Санкт-Петербургский государственный университет
аэрокосмического приборостроения

XXVI Международная научная конференция

ВОЛНОВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА И ИНФОКОММУНИКАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ

Сборник статей

Часть 1

29 мая – 2 июня 2023 г.

Санкт-Петербург

Санкт-Петербург, Россия

2023

УДК 621.38
ББК 32.85
В67

В67 Волновая электроника и инфокоммуникационные системы: XXVI Междунар. науч. конф. (СПб., 29 мая – 2 июня 2023 г.): сб. статей: в 3 ч. Ч. 1. СПб.: ГУАП, 2023. 223 с.
ISBN 978-5-8088-1841-5
ISBN 978-5-8088-1842-2 (Ч. 1)

Материалы XXVI Международной научной конференции отражают современное состояние волновой электроники и ее применение в информационных и телекоммуникационных системах.

Представляют интерес для широкого круга исследователей, преподавателей, аспирантов и специалистов в области акустооптики, акустоэлектроники.

УДК 621.38
ББК 32.85

ISBN 978-5-8088-1841-5
ISBN 978-5-8088-1842-2 (Ч. 1)

© Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, 2023

ОБРАБОТКА И ПЕРЕДАЧА ИНФОРМАЦИИ В ИНФОКОММУНИКАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ

УДК 621.396.67

Н. Е. Агарков*
инженер-конструктор, младший научный сотрудник
*АО «ОНИИП», Омский научный центр СО РАН
(Институт радиофизики и физической электроники)

СИСТЕМНЫЙ ПОДХОД В РАЗРАБОТКЕ ПРИЗЕМНЫХ ПЕРЕДАЮЩИХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИ МАЛЫХ АНТЕНН ДКМВ-ДИАПАЗОНА С СОГЛАСУЮЩИМИ УСТРОЙСТВАМИ

Представлены результаты теоретических и практических исследований частотных характеристик приземных передающих электрически малых антенн ДКМВ-диапазона и совместно применяющихся с ними согласующих устройств. Показано, что для данного класса антенн вопрос обеспечения наименьшей добротности для расширения полосы согласования должен сопрягаться с вопросом минимизации сопротивления потерь в подстилающей поверхности. Рассмотрен алгоритм проектирования данных антенн с согласующими устройствами, позволяющий провести одновременную оценку возможности реализации как конструкции антенны, необходимой для получения частотных характеристик системы, так и конструктивного исполнения согласующего устройства и его элементов.
***Ключевые слова*:** электрически малые антенны, приземные антенны, ДКМВ-диапазон, согласующие устройства.

N. E. Agarkov*
Design Engineer, Junior Researcher
*JSC «ONIIP», Omsk Scientific Center SB RAS
(Institute of Radiophysics and Physical Electronics)

A SYSTEMATIC APPROACH IN THE DEVELOPMENT OF GROUND-BASED TRANSMITTING ELECTRICALLY SMALL HF ANTENNAS WITH MATCHING DEVICES

The results of theoretical and practical studies of the frequency characteristics of ground-based transmitting electrically small antennas of the HF range and matching devices jointly used with them are presented. It is shown that for this class of antennas, the issue of ensuring the lowest Q-factor for the expansion of the matching band should be interfaced with the issue of minimizing the resistance of losses in the underlying surface. The algorithm of designing these antennas with matching devices, allowing assessment of the possibility of implementation as an antenna design necessary to obtain frequency characteristics the system, as well as the design of the matching device and its elements.
Keywords: electrically small antennas, ground-based antennas, HF band, matching devices.

Работа выполнена по государственному заданию Омского научного центра СО РАН (номер госрегистрации проекта 122011200349-3).

Введение

Радиосвязь в диапазоне декаметровых волн (ДКМВ) в настоящее время продолжает активно развиваться, о чем свидетельствует большое количество тематических публикаций [1]–[6]. Основные задачи, стоящие перед разра-

ботчиками новейших систем связи ДКМВ-диапазона – это дальнейшая миниатюризация оборудования систем связи с повышением его КПД, надежности, удобства в эксплуатации, расширением функционала и повышением скорости обмена информацией по радиоканалам. В части антенных систем традиционно возникает противоречие между уменьшением их габаритных размеров и сохранением или повышением их частотных характеристик. Широко применяющиеся на практике приземные передающие электрически малые антенны (ЭМА) штыревого типа носимых, а также крышевые электрические и магнитные антенны мобильных радиостанций с антенным согласующим устройством (АнСУ) не обеспечивают необходимое качество согласования с входным/выходным каскадом радиостанции при работе с широкополосными сигналами [3], [4], [6]–[12], которые все чаще применяются в радиолиниях. Более того расположение данных антенн вблизи почвы или искусственной подстилающей поверхности с конечной проводимостью σ (мСм/м) приводит к нежелательному расширению полосы согласования системы «ЭМА-АнСУ» (Δf, Гц) за счет уменьшения коэффициента усиления (КУ) антенн и системы. Дополнительное сопротивление потерь вносится как, собственно, элементами АнСУ, имеющими конечную добротность $Q_{СУ}$, так и компоновкой АнСУ (количеством элементов, ограничениями на габаритные размеры этих элементов, наличием около них близкорасположенных металлических экранов, паразитными параметрами топологии печатных плат АнСУ и т. д.). Компоновка АнСУ напрямую зависит и от импеданса применяемой ЭМА. В связи с этим достижение требуемых частотных характеристик антенной системы возможно только при ее разработке с использованием системного подхода, в рамках которого объединяются частотные характеристики ЭМА, АнСУ и конструктивные возможности построения системы. Без этой связи, без поиска оптимальных соотношений между двумя элементами системы с учетом неопределенности подстилающей поверхности, над которой будет располагаться разрабатываемая система в реальных условиях эксплуатации, антенная система будет иметь на практике заведомо ухудшенные частотные характеристики. На сегодняшний день существует нерешенная задача поиска оптимальных конструкций приземных передающих ЭМА ДКМВ-диапазона, обеспечивающих наименьшую добротность при сохранении эффективности в условиях расположения ЭМА над подстилающей поверхностью с потерями.

Алгоритм разработки системы по заданным начальным условиям

Схема алгоритма разработки системы по заданным начальным условиям представлена на рис. 1.

В блоке 1 вводится тип проектируемой ЭМА и ее габаритные размеры, после чего в блоке 2 происходит расчет сопротивления излучения ($R_{изл}$, Ом) для простейшей конструкции выбранного типа ЭМА с заданными габаритными размерами.

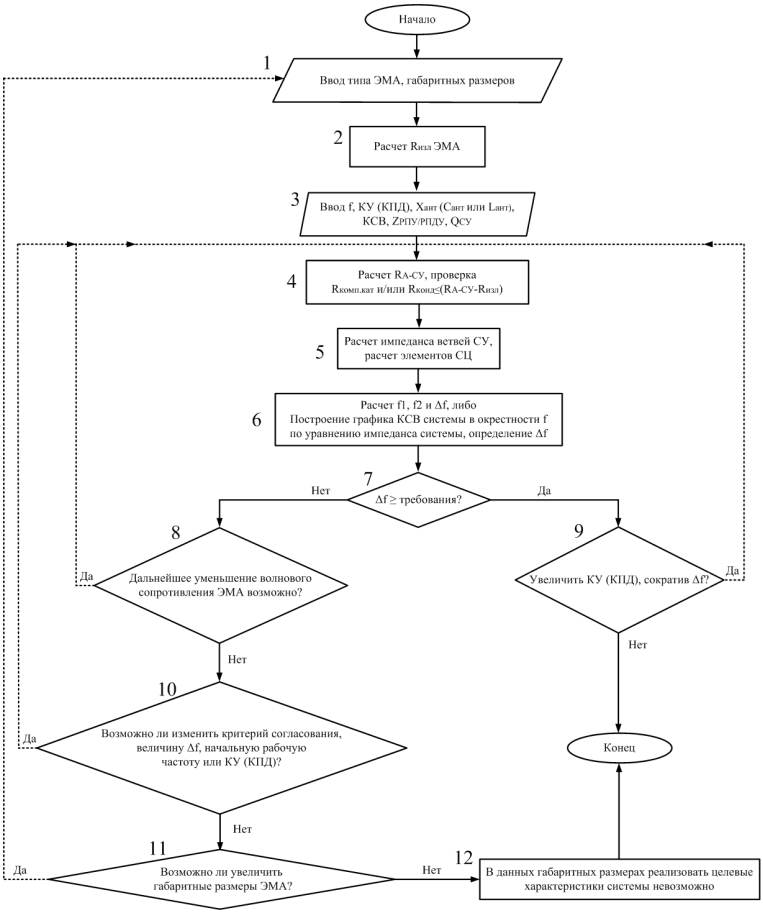


Рис. 1. Схема алгоритма проектирования ЭМА по заданным начальным условиям

Величина $R_{изл}$ может быть получена и путем электродинамического моделирования простейшей конструкции ЭМА в доступном пакете прикладных программ. Этим решается задача грубой оценки $R_{изл}$ разрабатываемой антенны в условиях, когда конструкция ЭМА, имеющая частотные характеристики, удовлетворяющие вводным данным, еще не определена. Найденное $R_{изл}$ используется в блоке 4 для расчета максимального значения активного сопротивления системы ($R_{A\text{-}СУ}$, Ом), удовлетворяющего задаваемой в блоке 3 эффективности системы. Величина $R_{A\text{-}СУ}$ есть сумма активного сопротивления антенны ($R_{ант}$, Ом) и активного сопротивления элементов АнСУ – катушки индуктивности ($R_{комп.\ кат}$, Ом) и конденсатора ($R_{конд}$, Ом).

В блоке 4 проводится и проверка условия ($R_{комп.\ кат}$ и/или $R_{конд}$) ≤ ($R_{А\text{-}СУ}$ – $R_{изл}$). Если оно не выполняется, обеспечить заданную эффективность системы при заданном Q невозможно ни при каких значениях импеданса ЭМА.

В блоке 3 обеспечивается ввод необходимых начальных условий (в том числе рабочей частоты (f, Гц), КСВ в полосе, выходного сопротивления радиостанции ($Z_{РПУ/РПДУ}$, Ом), емкости ($C_{ант}$, Ф) или индуктивности ($L_{ант}$, Гн) ЭМА, либо реактивного сопротивления ЭМА на частоте ($X_{ант}$, Ом)) для расчета элементов АнСУ в блоке 5. Расчет элементов АнСУ производится аналитическим методом, используя простые математические выражения для КСВ, уравнения импеданса цепи в комплексном виде и уравнение резонанса цепи. Вычисление Δf системы обеспечивается блоком 6, после чего значение Δf сравнивается с первоначально заданным требованием. Если полученное значение Δf больше изначально требуемого, то можно увеличить КУ (КПД) системы, использовав имеющийся запас в $R_{А\text{-}СУ}$, либо завершить алгоритм и, зная $R_{ант}$ и $X_{ант}$, перейти к моделированию антенны (блок 9). Если полученное значение Δf меньше требуемого, то в блоках 8, 10 и 11 возможно рассмотреть изменение начальных условий, либо завершить алгоритм с отрицательным результатом, поскольку в заданных габаритных размерах реализовать требуемые частотные характеристики системы невозможно.

Практическое применение алгоритма

На рис. 2 и 3 представлен пример расчета Δf системы на частоте 3 МГц со штыревой ЭМА длиной 1,5 м и АнСУ, использующем компенсирующую катушку индуктивности и широкополосный трансформатор сопротивления (ШПТ) при $R_{изл=}$0,08 Ом, КУ=–20 дБи, $Q_{СУ=}$300 для $L_{комп.\ кат}$, КСВ ≤ 2,5 и $Z_{РПУ/РПДУ=}$50 Ом. Расчеты производились для двух значений эквивалентной емкости ЭМА: $C_{ант1=}$15 пФ ($X_{ант1=}$–3540 Ом), $C_{ант2=}$45 пФ ($X_{ант2=}$–1180 Ом).

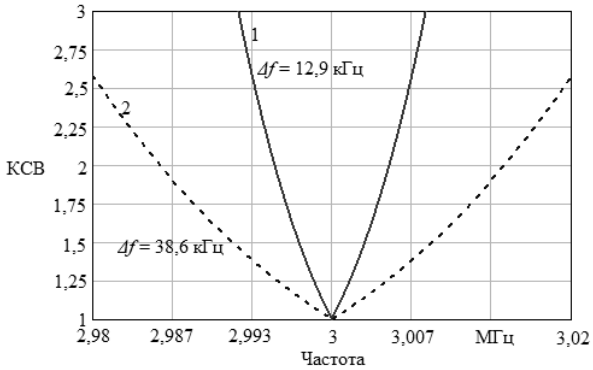


Рис. 2. График КСВ системы со при $C_{ант1=}$15 пФ (1) и при $C_{ант2=}$45 пФ (2)

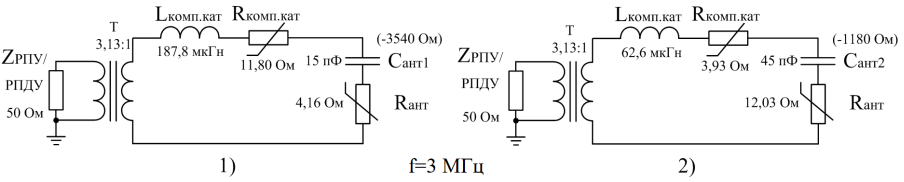


Рис. 3. Схемы системы со значениями элементов при $C_{ант1}$=15 пФ (1) и при $C_{ант2}$=45 пФ (2)

Приведенные на рис. 2 и 3 результаты расчета Δf системы и элементов схемы показывают, что для $C_{ант1}$=15 пФ и $Q_{СУ}$=300 $R_{ант}$=4,16 Ом. Для приземной штыревой ЭМА на данной частоте $R_{ант}$ очень мало [7]–[9] и, с большой долей вероятности, не может быть реализовано при размещении ЭМА над почвой. Более того, 73 % подводимой мощности к такой системе выделится на компенсирующей катушки индуктивности АнСУ. При уменьшении $Q_{СУ}$ до 200 система, обладающая $C_{ант1}$=15 пФ становится математически и физически нереализуемой при заданном КУ из-за превышения величины $R_{комп.\ кат}$ над общим $R_{А\text{-}СУ}$. Набор катушек суммарной индуктивностью в 187,8 мкГн для работы системы в режиме передачи мощности на практике будет иметь невысокую добротность (в пределах нескольких десятков), что дополнительно увеличит $R_{комп.\ кат}$ и снизит КУ (КПД) системы. В то же время в системе, обладающей $C_{ант2}$=45 пФ на $R_{ант}$ приходится 12,03 Ом, что при организации качественного противовеса вполне реализуемо, а требуемая компенсирующая индуктивность составляет всего 62,6 мкГн, которая легко может быть реализована на практике с добротностью порядка 200–300. Потери мощности в АнСУ для $C_{ант2}$, таким образом, составят не более 25 %. Конструктивно антенна с $C_{ант2}$=45 пФ должна иметь объемный конический излучатель, расширяющийся снизу вверх и большое количество противовесов [13], [14]. Максимальный угол раскрыва излучателя будет определяться значением $R_{изл}$ ЭМА простейшей конструкции, поскольку рост емкости ЭМА за счет сближения прямого и обратного проводника всегда сопровождается уменьшением сопротивления излучения. Начиная с определенного угла раскрыва рост $C_{ант}$ будет происходить медленнее, чем падает $R_{изл}$. Собственно, данный факт и ограничивает максимально достижимую Δf системы при заданном КУ (КПД) системы.

Заключение

Представлен алгоритм расчета Δf системы «ЭМА-АнСУ» на основе системного подхода, использующий ряд начальных условий. Взаимосвязь КУ системы с ее Δf обеспечивается введением обобщающего параметра $R_{А\text{-}СУ}$. Величина $R_{А\text{-}СУ}$ является максимально допустимым сопротивлением системы, при котором еще обеспечивается заданный КУ системы. По ходу выполнения алгоритма расчета Δf величина $R_{А\text{-}СУ}$ разбивается на составляющие – $R_{ант}$ и $R_{комп.\ кат}$ и/или $R_{конд}$. Следовательно, при необходимости сохранения $R_{А\text{-}СУ}$ для обеспечения заданной эффективности системы, происходит распределение этой величи-

ны между $R_{ант}$ и $R_{комп.\ кат}$ и/или $R_{конд}$. Это может привести к ситуации, когда величина $R_{ант}$ станет настолько малой, что ее достижение в заданных габаритных размерах приземной ЭМА при сохранении $R_{изл}$ станет невозможно ни при какой конструкции ЭМА, хотя с математической точки зрения система останется реализуемой. Величина $X_{ант}$ определяет достижимую Δf при использовании определенного типа АнСУ. Необходимо отметить, что существуют такие комбинации $R_{ант}$ и $X_{ант}$, при которых сопротивление потерь в АнСУ оказывается больше $R_{А\text{-}СУ}$ и реализация системы с заданным КУ становится невозможна и математически. В источниках [8], [10]–[12] данный аспект описывается как фундаментальное ограничение на достижимую эффективность ЭМА при ее согласовании. Таким образом, использование системного подхода при проектировании приземных передающих ЭМА ДКМВ-диапазона позволяет учесть все факторы, снижающие на практике КУ (КПД) ЭМА и системы.

Список источников

1. *Головин О. В., Простов С. П.* Системы и устройства коротковолновой радиосвязи. М.: Горячая линия – Телеком, 2006. С. 3–29.

2. *Johnson E.* Staring link establishment for high-frequency radio // 2015 IEEE Military Communications Conference. 2015. P.1433–1438.

3. *Johnson E.* Wideband ALE – the next generation of HF // Nordic HF Radio Conference HF ‘16, Fårö, Sweden. Aug. 2016. P. 9.1.1–9.1.18.

4. *Пукса Д. О., Романов Ю. В.* Результаты трассовых испытаний адаптивной КВ-радиолинии высокоскоростной передачи данных файлового типа на базе радиомодема с полосой сигнала до 40 кГц // Техника радиосвязи. 2015. № 4 (27). С. 14–20.

5. Специальные радиосистемы: официальный сайт. URL: https://www.radioscanner.ru/files/systems/file20434/ (дата обращения: 02.03.2023).

6. *Волкомирская Л. Б., Гулевич О. А., Крашенинников И. В.* Результаты экспериментов в средних широтах с использованием широкополосных коротковолновых сигналов для связи и диагностики структуры ионосферы // Инженерный вестник Дона. 2019. № 1 (52). С. 1–11.

7. *Гвоздев И. Н., Муравьев Ю. К., Серков В. П.* Характеристики антенн радиосистем связи. Л.: ВАС, 1978. 231 с.

8. *Hansen R., Collin R.* Small Antenna Handbook. John Wiley and Sons, 2011. 360 p.

9. *Nikkhah N., Zakeri B., Abedi H.* Extremely electrically small MF/HF antenna // IET Microw. Antennas Propag. Jan. 2020. Vol. 14. Issue 1. P.88–92.

10. *Fujimoto K., Morishita H.* Modern Small Antennas. Cambridge University Press, 2013. 488 p.

11. *Беличенко В. П.* Электрически малые антенны: хронология, решенные задачи, новые проблемы и идеи // Актуальные проблемы радиофизики: сб. трудов IX Междунар. научно-практ. конф. (АПР–2021). 20–22 октября 2021 г. С. 56–61.

12. *Слюсар В.* 60 лет теории электрически малых антенн. Некоторые итоги // Электроника: наука, технология, бизнес. 2006. № 7 (73). С. 10–19.

13. *Агарков Н. Е.* Пределы повышения эффективности приземных электрически малых антенн КВ-диапазона в системе «Антенна – согласующее устройство» с общими потерями // Радиолокация, навигация, связь: сб. трудов XXVIII Междунар. научно-техн. конф. (RLNC*2022). 2022. Т. 5. С. 219–233.

14. *Агарков Н. Е.* Проектирование передающих малогабаритных штыревых антенн КВ-диапазона в системе «антенна – согласующее устройство» // Техника радиосвязи. 2022. Вып. 1 (52). С. 30–43.

УДК 004.056, 004.91

С. В. Беззатеев*
доктор технических наук, доцент
Т. Н. Елина*
кандидат экономических наук, доцент
А. В. Дубинина*
аспирант
*Санкт-Петербургский государственный университет
аэрокосмического приборостроения

РЕАЛИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИИ СМАРТ-КОНТРАКТОВ В СИСТЕМЕ ЭЛЕКТРОННОГО ДОКУМЕНТООБОРОТА

Разработана модель защищенной системы электронного документооборота, которая поддерживает систему смарт-контрактов и позволяет подписывать документ пороговой кольцевой подписью для его утверждения участниками процесса. Спроектирована информационная система, реализующая разработанные алгоритмы.
***Ключевые слова*:** система электронного документооборота, криптографические методы защиты информации, смарт-контракты, информационная система.

S. V. Bezzateev*
Dr. Sc. Tech., Associate Professor
T. N. Yelina*
PhD Sc. Tech., Associate Professor
A. V. Dubinina*
PhD Student
*St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

IMPLEMENTATION OF SMART CONTRACTS TECHNOLOGY IN THE ELECTRONIC DOCUMENT MANAGEMENT SYSTEM

A model of a secure electronic document management system has been developed that supports a system of smart contracts and allows you to sign a document with a threshold ring signature for its approval by process participants. An information system was designed that implements the developed algorithms.
Keywords: electronic document management system, cryptographic methods of information protection, smart contracts, information system.

С развитием информационных технологий в области управления документами появилось множество систем электронного документооборота (СЭД). На сегодняшний день на рынке представлено множество систем электронного документооборота. Некоторые из них включают в себя возможность работы с мобильного устройства. Системы электронного документооборота позволяют контролировать сделки, но этот контроль несовершенен, потому что доверие к этому контролю не может быть выше, чем доверие к СЭД и его пользователям. Альтернативой может послужить реализация данного контроля на основе технологий смарт-контрактов в блокчейне.

С увеличением количества людей, подписавших один и тот же документ электронной подписью, возникает проблема проверки данной подписи, так как для этого необходимо иметь сертификаты подписей всех подписантов. Эта проблема актуальна, например, во время утверждения документа. Для решения предлагается использование пороговой кольцевой подписи с возможностью установления некоторых ролей, например, диктатор. Диктатор – это лицо, которое единолично может утвердить документ. Для утверждения документа не важно, кто именно подписал, важно количество для преодоления порога. Если набирается необходимый порог, то из полученных частей секрета собирается сам секрет (в случае утверждения документа диктатором используется его секретный ключ), который в дальнейшем используется в алгоритме кольцевой подписи. Кольцевая подпись позволяет добавить различные ролевые модели в схему подписи, при этом сохраняя иханонимность.

В данной работе рассмотрена разработка защищенной системы электронного документооборота, которая поддерживает интеграцию с системой смарт-контрактов и позволяет подписывать документ пороговой кольцевой подписью в качестве его утверждения. Она будет гарантировать порог необходимых подписантов, и эта гарантия прописывается внутри криптографического алгоритма. Пользователи системы смогут ее использовать для утверждения документов, то есть документ будет считаться утвержденным, если заданный порог пользователей выдал свою часть секрета, либо диктатор выдал свой секретный ключ, и в результате чего сформировалась пороговая кольцевая подпись.

Архитектура предлагаемой информационной системы представлена на рис. 1. Все бизнес-правила реализуются на стороне сервера приложений, использующего Hibernate и Spring. Исходя из требований системы к хранению данных, были выбраны две СУБД – PostgreSQL и MongoDB.

На рис. 2 приведены блок-схемы для реализации голосования в системе электронного документооборота с применением пороговой кольцевой подписи. При подготовке ответственное лицо должно создать заявку наголосование в системе. Для этого выбирается группа пользователей, которая участвует в голосовании, задается порог и время, отводимое на проведение голосования. Система, после настройки конфигурации заявки, формирует секрет, который разделяется между участниками по схеме Шамира [1]. Также ответственное лицо может выбрать пользователя в роли диктатора. Системасгенерирует для диктатора свою пару открытый и закрытый ключи для схемы Эль – Гамаля [2]. Роль диктатора заключается в том, что если он решает подписать (утвердить) документ, то согласие других участников не требуется.

Во время голосования пользователь в системе может проголосовать либо «за», либо «против». В случае первого варианта пользователь предоставляет системе свою долю секрета. Система, получив от пользователя долю секрета, смотрит, сколько уже долей получено. Если количество долей равняется порогу (k), то начинается процесс восстановления секрета по алгоритму Шамира. Если количество долей не равняется порогу и время на голосование истекло, то документ считается неутвержденным. Если диктатор утверждает документ и

предоставляет свой секретный ключ, то начинается процесс подписания документа.

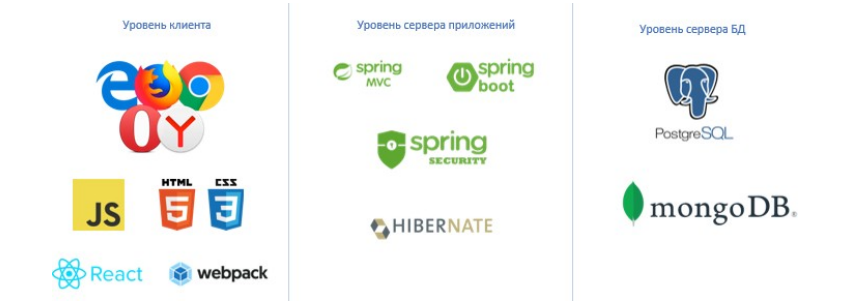


Рис. 1. Архитектура информационной системы

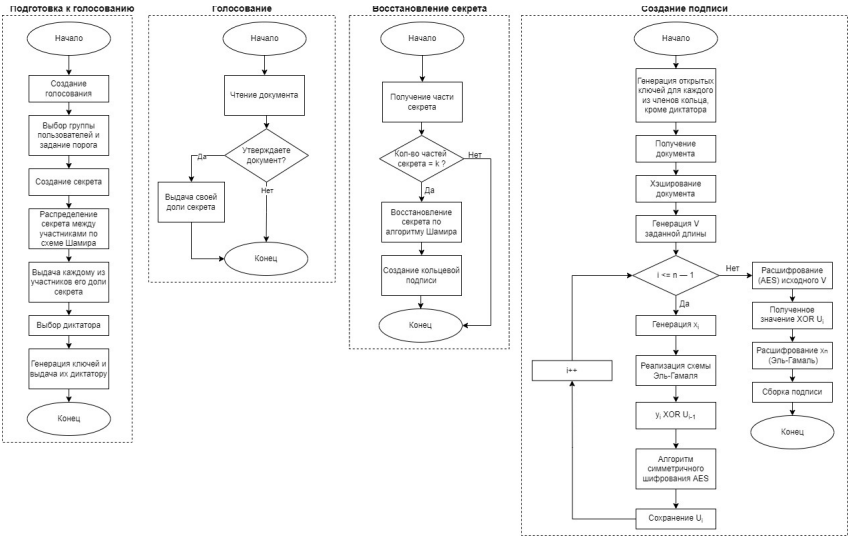


Рис. 2. Блок-схемы для реализации функционала утверждения документа

Восстановив секрет, система начнет алгоритм создания подписи, используя для этого алгоритм кольцевой подписи (при этом *n* увеличивается на 1) [3]. Сначала система для каждого участника голосования (члена кольца), кроме диктатора, формирует открытый ключ по схеме создания ключей для алгоритма Эль – Гамаля. Для диктатора ключ не формируется, так как во время подготовки к голосованию он уже сформирован. Получив документ, система вычисляет для него значение хэш-функции с помощью алгоритма, описанного в ГОСТ 34.11-2018 [4]. В результате собирается кольцевая подпись для документа, кото-

рая состоит из подписываемого документа, списка всех открытых ключей участников кольца.

Пример работы описанного алгоритма приведет на рис. 3.

```
Введите сообщение:vsem privet
Подписать?(yes, если да):yes
[[8829327874865571327365877881024068861453693934789622828685578031933189893465379792923508612626888094746143718132662768429392114945346616644520814241500 2
 17862225079799785131807864023065728746559635723187817646737271456267671614208435159804040260623178668979747978335131632333959137838721886762076122623883464,
  15972317220825295669837085639317821586397861685545529408987734987106807762264258623898137973494578402387388708159978947687984268710547794544440696018674 0
 4667685354929852362296068743627985957685927801212412327477825633832829288381528357787995319863927011716608989457794188516122251567553105349489163727798719,
  12744556772811287632145085895276321068828443868089508675572564729462939965432274205346414084099277569335118688835812964147765598363854440968762246695384 72
 9398911458641863831692447725287813862077838556252288313572601613537159927415853668883712788291191656314568491355159089246708879446937888428779271058953319 97
 , 65537],
 [25993664713780419352183880199816363478877725513933611430142976451428098319844153761898541231583171285842115735559856436647333635343123588773684001259833 8
 5633457240286307285989326870739898869193869997681984274927889484721315926652358287191824833135182389187428759558988725382657536155485132810771792466613,
  43121407608321383241688146211604484168778669328311956883783882982233529865377238953658482152835513643446314529499143764636487805457263721158476248524848 8
 6410272014979393438473551423851358491975228980897896858689128274665994594383288865598282179588812681930331745438877979015545756686393911788996173184821275,
  11888654768211831189842997884357283884623816968770837267433430398715280323482933438975385129188614968665212471566866931145428582948981084178797367341219 68
 4347667878865842985356289937139266995842658967736849862948593134435588445851872279897713339613776892743154223158097853542785464732140083454087628815853418 89
 , 65537],
 [4021732378338638993847264302820768295564928356836334774989556744637693017896573768832286713188668486522447591531283588885529968212243239934285434441112714
 5737545488901865262256887473697276250818284928285728436436554881417255888627385362198266815429253168967487698016125616388224828562283958986335854447108024,
 2781763462967342178683574511052998898434618028362248824159287262685341642875103014993515298695795813538675238146131981772259331644879315711663436271287858 6
 481355565411727374703826273309812081610872494066254194510928126899699832288223921389898960842449835234765408852911368218846938262753882277973933388896874,
 9152119385589749423085153885522512789229223494014126835397313367647698323381894358778038299675882794164347441016531129582722122623443443383789808517877855 76
 9241887193432831501438638269472988692855454975112038224571868333729415745571437677226883452768286949289899599862234668208896593232467172815523180638329 99,
 65537], b'vsem privet']
```

Рис. 3. Реализация пороговой кольцевой подписи

Программное приложение, реализующее предложенные алгоритмы, разработано на RESTApi. Вся серверная часть написана на языке программирования Java с использованием Hibernate и Spring. С помощью данных фреймворков реализованы контроллеры, которые связывают клиентскую часть и базы данных.

При создании нового контракта пользователь должен заполнить шаблон договора поставки товара. Когда файл уже сформирован, он отправляется на проверку контрагенту, который может подписать документ. В этом случае ему нужно выбрать доступный сертификат электронной подписи и ввести пароль (рис. 4).

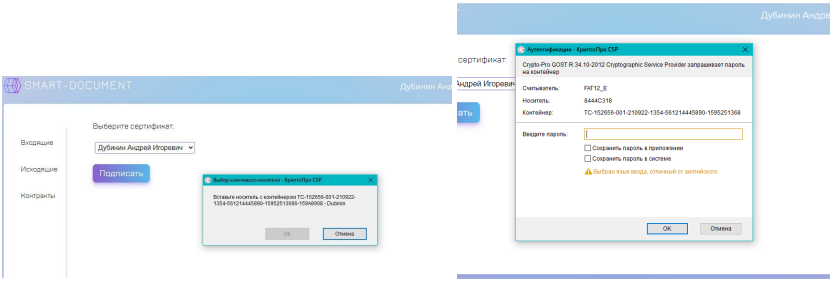


Рис. 4. Программная реализация подписания документа

На рис. 5 представлен пример реализованной сделки со стороны поставщика.

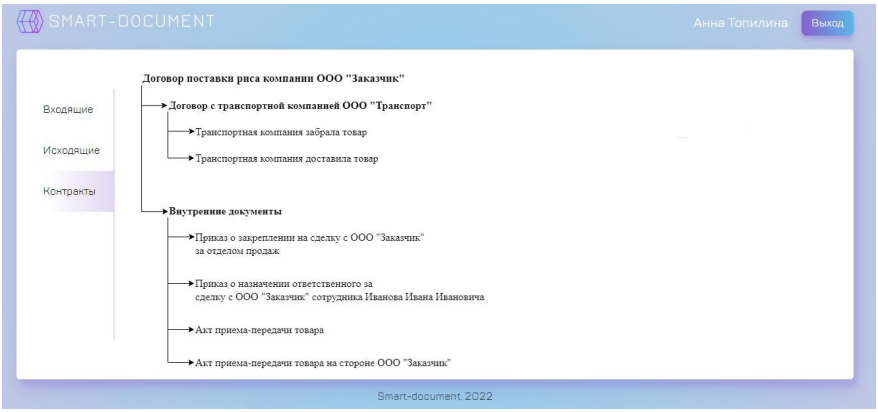


Рис. 5. Реализованная сделка со стороны поставщика

В данной работе предложена реализация функционала пороговой кольцевой подписи с диктатором, который может быть применен в системе электронного документооборота для утверждения документов. При этом будет сохраняться анонимность голосовавших и самого диктатора.

Список источников

1. *Шпиц С., Тимофеев А., Урбанович Ю.* Non-admissible tracks in Shamirs scheme // Finite Fields and their Applications. 2011. N 17. P. 329–342.

2. *Фуксбауэр Г., Плувье А., Серин И.* Blind Schnorr Signatures and Signed ElGamal Encryption in the Algebraic Group Model // Lecturer Notes in Computer Science. 2020. С. 63–95.

3. *Цинь З., Сюн Х., Чжу Г.* Ad hoc anonymous signatures: State of the art, challenges and new directions. Nova Science Publishers, 2013.162 p.

4. ГОСТ 34.11-2018. Информационная технология. Криптографическая защита информации. Функция хэширования. URL: https://docs.cntd.ru/document/1200161707 (дата обращения: 20.05.2022).

УДК 621.391

В. С. Белявский*
студент
А. В. Борисовская*
ассистент
*Санкт-Петербургский государственный университет
аэрокосмического приборостроения

ОБЗОР МЕТОДОВ ОЦЕНКИ СРЕДНЕГО ВОЗРАСТА ИНФОРМАЦИИ В СИСТЕМАХ МАССОВОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ

Рассмотрены системы массового обслуживания M|D|1 и M|M|1. Проведен обзор работ, в которых исследуются методы оценки среднего возраста информации для таких систем. С помощью имитационного моделирования получены зависимости среднего возраста информации от интенсивности входного потока для этих систем с прямым и обратным порядком обслуживания. Приведено сравнение среднего возраста информации со средней задержкой. Дано пояснение полученных результатов на качественном уровне.
Ключевые слова: система массового обслуживания, средний возраст информации, имитационное моделирование.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, соглашение № FSRF-2023-0003 «Фундаментальные основы построения помехозащищенных систем космической и спутниковой связи, относительной навигации, технического зрения и аэрокосмического мониторинга».

V. S. Belyavskiy*
Student
A. V. Borisovskaya*
Assistent
*St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

A REVIEW OF METHODS FOR ESTIMATING THE AVERAGE AGE OF INFORMATION IN QUEUING SYSTEMS

In this paper, the M|D|1 and M|M|1 queuing systems are considered. The review of works in which methods of estimation of average age of information for such systems are investigated is carried out. With the help of simulation modeling, the dependences of the average age of information on the intensity of the input flow for these systems with forward and reverse order of service are obtained. The comparison of the average age of information with the average delay is given. An explanation of the results obtained at the qualitative level is given.
Keywords: Queuing system, average age of information, simulation modeling.

Введение

В представленной статье рассмотрена одна из метрик производительности системы передачи данных, называемая средним возрастом информации. Она отражает актуальность информации в системе. Исследования данной метрики появились сравнительно недавно. В [1]–[4] описаны методы оценки среднего возраста информации в различных системах массового об-

служивания (СМО), в том числе в системах M|D|1 и M|M|1. Приведены результаты оценки этой метрики путем имитационного моделирования и теоретического расчета. В [5], [6] рассматриваются СМО с обратным порядком обслуживания и оценивается средний возраст информации в таких системах. В настоящее время отсутствуют работы на русском языке с исследованиями этой метрики, а в англоязычных работах не описано влияние порядка обслуживания на средний возраст информации. В данной работе дается подробный анализ зависимости среднего возраста информации от порядка обслуживания заявок.

Системы M|D|1 и M|M|1

Рассмотрим две простейшие СМО M|D|1 и M|M|1, которые описаны в книге [6]. M|D|1 – система с постоянным временем обслуживания, а M|M|1 – система со случайным временем обслуживания. В обеих системах используется пуассоновский входной поток. В СМО интенсивность появления заявок принято обозначать – λ, интенсивность обслуживания – μ, а коэффициент загрузки системы – $\rho=\lambda / \mu$. Доказано, что СМО стабильна при $\lambda < \mu$ [6], и не стабильна в противном случае.

Основным показателем качества работы СМО является средняя задержка. Средняя задержка d – среднее время пребывания одной заявки в системе. Заявка находится в системе с момента ее поступления в систему и до выхода ее из системы. Для систем M|D|1 и M|M|1 эта характеристика исследуется давно и вычисляется по следующим формулам [6]:

$$d_{M|D|1} = \frac{\rho}{2(1-\rho)} + 1 \tag{1}$$

$$d_{M|M|1} = \frac{\rho}{1-\rho} + \frac{1}{\mu} \tag{2}$$

Средний возраст информации в СМО

Концепция возраста информации (Age of Information [AoI]) для СМО была введена в 2012 году [1] для количественной оценки актуальности имеющихся сведений о состоянии удаленной системы. Под возрастом информации понимают некоторую функцию от времени, которая убывает в моменты обновления информации в системе и возрастает в остальные моменты времени.

Средний возраст информации для интервала (0, τ) определяется с помощью интеграла вида [1]:

$$\Delta_\tau = \frac{1}{\tau}\int_0^\tau \Delta(t)\,dt$$

Оценить средний возраст информации можно подсчитав площадь под функцией Δ_τ:

$$\Delta_\tau = \frac{\sum_{i=1}^{n} s_i + s_n}{\tau},$$

где τ – период рассмотрения системы, s_n – площадь треугольника, s_i – площадь *i-й* трапеции. На рис. 1 представлен пример для n=6.

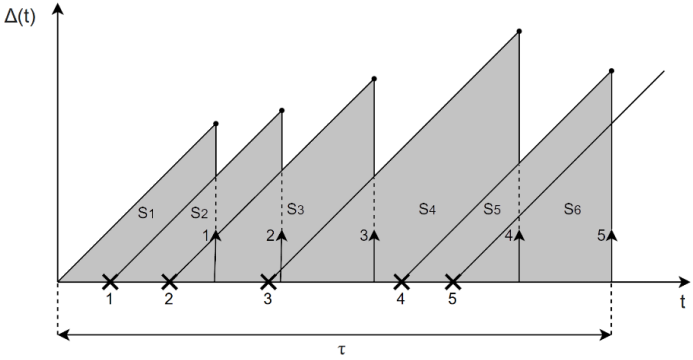


Рис. 1. Пример оценки среднего возраста информации

В [5] приведены теоретические формулы для оценки среднего возраста информации в системах M|D|1 и M|M|1:

$$\Delta_{M|D|1} = \frac{1}{\mu}\left(\frac{1}{2(1-\rho)} + \frac{1}{2} + \frac{(1-\rho)e^{\rho}}{\rho}\right) \quad (3)$$

$$\Delta_{M|M|1} = \frac{1}{\mu}\left(1 + \frac{1}{\rho} + \frac{\rho^2}{1-\rho}\right). \quad (4)$$

Результаты моделирования

Рассмотрим два порядка обслуживания: прямой FCFS (First Come First Served) и обратный LCFS (Last Come First Served). В отличие от прямого порядка обслуживания, при обратном порядке обслуживания в оценке среднего возраста информации учитываются не все заявки, а только те, которые были обслужены не позднее появившихся после них заявок. С помощью имитационного моделирования были получены зависимости средней задержки и среднего возраста информации от интенсивности входного потока в системах M|D|1 и M|M|1 с разным порядком обслуживания. Данные зависимости построены при μ=1 и представлены на рис. 2 и 3. В литературе отсутствует теоретическое значение для среднего возраста информации в системе с постоянным временем обслуживания и обратным порядком обслуживания, поэтому на рис. 3 приведены только результаты имитационного моделирования как для M|D|1, так и для M|M|1.

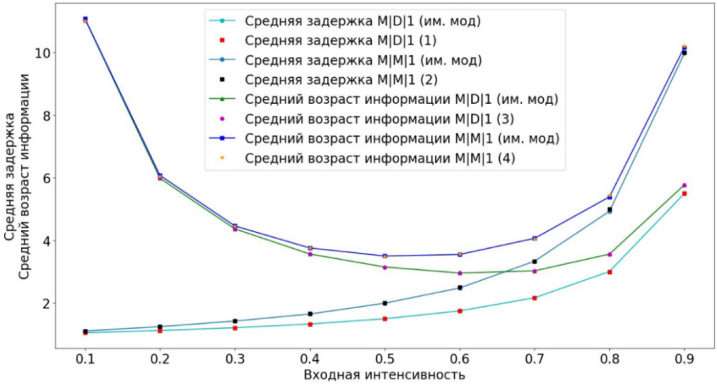


Рис. 2. Средняя задержка и средний возраст информации в M|D|1 и M|M|1 (прямой порядок обслуживания)

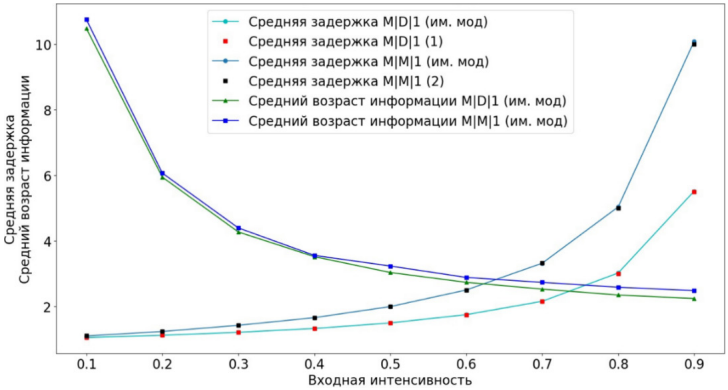


Рис. 3. Средняя задержка и средний возраст информации в M|D|1 и M|M|1 (обратный порядок обслуживания)

Вначале средний возраст информации при любом порядке обслуживания высок ввиду низкой интенсивности входного потока, из-за чего информация в системе обновляется редко. С увеличением интенсивности, независимо от порядка обслуживания, он начинает убывать, так как информация начинает обновляться чаще. При прямом порядке обслуживания средний возраст информации снова возрастает при высоких интенсивностях, так как возрастает время ожидания обслуживания заявки с актуальной информацией. При обратном порядке обслуживания заявок он продолжает убывать при высоких значениях интенсивности. Так происходит потому, что чем выше входная интенсивность, тем больше заявок не учитывается при оценке среднего возраста информации, так как нарушается очередь их обслуживания. Стоит отметить, что при прямом

порядке обслуживания средний возраст информации имеет заметные отличия в системах M|D|1 и M|M|1, а при обратном порядке обслуживания в этих системах – он практически не отличается. Средняя задержка ведет себя одинаково при любом порядке обслуживания ввиду того, что порядок обслуживания заявки никак не влияет на интенсивность обслуживания заявок. Таким образом, полученные зависимости иллюстрируют, что порядок обслуживания не влияет на среднюю задержку, но влияет на средний возраст информации.

Заключение

В данной работе выполнен обзор работ, в которых исследуется средний возраст информации для различных СМО. Проведен анализ зависимости средней задержки и среднего возраста информации от порядка обслуживания заявок. Полученные результаты показали, что порядок обслуживания влияет на средний возраст информации, что противоположно известному факту о средней задержке. Анализ поведения среднего возраста информации в простейших СМО позволит исследовать этот показатель в других системах передачи данных, например, в системах случайного множественного доступа.

Список источников

1. *Kaul S., Yates R., Gruteser M.* Real-time status: How often should one update? // Proceedings IEEE INFOCOM, 2012. P. 2731–2735.

2. *Kosta A., Pappas N., Angelakis V.* Age of information: A new concept, metric, and tool // Foundations and Trends® in Networking. 2017. Vol. 12. N 3. P. 162–259.

3. Age of information: An introduction and survey / R. Yates, Y. Sun, D. Brown et al. // IEEE Journal on Selected Areas in Communications. 2021. Vol. 39. N 5. P. 1183–1210.

4. A general formula for the stationary distribution of the age of information and its application to single-server queues / Y. Inoue, H. Masuyama, T. Takine, T. Tanaka // IEEE Transactions on Information Theory. 2019. Vol. 65. N 12. P. 8305–8324.

5. *Kaul S., Yates R., Gruteser M.* Status updates through queues // 2012 46th Annual conference on information sciences and systems (CISS). 2012. P. 1–6.

6. *Клейнрок Л.* Теория массового обслуживания. М.: Машиностроение, 1979. 432 с.

УДК 004.75

В. А. Богатырев*
доктор технических наук, профессор
С. В. Богатырев*
аспирант
В. В. Сивов**
аспирант
*Санкт-Петербургский государственный университет
аэрокосмического приборостроения
**Университет ИТМО

МОДЕЛЬ ДОСТУПНОСТИ КЛАСТЕРА ПРИ АКТУАЛИЗАЦИИ ИНФОРМАЦИИ ПОСЛЕ ВОССТАНОВЛЕНИЯ УЗЛОВ

Предложена модель оценки доступности отказоустойчивого кластера при ограничении допустимого времени обслуживания запросов. Восстановление узлов кластера после отказов включает замену вычислительного узла целиком при предварительном занесении в него результатов последнего резервного копирования. Актуализация информации, накопленной после резервного копирования, проводится при репликации этой информации с работоспособных узлов кластера.
***Ключевые слова*:** доступность, надежность, кластер, репликация, марковская модель, отказоустойчивость, резервное копирование, восстановление, отказы.

V. A. Bogatyrev*
Dr. Sc. Tech., Professor
S. V. Bogatyrev*
PhD Student
V. V. Sivov**
PhD Student
*St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation
**ITMO University

CLUSTER AVAILABILITY MODEL WHEN UPDATING INFORMATION AFTER NODE RECOVERY

A model for assessing the availability of a fault-tolerant cluster with a limitation of the allowable time for servicing requests is proposed. Restoring cluster nodes after failures involves replacing the entire computing node, with the results of the last backup previously entered into it. Updating of the information accumulated after backup is carried out when this information is replicated from healthy cluster nodes.
Keywords: availability, reliability, cluster, replication, markov model, fault tolerance, backup, recovery, failures.

Введение

Повышение надежности отказоустойчивости и доступности систем обработки данных в инфокоммуникационных системах, при снижении задержек передач и обслуживания запросов в вычислительных системах, консолидируемых

в кластеры в настоящее время актуально [1]–[3]. Важность исследований в указанных направлениях обусловлено широким внедрением киберфизических систем, интегрирующих технологии искусственного интеллекта, обработки больших, облачных вычислений. Вопросы надежности, безопасности и своевременности выполнения функциональных задач во многом определяют эффективность широко внедряемых в настоящее время технологий Интернет вещей (IoT), Индустрии 4.0 [3]–[7].

Обеспечение надежности и своевременности выполнения функциональных запросов в инфокоммуникационных системах реализуется как на уровне сети, так и систем хранения и обработки данных.

Обеспечение надежности и своевременности выполнения требуемых запросов (задач) в кластерных системах зависит от организации обслуживания потока запросов и от дисциплин восстановления их функционирования после отказов [8]–[10].

Обеспечению требуемой надежности с выдачей результатов за ограниченное время связано с обоснованием дисциплин восстановления после отказов, с организацией миграции, репликации и резервного копирования данных, проводимых с учетом требований по непрерывности вычислительных процессов и сохранения накопленных при функционировании системы данных, потеря которых в ряде случаев может быть трудно восполняемой. Существующие модели кластерных систем в недостаточной мере учитывают указанные особенности рассматриваемых кластерных систем, а также не учитывают возможные модификации дисциплин их восстановления [8]–[10].

Цель данной статьи оценка надежности кластера и его готовности к своевременному обслуживанию запросов критичных к времени ожидания. Модель должна отражать дисциплину поэтапного восстановления узлов кластера целиком после их отказов, приводящих к невозможности выполнения в узле функциональных задач. Предлагаемое поэтапное восстановление включает этапы: предварительной подготовки узла с занесение в его память результатов предыдущего резервного копирования (этот этап реализуется до отказа узла), подключения узла, содержащего результаты резервного копирования, взамен отказавшего, репликации данных, накопленных после резервного копирования, в восстанавливаемый узел из одного из работоспособных узлов. Для обоснования предлагаемой дисциплины восстановления строится марковская модель кластера и определяется его готовность к своевременному выполнению требуемых запросов.

Марковская модель надежности кластера с оценкой вероятностей своевременного выполнения запросов для различных состояний

Марковская модель кластера с реализацией рассмотренной дисциплины восстановления представлена на рис. 1.

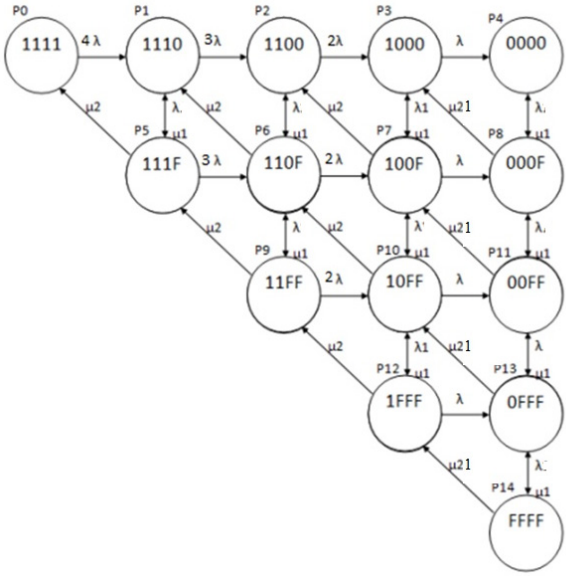


Рис. 1. Марковская модель кластера

На рисунке обозначены интенсивности: отказов узла кластера λ, восстановления узла с занесением результатов предыдущего резервного копирования μ_1, репликации актуальных данных, сформированных после резервного копирования μ_2, и восстановления потерянных актуальных данных μ_{21}

На рисунке при задании состояний кластера *i*-я позиция в коде соответствует состоянию *i*-го узла. Через «1» и «0» обозначены состояния работоспособности и отказа узла. Через «F» обозначено состояние репликации в память узла актуальных данных, сформированных после резервного копирования.

При работоспособности *i* узлов кластера, если все они могут быть использованы для обслуживания потока запросов, вероятность выполнение запроса в кластере за время, не превосходящее t_0 обозначим B_i. При равномерном распределении трафика, поступающего с интенсивностью Λ вероятность B_i вычислим как

$$B_i = \left[1 - \frac{\Lambda}{i} v \exp(-t_0(v^{-1} - \frac{\Lambda}{i})\right],$$

где v – среднее время обслуживания запросов.

Вероятность готовности кластера к своевременному выполнению запросов с учетом использования части работоспособных узлов для репликации актуальных данных определим как

$$R = B_4 P_0 + B_3 P_1 + B_2(P_2 + P_5) + B_1(P_3 + P_6).$$

Результаты оценки вероятность готовности кластера к своевременному выполнению запросов от интенсивности трафика представлены на рис. 2, на котором кривые 1, 2, 3, 4 соответствуют t_0=0,01, 0,02, 003, 004 с. Расчет выполнен при v=0.01 *с*, $\lambda=10^{-4}$ ч$^{-1}$ μ_1=1 ч$^{-1}$ μ_2=0,2 ч$^{-1}$ μ_{21}=0,08 ч$^{-1}$

Из графиков видно существенность влияния интенсивности трафика на вероятность своевременного выполнения запросов.

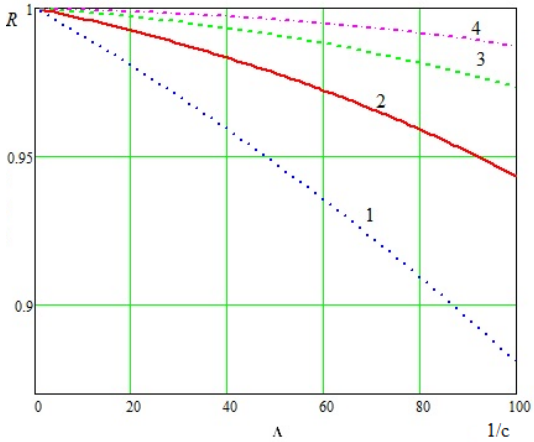


Рис. 2. Вероятность готовности кластера к своевременному выполнению запросов

Заключение

Рассмотрена марковская модель надежности и его готовности к своевременному выполнению запросов. Предложена дисциплина поэтапного восстановления узлов кластера после их отказов, приводящих к невозможности выполнения в узле функциональных задач. Предлагаемое поэтапное восстановление включает этапы на которых происходит: предварительная подготовка резервного узла с занесение в его память результатов предыдущего резервного копирования (этот этап реализуется до отказа узла), подключение узла, содержащего результаты резервного копирования, взамен отказавшего, репликация данных, накопленных после резервного копирования в работоспособных узлах кластера.

Список источников

1. *Yoo H., Park R., Chung K.* IOT-based health big-data process technologies: a survey KSII Transactions on Internet and Information Systems. 2021. Vol. 15. N 3. P. 974–992.

2. *Rathee G., Khelifi A., Iqbal R.* Artificial intelligence- (ai-) enabled internet of things (IOT) for secure big data processing in multihoming networks. Wireless Communications and Mobile Computing. 2021. P. 5754322.

3. *Korobeynikov A., Shukalov A., Zharinov I.* Cyber-physical and human control of technological process and equipment sensitive to failures. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. Krasnoyarsk Science and Technology City Hall of the Russian Union of Scientific and Engineering. Krasnoyarsk, 2021. P. 42081.

4. *Burkov A., Rachugin R., Turlikov A.* Information and Control Systems. 2022. N 5 (120). P.49–59.

5. *Татарникова Т. М., Бимбетов Ф.* Модель мониторинга расхода трафика устройством Интернета вещей // Материалы конференции «Информационные технологии в управлении» (ИТУ-2022). 15-я мультиконференция по проблемам управления. СПб., 2022. С. 263–266.

6. *Tatarnikova T., Sverlikov A.* Methodology for detecting anamalies in the traffic of the internet of things Wave Electronics and Its Application in Information and Telecommunication Systems. 2022. Vol. 5. N 1. P. 476–479.

7. *Верзун Н. А., Колбанев М. О., Романова А. А.* Показатели эффективности процесса информационного взаимодействия в сети Интернета вещей Известия СПбГЭТУ ЛЭТИ. 2022. № 3. С. 5–14.

8. *Богатырев В. А.* Оценка надежности и оптимальное резервирование кластерных компьютерных систем. Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2006. № 10. С. 18–21.

9. *Богатырев В. А.* Комбинаторно-вероятностная оценка надежности и отказоустойчивости кластерных систем // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2006. № 6. С. 21–26.

10. *Bogatyrev V., Derkach A., Bogatyrev S.* Timeliness of the reserved maintenance by duplicated computers of heterogeneous delay-critical stream // CEUR Workshop Proceedings. ISTMC 2019 – Selected Papers of the 4th All-Russian Scientific and Practical Conference with International Participation «Information Systems and Technologies in Modeling and Control». 2019. P. 26–36.

УДК 004.75

В. А. Богатырев*
доктор технических наук, профессор
А. Т. Ле**
аспирант
Е. А. Абрамова**
аспирант
*Санкт-Петербургский государственный университет
аэрокосмического приборостроения
**Университет ИТМО

НАДЕЖНОСТЬ РЕКОНФИГУРИРУЕМОЙ СЕТИ С ПЕРЕКЛЮЧЕНИЕМ СЕГМЕНТОВ

Предложены модели структурной надежности сети многопутевой маршрутизации с возможностью ее реконфигурации при переключении сегментов путей. Модели ориентированы на оптимизацию размещения узлов переключения сегментов, направленную на достижение максимума работоспособности сети при вариантности подключения источников запросов к имеющимся путям связи с серверами.
***Ключевые слова*:** многопутевая маршрутизация, структурная надежность, надежность, резервирование, реконфигурация, сеть.

V. A. Bogatyrev*
Dr. Sc. Tech., Professor
A. T. Le**
PhD Student
E. A. Abramova**
PhD Student
*St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation
**ITMO University

RELIABILITY OF A RECONFIGURABLE NETWORK WITH SEGMENT SWITCHING

Models of the structural reliability of a multipath routing network with the possibility of its reconfiguration when switching path segments are proposed. The models are focused on optimizing the placement of segment switching nodes, aimed at achieving maximum network operability with the possibility of connecting request sources to existing communication paths with servers.
Keywords: multipath routing, structural reliability, reliability, redundancy, reconfiguration, network.

Введение

Повышение надежности инфокоммуникационных систем, в том числе сетей Интернет вещей (Internet of Things, IoT) является актуальной задачей, поскольку эти системы все чаще интегрируются в различные сферы промышленности, науки и жизни, становятся более сложными и разветвленными [1]–[3]. В

связи с этим для обеспечения безопасности сетей, все больше внимание уделяется их надежности, отказоустойчивости при снижении задержек передач реального времени [4]–[6].

Требования повышения надежности [7]–[10] и отказоустойчивости в киберфизических системах могут быть достигнуты на основе многопутевой маршрутизация (Multipath Routing). Многопутевая маршрутизация позволяет использовать несколько путей для передачи данных между устройствами и может быть оптимизирована различными способами, включая использование различных протоколов маршрутизации и алгоритмов выбора маршрута для передачи данных. Повысить надежность и своевременность доставки пакетов реального времени позволяет многопутевое резервирование передач [9].

Новые возможности повышения надежности и снижения задержек при многопутевой маршрутизации дает реконфигурировании сети на основе переключения сегментов путей и перераспределения трафика в случаях его изменений и отказов в сети [10], [11].

Исследование возможностей повышения надежности и снижения задержек в сети с дублированием путей связи источников запросов с серверами при реконфигурации и балансировки трафика в узлах переключателях сегментов [10], [11], в которых решена задача оптимизации размещения переключателей сегментов дублированных путей.

В качестве развития исследований [10], [11] рассматривается более сложная топологию сети реконфигурируемых посредством переключателей сегментов сетей с троированием путей связи источников и однотипных серверов - приемников запросов.

Целью статьи является повышение надежности реконфигурируемой сети при оптимизации размещения коммутационных узлов, переключателей сегментов троированных путей.

Для достижения поставленной цели ставится задача разработка модели структурной надежности сети многопутевой маршрутизации с возможностью ее реконфигурации при переключении сегментов путей. Модели ориентированы на оптимизацию размещения узлов переключения сегментов направленную на достижение максимума работоспособности сети при вариантности подключения источников запросов к имеющимся путям связи с серверами.

Многопутевая маршрутизации с переключением сегментов

Структурная модель надежности сети при доступности для источников только одного из троированных путей представлена на рис. 1*а*, а при полной связанности для них всех путей на рис. 1*б*. Общее число узлов, составлявших каждый путь n, а число узлов в сегменте пути до узла переключателя путей n_1. A, B, C – источники запросов, S-сервер. Все серверы одинаковы.

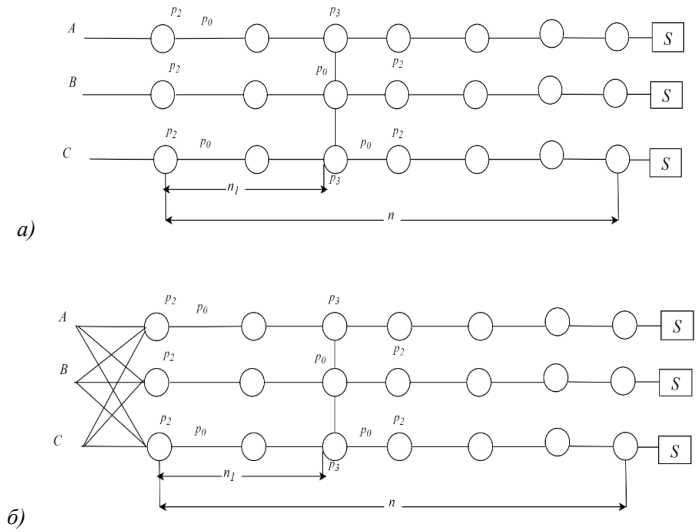


Рис. 1. Структурная модель надежности реконфигурируемой сети при вариантах подключения источников запросов A, B, C к путям связи с серверами S

Надежность сети при требовании обеспечения связанности любого источника запросов хотя бы с одним сервером

Для структур по рис. 1*а* связанность любого источника запросов хотя бы с одним сервером требуется исправности всех трех переключателей сегментов, а также исправность всех сегментов путей от источников A, B, C до узлов переключения сегментов.

Таким образом, вероятность работоспособности сети при рис. 1*а* при требовании обеспечения связанности любого источника запросов хотя бы с одним сервером определяется как

$$P_{ABC} = p_3^3 (p_2^{n_1})^3 (p_0^2 (1-(1-p_2^{(n-n_1)})^3) + 2p_0(1-p_0)(1-(1-p_2^{(n-n_1)})^2) p_2^{(n-n_1)} +$$
$$+(1-p_0)^2 (p_2^{(n-n_1)})^3).$$

Вероятность связанности сети при полнодоступном подключении всех источников запросов к трем имеющимся в сети путям определяется как

$$P = p_3^3 (p_0^2 (1-(1-p_2^{n_1})^3)(1-(1-p_2^{(n-n_1)})^3) +$$
$$+2p_0(1-p_0)(1-(1-(1-(1-p_2^{n_1})^2)(1-(1-p_2^{(n-n_1)})^2))(1-p_2^n)) +$$
$$+(1-p_0)^2 (1-(1-p_2^n)^3)) + 2p_3^2 (1-p_3)(p_0 (1-(1-p_2^{n_1})^2)(1-(1-p_2^{(n-n_1)})^2) +$$
$$+(1-p_0)\ (1-(1-p_2^n)^2)) + 3p_3(1-p_3)^2 p_2^n,$$

где p_0 – надежность линии связи между узлами; p_1 – надежность коммуникационного узла, $p_2=p_1p_0$; p_3 – надежность коммуникационного узла, осуществляющего переключение маршрутов.

Расчет надежности сети в зависимости от расположения переключателей путей

Проанализируем влияние размещения узлов-переключателей путей на надежность сети. Расчет проведем при n=20 узлах, составляющих каждый путь, и интенсивности отказов узлов и линий соответственно $\lambda_0=10^{-4}$ 1/ч. и $\lambda_1=10^{-4}$ 1/ч.

Будем считать, что в сети реализовано периодическое обслуживание с восстановлением отказавших узлов и переходом сети в исходное состояние полной работоспособности. В период между обслуживанием в системе происходит накопление отказов, в этот период оценим надежность сети по вероятности безотказной работы. Надежность узлов и линий определим по вероятности безотказной работы за время t как $p_0=\exp(-\lambda_0 t)$, $p_1=\exp(-\lambda_1 t)$, $p_3=p_1=\exp(-\lambda_1 t)$. Надежность сети оценим при требовании обеспечения связанности любого источника запросов хотя бы с одним сервером.

Зависимость вероятности связанности сети от числа узлов до переключателя маршрута представлены на рис. 2. На рис. 2*а* кривые 1, 2, 3, 4 соответствуют времени между обслуживанием t=100, 150, 250, 500 часов для сети с топологией по рис. 1*а*. На рис. 2*б* кривые 1, 2, 3, 4 соответствуют времени t=50, 55, 60, 65 часов для сети с топологией по рис. 1*б*.

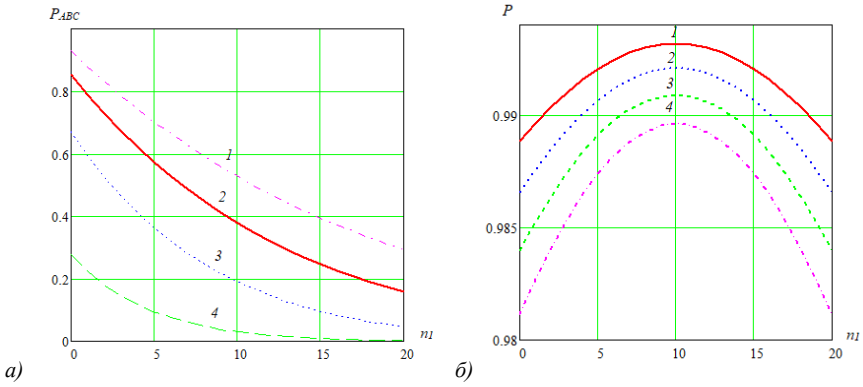


Рис. 2. Зависимость вероятности связанности сети от числа узлов до переключателя маршрутов

Из представленных графиков видно, что при подключении каждого источника запросов только к одному пути размещение переключателей сегментов целесообразно как можно ближе к источникам запросов. Для полнодоступного

подключения источников ко всем путям размещение переключателей маршрутов должно быть в центре маршрутов связи с серверами.

Заключение

Предложены модели структурной надежности сети многопутевой маршрутизации с возможностью ее реконфигурации при переключении сегментов резервированных путей. Модели позволяю оценить влияние размещения узлов переключения сегментов на надежность реконфигурируемой сети, при вариантности подключения источников запросов к имеющимся путям связи с серверами.

Показано существование оптимального размещения узлов переключения путей, при котором достигается максимальная надежность системы.

Список источников

1. *Chanal P., Kakkasageri M.* Security and privacy in IOT: a survey // Wireless Personal Communications. 2020. Vol. 115. P. 1667–1693.

2. *Akhigbe B.* IoT technologies for livestock management: a review of present status, opportunities, and future trends // Big data and cognitive computing. 2021. Vol. 5. N 1. P. 10.

3. *Bagchi S.* New Frontiers in IoT: Networking, Systems, Reliability, and Security Challenges // IEEE Internet of Things Journal. 2020. Vol. 7. P. 11330–11346.

4. *Stepanov N., Turlikov A., Begishev V.* Ccuracy assessment of user micromobility models for thz cellular systems // mmNets 2021 – Proceedings of the 5th ACM Workshop on Millimeter-Wave and Terahertz Networks and Sensing Systems, Part of ACM MobiCom 2021. 5. 2021. P. 37–42.

5. *Татарникова Т. М., Бимбетов Ф., Богданов П. Ю.* Выявление аномалий сетевого трафика методом глубокого обучения // Известия СПбГЭТУ ЛЭТИ. 2021. № 4. С. 36–41.

6. *Astakhova T., Shamin A., Verzun N.* A model for estimating energy consumption seen when nodes of ubiquitous sensor networks communicate information to each other // CEUR Workshop Proceedings. MICSECS 2018 – Proceedings of the 10th Majorov International Conference on Software Engineering and Computer Systems. 2019.

7. *Zakoldaev D., Korobeynikov A., Shukalov A.* Industry 4.0 vs Industry 3.0: the role of personnel in production // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 734. N 1. P. 012048.

8. *Tatarnikova T., Sikarev I., Bogdanov P.* Botnet Attack Detection Approach in IoT Networks. Aut. Control Comp. Sci. 56, 838–846 (2022).

9. *Bogatyrev V., Bogatyrev A., Bogatyrev S.* Redundant multi-path service of a flow heterogeneous in delay criticality with defined node passage paths // Journal of Physics: Conference Series – 2021. Vol. 1864. N 1. P. 012094.

10. *Богатырев В. А., Ле А. Т., Абрамова Е. А.* Перераспределение потоков сети с многопутевой маршрутизацией // Автоматизация процессов управления. 2022. № 4 (70). С. 141–149.

11. *Bogatyrev V., Le A., Abramova E.* Structural reliability of a multipath routing network with reconfigurations when switching routes // 2022 International Russian Automation Conference (RusAutoCon). 2022. P. 414–418.

УДК 004.032.26

В. В. Боженко*
ассистент
И. А. Зорин*
студент
*Санкт-Петербургский государственный университет
аэрокосмического приборостроения

ПРИМЕНЕНИЕ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ К ЗАДАЧЕ РАСПОЗНАВАНИЯ ТЕКСТА

Рассматривается задача распознавания текста на изображении, выявляются основные особенности и проблемы, связанные с обработкой сложных изображений. Предлагается алгоритм распознавания с использованием сверточных нейронных сетей. В результате реализована нейронная сеть для предварительной обработки изображений и определения символов, описана архитектура данной нейронной сети.
Ключевые слова: нейронные сети, сверточные нейронные сети, OCR, распознавание текста, обработка изображений, компьютерное зрение.

V. V. Bozhenko*
Assistant
I. A. Zorin*
Student
*St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

APPLICATION OF NEURAL NETWORKS TO THE TEXT RECOGNITION

The research presents the problem of text recognition in an image, identifies the main features and problems the recognition, describes the algorithm using convolutional neural networks. A neural network for image preprocessing recognition and character definition is implemented, the neural network architecture is described.
Keywords: neural networks, convolutional neural networks, OCR, text recognition, image processing, computer vision.

В настоящее время активно развивается такая область, как распознавание образов, одним из направлений которого является распознавание текста. Данная задача является актуальной, имеет широкое применение в различных областях, так как преобразование данных в электронный вид позволяет организовать более удобное взаимодействие с ними и автоматизировать многие процессы [1]. Кроме того, до сих пор не существует идеальной универсальной системы по распознаванию любого текста. Проблемы распознавания текстов являются предметом активных исследований [2].

Оптическое распознавание символов (OCR) – это перевод изображений из рукописного, машинописного и печатного в текстовые данные, которые легко читать, копировать и редактировать [3]. При этом OCR не ограничен обработкой бумажных документов, актуальна также задача распознавания на

более сложных графических объектах, например, фотографиях с различным фоном и разного качества.

Сложность задачи распознавания текста во многом определяется тем, в каком виде он представлен для распознавания. При распознавании текста на однородном фоне, например, документе, когда символы имеют одинаковые высоту и ширину, выполнение сегментации и бинаризации – приведения изображения к черно-белому цвету, не так проблематично. Однако, если на изображении присутствует неоднородный фон, разный размер, цвет или наклон шрифта, а также другие объекты, распознавание текста осложняется, появляется также задача локализации текста – отделения текста на изображении от других объектов [2].

Нейронные сети (НС) позволяют решать большой перечень задач, при этом распознавание является одним из наиболее популярных способов применения НС. Также НС в последнее время активно используются для распознавания символов, так как в отличие от классических традиционных методов [1] вместо программирования сложных функций используется обучение на основе имеющихся данных. Использование НС дает высокую эффективность и производительность, однако требует данные для обучения и разработку особой структуры, которая будет учитывать специфику решения конкретной задачи [4].

Обычно для решения задачи распознавания текста на изображении используются сверточные нейронные сети (CNN) [5]. Именно благодаря обучению представляется возможным распознавать тексты разных сложностей. CNN отличаются тем, что могут обеспечить частичную устойчивость к изменениям масштаба, смещениям, поворотам, смене ракурса и другим искажениям [6].

Предполагается, что входными данными для системы распознавания является полученное изображение текста, при этом это изображение может содержать произвольную информацию, такую как смесь и текста, и рисунков. В качестве входных данных для экспериментов был использован набор данных, собранный авторами и состоящий из 2000 изображений размером 512 на 512 пикселей.

Общий алгоритм распознавания представлен на рис. 1. В данном алгоритме можно выделить следующие этапы:

- предварительная обработка изображений,
- сегментация – нахождение области, которая содержит текст и ее локализация,
- посимвольное распознавание текста,
- постобработка [4].

Предварительная обработка связана с подготовкой изображения и приведения его к виду, пригодному для последующего эффективного анализа и использования. Сначала, цветное изображение преобразуется в черно-белое, применяется фильтрация и очищение от шума [6].

Рис. 1. Последовательность работы алгоритма распознавания текста

После предобработки начинается семантическая сегментация изображения – задача разделения частей изображения на подгруппы пикселей, принадлежащих к соответствующим объектам, с его классификацией [6].

В результате была разработана архитектура для распознавания символов, включающая в себя две нейросети. Первая НС преобразует входное изображение в черно-белое, а затем из этого изображения извлекается расположение всех символов. Затем эти символы подаются на вторую модель, которая определяет подаваемый символ, и из этих символов формируется итоговый текст.

Для первой НС используется Unet модель, с архитектурой – CNN энкодера-декодера, энкодер постепенно понижает дискретизацию изображения и ищет признаки, необходимые для определения класса каждого пикселя. Декодер постепенно повышает дискретизацию таким образом, чтобы на выходе получилось черно-белое изображение размером 512 на 512 пикселей. CNN слои до понижения дискретизации и после ее повышения попарно конкатенируются для учета признаков, найденных на ранних и поздних этапах работы НС. Архитектура первой НС представлена на рис. 2.

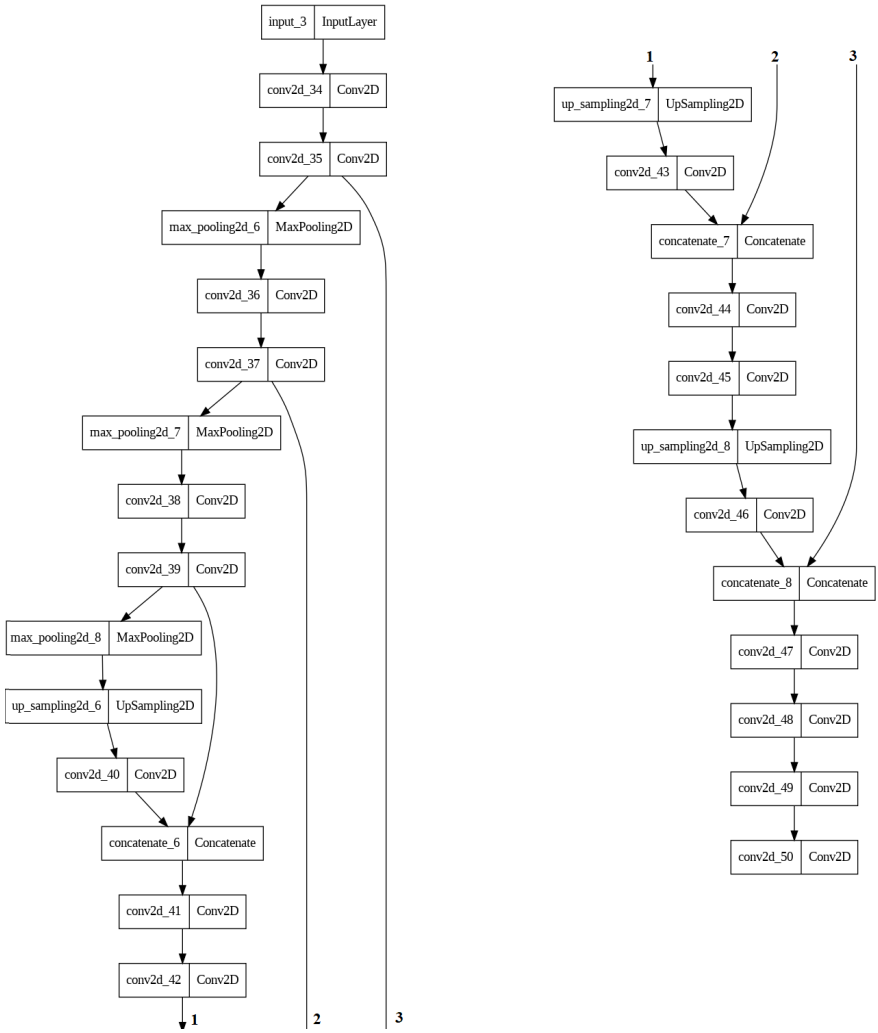


Рис. 2. Архитектура первой НС

Следующая часть работы заключается в подготовке изображения на вход второй НС, для этого используется одна из наиболее популярных библиотек для получения позиции символов на изображениях – библиотека OpenCV [7]. С помощью OpenCV выводится положение всех символов, и фрагмент с каждой буквой приводится к размеру 28 на 28 пикселей, а затем подается на вход второй модели.

Вторая модель состоит из двух блоков:

– блок CNN, предназначенный для выделения признаков символа на изображениях,

– блок персептрона, который служит для обработки полученных признаков и распределения вероятностей нахождения на подаваемом изображении определенного символа.

На выходе данная НС содержит 44 нейрона, где 33 нейрона соответствуют буквам русского алфавита, 1 нейрон отвечает за букву I и 10 нейронов за цифры от 0 до 9. В результате на выходе получается список из вероятностей нахождения на изображении того или иного символа.

Стоит отметить, что обучение нейронных сетей, даже при использовании самых эффективных алгоритмов, представляет собой трудоемкий процесс, далеко не всегда дающий ожидаемые результаты. Данное решение позволяет получить достаточно хорошие результаты, хотя и представляет интерес улучшение качества распознавания.

Таким образом, в ходе работы был рассмотрен алгоритм для распознавания символов на сложных графических объектах, который как правило, состоит из двух больших этапов – поиск текста и распознавание слов в этом тексте. Безусловно реальные изображения текстов далеки от совершенства, а зашумленные и искаженные изображения все еще являются проблемой и областью исследования для распознавания.

Список источников

1. *Валькe А. А., Лобов Д. Г.* Алгоритмы распознавания символов // Динамика систем, механизмов и машин. 2018. Т. 6. № 4. С. 164–168.

2. *Болотова Ю. А., Спицын В. Г., Осина П. М.* Обзор алгоритмов детектирования текстовых областей на изображениях и видеозаписях // Компьютерная оптика. 2017. Т. 41. № 3. С. 441–452.

3. Оптическое распознавание символов. URL: https://symbl.cc/ru/unicode/blocks/optical-character-recognition/ (дата обращения: 15.03.2023).

4. *Красновидов А. В., Алексеев А. С.* Распознавание зашумленных текстовых символов с помощью обучаемой нейронной сети // Интеллектуальные технологии на транспорте. 2018. № 2 (14). С. 28–33.

5. Convolutional Neural Networks. URL: https://www.ibm.com/topics/convolutional-neural-networks (дата обращения: 15.03.2023).

6. *Зарипова Р. С., Кривоногова А. Е.* Распознавание текстов с использованием нейронных сетей. URL: http://novaum.ru/public/p550 (дата обращения: 15.03.2023).

7. OpenCV. URL: https://docs. opencv. org/4. x/d0/de3/tutorial_py_intro.html (дата обращения: 15.03.2023).

УДК 004.728.3.057.4

А. А. Бурков*
старший преподаватель
А. М. Тюрликов*
доктор технических наук, профессор
Р. О. Рачугин*
студент
*Санкт-Петербургский государственный университет
аэрокосмического приборостроения

ОЦЕНКА ЧИСЛА АБОНЕНТОВ В СИСТЕМЕ ДЛЯ МНОГОКАНАЛЬНОГО АЛГОРИТМА АЛОХА С ФАЗОЙ ИССЛЕДОВАНИЯ И ОРТОГОНАЛЬНЫМИ ПРЕАМБУЛАМИ

В настоящее время активно развиваются технологии беспроводной связи, вызванное увеличением числа устройств и трафика, передаваемого ими. Параллельно с этим требуется развитие алгоритмов, необходимых для увеличения пропускной способности сетей. В [1] была представлена модель многоканального алгоритма АЛОХА с фазой исследования с потерей данных. В [2] описывается модификация алгоритма с потерями, позволяющая избавится от потерь. Модель системы, представленная в [2], определяет вероятности передачи на фазе исследования, зависящую от числа абонентов, участвующих в каждом кадре. В данной работе рассматривается правило изменения вероятности передачи на фазе исследования, зависящей от оценки числа пользователей.
Ключевые слова: многоканальная АЛОХА, оценка числа абонентов, пропускная способность, случайным множественный доступ.

Статья подготовлена при финансовой поддержке РНФ, проект № 22-19-00305 «Пространственно-временные стохастические модели беспроводных сетей с большим числом абонентов».

A. A. Burkov*
Senior Lecturer
A. M. Turlikov*
Dr. Sc. Tech., Professor
R. O. Rachugin*
Student
*St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

ESTIMATION OF THE NUMBER OF USERS IN THE SYSTEM FOR THE MULTICHANNEL ALOHA ALGORITHM WITH THE RESEARCH PHASE AND ORTHOGONAL PREAMBLES

Currently, wireless communication technologies are actively developing, caused by an increase in the number of devices and the traffic transmitted by them. In parallel with this, it is necessary to develop the algorithms necessary to increase the throughput of networks. In [1], a model of the multichannel ALOHA algorithm with an exploration phase with data loss was presented. In [2], a modification of the lossy algorithm is described, which makes it possible to get rid of losses. The system model presented in [2] determines the transmission probabilities in the exploration phase, depending

on the number of users participating in each frame. In this paper, we consider the rule for changing the transmission probability in the research phase, depending on the estimate of the number of users.
Keywords: multichannel ALOHA, estimation of the number of users, maximum throughput, random multiple access.

Введение

В [1] рассматривается многоканальный алгоритм АЛОХА, использующий ортогональные преамбулы и фазу исследования. Представленный алгоритм является алгоритмом с потерями, то есть данные передаются один раз и в случае неудачи теряются. Кадр данного алгоритма состоит из двух фаз: фазы исследования и фазы передачи данных. В начале каждой фазы пользователь решает будет ли он передавать свои данные. Вероятность передачи данных в фазе исследования равна 1. Пользователи, решившие передавать в фазе исследования, случайным образом выбирают один из K каналов и передают по нему свою преамбулу. Затем БС оценивает количество преамбул в каждом канале и передает эту информацию всем пользователям. После этого пользователи делятся на две группы. В первую группу (G_S) входят пользователи, в каналах которых была передана одна преамбула. Все остальные пользователи попадают во вторую группу (G_C). Каналы, выбранные пользователями в G_S, закрепляются за ними, а все остальные каналы относятся ко второй группе.

Затем следует DTP. Пользователи G_S передают данные с вероятностью, равной единице. Пользователи G_C решают, передавать ли им данные с вероятностью, равной $p_{DTP} = \min\left\{1, \frac{K - |G_S|}{|G_C|}\right\}$. Пользователи группы G_C, решившие передавать, случайным образом выбирают один из каналов второй группы и передают свои данные. Затем базовая станция информирует всех пользователей о событиях, произошедших в каждом канале, по каналу обратной связи. Для данного алгоритма в [1] была представлена формула расчета верхней границы критической выходной интенсивности на канал, имеющая следующий вид:

$$\lambda_{cr} = e^{-1}(2 - e^{-1}).$$

В [2] рассматривается модель системы с потерями аналогичная модели, представленной в [1], но дополняется выводом формулы точного расчета выходной интенсивности на канал для системы с K каналами. Данная формула имеет следующий вид:

$$T(\lambda) = \lambda e^{-\lambda} + \sum_{l=1}^{K} C_{K-1}^{l-1} \lambda^{K-l} e^{-\lambda K} \sum_{\substack{i_1=0 \\ i_1 \neq 1 \\ \sum_{j=1}^{l} i_j \neq 0}}^{\infty} \ldots \sum_{\substack{i_l=0 \\ i_l \neq 1 \\ \sum_{j=1}^{l} i_j \neq 0}}^{\infty} \left(I\left\{\sum_{j=1}^{l} i_j \leq l\right\} \sum_{j=1}^{l} i_j \frac{1}{l}\left(1 - \frac{1}{l}\right)^{\sum_{j=1}^{l} i_j} + \right.$$

$$+I\left\{\sum_{j=1}^{l} i_j > l\right\}\left(1-\frac{1}{\sum_{j=1}^{l} i_j}\right)^{\sum_{j=1}^{l} i_j - 1}\left.\right)\frac{\lambda^{\sum_{j=1}^{l} i_j}}{\prod_{j=1}^{l} i_j!}, \qquad (1)$$

где $I\{statement\} = \begin{cases} 1, \ true \\ 0, \ false \end{cases}$. Теоретический расчет, полученный по формуле (1), выходной интенсивности на канал показывает, что максимальные значения выходной интенсивности достигаются при интенсивности входного потока больше 1. Данные значения представлены в табл. 1.

Таблица 1

Максимум выходной интенсивности

Number channel	Max T(λ)	λ
1	0,5482	1,775
2	0,578	1,55
3	0,5917	1,415
4	0,5983	1,34
5	0,6015	1,285
6	0,6031	1,25

Также в [2] описывается модификация алгоритма из [1]. Данная модификация заключается в том, что абоненты остаются в системе до тех пор, пока они успешно не передадут данные (система без потерь). Для этой модификации вводится допущение о знании числа пользователей в начале каждого кадра. Данное допущение изменяет вероятность передачи на фазе исследования следующим образом:

$$p_{EP} = \min\left\{1, \frac{KG}{M}\right\},$$

где G – параметр алгоритма. Кроме этого, в [2] приводится доказательство, что оптимальным выбором параметра G являются значения λ из табл. 1.

Алгоритм без потерь с параметром G позволяет получить максимальную выходную интенсивность на канал, но ограниченно допущением о знании точного числа пользователей. В [3]–[5] представляется подход, позволяющий ввести формулу адаптации вероятности передачи на фазе исследования, что в свою очередь позволяет убрать допущение.

Опишем три события A, B и C. Событие A – это событие «Пусто» в канале. Событие B – это событие «Успех» в канале. Событие C – это событие «Конфликт» в канале.

Введем в рассмотрение величину S_t. При t=1 положим S_1=1. Значение которой вычисляется по следующей формуле:

$$S_{t+1} = \max\left[1, S_t + aI\{A\} + bI\{B\} + cI\{C\}\right], \qquad (2)$$

где $I\{\cdot\}$ – индикатор события. A, B, C – это возможные события в системе. Коэффициенты a, b, c – константы, которые аналогичны коэффициентам из [3] и равны следующим значениям:

$$a = \frac{\lambda_{cr}}{K} - 1,\ b = \frac{\lambda_{cr}}{K} - 1,\ c = \left(e-2\right)^{-1} + \frac{\lambda_{cr}}{K},$$

где K – число каналов в системе, λ_{cr} – верхняя границы критической выходной интенсивности.

Выполняя адаптацию по формуле (2), мы можем изменить вероятность передачи на фазе исследования следующим образом: $p_E = \min\left\{1, \frac{K}{S_t}\right\}$.

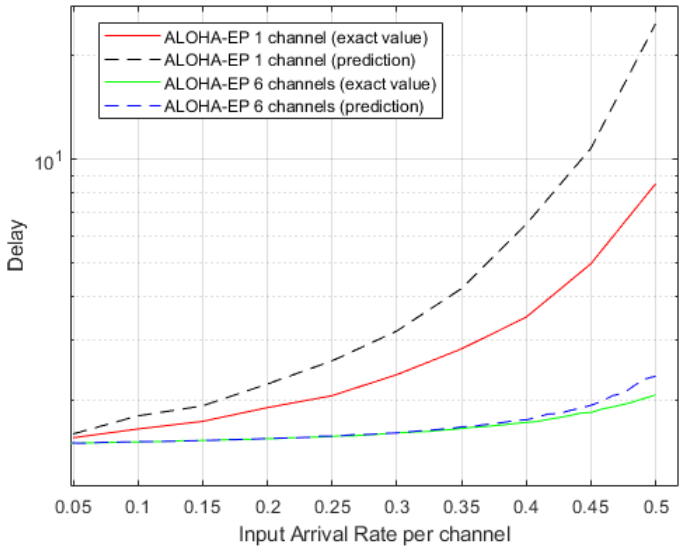


Рис. 1. Зависимость средней задержки от входной интенсивности на канал

Заключение

В работе рассматривается алгоритм АЛОХА из [1], где был предложен расчет пропускной способности на канал для бесконечного числа каналов. Из [2] рассматривается способ анализа характеристик алгоритма для заданного числа каналов вычислить пропускную способность на канал и модификация ал-

горитма из [1]. Описывается правило оценки числа пользователей в кадре, позволяющее отбросить допущение о точном числе пользователей для системы с потерями и получить такое же значение выходной интенсивности, но худшую среднюю задержку. Представляются результаты моделирования средней задержки для алгоритма с потерями (рис. 1). По полученным результатам можно сделать вывод, что с ростом числа каналов в системе влияние погрешности оценки числа абонентов в кадре на среднюю задержку уменьшается.

Список источников

1. *Choi J.* On improving throughput of multichannel aloha using preamble-based exploration // Journal of Communications and Networks. 2020. Vol. 22. N 5. P. 380–389.

2. *Бурков А. А., Рачугин Р. О., Тюрликов А. М.* Analyzing and stabilizing multichannel ALOHA with the use of the preamble-based exploration phase // Информационно-управляющие системы. 2022. № 5. С. 49–59.

3. *Михайлов В. А.* Геометрический анализ устойчивости цепей Маркова в Rn+ и его приложение к вычислению пропускной способности адаптивного алгоритма случайного множественного доступа // Проблемы передачи информации. 1988. Т. 24. Вып. 1. С. 61–73.

4. *Galinina O., Turlikov A., Andreev S.* // Stabilizing multichannel slotted aloha for machine-type communications // IEEE International Symposium on Information Theory. 2013. С. 2119 –2123.

5. *Rivest R.* Network control by Bayesian broadcast // IEEE Transactions on Information Theory. 1987. Vol. 33. N 3. P. 323–328.

УДК 004.8

А. В. Дмитриев*
студент
Е. Д. Пойманова*
кандидат технических наук, доцент
*Санкт-Петербургский государственный университет
аэрокосмического приборостроения

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА НА БАЗЕ МИКРОКОНТРОЛЛЕРА ДЛЯ РАСПОЗНАВАНИЯ ГОЛОСОВЫХ КОМАНД

Рассмотрены перспективы интеграции нейронных сетей с микроконтроллерами и использование устройств, которые являются результатом подобной интеграции, в задачах распознавания речевых команд. Показана перспективность данного направления с точки зрения развития технологий и с точки зрения рынка, с учетом низкой конкуренции подобных технологий в России.
***Ключевые слова*:** искусственный интеллект, нейронные сети, машинное обучение, распознавание речи, распознавание голосовых команд, микроконтроллеры.

A. V. Dmitriev*
Student
E. D. Poymanova*
PhD Sc. Tech., Associate Professor
*St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

USING ARTIFICIAL INTELLIGENCE TO VOICE COMMAND RECOGNITION ON MICROCONTROLLER

The article provides the possibilities for the integration of Neural Networks with microcontrollers and the use of devices that are the result of such integration in speech recognition tasks. The prospects of this direction from the point of view of technology development and from the point of view of the market are shown, taking into account the low competition of similar technologies in Russia.
Keywords: artificial intelligence, neural networks, machine learning, speech recognition, voice command recognition, microcontrollers.

Введение

На сегодняшний день в огромное количество цифровых устройств внедряют технологии искусственного интеллекта, но зачастую они требуют существенных вычислительных мощностей и достаточного объема памяти. В данной статье описывается реализация программно-аппаратного комплекса для решения задач распознавания голосовых команд на базе компактного и маломощного микропроцессора STM32F407. Выбор именно этого микроконтроллера обусловлен тем, что семейство микроконтроллеров stm32 достаточно распространено, а модель f407 имеет минимальные из подходящих характеристик для работы на ней нейронной сети.

Актуальность использования микропроцессорного устройства с AI в распознавании речи

Очевидно, что на столь стремительно развивающуюся сферу как искусственный интеллект (ИИ), устремлено много внимания не только технических специалистов, которые заинтересованы в ускорении прогресса, но и маркетологов, заинтересованных в получении наибольшей прибыли в перспективной отрасли. Вследствие этого аналитиками из IDC прогнозировалось, что объем рынка ИИ в 2022 году составит около $450 млрд [1]. В условиях роста рынка искусственного интеллекта многие крупные корпорации занимаются развитием ИИ технологий. Например, достаточно известная Американская компания OpenAI в сентябре 2022 года представила систему распознавания речи, но если говорить о нейросетях от OpenAI, то речь всегда заходит о тяжеловесных программных решениях, которые запускаются на достаточно мощных компьютерах. Известным успешным решением в области программно-аппаратных систем является Яндекс Станция со встроенным голосовым помощником, который после произнесения пользователем ключевой фразы («Алиса, …») распознает речь и выполняет заданные команды. Яндекс Станция – достаточно требовательное к аппаратуре решение, зачастую требующее подключение к Интернету, несмотря на широкий спектр возможных сценариев использования. Для более узкоспециализированных задач, не требующих всего функционала «Алисы», можно использовать гораздо более компактные и менее мощные устройства, аппаратного потенциала которых будет вполне достаточно для решения задачи распознавания голосовых команд. Помимо более эффективного использования вычислительных ресурсов, такие устройства будут иметь гораздо меньший размер, что максимально упростит интеграцию таких устройств с необходимой задачей.

Технологии, которые использовались для реализации подобного решения

Программная реализация проекта состоит из следующих частей: построение и обучение нейросети на компьютере с помощью языка python, интеграция нейросети с микроконтроллером и реализация блока предобработки сигнала с микрофона микроконтроллера с помощью языка C++.

1. Для разработки и обучения нейронной сети предлагается использовать язык программирования Python, так как в этом языке программирования имеется возможность использования существующих библиотек для работы с нейронными сетями: Keras – открытая библиотека, написанная на языке Python, упрощает взаимодействие с TensorFlow. Нацелена на оперативную работу с сетями глубинного обучения, при этом спроектирована так, чтобы быть компактной, модульной и расширяемой [2].

2. TensorFlow – открытая программная библиотека для машинного обучения, разработанная компанией Google для решения задач построения и тренировки нейронной сети с целью автоматического нахождения и классификации образов, достигая качества человеческого восприятия [3].

3. TensorFlow Lite – открытая программная библиотека. TFLite позволяет исполнение модели на различных устройствах, например телефоне или Raspberry Pi. В основном используется для портирования уже готовой и обученной нейронной сети для «карманных» устройств.

4. STM32CubeIDE – это продвинутая платформа для разработки программного обеспечения нижнего уровня для 32-битных микроконтроллеров STM32 [4].

5. Микроконтроллер STM32F407VGT6 с 32-битным ARM Cortex M4, объемом SRAM 192 Кбайта и flash памятью 1 Мбайт. Также на плате с микроконтроллером установлен PDM микрофон MP45DT02 [5].

Аппаратная часть реализации проекта заключается в получении доступа к микрофону микроконтроллера, и вывод итоговых данных через интерфейс UART [6].

Реализация распознавания команд на микроконтроллере STM32

Нейронная сеть для решения данной задачи была спроектирована с учетом работы на маломощном устройстве, поэтому содержит всего 5 слоев: входной, выпадающий (rate=0.25), полностью связанный, выпадающий(rate=0.5), выходной. Все исходные данные для обучения являются wav-файлами с частотой дискретизации 16 кГц и длительностью, составляющей 1 секунду. На вход нейросети попадает обработанная с помощью STFT (Short-Time-Fourier-Transform) [7] 1 секунда речи, то есть 16 000 отсчетов спектрограммы. Выход нейронной сети выглядит как пронумерованные вероятности того, что была произнесена конкретная фраза из датасета. Подобный формат вывода позволяет получать номер распознанной фразы, что можно использовать в качестве управляющего сигнала – например, голосовое управление в умном доме или в другой системе, где на конкретную команду должна последовать определенная реакция системы.

После конвертации в формат TFLite обученную и полностью готовую нейросеть удалось сжать до 321 Кбайт, что является приемлемым размером для загрузки в память микроконтроллера.

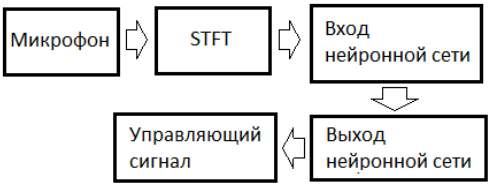


Рис. 1. Структурная схема работы устройства

В работе устройства необходимо преобразовывать PDM семплы микрофона в PCM, и провести прореживание PCM отсчетов, так как по умолчанию микрофон работает с частотой 48 кГц. После получения PCM отсчетов с необ-

ходимой частотой дискретизации, необходимо решить задачу распознавания голоса: перед работой основного модуля проекта stm32 «слушает» эфир. Процесс «прослушивания» заключается в том, чтобы каждые 128 сэмплов с микрофона обрабатывать с помощью преобразования Фурье и делать выводы о наличии в сэмпле человеческой речи.

Когда в сэмпле обнаруживается человеческая речь, текущая секунда данных с микрофона скапливается в буфер, после чего она преобразуется с помощью STFT и отправляется на вход нейронной сети. После получения информации с выхода нейронной сети, для демонстрации работы прототипа устройства, по управляющему сигналу (номеру команды) выбирается соответствующая строка с командой из списка команд в датасете и отправляется в консоль на компьютер по протоколу UART.

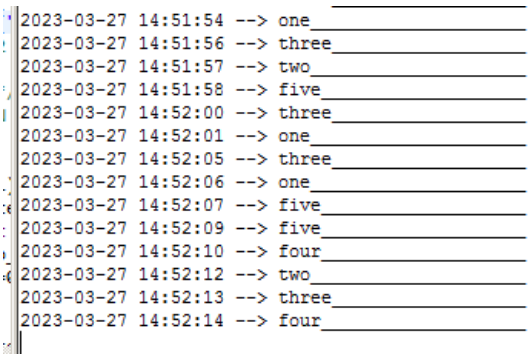


Рис. 2. Демонстрация работы устройства

Устройство распознает произнесенные цифры. Для корректного отображения в консоли команды переведены на английский язык.

Заключение

Ситуация на мировом рынке IT-технологий в сфере искусственного интеллекта показывает, что развитие проектов в области ИИ перспективно как с точки зрения прогресса, так и с коммерческой точки зрения. Была выделена предметная область, которая активно развивается, и были сделаны выводы о том, что в ней возможно создать собственное конкурентноспособное и востребованное программное решение. Также было приведено краткое описание структуры и реализации проекта, для решения задач в этой сфере, которое может быть применено в абсолютно различных сценариях.

Список источников

1. STM32F407VG product overview // stlife.augmented. URL: https://www.st.com/en/microcontrollers-microprocessors/stm32f407vg.html (дата обращения: 16.03.2023).

2. Искусственный интеллект (мировой рынок) // TADVISER. URL: https://www.tadviser.ru/index (дата обращения: 25.11.2022).

3. stm32f4 discovery PDM микрофон. Настройка I2s. Внешний ЦАП // Дзен. URL: https://dzen.ru/media/e_world/stm32f4-discovery-pdm-mikrofon-nastroika-i2s--vneshnii-cap-5f429045df47942c9aee2c80 (дата обращения: 16.03.2023).

4. Short-Time Fourier Transform // ScienceDirect. URL: https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/short-time-fourier-transform (дата обращения: 11.03.2023).

5. STM32Cube initialization code generator // stlife. augmented. URL: https://www.st.com/en/development-tools/stm32cubemx.htmlhtml (дата обращения: 16.03.2023).

6. Работа с UART через библиотеку HAL с использованием прерываний // MyPractic. URL: http://mypractic.ru/urok–23-rabota-s-uart-cherez-biblioteku-hal-s-ispolzovaniem-preryvanij.html (дата обращения: 15.03.2023).

7. Почему TensorFlow // TensorFlow. URL: https://www.tensorflow. org/about (дата обращения: 15.03.2023).

8. ML for Mobile and Edge Devices – TensorFlow Lite // TensorFlow. URL: https://www.tensorflow. org/lite (дата обращения: 15.03.2023).

9. About Keras // Keras. URL: https://keras.io/about/ (дата обращения: 15.03.2023).

УДК 621.496.4

А. О. Дмитриев*
студент
Б. Э. Штеле*
студент
М. К. Яковлев*
студент
Н. В. Степанов*
ассистент
*Санкт-Петербургский государственный университет
аэрокосмического приборостроения

ЗАДЕРЖКА ПЕРЕДАЧИ ИНТЕРНЕТ-РАДИОСВЯЗИ

Радио – это один из самых популярных и доступных источников медиаконтента, который используется по всему миру. С тех пор, как радио было изобретено более столетия назад, оно продолжает оставаться одним из наиболее популярных средств массовой коммуникации. В настоящее время, с развитием Интернета, появилась возможность прослушивать радио через Интернет.
Ключевые слова: FM-радио, Интернет-радио, задержка, частотная модуляция, приемник, преобразование сигнала, пропускная способность, нагрузка на сервер.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, соглашение № FSRF-2023-0003 «Фундаментальные основы построения помехозащищенных систем космической и спутниковой связи, относительной навигации, технического зрения и аэрокосмического мониторинга».

A. O. Dmitriev*
Student
B. E. Shtele*
Student
M. K. Yakovlev*
Student
N. V. Stepanov*
Assistant
*St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

DELAY OF INTERNET RADIO SIGNAL TRANSMISSION

Radio is one of the most popular and accessible sources of media content that is used all over the world. Since radio was invented more than a century ago, it continues to be one of the most popular means of mass communication. Nowadays, with the development of the Internet, it has become possible to listen to radio over the Internet. However, many people are wondering: where is the longer delay in FM radio, on the Internet or via a radio receiver? In this article we will look at the differences between FM radio and Internet radio.
Keywords: FM radio, Internet radio, delay, frequency modulation, receiver, signal conversion, bandwidth, server load.

Введение

FM-радио является одним из самых популярных и широко используемых средств передачи аудиосигналов. Однако в современном мире существуют и другие каналы связи, например, Интернет-радио. Важным параметром оценки средств связи, исследуемой в данной работе, является задержка передачи сигнала [1]. Из-за скорости распространения сигналов по различным средствам коммуникации звук аудиопередачи также может искажаться и терять свою актуальность. В данной работе оценивается задержка в качестве основного параметра для сравнения двух каналов передачи станций радиовещания. Первый – это аналоговый FM-радио канал передачи. Второй – передача по сети Интернет. Оценка разницы в задержке передачи может влиять показывает насколько на вовремя передаются сообщения до пользователя. В работе также оценивается качество звука.

В этой статье сначала рассматривается FM-радио и основные компоненты из которых складывается задержка передачи. Затем – задержка Интернет вещания и какие факторы влияют на задержку передачи сигнала, опытным путем сравним задержку передачи через FM-радио и через Интернет, и объясним, как это связано с пропускной способностью и нагрузкой на сервер.

FM-радио и задержка передачи сигнала

FM-радио использует модуляцию частоты (FM) для передачи аудиосигналов [2]. Основная задача FM-радио заключается в том, чтобы преобразовать аналоговый аудио-сигнал в высокочастотный сигнал, который может быть передан через радиосигнал [3]. Этот сигнал может быть принят приемником, который декодирует его обратно в аналоговый аудиосигнал [4], [5]. Передача сигнала через FM-радио происходит в реальном времени, и при отсутствии помех задержка передачи составляет доли микросекунд. Сами сигналы, на тех частотах, которые используют радиостанции могут передавать в зоне прямой видимости приемника. Максимальное расстояние между приемником и антенной-излучателем радио телевизионного передающего центра (РТПЦ) может составлять около 30 км. Задержка передачи данных в беспроводном канале при известной скорости распространения радиосигналов в эфире равной близкой скорости света $3 \cdot 10^8$ м/с, в этом случае равна 0,1 мкс.

Однако, если есть помехи на пути распространения сигнала, если радиосигнал проходит через препятствия, например, здания или горы, это может вызвать эхо и задержку передачи сигнала в несколько миллисекунд.

Интернет-радио и задержка передачи сигнала

Интернет-радио является одним из наиболее популярных способов прослушивания радио в настоящее время. В отличие от FM-радио, Интернет-радио использует цифровую передачу сигнала, что означает, что аналоговый аудиосигнал сначала преобразуется в цифровой формат, а затем передается через Интернет [5]. Однако Интернет-радио имеет более высокую задержку передачи сигнала, чем FM-радио.

Задержка передачи сигнала через Интернет-радио зависит от нескольких факторов. Один из них – пропускная способность, то есть скорость передачи данных через Интернет [1]. Чем меньше пропускная способность, тем больше задержка передачи сигнала. Еще одним фактором является нагрузка на сервер. Если много пользователей одновременно слушают одну и ту же станцию, это может привести к увеличению задержки передачи (табл. 1).

Таблица 1

Задержки передачи по Интернет-радио в зависимости от временного трафика

Радиостанция, частота МГц	Расстояние до радиостанции, км	Задержка радиовещания, мкс	Задержка[1] утро, сек	Задержка[1] день, сек	Задержка[1] вечер, сек
Европа Плюс 100.5	6,28	0,02 мкс	38	36	40
Питер FM 100.9	6,28	0,02 мкс	3,5	3	4
Эльдорадио 101.4	6,9	0,023 мкс	38.5	39	40
Метро 102.4	6,9	0,023 мкс	13	9	7
Максимум 102.8	6,9	0,023 мкс	20	19,5	20
Детское 103.7	6,28	0,02 мкс	4	4	4
Like FM 104.8	6,28	0,02 мкс	25	20	20
Love FM 105.3	6,28	0,02 мкс	3	3,2	3
Монте Карло 105.9	6,28	0,02 мкс	13,5	7	13

[1]Задержка – разница между передачей по FM-радио и передачей через Интернет-радио.

Также стоит отметить, что Интернет-радио использует буферизацию, чтобы избежать потерь данных. Это означает, что сигнал передается и сохраняется в буфере на узловых устройствах, прежде чем он дойдет до пользователя. Таким образом, задержка передачи сигнала через Интернет-радио больше, чем через традиционное FM-радио, как показано в табл. 1.

Задержка передачи сигнала

Был проведен замер разницы передачи по каналу FM-радиовещания на SDR (software-defined radio) и сообщениями, которые приходили через Интернет-радио. На рис. 1 первым показан сигнал радио, записанный по FM-радио. Такая же информация отслеживалась на Интернет источнике и фиксировалась с помощью автокорреляциионой функции (второй сигнал на рис. 1). Значение сдвига, при котором автокорреляционная функция дала максимум, является задержкой – разницой между передачей по FM-радио и передачей через Интернет-радио (рис. 2).

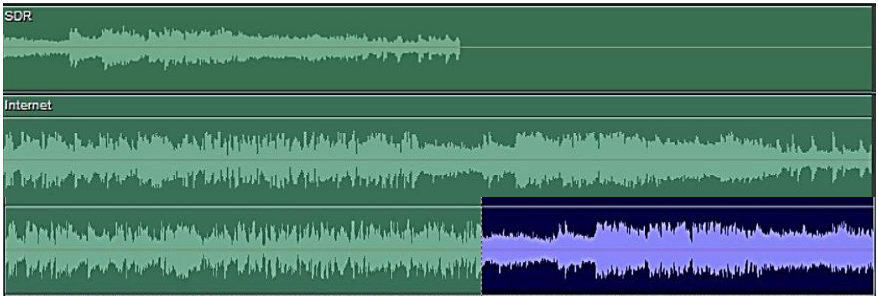


Рис. 1. Сигналы, записанные с SDR и Интернет-радио

График двух сигналов с выделенной общей частью

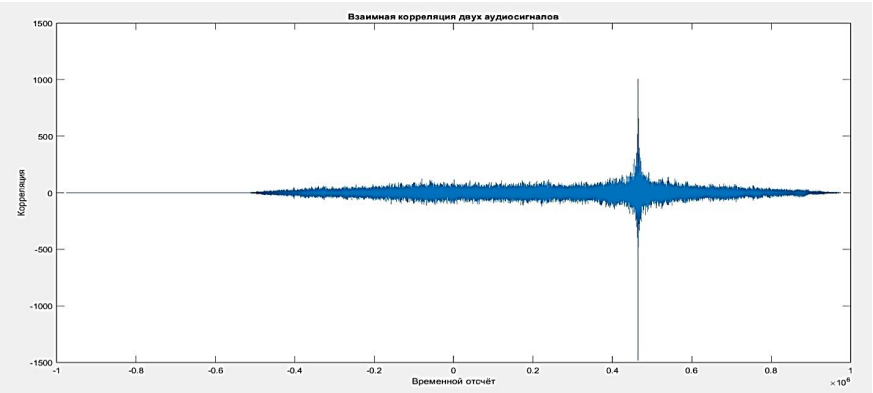


Рис. 2. График взаимной корреляции двух сигналов

На сигналах, приведенных на рис. 1, автокорреляционная функция дала максимум в отсчете 464 463 (рис. 2), что при частоте дискретизации равной 48 ГГц дает задержку в 9,676 с. На третьем сигнале рис. 1 синим цветом выделена общая часть сигналов с SDR и Интернет-радио.

Для расчета задержки радиовещания с FM-радио использовалось расстояние до ЛРТПЦ (6,28 км) и РТПС Ольгино (6,9 км), с которых ведется радиовещание в Санкт-Петербурге. Задержка передачи сигналов от этих радиостанций будет зависеть от трафика Интернета в конкретный временной отрезок (табл. 1).

Задержки по FM-радио значительно меньше, чем передачи по Интернет-радио. По этой причине задержкой при передаче через FM-радио можно пренебречь при рассмотрении задержек Интернет-радио. Таким образом, разница между передачей по FM-радио и передачей через Интернет-радио будет являться задержкой передачи Интернет-трафика.

Время задержки в передаче Интернет-трафика меняется, в зависимости от времени суток, когда сделан замер. Как показано в табл. 1, утреннее и вечернее время пользователи чаще слушают Интернет-радио. Этот факт приводит к более длительным задержкам, а днем трафик уменьшается.

Время задержки же зависит от популярности радиостанции. На таких популярных станциях как «Европа Плюс» задержка передачи Интернет-трафика может быть около минуты, тогда как на более локальных или узкоспециализированных радиостанциях, задержка значительно меньше.

Заключение

Задержка передачи сигнала является важным фактором при выборе канала связи для передачи аудио-сигнала по сети Интернет. FM-радио имеет минимальную задержку передачи, но может подвергаться помехам на пути распространения сигнала. Интернет-радио имеет более высокую задержку передачи, которая зависит от пропускной способности и нагрузки на сервер, но может использовать буферизацию для избежания потерь данных. Задержка может составлять около минуты. Данная величина зависит от времени суток, популярности радио ресурса и условий передачи.

Список источников

1. *De Alencar M., de Melo Carvalho Filho D.* Cellular Network Planning. CRC Press, 2022.

2. *Logvinov V., Smolskiy S.* Structural Diagrams of Radio Receivers // Radio Receivers for Systems of Fixed and Mobile Communications. Cham: Springer International Publishing, 2022. P. 121–206.

3. *Wulff A.* Beginning Radio Communications. Apress, 2019.

4. *Bozomitu R., Stoica Ş.* A Robust Radiocommunication System for FM Transmission Based on Software Defined Radio Technology // 2022 IEEE 28th International Symposium for Design and Technology in Electronic Packaging (SIITME). IEEE, 2022. P. 78–81.

5. *Khan M., Hasnain S. K., Jamil M.* Digital Signal Processing: A Breadth-first Approach. CRC Press, 2022.

УДК 621.391.8

В. В. Егоров*
доктор технических наук, старший научный сотрудник
М. Л. Маслаков*
кандидат технических наук
*Санкт-Петербургский государственный университет
аэрокосмического приборостроения

СЛЕПАЯ ОЦЕНКА ДИСПЕРСИИ ШУМОВОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ ДЛЯ МОДУЛИРОВАННЫХ СИГНАЛОВ НА ОСНОВЕ МАЛОЙ ВЫБОРКИ

Рассмотрена задача оценки дисперсии аддитивной шумовой составляющей по информационному сигналу в условиях малого объема анализируемой выборки. Для этого использован метод обратного моделирования. Для получения более точной оценки предложен функционал, на основе которого осуществляется минимаксная параметрическая оценка. Показаны результаты численного моделирования.
Ключевые слова: оценка, обратное моделирование, дисперсия шума, вероятность ошибки на бит.

V. V. Egorov*
Dr. Sc. Tech., Senior Researcher
M. L. Maslakov*
PhD Sc. Tech.
*St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

BLIND ESTIMATION METHOD OF NOISE COMPONENT DISPERSION FOR MODULATED SIGNALS BASE ON SMALL SAMPLE

The problem of the dispersion estimation of additive noise component for data signal under conditions of a small analyzed sample is considered. Method inverse modeling is used. The functional on base a minimax parametric estimation for obtain a more accurate estimate is proposed. The results of numerical simulation are presented.
Keywords: estimation, inverse modeling, noise dispersion, bit error rate.

Введение

При функционировании адаптивных систем радиосвязи в каналах со сложной быстроменяющейся сигнально помеховой обстановкой важной задачей является получение не только как можно более точных оценок показателей качества, но и своевременного получения этих оценок. Лишь в этом случае удается достигнуть максимальных показателей эффективности радиолинии.

В качестве оцениваемого показателя, характеризующего качество радиолинии в данный момент времени, обычно используют отношение сигнал/шум (ОСШ) или дисперсию шума [1], [2]. Для получения соответствующих оценок известны методы, использующие тестовые сигналы [2], [3] и бестестовые или слепые методы [3]–[5].

Очевидным недостатком первой группы методов является снижение информационной скорости в связи с временными затратами на передачу теста. Недостатком большинства методов второй группы является необходимость накопления достаточного объема анализируемых данных для последующего их статистического анализа при получении оценки, что приводит к снижению оперативности, то есть своевременности получаемой оценки.

В [6] авторами был предложен метод бестестовой оценки дисперсии шума для информационных сигналов малой длительности на основе «контролируемого зашумления» и искусственного увеличения объема анализируемой выборки.

В данной работе предложена реализация данного метода, на основе построения минимаксного функционала. Предложенный подход позволяет повысить точность получаемой оценки.

Оценка дисперсии шумовой составляющей

Рассмотрим кратко основную идею, изложенную в [6]. Пусть s – вектор отсчетов принятого сигнала фазомодулированного (ФМ) сигнала, соответствующий передаче N символов, на входе демодулятора принятый на фоне аддитивного шума, то есть

$$s = \overline{s} + \xi, \tag{1}$$

где $\overline{s}$ – точные значения сигнала; ξ – аддитивный шум.

Дисперсию шумовой реализации ξ обозначим как σ_ξ^2, при этом она неизвестна. Отметим, что обычно при моделировании полагают, что шум является белым гауссовским.

Как известно [7], ОСШ определяется выражением

$$h^2 = \frac{\|s_0\|^2}{2\sigma_\xi^2} = \frac{W}{2\sigma_\xi^2}, \tag{2}$$

где s_0 – сегмент сигнал, соответствующий элементарному или единичному символу, а W – мощность элементарного символа.

Далее воспользуемся известной зависимостью для вероятности ошибки на бит. Так, для сигналов с двухпозиционной ФМ (BPSK) при оптимальном когерентном приеме определяется выражением [8]:

$$P(h^2) = \frac{1}{2} erfc\left(\sqrt{h^2}\right), \tag{3}$$

где $erfc(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_x^\infty \exp\left(-y^2\right) dy$ – функция ошибки.

Для получения оценки $\hat{\sigma}_{\xi}^{2}$ в [6] предлагается ввести $M \cdot L$ реализаций аддитивной шумовой составляющей $\eta_{m,l}$ с заданными дисперсиями $\sigma_{\eta,m}^{2}, n = 1...M$. В результате получим $M \cdot L$ реализаций вида

$$u_{m,l} = s + \eta_{m,l} = \left(\overline{s} + \xi\right) + \eta_{m,l},\ m = 1...M, l = 1...L. \tag{4}$$

Вероятность ошибки на бит на выходе демодулятора оценим следующим образом:

$$\hat{P}(m) = \frac{1}{LN}\sum_{l=1}^{L}\sum_{n=1}^{N}\overline{b}(n) \oplus b_{m,l}(n), \tag{5}$$

где $\overline{b} = \left\{\overline{b}(n), n = 1...N\right\}$ – последовательность передаваемых информационных бит, $b_{m,l} = \left\{b_{m,l}(n), n = 1...N\right\}$ – вектор демодулированных бит сообщения, соответствующий сигналу $u_{m,l}$, $\oplus$ – знак сложения по модулю 2.

При этом ОСШ сигнала $u_{m,l}$ есть

$$\frac{W}{2\sigma_{\xi\eta,m}^{2}} = \frac{W}{2\left(\sigma_{\xi}^{2} + \sigma_{\eta,m}^{2}\right)}. \tag{6}$$

Сопоставив значения $\hat{P}(m)$ и $P(h^{2})$ (см. подробнее [6]), получим соответствующие значения $\hat{\sigma}_{\xi\eta,m}^{2}$, которые подставим в M уравнений

$$\hat{\sigma}_{\xi,m}^{2} = \hat{\sigma}_{\xi\eta,m}^{2} - \sigma_{\eta,m}^{2}, m = 1...M. \tag{7}$$

В результате можно получить оценку дисперсии шумовой составляющей ξ в форме

$$\hat{\sigma}_{\xi}^{2} = \mathrm{mean}\left(\hat{\sigma}_{\xi,m}^{2}\right) = \frac{1}{M}\sum_{m=1}^{M}\hat{\sigma}_{\xi,m}^{2}. \tag{8}$$

Минимаксная параметрическая оценка

Для удобства последующих изложений перепишем выражение (3) как зависимость от σ_{ξ}^{2}, то есть

$$P(\sigma_{\xi}^{2}) = \frac{1}{2}erfc\left(\sqrt{\frac{W}{2\sigma_{\xi}^{2}}}\right). \tag{9}$$

С учетом (6) вероятность ошибки на бит для сигналов с контролируемым шумом, получаемых из (4), есть

$$P(\sigma^2_{\xi\eta,m}) = \frac{1}{2} erfc\left(\sqrt{\frac{W}{2\sigma^2_{\xi\eta,m}}}\right) = \frac{1}{2} erfc\left(\sqrt{\frac{W}{2\left(\sigma^2_{\eta,m} + \sigma^2_{\xi}\right)}}\right). \qquad (10)$$

Однако фактически имеем лишь оценку вида (5), представляющую собой зависимость $\hat{P}(m) \equiv \hat{P}(\sigma^2_{\eta,m})$. Требуется найти лучшее приближение $P(\sigma^2_{\xi\eta,m})$ к $\hat{P}(m)$.

Для этого введем параметр α и представим оценку (5) в форме

$$\hat{P}(m) \approx \frac{1}{2} erfc\left(\sqrt{\frac{W}{2\left(\sigma^2_{\eta,m} + \alpha\right)}}\right). \qquad (11)$$

Тогда приближение модели (10) к оценкам $\hat{P}(m)$ будет характеризоваться функционалом вида

$$f(\alpha) = \max\left|\lg\left(\frac{1}{2} erfc\left(\sqrt{\frac{W}{2\left(\sigma^2_{\eta,m} + \alpha\right)}}\right)\right) - \lg\left(\hat{P}(m)\right)\right|, \qquad (12)$$

а лучшее приближение и соответственно искомая оценка дисперсии шумовой компоненты ξ есть минимум данного функционала, то есть

$$\hat{\sigma}^2_{\xi} = \arg\left\{\min_{\alpha}\left(f(\alpha)\right)\right\}. \qquad (13)$$

На рис. 1 приведен пример зависимости функционала $f(\alpha)$ от параметра α.

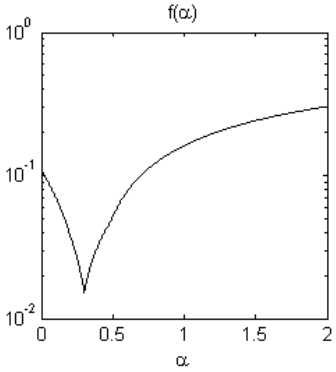


Рис. 1. Пример зависимости функционала $f(\alpha)$

Как отмечалось в [6], при практической реализации предложенного метода оценки может потребоваться подстройка модели (9), что связано с неоптимальностью реализации приема в демодуляторе. Это может быть сделано путем ввода поправочного коэффициента σ_0^2. Тогда выражение (12) преобразуется к виду

$$f(\alpha) = \max\left|\log\left(\frac{1}{2}erfc\left(\sqrt{\frac{W}{2\left(\sigma_{\eta,m}^2 + \sigma_0^2 + \alpha\right)}}\right)\right) - \lg\left(\hat{P}(m)\right)\right|. \qquad (14)$$

Численный эксперимент

Для сравнения результатов, полученных в [6], с полученными в данной работе численный эксперимент был проведен в тех же условиях: заданное значение ОСШ $h^2 = 10$ дБ, что соответствует дисперсии шумовой составляющей $\sigma_\xi^2 = 0.277$, вид сигналов и модуляция соответствуют стандарту Arinc 635 [9].

Оценки σ_ξ^2, получаемую из выражения (8) обозначим как $\hat{\sigma}_{\xi,\text{mean}}^2$, а оценку, получаемую из (13) обозначим как $\hat{\sigma}_{\xi,\alpha}^2$. Погрешности, указанных оценок оценим следующим образом:

$$\sigma_X^2 = \frac{1}{K-1}\sum_{k=1}^{K}\hat{\sigma}_{\xi,X}^2(k) - \sigma_\xi^2, \qquad (11)$$

где K – число проводимых испытаний, а индекс X соответствует способу получения оценки.

Результаты численного моделирования предложенного метода оценки дисперсии шумовой составляющей для различных значений N и L приведены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты численного моделирования

N	L	σ_{mean}^2	σ_α^2
100	100	0,0372	0,0253
	250	0,0369	0,0248
	500	0,0365	0,0242
50	100	0,0562	0,0330
	250	0,0529	0,0315
	500	0,0513	0,0303
30	100	0,0749	0,0423
	250	0,076	0,0426
	500	0,0741	0,0431

Заключение

Предложенный в работе метод позволяет в режиме реального времени производить оценку дисперсии шумовой составляющей, на основе которой могут быть получены текущие оценки ОСШ и ВОБ. При этом оценка осуществляется на относительно короткой длительности информационного сигнала в условиях, когда значение ОСШ достаточно велико, соответственно, ВОБ мала, что затрудняет использование классических методов в виду малого объема анализируемых данных. Таким образом, имеется возможность максимально оперативно менять параметры адаптивной радиолинии для достижения максимальных показателей эффективности.

Список источников

1. *Губин Н. М., Матлин Г. М.* Качество связи. Теория и практика. М.: Радио и связь, 1986.

2. MIL-STD-188–190. Methods for communications systems measurements. United States Department of Defense Interface Standard, 1990.

3. *Смаль М. С.* Бестестовые способы оценивания состояния коротковолнового радиоканала в адаптивных радиолиниях: дис. … на соиск. канд. техн. наук. СПб.: ГУАП, 2018.

4. *Rice M., Wicker S.* Sequential Scheme for Adaptive Error Control over Slowly Varying Channels // IEEE Trans.commun. 1994. P. 1533–1643.

5. *Cui T., Tellambura C.* Power Delay Profile and Noise Variance Estimation for OFDM // IEEE Commun. Lett. 2006. Vol. 10. N 1. P. 25–27.

6. *Егоров В. В. Маслаков М. Л.* Оценка отношения сигнал/шум для коротких выборок информационных сигналов // Цифровая обработка сигналов. 2021. № 3. С. 41–43.

7. *Тихонов В. И.* Статистическая радиотехника. М.: Советское радио, 1966.

8. *Финк Л. М.* Теория передачи дискретных сообщений М.: Советское радио, 1970.

9. ARINC Specification 635-4. HF Data Link Protocol. Dec. 22, 2003.

УДК 004.52

Р. С. Зулкашев*
студент
М. Д. Поляк*
старший преподаватель
*Санкт-Петербургский государственный университет
аэрокосмического приборостроения

АЛГОРИТМ СИНТЕЗА ДАТАСЕТА ДЛЯ ЗАДАЧИ ДИАРИЗАЦИИ

Рассматривается подход к созданию набора данных, который может использоваться при построении алгоритмов диаризации. Предлагаемый алгоритм обработки аудиозаписей позволяет создавать случайные паузы между отдельными звуковыми фрагментами, частично накладывать аудиодорожки друг на друга, а также добавлять к ним шум с заданными характеристиками. Результаты вычисления метрики DER на сгенерированных аудиофайлах с помощью модели pyannote показывают, что сгенерированные с помощью рассматриваемого подхода синтетические данные адекватны и соответствуют реальным аудиозаписям. Цель статьи – показать реализованные подходы к генерации аудиоданных для задачи диаризации и оценить качество полученных данных.
Ключевые слова: обработка аудиозаписей, диаризация, синтетические данные.

R. S. Zulkashev*
Student
M. D. Polyak*
Senior Lecturer
*St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

SYNTHESIZED AUDIO DATA FOR DIARIZATION PROBLEM

This article describes an approach to synthesize dataset for training diarization algorithms. The proposed algorithm for processing audio tracks is able to add random pauses between audio fragments, add partial overlap to adjacent audio segments and add random noise to the entire track or individual segment. Evaluation of DER metric using pyannote diarization model shows that synthesized audio data is adequate and correlates with real world audio tracks.
Keywords: audio processing, diarization, synthetic data.

Введение

Диаризация – это процесс разделения и идентификации говорящих на аудиозаписи. Эта задача особенно сложна при работе с многоголосными записями, такими как встречи, интервью и телефонные разговоры. Одна из основных проблем в задаче диаризации – доступность размеченных данных. Это связано с тем, что каждый участок речи должен быть аннотирован с точностью до миллисекунд. Уже создано несколько достаточно объемных наборов аудиоданных, но большинство из них состоит из записей на английском языке [3], [4]. Один из возможных способов создания русскоязычного набора данных – это его синтезация. Были проведены исследования по созданию и анализу искусственных аудиоданных, демонстрирующие их эффективность в обучении моде-

лей [1], [2], [5]. В этой статье будут обобщены существующие подходы и исследованы новые в способах генерации аудиоданных для задачи диаризации.

Код данной работы доступен по ссылке: https://github.com/Bumstern/synthetic_diarization_dataset_generation

Описание логики работы программы

Описание алгоритма генерации датасета стоит начать с описания входных и выходных наборов данных. На вход программе поступают аудиофайлы, содержащие запись голоса только одного говорящего. Файлы сгруппированы по каждому чтецу. В качестве выхода программа будет генерировать датасет с временными разметками для каждого участка с речью. Общую схему работы алгоритма можно описать в 5 основных этапах (рис. 1):

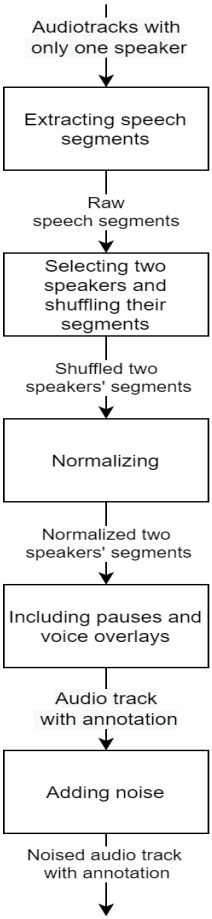


Рис. 1. Блок-схема работы программы

- выделение участков с речью из входного аудиофайла;
- случайный выбор двух чтецов и перемешивание их аудиофрагментов с речью;
- нормализация;
- добавление пауз и перебиваний;
- добавление шумов.

Первый этап создания датасета – это выделение фрагментов речи из аудиодорожки. Данную процедуру можно проделать с помощью алгоритма voice activity detection (VAD). В нашей реализации для этих целей была использована модель из pyannote [6]. Таким образом, после обработки аудиофайла получается список аудиосегментов с речью.

Следующий этап довольно примитивен и состоит в том, чтобы объединить списки фрагментов речи двух спикеров и добавить метки класса для каждого элемента. Затем получившийся массив фрагментов аудио и меток одинаково перемешивается. Так, в датасете достигается симуляция процесса диалога между людьми.

На третьем этапе фрагменты речи нормализуются по громкости. Для этого вычисляется средняя громкость переданных аудио фрагментов и громкость каждого отрезка речи смещается к этому среднему. Результаты такой обработки показаны на рис. 2, 3.

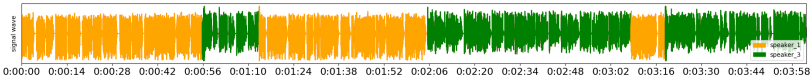


Рис. 2. Без нормализации по громкости

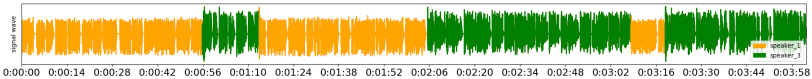


Рис. 3. После нормализации по громкости

Во время четвертого этапа, получившийся список аудиофрагментов, соединяется в единую аудиодорожку. Процесс работает в цикле по каждому аудио фрагменту и добавляет его к уже объединенным. При этом сохраняются метки времени каждого добавленного фрагмента. Объединение происходит случайно одним из двух способов:

- соединение через паузу;
- через наложение дорожек друг на друга.

В первом случае генерируется пауза, и если она достаточно продолжительная, то вставляется между объединенными кусками речи. Иначе элементы объединяются без добавления паузы. Вдохновившись исследованиями естественных диалогов [1], [7], [8], для генерации длительности паузы использовалось распределение Рэлея с модой в 200 мс.

Во втором же варианте сначала проверяется условие возможности наложения двух аудио фрагментов, а после вычисляется ее максимально возможная продолжительность. Условие проверки примитивное – один и тот же спикер не может перебивать сам себя. Время наложения ограничено:

- продолжительностью накладываемой дорожки;
- продолжительностью дорожки, на которую накладывают;
- не может накладываться на предыдущего спикера;
- не может выходить за рамки максимума и минимума времени наложения.

Далее, если вычисленная продолжительность наложения больше минимального порогового, то с заданной вероятностью может произойти наложение речи спикеров друг на друга. Причем реальное время наложения будет выбираться случайно из диапазона (пороговый минимум, вычисленный максимум). Это основная логика в генерации датасета. Но есть еще один подход для улучшения синтетических данных.

На последнем шаге к выходному аудиофайлу добавляется белый шум, который генерируется с помощью нормального распределения. В перспективе в качестве такого шума будут использоваться звуки толпы, улиц, леса и т. п. Необходимость в наложении шума исходит из того факта, что входные данные записаны в идеальных условиях, а диалоги без посторонних звуков в реальности редкое явление. Поэтому для приближения синтетического датасета к реальным данным необходимо добавлять шум.

В качестве примера один из сгенерированных аудио файлов программой показан на рис. 4, 5. На каждом изображении продемонстрировано как распределены фрагменты речи для каждого спикера на протяжении всей аудиодорожки. Цвет указывает, какому спикеру какой участок аудио принадлежит. График временных участков на рис. 4 служит для простой демонстрации взаимного наложения участков речи. Когда происходит наложение, накладываемый временной отрезок смещается на побочную (нижнюю) ось. Осциллограмма аудиодорожки на рис. 5 нужна для более полной информации об аудиозаписи.

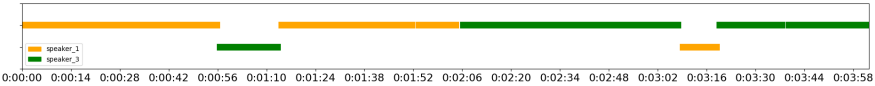


Рис. 4. График временных участков

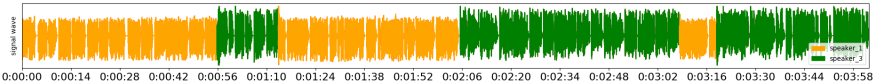


Рис. 5. Осциллограмма звуковой дорожки

Оценка качества диаризации

Оценим качество сгенерированных аудиоданных, пропустив их через модель диаризации и посчитав метрику DER. Метрика считается по формуле: (False Alarm + Miss + Overlap + Confusion) / Reference Length. То есть чем меньше DER, тем лучше качество диаризации. Метрика считалась на 1 аудиофайле с разными параметрами. Чтобы распределение речевых фрагментов не менялось при каждом запуске, используется фиксированный random state. Результаты представлены в табл. 1.

Таблица 1

Метрика DER

Аудио	DER
Без наложения	0.0105
С наложением	0.0147
Без наложения + шум (–40dB)	0.0105
С наложением + шум (–40dB)	0.0143
С наложением + больше шума (–3dB)	0.177

Результат показывает, что наложения аудиофрагментов друг на друга и добавление шума усложнили процесс диаризации. Значит, сгенерированные данные приближаются к реальным. Но на сколько хорошо? Для сравнения вычисленная метрика DER на реальной аудио дорожке на английском языке равна 0.111. Но в данном примере аудио содержало уже 9 говорящих, а также посторонний шум (не белый шум), тем самым объясняя сильную разницу в качестве. Следовательно, для достижения более качественной симуляции нужно увеличить кол-во спикеров, а также накладывать более сложный шум. Также еще стоит улучшить нормализацию по громкости, так как на данном этапе можно визуально отличить, кто и когда начинает говорить, просто взглянув на осциллограмму.

Заключение

Искусственные данные имеют свои преимущества и недостатки. Генерация набора данных гораздо проще и дешевле, чем сбор реальных данных. Правда также и то, что синтетический набор данных неограничен в количестве и имеет множество способов параметризации. Однако следует отметить, что синтетические данные не могут полностью заменить реальные, потому что нельзя в полной мере воссоздать все возможные условия записи и особенности стиля общения людей. Кроме того, создание высококачественных синтетических данных требует определенных знаний в предметной области.

Результаты метрик показывают, что сгенерированные аудиоданные имеют еще недостаточно хорошее качество, но уже являются неплохим начальным приближением к реальному распределению. Для более качественной генерации

диалогов программа должна уметь создавать более сложный шум, а также поддерживать большее количество спикеров.

Таким образом, использование синтетических данных для задачи диаризации может быть эффективным решением при правильном подходе к их созданию, но также требует осторожности и дополнительной проверки качества модели на реальных данных.

Список источников

1. *Karpov A., Jokisch O., Potapova R.* A Free Synthetic Corpus for Speaker Diarization Research // Speech and Computer. SPECOM 2018. Lecturer Notes in Computer Science. Vol. 11096. Springer, Cham.

2. *Landini F., Lozano-Diez A.* From Simulated Mixtures to Simulated Conversations as Training Data for End-to-End Neural Diarization, 2022; arXiv: 2204. 00890.

3. *Ryant N., Singh P., Krishnamohan V.* The Third DIHARD Diarization Challenge. 2020, arXiv:2012.01477.

4. Awesome Speaker Diarization. Datasets.github. URL: https://github.com/wq2012/awesome-diarization#Datasets (дата обращения: 13.03.2023).

5. *Popov A., Ivanov S.* Neural Network Models for Russian Language Speaker Recognition. 2021 International Conference on Quality Management, Transport and Information Security, Information Technologies (IT&QM&IS), Yaroslavl, Russian Federation, 2021. P. 533–536.

6. *Bredin H., Laurent A.* End-to-end speaker segmentation for overlap-aware resegmentation. 2021, Proc. Interspeech 2021.

7. *Heldner M., Edlund J.* Pauses, gaps and overlaps in conversations // Journal of Phonetics. Vol. 38, Issue 4. 2010. P. 555–568.

8. *Stivers T., Brown P., Englert C.* Universals and cultural variation in turn-taking in conversation. 2009, Proceedings of the National Academy of Sciences.

УДК 621.391

М. Н. Исаева*
ассистент
А. А. Овчинников*
кандидат технических наук, доцент
*Санкт-Петербургский государственный университет
аэрокосмического приборостроения

ОБ ОСОБЕННОСТЯХ ПОИСКА ИНФОРМАЦИОННЫХ СОВОКУПНОСТЕЙ БЛОЧНО-ПЕРЕСТАНОВОЧНЫХ НИЗКОПЛОТНОСТНЫХ КОДОВ ПРИ ИСПРАВЛЕНИИ ПАКЕТОВ ОШИБОК

Рассматривается вероятность нахождения информационных совокупностей при исправлении пакетов ошибок, а также случайные матрицы и блочно-перестановочные матрицы. Приведены графики зависимости вероятности нахождения информационных совокупностей от количества позиций, которые рассматриваются при поиске информационных совокупностей.
Ключевые слова: блочно-перестановочные конструкции, пакеты ошибок, декодирование по информационным совокупностям, вероятность нахождения информационной совокупности.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, соглашение № FSRF-2023-0003 «Фундаментальные основы построения помехозащищенных систем космической и спутниковой связи, относительной навигации, технического зрения и аэрокосмического мониторинга».

M. N. Isaeva*
Assistant
A. A. Ovchinnikov*
PhD Sc. Tech., Associate Professor
*St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

ABOUT THE PECULIARITIES OF SEARCHING FOR INFORMATION SETS OF BLOCK-PERMUTATION LDPC-CODES WHEN CORRECTING ERROR BURSTS

This article discusses the probability of detecting information sets while correcting error bursts. Random matrices and block permutation matrices are considered. Graphs of the dependence of the probability of finding information sets on the number of positions that are considered when searching for information sets are given.
Keywords: block permutation matrices, error bursts, decoding by information sets, the probability of detecting information sets.

Введение

Во времена цифровых технологий ежедневно объем информации, циркулирующий по каналам связи, бесконечно возрастает. Из-за различных причин в каналах связи могут возникать ошибки, которые приводят к искажению двоич-

ной передаваемой последовательности, что при декодировании может изменить суть передаваемого сообщения.

Существует декодирование по информационным совокупностям, которое способно исправлять ошибки. В теории помехоустойчивого кодирования чаще всего рассматривается исправление независимых ошибок. Однако в реальных каналах связи ошибки часто сгруппированы внутри передаваемой последовательности и образуют пакеты. При исправлении пакетов ошибок сложность декодирования по информационным совокупностям может быть заметно уменьшена [1].

Известные оценки вероятности нахождения информационной совокупности проводятся для случайных матриц, а для исправления пакетов ошибок могут использоваться широко распространенные блочно-перестановочные LDPC-коды. В данной статье рассматривается вопрос вероятности нахождения С при исправлении пакетов ошибок.

Декодирование по информационным совокупностям

Информационной совокупностью называется множество $\gamma=\{ 1 \le j_1 < j_2 < \ldots < j_k \le n \}$, при задании компонент $\alpha_{j_1},\ldots,\alpha_{j_k}$ однозначно определяющее кодовое слово. Если информационная совокупность свободна от ошибок, то принятое слово может быть восстановлено однозначно [2], [3]. Поиск информационной совокупности в порождающей матрице **G** происходит следующим образом: берутся произвольные k столбцов этой матрицы и составляется матрица $\mathbf{M}_\gamma$. Позиции взятых k столбцов будут являться и. С. γ в том случае, если матрица $\mathbf{M}_\gamma$ будет невырожденной, то есть ее ранг будет равен числу k. Также для $\mathbf{G}_\gamma = \mathbf{M}^{-1} \cdot \mathbf{G}$ на позициях γ должна образоваться единичная матрица.

Назовем пакетом ошибок вектор длиной b, в котором первый и последний ненулевой элемент располагаются не далее, чем на b позиций друг от друга. Пакет ошибок может быть циклическим, то есть начинаться в конце принятого слова и заканчиваться в его начале. При декодировании пакета все ошибочные позиции группируются и это может быть учтено при поиске информационных совокупностей: можно ограничивать поиск k элементов С позициями, не входящими в предполагаемое расположение пакета. Таким образом, область поиска информационной совокупности также образует собой замкнутый интервал некоторой длины $k+\Delta$. При этом для сокращения числа С имеет смысл выбирать длину интервала как можно меньшей, то есть значение Δ следует минимизировать.

Известно [4], что вероятность того, что случайная матрица **M** размера $k\times(k+\Delta)$ будет иметь полный ранг оценивается как

$$P(rank(\mathbf{M}_{k,k+\Delta}) = k) = Q_\Delta = \prod_{i=\Delta+1}^{\infty}\left(1-\frac{1}{2^i}\right), \Delta \ge 0. \qquad (1)$$

Из данной формулы получим, что для $\Delta=0$ значение этой вероятности будет $Q_0 \approx 0{,}29$. Но структура порождающих и проверочных матриц, использу-

мых помехоустойчивых кодов может быть далека от случайной. С учетом ограничения на интервал поиска при исправлении пакетов ошибок формула (1) может оказаться некорректной. Возникает задача оценки вероятности нахождения С с учетом сформулированных ограничений.

LDPC-коды

В настоящей статье в качестве примера рассматриваются коды с малой плотностью проверок на четность или LDPC-коды. Применение этих кодов для исправления пакетов ошибок рассматривалось в [5], [6]. LDPC-коды в 1962 году предложил Р. Галлагер [7]. Такие коды задаются с помощью разреженной проверочной матрицы **H**. Их можно задать на основе блочно-перестановочные конструкции. Размер этих блоков – m на m, количество блоков – γ на ρ. Структура проверочной матрицы:

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} \mathbf{C}^{t_{11}} & \mathbf{C}^{t_{12}} & \cdots & \mathbf{C}^{t_{1\rho}} \\ \mathbf{C}^{t_{21}} & \mathbf{C}^{t_{22}} & \cdots & \mathbf{C}^{t_{2\rho}} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{C}^{t_{\gamma 1}} & \mathbf{C}^{t_{\gamma 2}} & \cdots & \mathbf{C}^{t_{\gamma\rho}} \end{bmatrix}, \qquad (1)$$

где t_{ij} – степени матрицы циклической перестановки, которые задают блоки $\mathbf{C}^{t_{ij}}$ проверочной матрицы **H**. Можно обратить внимание, что в матрице вида (1) столбцы двух подряд идущих блоков в сумме всегда образуют нулевой столбец. Это может влиять на поиск информационной совокупности на подряд идущих позициях.

Классическим способом поиска и. С. является нахождение позиций k линейно независимых столбцов, образующих невырожденную $k\times k$ подматрицу порождающей $k\times n$ матрицы. Однако поиск С может быть осуществлен и по проверочной матрице. Использование проверочной матрицы вместо порождающей для поиска и с может быть более вычислительно эффективным для кодов со скоростью $R > 1/2$.

Поиск информационной совокупности

Рассмотрим случайные блочно-перестановочные конструкции, в которых блоки являются матрицей циклической перестановки, t_{ij} выбираются равномерно из интервала $[0{:}m-1]$. Количество блоков γ=[2; 3; 4] и ρ=6, размер блоков m=11. Кроме этого, будем рассматривать случайные матрицы схожего размера k=22, n=66, в которых ненулевые элементы располагаются с вероятностью 0,5.

На рис. 1*а* изображен график вероятности нахождения С ($P_{\text{и. С.}}$) при Δ=0. Обратим внимание, что при значении γ=3 на графике присутствуют некоторые пики, возникающие на позициях конца блоков блочно-перестановочной матрицы. Как говорилось выше, столбцы двух подряд идущих блоков всегда линейно зависимы, таким образом, если интервал поиска невырожденной матрицы со-

держит в себе два блока целиком – такая матрица всегда вырождена. При длине интервала равного $3m–1$ вероятность этого события равна единице.

Рассмотрим интервал длиной $3m–2$, тогда существует единственно возможное положение интервала, не включающее два подряд идущих блока. Будем считать, что поиск производится по проверочной матрице **H** и рассматриваются интервалы длины r, где r – ранг матрицы **H**, который не превышает $m\cdot\gamma - (\gamma - 1)$. Появление С в данном случае невозможно при длине интервала r превышающего $3m - 2$, тогда: $m\cdot\gamma - (\gamma - 1) \geq 3m - 1$, отсюда $\gamma \geq \frac{3m-2}{m-1}$. Функция в правой части равна 4 при m=2 и монотонно убывает с ростом m. Таким образом, при $\gamma \geq 4$ блочно-перестановочная конструкция (1) не имеет С из подряд идущих позиций. При γ=3 такая С возможна только при непопадании интервала в конец блока, при γ=2 с учетом $rank(\mathbf{H})=r=2m - 1$ попадание $2m$ подряд идущих столбцов в окно размером r невозможно. Это объясняет форму всех кривых на рис. 1*а*.

Теперь рассмотрим, как изменятся формы кривых при $\Delta\neq0$ (рис. 1*б*, 2*а*, *б*). Для γ=2 увеличение Δ приводит к уменьшению $P_{\text{и. с}}$, поэтому после определенного значения Δ нет смысла увеличивать. Для γ=3 с увеличением Δ $P_{\text{и. с}}$ появляется не только в позициях конца блоков. Для γ=4 $P_{\text{и. с}}$=0 до того, как стали рассматривать Δ=10. При значении Δ=20 для γ=2 вероятность стремится к нулю, а для γ=4, наоборот, выросла, даже относительно «пиков» из предыдущего графика. Также, как можно заметить, значение вероятности для случайной матрицы колеблется в районе отметки 0,3, что соответствует значению из формулы (1) для $Q_0 \approx 0{,}29$. Таким образом, для разных размеров блочно-перестановочных матриц существует свое значение Δ, при котором вероятность нахождения информационной совокупности будет максимальной, причем не только на концах блоков.

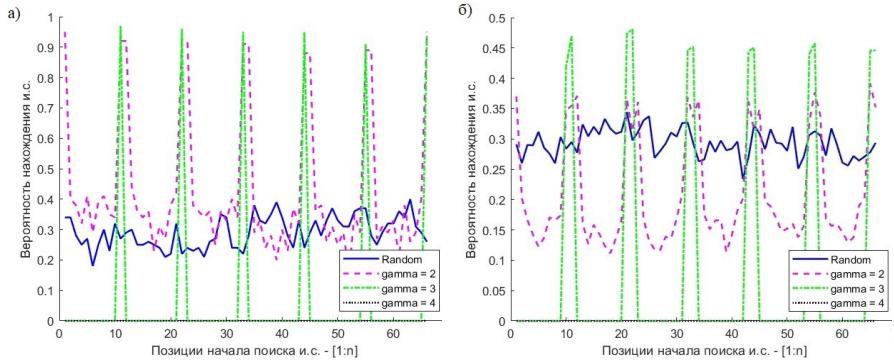


Рис. 1. График вероятности нахождения С: а – Δ=0; б – Δ=1

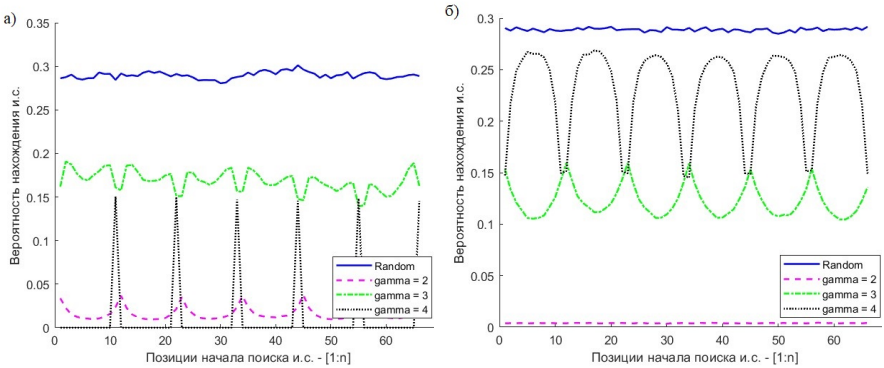


Рис. 2. График вероятности нахождения и С: а – при Δ=10; б – Δ=20

Заключение

В данной статье была рассмотрена вероятность нахождения информационных совокупностей в случайных матрицах и в блочно-перестановочных матрицах, приведены соответствия между порождающей и проверочной матрицей при поиске информационных совокупностей. Было выяснено при каких значениях Δ существует вероятность нахождения информационных совокупностей для различных блочно-перестновочных матриц.

Список источников

1. *Исаева М. Н., Овчинников А. А.* О применении декодирования по информационным совокупностям при исправлении пакетов ошибок // Радиотехнические, оптические и биотехнические системы. Устройства и методы обработки информации: Четвертая Всерос. науч. конф.: сб. докл. СПб.: ГУАП, 2023. С. 188–191.

2. *Barg A., Krouk E.* On the complexity of minimum distance decoding of long linear codes // IEEE Transactions on Information Theory. Vol. 45. N 5. P. 1392–1405.

3. *Baldi M.* QC-LDPC Code-Based Cryptography. Springer, 2014. 120 p.

4. *Berlekamp E.* The technology of error correcting codes, Proc. IEEE. 1980. Vol. 68. P. 564–593.

5. *Ovchinnikov A., Veresova A., Fominykh A.* Decoding of linear codes for single error bursts correction based on the determination of certain events // Informatsionno-upravliaiushchie sistemy [Information and Control Systems], 2022. N 6. P. 41–52.

6. *Ryan W., Lin S.* Channel Codes: Classical and Modern. New York: Cambridge University Press, 2009. 710 p.

7. *Gallager R.* Low-Density Parity-Check Codes // IRE Transactions on Information Theory. Jan. 1962. Vol. 8. N 1. P. 21–28.

УДК 004.07

К. В. Ковальчук*
студент
М. Н. Исаева*
ассистент
*Санкт-Петербургский государственный университет
аэрокосмического приборостроения

СПОСОБЫ РЕАЛИЗАЦИИ ПЕРЕХВАТА И ПОДМЕНЫ ПАКЕТОВ В СЕТИ

Рассмотрены некоторые виды сетевых атак и методы их предотвращения. Приведены конкретные примеры реализации сниффинга и спуфинга.
***Ключевые слова*:** сетевые атаки, спуфинг, сниффинг.

K. V. Kovalchuk*
Student
M. N. Isaeva*
Assistant
*St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

METHODS OF IMPLEMENTATION OF SNIFFING AND SPOOFING IN NETWORK

The article discusses some types of network attacks. Specific examples of implementation of sniffing and spoofing are given. Methods of preventing such attacks are considered.
Keywords: network attacks, spoofing, sniffing.

Введение

С появлением Интернета возникла проблема защиты от сетевых атак. Все виды несанкционированного доступа к внутренней сети могут привести к неприятным последствиям для какой-либо организации. Вопрос защиты от атак, приводящих к нарушению работы сети, и утечек информации всегда остается актуальным, поскольку с течением времени злоумышленники придумывают новые способы проведения сетевых атак. Таким образом, всегда остается потребность анализировать их и противостоять им.

В данной статье рассматриваются различные виды сетевых атак, в частности, сниффинг и спуфинг. И приведены методы защиты от данных видов атак.

Виды сниффинга

Под сетевой атакой подразумевается негативное воздействие на ресурсы информационной системы, направленные на реализацию несанкционированного доступа или перехвата трафика. Подобные атаки реализуются по сетевым протоколам, в частности, можно перехватывать пакеты, заменять IP-адреса и MAC-адреса, а также анализ чужого трафика в корыстных целях. Программа

для анализа трафика называется сниффер. Наиболее популярной такой программой является Wireshark. Исходя из возможностей снифферов появилась возможность реализовывать сетевые атаки.

Одним из видов атак можно назвать сниффинг пакетов, который подразумевает прослушивание пакетов, передающихся по каналу при помощи снифферов. Сниффинг можно разделить на два вида.

Пассивный − данный вид основан на перехватывании трафика, проходящего через компьютер, без каких-либо его изменений. Такой вид воздействия достаточно тяжело обнаружить в виду отсутствия каких-либо подозрительных действий. Угрозой в данной случае является возможное нарушение Политики безопасности организации. При пассивном виде сниффига можно принимать и анализировать пакеты, сравнивая MAC-адреса в заголовке пакета и у сетевой карты, а также же принимать и анализировать все пакеты, если сетевая карта работает в «неразборчивом» режиме (promiscuous mode).

Активный − данный вид включает в себя различные способы обмана сетевого оборудования. Такой сниффинг может привести к нарушению работоспособности сети, а также к изменению информации. В отличие от пассивного, активный сниффинг возможно обнаружить и идентифицировать источник.

Активный сниффинг применим к сетям на коммутаторах. Например, для отправки данных сети на коммутаторах используют протокол ARP (Address Resolution Protocol – протокол определения адреса) с целью узнать MAC-адрес, так как обращение к нужному устройству по-прежнему происходит по нему. ARP-протокол не имеет никакой проверки на то, нужное ли устройство ответило на отправленный запрос, таким образом, злоумышленник может получить доступ к данным отправив свой MAC-адрес в ответ на такой запрос.

Существует также и другой способ, называемый «MAC-флудингом», основная идея которого заключается в перегрузке коммутатора, достигаемой отправлением большого количества пакетов с неверными MAC-адресами. В таком случае коммутатор перестанет справляться с обработкой пакетов и начнет работать в режиме хаба, тем самым злоумышленник может перейти уже к пассивному виду сниффинга.

Способы защиты от сниффинга

В качестве мер по предотвращению обоих видов сниффинг-атак следует ограничить доступ к физическим устройствам, пользоваться шифрованием данных, избегать протоколы: Telnet, Rlogin, HTTP, SMTP, NNTP, POP, FTP, IMAP, они наиболее уязвимы к этому типу атак [1].

Раннее уже было сказано, что обнаружение пассивного сниффинга может быть достаточно затруднительным: изменения происходят только на том устройстве, которое занимается прослушиванием, из-за чего придется проверять нагрузку на каждом устройстве, что при большом количестве устройств нерационально из-за количества потраченного времени. Еще существует способ с отправкой широковещательных эхо-запросов с неверным MAC-адресом, в таком случае правильно работающие устройства не отправят ничего в ответ, а

устройство с сетевой картой в «неразборчивом» режиме, наоборот, ответит на запрос. Однако злоумышленник может запретить исходящий ICMP-трафик и такое устройство уже не будет отвечать, что делает такой способ обнаружения не очень надежным. Лучшим решением будет − избегать сетей, построенных на хабе, и пользоваться коммутаторами и маршрутизаторами.

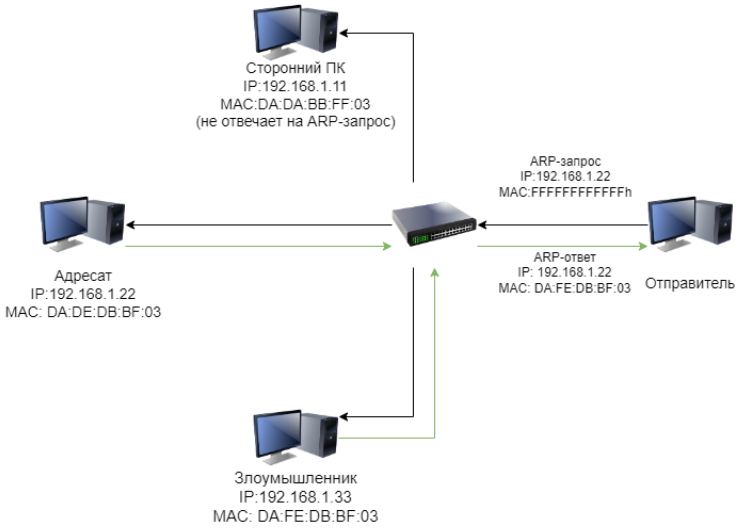


Рис. 1. Схема сниффинга с подменой MAC-адреса

С активным сниффингом бороться можно следующим образом: для обнаружения подмены MAC-адреса путем ответа на ARP-запросы (схема приведена на рис. 1) можно использовать протокол RARP. Он возвращает IP-адрес в ответ на запрос с MAC-адресом, по сути выполняя действия обратные протоколу ARP. Таким образом, возможно попробовать найти несоответствие и обнаружить устройство злоумышленника по MAC-адресу. В качестве мер предотвращения такой атаки можно использовать статичные ARP-записи. Для этого придется вручную прописывать такие записи на каждом компьютере, что ограничивает ситуации, когда можно воспользоваться этим способом. Также можно пользоваться маршрутизаторами, в таком случае злоумышленники уже не смогут подменять MAC-адреса, но они все еще могут обходить их путем фальсификации IP-маршрутов, однако это уже сложнее. В качестве защиты от MAC-флудинга лучшим решением будет приобретение более мощного оборудования, способное справиться с подобными нагрузками.

Виды спуфинга

Помимо анализа трафика, злоумышленнику также может быть выгодно подменять данные для того, чтобы выдавать себя за доверенное лицо. Такие

атаки называются спуфингом. К ним можно отнести любые виды обмана, при которых злоумышленник выдает себя за кого-то, кому человек или система доверяет.

Можно выделить наиболее распространенные виды спуфинга [2].

ARP-спуфинг – о нем уже было сказано выше, так как он использовался для активного сниффинга, когда злоумышленник отвечал на ARP-запрос, отправляя свой MAC-адрес и получая при этом доступ к отправляемым пакетам.

IP-спуфинг – очень схожий по концепции с предыдущим вид спуфинга, заключающийся в подмене IP-адреса (рис. 2).

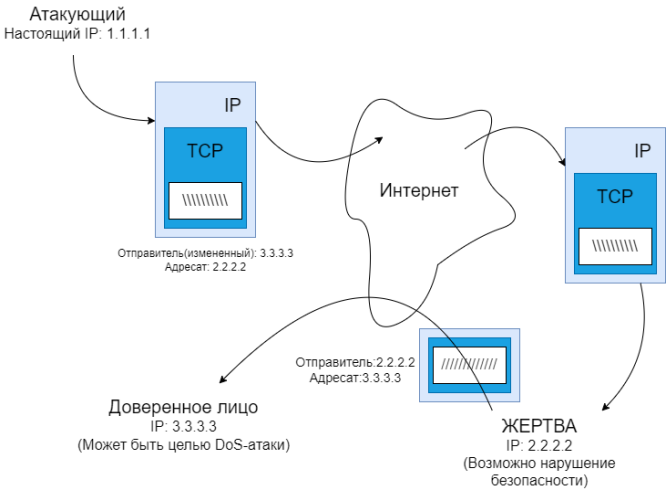


Рис. 2. Схема реализации IP-спуфинга

Атака «человек по середине» – вид атаки, когда злоумышленник внедряется в канал между двумя абонентами и для каждой стороны представляется другой, которой изначально и отправлялись данные. Например, злоумышленник создает поддельную Wi-fi сеть, вставая между устройством, подключающемуся к ней, и настоящей Wi-fi сетью, тем самым получая доступ к пересылаемым сообщениям.

DNS-спуфинг – вид спуфинга, при котором кэш DNS-серверов изменяют. Из-за этого пользователь, который хотел перейти на определенный сайт по доменному имени, попадает на тот сайт, который указал злоумышленник, из-за такого метода воздействия этот способ также называют «отравлением кэша».

Спуфинг с подменой электронной почты – спуфинг, при котором злоумышленник шлет письма с адреса, который должен показаться человеку знакомым и доверенным. Таким образом, доверившийся пользователь оказывается обманут и его устройство может быть заражено вредоносным программным обеспечением.

Способы защиты от спуфинга

Если говорить о мерах защиты от спуфинга, в первую очередь хочется отметить, что успешность их проведения также зависит от того, чтобы жертва доверилась мошеннику. Способы и методы, которыми достигается подобный результат, называют социальной инженерией. От нее, к сожалению, нельзя защититься какими-то техническими средствами, следовательно, такую уязвимость стоит исключать путем работы непосредственно с пользователем. Например, осведомляя и предупреждая его о различных видах подобного мошенничества.

Касательно программных средств, можно вспомнить про брандмауэр и различные антивирусы, а также встроенную защиту браузеров, которая предупреждает о возможном вредоносном сайте или файле.

Как и во всех сферах, большую популярность приобретает искусственный интеллект: на данный момент активно изучаются и разрабатываются методы машинного обучения в целях защиты от спуфинга [3]. Например, конволюционные нейронные сети могут быть использованы для обнаружения малозаметных различий в голосе (подмена голоса также является видом спуфинга). Однако на данный момент применение нейронных сетей достаточно узконаправленное. В основном они используются в надежде обнаружить крайне малые отличия, незаметные для обычного человека.

Заключение

В данной статье были рассмотрены некоторые виды сетевых атак, разобраны способы их обнаружения и предотвращения. Знание этих способов актуально не только специалистам в области информационных технологий, но и обычным пользователям, чтобы обезопасить себя в Интернете.

Список источников

1. *Фленов М. Е.* Linux глазами хакера: СПб.: БХВ-Петрбург, 2006. 386 с.

2. *Грэм Д.* Этичный хакинг. Практическое руководство по взлому. СПб.: Питер, 2022. 384 с.

3. *Aljabri M.* Intelligent techniques for detecting network attacks: review and research directions // Sensors.2021. Vol. 21. N 21. P. 7070.

УДК 621.496.4

Е. А. Мариенко*
студент
А. Ю. Колесникова*
студентка
С. К. Смородская*
студентка
Н. В. Степанов
ассистент
*Санкт-Петербургский государственный университет
аэрокосмического приборостроения

ОЦЕНКА ЗАДЕРЖКИ ВЫВОДА ДАННЫХ В FLIGHTRADAR24

FlyghtRadar24 – это сервис, который выводит координаты, высоту, скорость самолетов и ряд другой полезной информации. В связи с тем, что принятые сигналы проходят обработку на сервере этого приложения, данные приходят с некоторой задержкой. Используя дополнительное устройство для изучения радиосигналов – HackRF, мы можем оценить время приема сигнала и время отображения данных на FlyghtRadar24 и рассчитать задержку. В этой статье мы описали различие по времени отображения полезной информации о данных самолетов на сервисе FlyghtRadar24 и прием сигналов с устройства программно-определяемого радио (Software Defined Radio, SDR). Рассчитав задержку между временем отправки пакета данных с воздушного суда и временем отображения этих данных на веб-интерфейсе FlyghtRadar24, можно сделать вывод о том, что информация на этом сервисе не является актуальной.
***Ключевые слова*:** система для приема ADS-B сигналов, наблюдение за воздушным движением, авиационная связь, системы реального времени, спутниковая система навигации, технология наблюдения ADS-B, SDR.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, соглашение № FSRF-2023-0003 «Фундаментальные основы построения помехозащищенных систем космической и спутниковой связи, относительной навигации, технического зрения и аэрокосмического мониторинга».

E. A. Marienko*
Student
A. Y. Kolesnikova*
Student
S. K. Smorodskaya*
Student
N. V. Stepanov
Assistant
*St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

FLIGHTRADAR24 DATA OUTPUT DELAY ESTIMATION

FlyghtRadar24 is a service that displays coordinates, altitude, aircraft speed and a number of other useful information. Due to the fact that the received signals are processed on the server of this application, the data arrives with some delay. Using an additional device for studying radio signals –

HackRF, we can estimate the signal reception time and data display time on FlyghtRadar24 and calculate the delay. In this article, we have described the difference in time between displaying useful information about aircraft data on the FlyghtRadar24 service and receiving signals from an SDR device. Having calculated the delay between the time of sending a data packet from an aircraft and the time of displaying this data on the FlyghtRadar24 web interface, we can conclude that the information on this service is not up to date.
Keywords: ADS-B signal receiving system, air traffic surveillance, aviation communications, real-time systems, satellite navigation system, ADS-B surveillance technology, SDR.

Введение

Область приема и обработки сигналов, излучаемых передатчиками, в первую очередь с целью обнаружения сигналов на частоте 1090 МГц, принадлежит системе ADS-B. Эта технология представляет собой систему передачи информации о местоположении воздушного суда по GPS, высоте, путевой скорости и других данных на наземные станции и другие самолеты один раз в секунду, в то время как обычным радарам может потребоваться от 5 до 12 секунд, чтобы обновить положение самолета. Авиадиспетчеры и оборудованные воздушные суда могут получить эту информацию. Данная система в настоящее время внедряется во всем мире и позволяет пилотам и наземным диспетчерам наблюдать за движением самолетов на экране компьютера, не полагаясь на традиционные радары [1].

Модель системы

В статье рассматривается две модели системы. В базовом сценарии сигналы принимаются с нескольких приемников в одном районе, собираются вместе, а затем система их автоматически анализирует [2]. Далее данные проходят обработку на сервере и выводятся в веб-приложении. В сценарии прямой связи данные сигналов принимаются на дополнительное устройство для изучения радиосигналов, расшифровываются и напрямую приходят на персональный компьютер. Под расшифровкой понимается получение сигнала, его демодуляция и декодирование.

Для обеих моделей первым этапом является прием сигнала. Он имеет длительность 120 микросекунд, поэтому для разбора каждой компоненты мы используем SDR-приемник с частотой дискретизации 2 МГц. На этапе декодирования нужно получить битовый поток. Наш сигнал закодирован с помощью manchester encoding – этот способ базируется на получении разницы уровней в полубайтах [3].

Структура нашего сигнала имеет следящие поля:

- Downlink Format (5 бит) – определяет тип сообщения;
- ICAO (24 бита) – уникальный код самолета;
- DATA (112 бит) – декодируемые данные [4].

Для нашего исследования были определены такие условия применения, как:

- дальность приема сигнала, ограниченная 100 км, из-за физических характеристик антенны;

- выборка была сформирована на основании данных с трех рейсов, протяженность каждого из которых составляла 3 минуты;
- получение данных осуществлялось с SDR HackRF One, которая имеет возможность как принимать, так и передавать радиосигналы в диапазоне 1 МГц – 6 ГГц [5];
- антенна на 1090 МГц, мы используем ground pole антенну, сделанную с использованием ВЧ BNC разъема и медного провода;
- программное обеспечение – GNU радио версии 3.10.

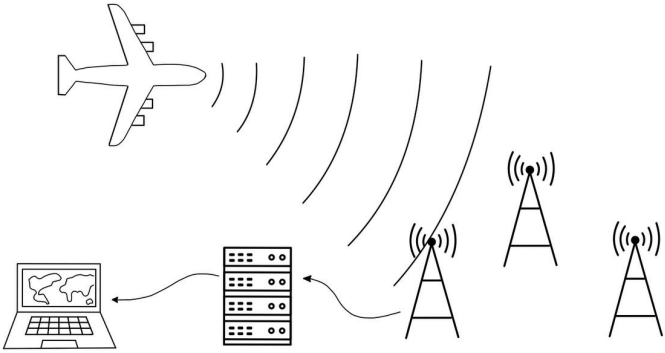


Рис. 1. Модель системы FlightRadar24

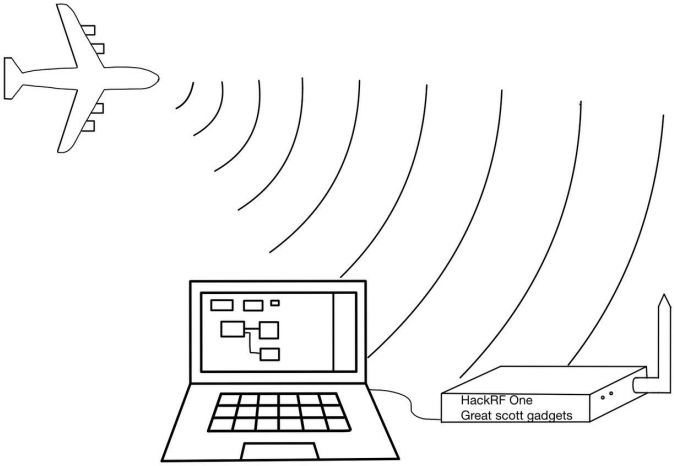


Рис. 2. Модель системы прямой связи

Результаты эксперимента

Для сравнения результатов были получены данные с FlightRadar24 и с собственной смоделированной системы с помощью устройства HackRF. Получение данных первым способом происходило с задержкой приблизительно в 5 секунд. Это связано с тем, что сигналы принимаются не на одно устройство, как в нашей модели, а на несколько приемников в одном районе, после чего проводится анализ выборки и обработка этих данных. Также стоит учесть, что сигналы, приходящие на SDR, выводятся только в консоль персонального компьютера, в то время как данные FlightRadar24 передаются сначала на сервер, а далее отсылаются на веб-интерфейс, что занимает время.

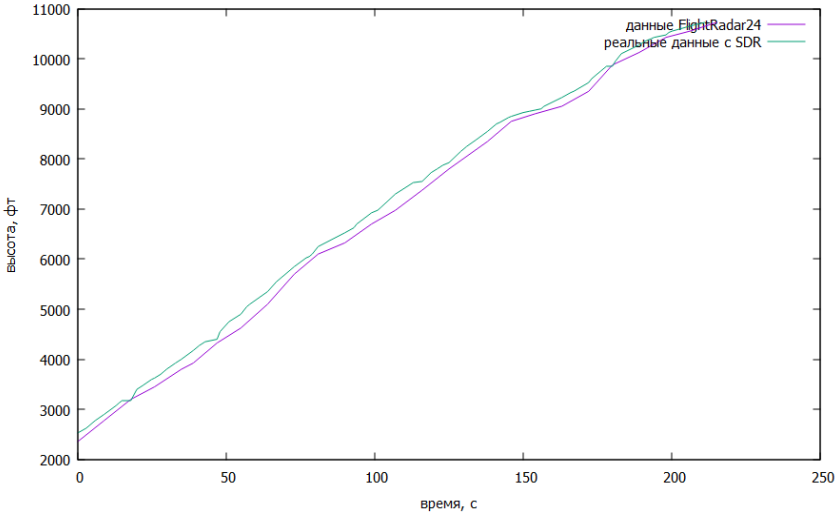


Рис. 3. График зависимости высоты, набранной самолетом, от времени

Выборка производилась на основании трех экспериментов. Результаты одного из них приведены на графике зависимости высоты, набранной самолетом, в футах, от времени в секундах (рис. 3).

Заключение

В статье была получена оценка задержки получения данных на FlightRadar24. После того как данные получены серверами FlightRadar24, их необходимо обработать, прежде чем их можно будет отобразить на веб-сайте. Это время обработки может зависеть от количества отслеживаемых рейсов, сложности маршрута полета и других факторов. Это может быть актуально в контексте мониторинга или анализа данных о воздушном движении, а также при оценке надежности или точности FlightRadar24, как источника данных.

Список источников

1. *Grekhov A., Kondratiuk V.* RPAS ADS-B and Trajectory Control Data Transmission via Satellite // Proceedings of the National aviation university. 2017. N 3. P. 26–32.

2. *Фреире К. Ф., Травес Н. С., Шадрина О.* Мониторинг воздушных судов с использованием ads-b у rtl-sdr // Информационные технологии, системный анализ и управление (ИТСАУ-2021). 2021. С. 572–575.

3. *Kharchenko V., Barabanov Y., Grekhov A.* Modeling of Satellite Channel for Transmission of ADS-B Messages // Proceedings of the National Aviation University. 2012. Vol. 3. P. 9–14.

4. *Lustig M., Ong F.* URL: https://inst. eecs. berkeley. edu/~ee123/sp16/lab/lab2/lab2-TimeDomain-SDR.html (дата обращения: 19.03.2023).

5. *Бойчук Т. С., Закиров В. И.* Анализ эффективности sdr-технологий в системах беспроводной передачи данных // Актуальные вопросы технических наук в современных условиях. 2018. С. 77–79.

УДК 004.891

Е. В. Пастухова*
кандидат технических наук, доцент
Ю. С. Романова*
кандидат технических наук, доцент
*Санкт-Петербургский государственный университет
аэрокосмического приборостроения

ПРИКЛАДНОЙ ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ: ЭКСПЕРТНЫЕ СИСТЕМЫ

Рассматривается основные алгоритмы и применение в анализе систем одного из методов искусственного интеллекта – метода экспертных систем. Использование этого метода позволяет принимать решения, схожие с решениями эксперта в заданной предметной области и широко используется в самых различных науках, бизнесе и промышленности.
Ключевые слова: экспертные системы, методы искусственного интеллекта, анализ систем, программные решения.

E. V. Pastukhova*
PhD Sc. Tech., Associate Professor
Y. S. Romanova*
PhD Sc. Tech., Associate Professor
*St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

APPLIED ARTIFICIAL INTELLIGENCE: EXPERT SYSTEMS

The article deals with the main algorithms and the application in the analysis of systems of one of the methods of artificial intelligence – the method of expert systems. The use of this method allows you to make decisions similar to the decisions of an expert in a given subject area and is widely used in a variety of sciences, business and industry.
Keywords: expert systems, methods of artificial intelligence, analysis of systems, software solutions.

Экспертные системы (ЭС) – это компьютерные программы, которые используют знания эксперта в определенной области для решения поставленной задачи. Они были разработаны еще в 70-х годах прошлого века, однако с развитием искусственного интеллекта и машинного обучения, экспертные системы приобрели новую жизнь.

Сегодня ЭС используются в самых разных областях – от медицины и биоинформатики до финансов и производства. Они помогают экспертам и специалистам в принятии решений, оптимизации процессов и улучшении качества продукции.

Одним из наиболее интересных примеров использования экспертных систем является их применение в биоинформатике и медицине. В этих областях ЭС могут помочь в определении оптимальных схем лечения, анализе медицинских данных, диагностике и прогнозировании заболеваний. Однако их исполь-

зование в этих областях может быть сложным из-за неопределенности и шумных данных, а также требовать значительных вычислительных ресурсов.

Военная и транспортная отрасли также используют ЭС для решения различных задач. Например, военные ЭС помогают в принятии решений на поле боя, а транспортные экспертные системы – в оптимизации маршрутов и управлении логистикой. Однако и в этих областях могут возникать сложности из-за неопределенных данных и различных условий.

Также ЭС успешно справляются с проверкой уникальности текстов для борьбы с плагиатом. Многие онлайн-сервисы предлагают своим пользователям возможность проверки текста на наличие заимствований и копирования; авторы и редакторы используют ЭС для проверки качества текстов и выявления ошибок.

Как правило, ЭС состоит из трех основных компонентов: базы знаний, системы управления и интерфейса пользователя. База знаний содержит информацию, необходимую для решения задачи и представлена в виде набора правил, фактов, примеров и определений. Система управления включает в себя механизмы логического вывода, которые позволяют определять, какие правила и процедуры следует применять для получения решения. Интерфейс пользователя может быть реализован в виде текстового или графического представления и обеспечивает взаимодействие между пользователем и системой.

Последовательность работы ЭС содержит следующие этапы [2]:

- захват и хранение знаний: на этом этапе эксперты в определенной области предметной области передают свои знания и опыт ЭС, а она их сохраняет для того, чтобы научиться принимать решения в данной области;
- решение: на этом этапе система использует полученные и сохраненные знания, чтобы принимать решения и делать выводы на основе предоставленных ей данных и запросов;
- объяснение: система может объяснить свои выводы и дать рекомендации, чтобы пользователи поняли, как она пришла к этим выводам;
- обучение: система улучшает свои знания и алгоритмы, используя новые данные и обратную связь с пользователем.

Каждый из этих этапов играет важную роль в работе ЭС, и ее эффективность зависит от качества знаний, хранящихся в базе, а также от алгоритмов, используемых для принятия решения и обучения.

ЭС нашли широкое применение в различных областях, таких как медицина, инженерия, финансы и т. д. Они могут использоваться для принятия решений, диагностики, планирования и контроля процессов различной природы, в том числе и в бизнес-процессах.

Одним из важных применений ЭС в бизнесе является обработка и анализ больших объемов данных. Анализ финансовых данных экспертными системами помогает в определении закономерностей и трендов, выявлении отклонений, что позволит бизнесу принимать более обоснованные решения. В управлении запасами ЭС может помочь оптимизировать управление ими с учетом множе-

ства факторов (колебания спроса, сроки доставки, сезонность и др.) и рекомендовать оптимальные уровни запасов для каждого товара.

ЭС также могут использоваться для автоматизации процессов контроля качества продукции или мониторинг работы оборудования; для оптимизации процессов производства (автоматический анализ данных о производственных операциях позволяет выявлять наиболее эффективные методы работы, прогнозировать сроки завершения проектов).

В системах клиентского обслуживания ЭС используют для автоматического ответа на вопросы клиентов и решения проблем. Такая система может быть обучена распознавать типичные проблемы клиентов и предлагать соответствующие решения или переключать на живого оператора.

Рекомендательные ЭС применяются в маркетинге для определения продвижения товаров. Кроме того, ЭС могут быть использованы для разработки инновационной продукции и услуг, в проведении исследований и создании новых продуктов, а также в оценке их потенциала на рынке на основе предыдущих покупок или поведения клиентов, что позволяет улучшить качество обслуживания и увеличить объемы продаж.

ЭС востребованы ив автоматическом анализе данных для формирования рекомендаций в инвестиционном кластере. Здесь важно учитывать, что ЭС должна быть разработана с учетом конкретной инвестиционной стратегии и финансовой ситуации клиента. Кроме того, систему необходимо регулярно тестировать и настраивать для обеспечения ее точности и надежности в быстроменяющейся действительности.

Конкретными примерами ЭС, созданных финансовыми компаниями для управления инвестициями, ценными бумагами, валютными опционами являются:

TradeStation – платформа, разработанная компанией TradeStation для торговли на финансовых рынках, которая использует ЭС для анализа рынка и выявления эффективных инвестиционных стратегий;

AlphaSense – ЭС, предназначенная для анализа финансовых отчетов и новостей на основе искусственного интеллекта, которая позволяет быстро находить и анализировать информацию для принятия решений в области инвестирования;

Quandl – платформа, предоставляющая доступ ко множеству финансовых данных и аналитических инструментов, использующая ЭС для анализа и обработки этих данных;

Nereid – ЭС, которую разработали специально для оптимизации работы с валютными опционами.

Все перечисленные ЭС используются для анализа рынка, выявления эффективных инвестиционных стратегий, и для принятия решений в области управления активами клиентов.

ЭС имеют ряд неоспоримых достоинств, доказывающих их актуальность и успешность. Перечислим их:

- они могут обрабатывать большие объемы информации и принимать решения быстро на основе анализа этой информации;
- автоматизация принятии решений ЭС позволяет снизить затраты на обучение и поддержку персонала;
- точность и надежность решений ЭС не зависит от эмоций или усталости;
- ЭС могут помочь в принятии решений в сложных ситуациях, где требуется большой объем информации и комплексный анализ;
- ЭС сохраняют знания и опыт экспертов, что может быть полезным при передаче знаний или при работе в условиях нехватки квалифицированных сотрудников.

Хотя ЭС могут быть очень полезными инструментами для решения сложных проблем, у них есть и некоторые недостатки. Довольно часто они бывают достаточно дорогостоящими в разработке и поддержке. В некоторых случаях ЭС могут оказаться менее точными, чем человеческие эксперты, особенно если они основаны на недостаточных или ошибочных данных. Кроме того, они не всегда способны адаптироваться к новым ситуациям и изменениям в окружающей среде, что может привести к неправильным рекомендациям или решениям.

Однако, несмотря на эти недостатки, ЭС все еще представляют собой мощный инструмент для решения сложных задач в различных областях.

В целом, экспертные системы являются важным инструментом в эпоху искусственного интеллекта. Они помогают экспертам и специалистам принимать обоснованные решения, оптимизировать процессы и улучшать качество продукции. Однако при использовании экспертных систем необходимо учитывать особенности конкретной области и возможные сложности, связанные с неопределенностью и шумными данными.

Список источников

1. *Васильева Т. Н.* Методы искусственного интеллекта // МНИЖ. 2021. № 4. С. 49–51.

2. *Симанков В. С.* Аналитическое исследование методов и алгоритмов искусственного интеллекта // Вестник Адыгейского государственного университета. Сер. 4. 2020. № 3. С. 16–25.

УДК 004.891

Ю. С. Романова*
кандидат технических наук, доцент
Е. В. Пастухова*
кандидат технических наук, доцент
*Санкт-Петербургский государственный университет
аэрокосмического приборостроения

ЭВОЛЮЦИОННЫЕ ВЫЧИСЛЕНИЯ В АНАЛИЗЕ СИСТЕМ

Рассматривается одно из самых интересных направлений искусственного интеллекта-эволюционные вычисления. Обсуждаются преимущества и недостатки метода, возможности его применения.
Ключевые слова: эволюционные вычисления, методы искусственного интеллекта, анализ систем, программные решения.

Y. S. Romanova*
PhD Sc. Tech., Associate Professor
E. V. Pastukhova*
PhD Sc. Tech., Associate Professor
*St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

EVOLUTIONARY COMPUTING IN SYSTEMS ANALYSIS

The article discusses one of the most interesting areas of artificial intelligence – evolutionary computing. The advantages and disadvantages of the method, the possibilities of its application are discussed.
Keywords: evolutionary computing, methods of artificial intelligence, analysis of systems, software solutions.

Одно из направлений в теории информации, которое занимается созданием обучаемых систем, называется искусственный интеллект. Методов создания и обучения систем существует достаточно много, одним из самых интересных, на наш взгляд, являются эволюционные вычисления. В современном мире исследования часто приводят ученых к таким задачам, которые невозможно решить с помощью традиционных подходов. И как раз эволюционные алгоритмы и эволюционное программирование становятся спасительным кругом в этом случае.

Эволюционные вычисления позволяют найти решения сложных задач оптимизации при помощи алгоритмов, имитирующих теорию эволюции Дарвина. В зависимости от вида оптимизации – дискретная и непрерывная, одно- или многокритериальная – эволюционные вычисления подразделяются на различные направления. Целью оптимизации может быть, все, что угодно, например, анализ маршрутов движения городского транспорта, получение оптимального расписания работы конвейеров, минимизирующее время простоя, оптимизация проектирования и выбора системы защиты информации в АИС предприятий, оценка быстроты работы самих эволюционных алгоритмов, сложности решения тех или иных задач [1].

Эволюционное программирование заключается в простой имитации механизма естественного отбора и включает в себя 6 этапов (рис. 1):

- инициализация – начальное решение (задаем, какие именно гены определяют веса нейросети объекта);
- дубликация – создание множества копий текущего решения;
- мутация – приобретение каждой копией случайного изменения генома;
- оценка – изменение оценки гена в зависимости от успехов, продемонстрированных сгенерированной особью;
- отбор – после оценки, существам с лучшими показателями разрешается репликация, то есть они становятся основой для следующего поколения;
- вывод – после достижения оптимального решения алгоритм заканчивается.

Для начала работы любого эволюционного алгоритма создается набор случайных решений, которые называются «особи», далеких от оптимальных показателей, поскольку для их создания, как правило, используется случайный выбор. Затем в эти решения вносят изменения – «мутации», и некоторые решения скрещивают, получая «потомков». Таким образом, запускается процесс эволюции. Из новых решений выбираются самые приспособленные под конкретную задачу и процесс начинается заново. Критерием приспособленности решений является приближение к тому показателю, который необходимо оптимизировать для получения лучшего результата. В зависимости от конкретной задачи это могут быть разные величины: от времени производства и стоимости до затрат энергии и мощности излучения. Как правило, каждое следующее поколение является более «приспособленным» решением, а соответственно все более близким к оптимальному решению задачи.

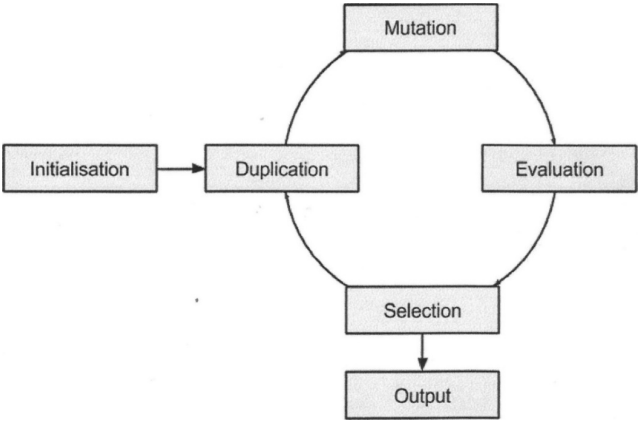


Рис. 1. Схема имитации естественного отбора

Эволюционные алгоритмы производят свои вычисления без прямого участия человека. Он только настраивает операторы мутаций и скрещивания, учи-

тывая особенности конкретной задачи. Редко, но бывают случаи, когда компьютер не в силах сам численно оценить оптимальность решения и тогда человек производит качественную оценку результата. Такой симбиоз называется *интерактивной эволюцией*.

Эволюционные вычисления широко используются в логистике и управлении производством, в биоинформатике и медицине, робототехнике и в машинном обучении (например, для генерации структуры нейронных сетей). В поисковой инженерии программного обеспечения, которая решает вопросы автоматической генерации, изменения и тестирования программного кода, эволюционные вычисления очень востребованы.

В качестве конкретного примера эффективного использования эволюционных вычислений можно упомянуть космическую антенну NASA [2], полученную с помощью сложного эволюционного алгоритма. Перед инженерами стояла задача оптимизировать форму антенны для наилучшей передачи сигнала из космоса. Попытки решить задачу привычными точными методами не дали удовлетворительных результатов. После безрезультатных инженерных исследований был предложен эволюционный алгоритм, который привел к оптимальному решению.

Всемирно известная задача коммивояжера имеет на данный момент наилучшее решение, основанное на усовершенствовании алгоритма Лина – Кернигана эволюционными вычислениями [3].

Все это показывает, насколько эволюционные алгоритмы хорошо справляются с задачами оптимизации любой природы, в том случае, когда точного результата обычными методами добиться невозможно.

В настоящее время внимание исследователей привлекает так называемая нейроэволюция, в которой оптимизируются сами нейросети. Например, в ходе усложнения задачи, сеть начинает расти, используя новые нейроны для нахождения более устойчивого решения, или, напротив, весовые коэффициенты связей изменяются, а структура нейросети остается прежней.

Преимуществами эволюционных алгоритмов является их широкая область применения, пригодность для поиска решений в многомерном пространстве, отсутствия ограничений целевой функции поиска, легкость интегрирования с другими методами искусственного интеллекта, получение нестандартных решений за счет использования сочетаний оптимальных решений в процессе эволюции.

Основным недостатком на сегодняшний день эволюционных алгоритмов является их высокая вычислительная и временная сложность, существует проблема выбора параметров, они не эффективны при поиске локальных экстремумов, не всегда гарантируют нахождение глобального экстремума, поскольку не выработаны эффективные критерии окончания алгоритма.

Список источников

1. *Родзин С. И.* Организация параллельных эволюционных вычислений // Известия ЮФУ. Технические науки.2021. № 14. С. 473–478.

2. Hornby, Greg&Globus. Automated Antenna Design with Evolutionary Algorithms. Collection of Technical Papers // Space Conference. 2016. N 1. P. 4–12.

3. *Hains D.* Improving Lin – Kernighan – Helsgaun with Crossover on Clustered Instances of the TSP // Parallel Problem Solving from Nature. 2020. N 12. P. 388–397.

УДК 621.391

С. А. Сажаева*
студентка
А. В. Борисовская*
ассистент
*Санкт-Петербургский государственный университет
аэрокосмического приборостроения

ОЦЕНКА ВЕРОЯТНОСТИ ДОСТАВКИ ИНФОРМАЦИИ О СОБЫТИИ В СЕНСОРНЫХ СЕТЯХ СО СЛУЧАЙНЫМ МНОЖЕСТВЕННЫМ ДОСТУПОМ

Рассмотрены модели сенсорной сети со случайным и фиксированным расположением сенсоров. Для обеих моделей с помощью имитационного моделирования получены точные значения вероятности доставки информации о событии и предложен аналитический способ оценки этой характеристики.
Ключевые слова: сенсорные сети, случайный множественный доступ, вероятность доставки.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда, грант № 22-19-00305 «Пространственно-временные стохастические модели беспроводных сетей с большим числом абонентов».

S. A. Sazhaeva*
Student
A. V. Borisovskaya*
Assistant
*St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

ESTIMATION OF THE PROBABILITY OF EVENT INFORMATION DELIVERY IN SENSOR NETWORKS WITH RANDOM MULTIPLE ACCESS

In this paper, models of a sensor network with a random and fixed location of sensors are considered. For both models, using simulation modeling, exact values of the probability of delivering information about the event were obtained and an analytical method for evaluating this characteristic was proposed.
Keywords: sensor networks, random multiple access, probability of delivery.

Введение

Беспроводным сенсорным сетям, основанным на случайном множественном доступе (СМД), легко находится применение в системах контроля и наблюдения различных территорий. Например, они могут применяться в системах мониторинга экологической обстановки, где каждое событие, о котором передается сообщение от сенсора, символизирует собой приближающиеся загрязнения, экологические аварии или прочие природные катастрофы. В таких системах важно вовремя передать и получить информацию обо всех появляю-

щихся в системе событиях. Это возможно в том случае, когда вся территория базовой станции находится под наблюдением сенсоров.

Примеры подобных систем рассмотрены в [1]–[4], где область распространения информации о событии представлена в виде круга, что соответствует условиям реальности. В статье представлен анализ зависимости вероятности доставки информации о событии от количества сенсоров в системе для упрощенной системы, в которой область распространения информации о событии является квадратом.

Модель системы

Сенсорная сеть с СМД, включает в себя базовую станцию и N сенсоров, улавливающих события. Информация о событии может быть передана лишь в том случае, если в окрестности события находится сенсор. Все время работы системы разделено на окна, которые в свою очередь состоят из K слотов. Длительность одного окна равна 1. Номер слота для передачи данных определяется случайно. В каждом слоте может произойти одна из ситуаций: успех, конфликт, пусто. В данной работе рассмотрены две разновидности данной системы: с фиксированным расположением сенсоров в виде решетки, а также со случайным расположением сенсоров (рис. 1).

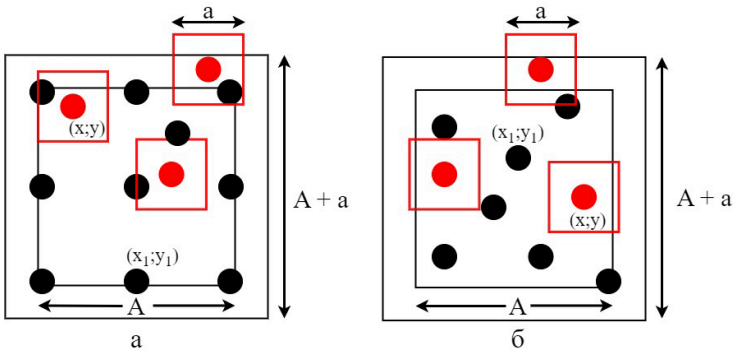


Рис. 1 Модель системы: а – модель с фиксированным расположением сенсоров; б – модель со случайным расположением сенсоров

Территория базовой станции – это квадрат со стороной A. Случайное расположение сенсоров означает, что они равномерно распределены на территории базовой станции, а фиксированное расположение сенсоров означает, что они находятся в узлах решетки на одинаковом расстоянии d друг от друга. Число фиксированных сенсоров в ряд примем за n, тогда общее число сенсоров в этом случае будет: $N=n\times n$. Квадрат со стороной $A + a$ – это дополнительная область действия сенсоров, расположенных на границе территории базовой станции. Условие срабатывания сенсора на событие может быть записано как: ($|x - x_1| \leq$

(a / 2)) И (| y – y$_1$| ≤ (a / 2)), где (x_1; y_1) – координаты сенсора, (x; y) – координаты центра события.

При имитационном моделировании данной системы вероятность доставки информации о событии вычисляется по формуле P(N)=S / C, где S – количество событий, о которых передана информация, а C – количество всех событий, произошедших за все время моделирования. Поток появления событий в системе является пуассоновским с параметром λ. Стоит учесть, что информация об одном и том же событии может быть успешно передана сразу несколькими сенсорами. В этом случае событие подсчитывается только один раз.

Оценка вероятности доставки информации о событии в системе с фиксированными сенсорами

В [5] предложен способ вычисления вероятности доставки информации о событии для модели системы с фиксированным расположением сенсоров, представленной в виде единичной окружности. Применим подход из [5] к описанной выше модели с фиксированным расположением сенсоров. Введем два индикатора I_1 и I_2:

$$I_1 = \begin{cases} 1, \text{ если событие попало в зону действия минимум одного сенсора;} \\ 0, \text{ иначе.} \end{cases}$$

$$I_2 = \begin{cases} 1, \text{ если информация о событии доставлена на базовую станцию;} \\ 0, \text{ иначе.} \end{cases}$$

Тогда теоретическая формула для вычисления значения вероятности доставки информации о событии принимает вид

$$P(N) = \Pr\{I_1 = 1\} \Pr\{I_2 = 1 | I_1 = 1\}. \quad (1)$$

Вероятность того, что в зону действия хотя бы одного сенсора попало событие, вычислим по формуле

$$\Pr\{I_1 = 1\} = \min\left(1, \frac{Na^2}{(A+a)^2}\right). \quad (2)$$

Вероятность того, что на базовую станцию успешно доставлена информация о событии, если оно охватило хотя бы один сенсор, вычислим по формуле

$$\Pr\{I_2 = 1 | I_1 = 1\} = \left(1 - \frac{1 - e^{\lambda a^2/(A+a)^2}}{K}\right)^{N-1}. \quad (3)$$

Тогда итоговое выражение для подсчета теоретического значения вероятности успешной доставки сообщения получим, подставив (2) и (3) в выражение (1)

$$P(N) = \min\left(1, \frac{Na^2}{(A+a)^2}\right)\left(1 - \frac{1 - e^{\lambda a^2/(A+a)^2}}{K}\right)^{N-1}. \qquad (4)$$

Результаты моделирования

С помощью имитационного моделирования построены зависимости вероятности доставки информации о событии от числа сенсоров для моделей с фиксированным и случайным расположением сенсоров (рис. 2). А также построена зависимость, полученная по формуле (4). Обозначим за $N_{опт}$ – число сенсоров, при котором охвачена вся территория базовой станции и расстояние между любыми двумя соседними сенсорами равняется d. В примере на рис. 2 максимальное значение вероятности доставки информации о событии при фиксированном расположении сенсоров достигается при $N_{опт}$=121. В этом случае n=11, d=A / (n – 1)=100 / (11 – 1)=10 и территория базовой станции полностью охвачена сенсорами. При случайном расположении сенсоров территория базовой станции будет охвачена полностью при большем числе сенсоров, поэтому максимальное значение вероятности доставки информации о событии в этом случае находится правее.

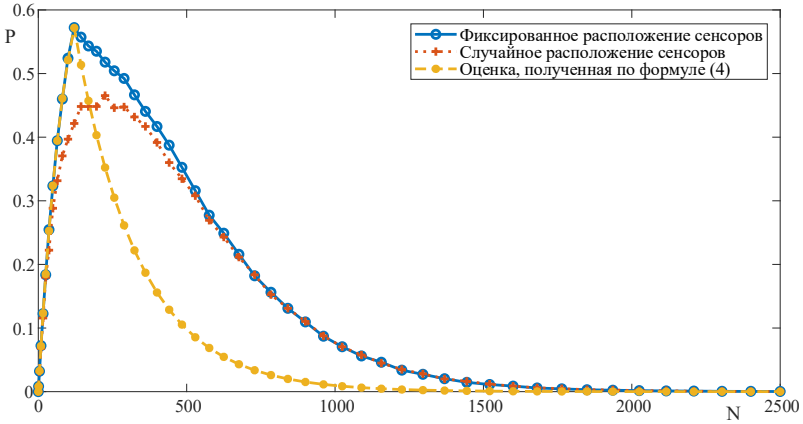


Рис. 2. Зависимость вероятности доставки информации о событии от количества сенсоров для систем с параметрами: A=100, a=10, K=121, λ=100

Таким образом, для модели с фиксированным расположением сенсоров выражение (4) является точным значением вероятности доставки информации о событии при $N \le N_{опт}$ и нижней оценкой при $N > N_{опт}$. Найти точное значение вероятности доставки информации о событии для модели со случайным расположением сенсоров существенно сложнее, но можно показать, что выражение (4) является ее оценкой.

Заключение

В работе представлено исследование модели сенсорной сети со случайным множественным доступом. Путем имитационного моделирования для системы со случайным и фиксированным расположением сенсоров получены зависимости вероятности доставки информации о событии от количества сенсоров в системе. Получено математическое выражение для оценки вероятности доставки информации о событии в таких моделях. Для модели с фиксированным расположением сенсоров полученное выражение является точным значением, если области действия сенсоров не пересекаются, и нижней оценкой в противном случае.

Список источников

1. *Kalor A., Popovski P.* Random access schemes in wireless systems with correlated user activity // IEEE 19th International Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications (SPAWC). 2018. P.1–5.

2. Stochastic resource optimization of random access for transmitters with correlated activation / C. Zheng, M. Egan, L. Clavier et al. // IEEE Communications Letters. 2021. N 9. P. 3055–3059.

3. Stochastic Resource Allocation for Outage Minimization in Random Access with Correlated Activation / C. Zheng, M. Egan, L. Clavier et al. // IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC). 2022. P. 1635–1640.

4. *Borisovskaya A., Turlikov A., Fonfrygin A.* Numerical Calculation of Random Access Characteristics for Sensors with Correlated Activation // Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF). 2022. P. 1–5.

5. *Борисовская А. В.* Определение вероятности доставки информации о событии в системах мониторинга на основе сетей, построенных по технологии LoRaWAN // Успехи современной радиоэлектроники. 2022. № 12. С. 82–89.

УДК 004.932.2

Я. О. Сениченкова*
студентка
М. Д. Поляк*
старший преподаватель
*Санкт-Петербургский государственный университет
аэрокосмического приборостроения

РАСПОЗНАВАНИЕ МУЗЫКАНТОВ СИМФОНИЧЕСКОГО ОРКЕСТРА ПО ИЗОБРАЖЕНИЯМ МЯГКИХ ТКАНЕЙ ГОЛОВЫ

Исследуется возможность определения профессии человека через анализ изображений мягких тканей передней части головы на примере музыкантов симфонического оркестра. Для проверки этой гипотезы был создан датасет, разделенный на два класса: музыканты и не музыканты. Качество датасета было проверено с помощью алгоритмов уменьшения размерности и оценки сходства изображений на основе векторов признаков. Результаты исследования показали, что в случае с музыкантами симфонического оркестра можно определить профессию человека только по изображению его или ее мягких тканей головы.
Ключевые слова: обработка изображений, FaceNet, машина опорных векторов.

Авторы выражают признательность Санкт-Петербургскому государственному университету аэрокосмического приборостроения за ценные замечания касательно необходимости использования эзопова языка в тексте данной работы.

Y. O. Senichenkova*
Student
M. D. Polyak*
Senior Lecturer
*St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

SYMPHONIC ORCHESTRA MUSICIANS RECOGNITION FROM IMAGES OF SOFT TISSUE OF THE HEAD

The article describes an approach to evaluating profession of a human based on analysis of images of soft tissues of the front of the head. A profession of symphonic orchestra musicians is given as an example. A dataset is proposed with two classes: musicians and non-musicians. The quality of the dataset is examined with dimensionality reduction algorithms and evaluation of similarity between feature vectors. The results have shown that in case of symphonic orchestra musicians it is possible to some extent possible to identify a profession of a human based on images of soft tissue of the head.
Keywords: image processing, FaceNet, support vector machine.

Введение

На данный момент стремительно развивающиеся технологии распознавания мягких тканей головы позволяют извлекать информацию из фотографий соответствующей части тела человека. Например, в зарубежной литературе описаны подходы, позволяющие определить сексуальную ориентацию [1] и политические взгляды [2] исключительно по фотографиям

мягких тканей головы. В [1] были продемонстрированы достойные результаты: 91 % точности при определении сексуальной ориентации мужчин и 83 % точности при определении сексуальной ориентации женщин. В [2] точность определения политических взглядов по фотографии мягких тканей головы составила 71 %. Технологии распознавания мягких тканей головы находят активное применение в бизнесе. Например, в [3] рассмотрена рекомендательная система для предприятий розничной торговли, строящая рекомендации товаров на основе данных о покупателях, полученных с помощью технологий распознавания мягких тканей головы. Утверждается, что построенные таким образом рекомендации смогли удовлетворить 70 % покупателей. В данной работе рассматривается частный случай задачи определения профессии человека: является ли человек музыкантом симфонического оркестра (далее – «музыкант»).

Для решения поставленной задачи используется модель FaceNet [4]. Используемая модель нейронной сети предобучена на датасете VGGFace2 для задачи идентификации человека по фотографии мягких тканей головы. Задачу идентификации предобученная сеть решает с точностью (0.9965. Сама предобученная модель находится в открытом доступе в сети Интернет.

На вход нейронной сети подается изображение размером 160×160 пикселей, которое после прохождения сверточных слоев разворачивается в вектор, состоящий из 512 чисел, содержащих в себе извлеченные из изображения признаки. Далее вектор из признаков передается на вход классификатора, реализованного с помощью машины опорных векторов. Данный классификатор вычисляет вероятности принадлежности фотографии к классам «музыкант симфонического оркестра» и «не музыкант симфонического оркестра».

Подготовка данных

Для обучения и тестирования классификатора были собраны фотографии музыкантов с сайтов симфонических оркестров, а также фотографии медийных личностей из датасета CelebA и фотографии преподавателей высших учебных заведений. Существует несколько версий датасета: в первой 403 фотографии, во второй – 1215. Данные версии понадобились для оценки влияния увеличения объема обучающей выборки на точность модели. Для повышения качества выборки, датасет был сбалансирован по половому признаку, также количество изображений первого и второго класса практически одинаковы. Например, во второй версии датасета 601 музыкант и 614 немузыкантов. Монохромность фотографии не влияет на качество работы FaceNet, что позволило оставить в датасете черно-белые фотографии [5].

Обучение классификатора

Для подбора оптимального гиперпараметра регуляризации классификатора на основе машины опорных векторов был использован поиск

по сетке (GridSearch). Согласно результатам данного метода оптимальное значение гиперпараметра регуляризации равно 0.9. В качестве ядерной функции была взята радиально-базисная функция (RBF). В связи с тем, что датасет сбалансирован, метрику accuracy можно использовать для оценки качества модели.

При обучении классификатора на первой версии датасета были получены следующие значения метрик: accuracy 0.683, F1-score 0.725, ROC AUC score 0.683. Матрица ошибок для первой версии датасета представлена в табл. 1.

Таблица 1

Матрица ошибок для первой версии датасета

Истинный класс	Полученный класс	
	Не музыкант	Музыкант
Не музыкант	16	14
Музыкант	5	25

При обучении классификатора на второй версии датасета были получены следующие метрики: accuracy 0.651, F1-score 0.683, ROC AUC score 0.651. Матрица ошибок для второй версии датасета представлена в табл. 2.

Таблица 2

Матрица ошибок для второй версии датасета

Истинный класс	Полученный класс	
	Не музыкант	Музыкант
Не музыкант	51	40
Музыкант	23	68

Анализ датасета

Одним из способов анализа датасета может являться поиск кластеров и зависимостей между изображениями на диаграмме рассеяния. Визуализации датасета на плоскости требует уменьшения количества информативных признаков до двух. Для выполнения данной операции были использованы следующие алгоритмы уменьшения размерности: метод главных компонент (PCA) [6] и t-SNE [7] в реализации sklearn.

Представленные на рис. 1 и 2 диаграммы рассеяния позволяют сделать вывод, что поверхность, разделяющая классы, имеет нелинейный характер как минимум при использовании алгоритмов снижения размерности PCA и t-SNE. Следовательно, можно утверждать, что среди векторов эмбедингов количество неинформативных признаков незначительно.

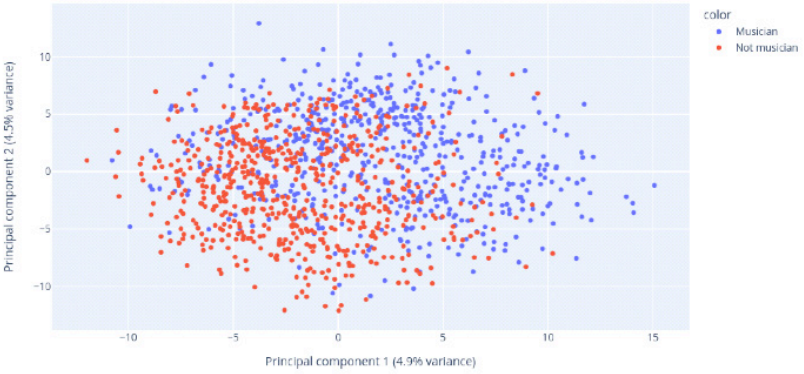


Рис. 1. Визуализация двух главных компонент эмбедингов изображений

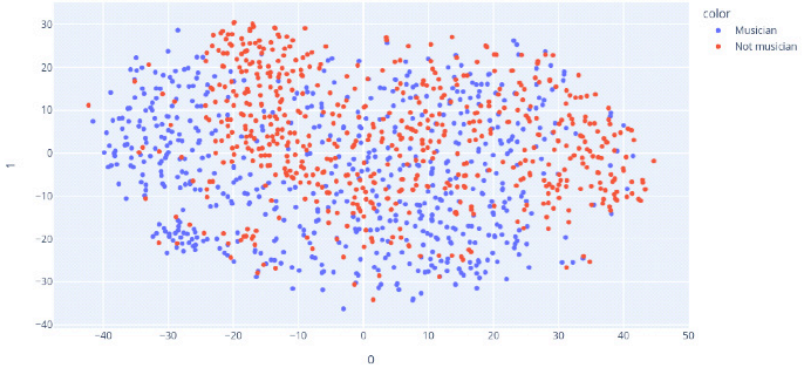
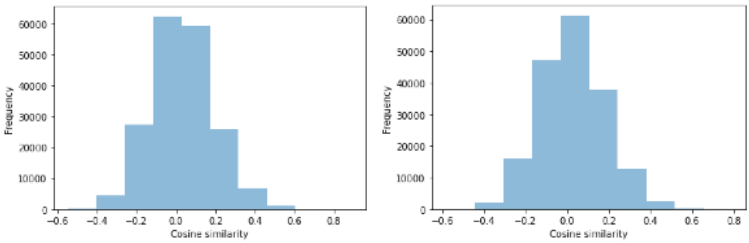


Рис. 2. Визуализация эмбедингов с помощью t-SNE

Применение метода главных компонент показало, что первые две главных компоненты способны описать соответственно 4,9 и 4,5 % от общей дисперсии, что в сумме дает лишь 9,4 % от общей дисперсии изображения. Эти данные позволяют предположить, что собранный датасет является достаточно разнообразным.

Для дополнительной проверки качества собранного датасета было вычислено косинусное сходство между всеми возможными парами фотографий. Данные расчеты были произведены для класса «не музыкант» (рис. 3*а*) и для класса «музыкант» (рис. 3*б*)



а) *б)*

Рис. 3. Частота значений косинусного сходства для всевозможных пар изображений, принадлежащих к классу: а – «не музыкант»; б – «музыкант»

Из гистограмм, представленных на рис. 3, можно сделать вывод, что датасет является разнообразным, так как подавляющее большинство вычисленных значений косинусных сходств не превышает по модулю 0.5, что говорит о несхожести изображений.

Форма гистограмм позволяет выдвинуть гипотезу, что попарные косинусные расстояния распределены по нормальному закону. Для проверки данной гипотезы был использован тест Д'Агостино – Пирсона [8] на нормальность распределения в реализации scipy. Нулевая гипотеза: «анализируемая выборка происходит из генеральной совокупности, имеющей нормальное распределение», альтернативная гипотеза: «анализируемая выборка не происходит из генеральной совокупности, имеющей нормальное распределение». В результате теста были получены следующие значения при уровне значимости p=0.05: для косинусных расстояний между изображениями класса «немузыкант» p=0.99, χ^2=4.23, для класса «музыкант» p=0.99, χ^2=3.80. Поскольку в обоих случаях $p > 0.05$, принимаются нулевые гипотезы. Таким образом, можно утверждать, что собранный датасет является несмещенным и, вероятно, адекватно описывает генеральную совокупность изображений мягких тканей головы, предположительно имеющую нормальное распределение.

Для проверки факта, что на изображениях мягких тканей головы человека действительно присутствуют признаки, по которым можно определить или опровергнуть принадлежность к профессии «музыкант», был проведен следующий эксперимент: классификатор был обучен на второй версии датасета, состоящей из 1215 изображений, но при проведении данного эксперимента метки классов были расставлены случайным образом [9] в соответствии с равномерным законом распределения. В результате на тестовой выборке accuracy стала равна 0.5414. Данное значение близко к 0.5, что говорит о том, что, скорее всего, в этой ситуации классификатор не смог уловить закономерности в изображениях и расставил метки классов случайным образом. Отсюда можно сделать вывод, что результаты обучения классификатора, приведенные выше, не являются следствием случайности;

классификатор действительно смог найти скрытые признаки в мягких тканях головы для соотнесения изображения с одним из классов: «музыкант» или «не музыкант».

Результаты и выводы

Построен классификатор с использованием алгоритмов машинного обучения, позволяющий с точностью 65 %. определить профессиональную принадлежность человека к музыкантам симфонического оркестра основываясь исключительно на изображениях мягких тканей головы. Анализ фотографий, вызвавших сомнение у классификатора, позволяет нам выявить следующие закономерности: классификатор отнесет девушку скорее к музыкантам, как и взрослых мужчин, что можно заметить на примере неверно классифицированных не музыкантов. Однако не все фотографии, подходящие под вышеописанные категории, попали в класс «музыкант», из чего можно сделать вывод, что классификатор смог выделить закономерности, не заметные человеческому глазу.

Список источников

1. *Wang Y., Kosinski M.* Deep neural networks are more accurate than humans at detecting sexual orientation from facial images // Journal of personality and social psychology. 2018. Vol. 114. N 2. P. 246.

2. *Kosinski M.* Facial recognition technology can expose political orientation from naturalistic facial images // Scientific reports. 2021. Vol.11. N 1. P. 1–7.

3. *Wu C., Zeng Y., Shih M.* Enhancing retailer marketing with an facial recognition integrated recommender system // 2015 IEEE International Conference on Consumer Electronics-Taiwan. IEEE, 2015. P. 25–26.

4. *Schroff F., Kalenichenko D., Philbin J.* Facenet: A unified embedding for face recognition and clustering // Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition. 2015. P. 815–823.

5. *Cole F.* Synthesizing normalized faces from facial identity features // Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition. 2017. P. 3703–3712.

6. *Pearson K.* Principal components analysis // The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science. 1901. Vol. 6. N 2. P. 559.

7. *Van der Maaten L., Hinton G.* Visualizing data using t-SNE // Journal of machine learning research. 2008. Vol. 9. N 11.

8. *D'Agostino R., Pearson E.* Tests for departure from normality. Empirical results for the distributions of b_2 and $\sqrt{b_1}$ // Biometrika. 1973. Vol. 60. N 3. P. 613–622.

9. *Wu X., Zhang X.* Automated inference on criminality using face images // arXiv preprint arXiv:1611.04135.2016. P. 4038–4052.

УДК 621.496.4

А. А. Синицын*
студент
А. С. Галаев*
студент
Н. В. Степанов*
ассистент
*Санкт-Петербургский государственный университет
аэрокосмического приборостроения

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СИМУЛЯТОРА NS-3 ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ СЕНСОРНЫХ СЕТЕЙ, ПОСТРОЕННЫХ ПО ТЕХНОЛОГИИ LORAWAN

Технология LoRaWAN заслуженно привлекает большое внимание в среде промышленных решений и уже сегодня дает возможность эффективно решать многие задачи. Инструмент, позволяющий провести анализ работоспособности беспроводной сети, на сегодняшний день с наибольшим приближением к реальности реализован на NS-3. Сборка и запуск различных моделей сети LoRaWAN с подробным описанием является необходимой задачей, которую решает данная статья. На примере известных сценариев работы сети сделан вывод, что неподтвержденные сообщения будут доставлены с большей вероятностью, при большом числе абонентов.
Ключевые слова: IoT, LoRaWAN, NS-3, моделирование, PDR, сценарии использования.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, соглашение № FSRF-2023-0003 «Фундаментальные основы построения помехозащищенных систем космической и спутниковой связи, относительной навигации, технического зрения и аэрокосмического мониторинга».

A. A. Sinitsyn*
Student
A. S. Galaev*
Student
N. V. Stepanov*
Assistant
*St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

BUILDING LORAWAN USING NS-3 TO SIMULATE SENSOR NETWORKS

LoRaWAN technology deservedly attracts a lot of attention in the industrial solutions environment, and even today it allows you to effectively solve many problems. A tool that allows you to analyze the performance of a wireless network, today, with the closest approximation to reality, is implemented on the NS-3. The assembly and launch of various LoRaWAN network models with a detailed description is a necessary task that this article solves. Using the example of known network operation scenarios, it was concluded that unacknowledged messages will be delivered with a higher probability, with a large number of subscribers.
Keywords: IoT, LoRaWAN, NS-3, modeling, PDR, use cases.

Введение

В представленной статье рассмотрена проблема моделирования сценариев использования широко применяемой в IoT (Internet of Things) технологии LoRaWAN (Long Range Wide-Area Network). Введение в решение проблемы масштабирования большого числа пользователей и поиск методов моделирования сценариев использования симулятора.

Применение данной технологии обоснованно тем, что беспроводные сети LoRaWAN имеют широкий радиус охвата пользовательских устройств (или так называемые оконечные устройства, ED). Основной плюс таких сетей является низкое энергопотребление и малая стоимость. Время жизни таких ED достигает 10 лет от одной батареи и зависит от длительности сообщения. Модели сети LoRaWAN рассматриваются в [1], [2].

В работе предлагаются решения для запуска симулятора на NS-3 (Network Simulator – 3) для проверки характеристик работы сетей LoRaWAN. В первом разделе представлены особенности сети LoRaWAN. Затем приведена основная часть построения проекта с LoRaWAN на NS-3, где рассмотрены три проблемы построения сценариев.

Особенности сети LoRaWAN

Разработчик стандарта LoRa Alliance [1] ввели такое понятие, как коэффициент расширения спектра (SF, Spreading Factor). Он обеспечивает гибкость диапазона для скорости передачи данных. Более низкие коэффициенты расширения спектра означают более высокую скорость передачи данных. При каждом увеличении коэффициента расширения спектра скорость передачи данных уменьшается вдвое [5]. При этом шлюз LoRa (или базовая станция, БС) может принимать несколько передач с разными коэффициентами расширения спектра одновременно (см. рис. 1).

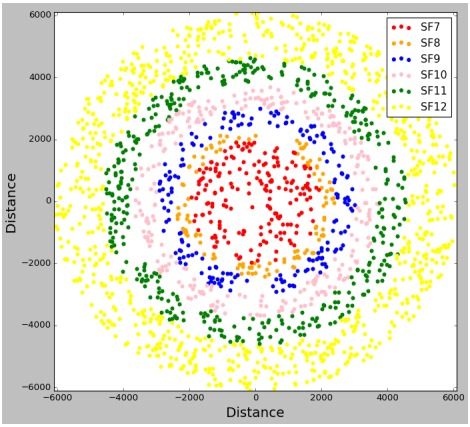


Рис. 1. Масштабирование SF на ED

Всего используется шесть SF, а БС может обслуживать множество ED, меняя SF в зависимости от расстояния. Такая формация подключения устройств задана топологией сети звезда.

Протокол LoRaWAN использует модель асинхронной АЛОХА, которая в 3–5 раз увеличивает срок службы батареи в сравнении с синхронным алгоритмом. Преимуществом над большинством сотовых IoT систем является возможность применения такой модели в нелицензированных диапазонах частот [3]. При этом используется до 16 частотных каналов [2].

Проект сети LoRaWAN на NS-3

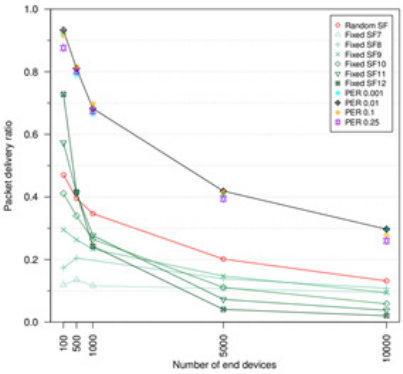
Сетевой симулятор NS-3 дискретных событий с открытым исходным кодом. Среда позволяет исследователям внести свой вклад и поделиться своим программными наработками.

На примере работы [4] рассмотрим проблемы управления симулятором, такие как сценарии назначения SF, режимы с подтверждением и без, передача квитанции по обратной связи вниз.

Различные SF влияют на скорость передачи информации. Присвоение слишком низкого SF приводит к ошибкам приема из-за низкого отношения сигнал на шум. Завышение SF приводит к неэффективному использованию канала. В [4] были рассмотрены три стратегии выбора параметра SF:

- Random: Коэффициенты распространения назначались конечным устройствам в соответствии с равномерным случайным распределением;
- FIX: Конечным устройствам назначался один и тот же коэффициент распространения;
- PER: для каждого конечного устройства назначался наименьший коэффициент распространения, для которого коэффициент ошибок пакетов падает ниже определенного порога.

Для получения результатов был выполнен ряд симуляций для каждой стратегии (рис. 2).



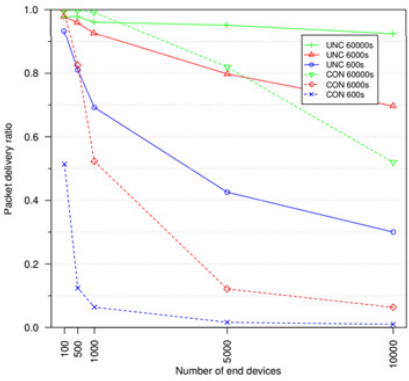


Рис. 2. Результат симуляции рис. 3. PDR для UNC и CON с 1 БС

Исходя из результатов исследования, можно сказать, что PER является лучшей стратегией из всех трех с точки зрения PDR (коэффициент доставки пакетов).

Теперь перейдем к сценарию с неподтвержденными и подтвержденными исходными данными. Данное исследование направлено на изучение влияния отправки восходящих MAC-сообщений в виде подтвержденных (CON(confirmed)) и неподтвержденных (UNC(unconfirmed)) сообщений на коэффициент доставки пакетов.

Можно было бы ожидать, что схема повторной передачи LoRaWAN повысит PDR, поскольку сообщения, которые не получили подтверждения повторно передаются конечным устройством. Конечное устройство пытается выполнить четыре передачи, прежде чем отбросить сообщение. Коэффициенты доставки пакетов для отправки данных в виде неподтвержденных и подтвержденных восходящих сообщений показаны на рис. 3 для трех разных периодов передачи данных в случае одного шлюза.

В случае неподтвержденных MAC-сообщений основной причиной недоставленных пакетов являются коллизии, когда шлюз занят приемом сообщения. Поэтому любая другая передача с той же скоростью передачи данных прерывается во время продолжающегося приема. PDR подтвержденных сообщений не всегда выше, чем у неподтвержденных сообщений. PDR выше только в тех случаях, когда нагрузка на трафик очень низкая.

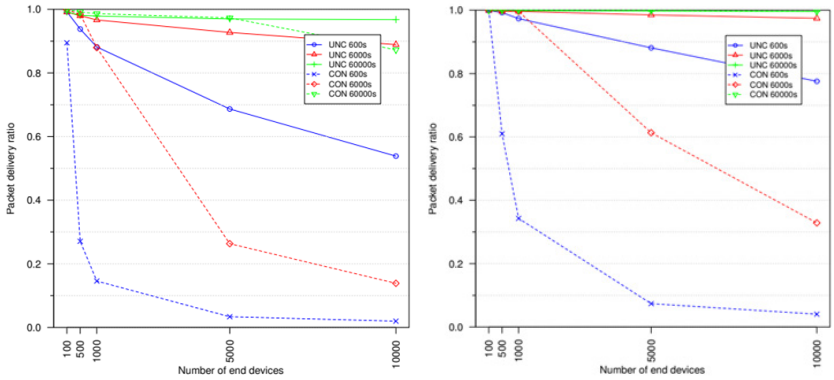


Рис. 3. Шлюзы сети LoRaWAN

Изучается влияние количества шлюзов в сети LoRaWAN на PDR. Для каждого конечного устройства рассчитывается PER 0.01 до ближайшего шлюза. На рис. 3 показан PDR для сети LoRaWAN с двумя и четырьмя шлюзами соответственно. Для неподтвержденных сообщений PDR значительно увеличивается по мере увеличения количества шлюзов. Для подтвержденных сообщений увеличение PDR заметно, но не так резко, как для неподтвержденных сообщений.

В заключительной части изучалось влияние отправки нисходящих данных. На рис. 3 видно, что для насыщенных вариантов PDR для подтвержденных нисходящих сообщений немного ниже, чем для неподтвержденных нисходящих сообщений.

Заключение

В статье был проведен обзор работ, рассматривающих модели сетей, построенных по технологии LoRaWAN, и исследованы характеристики таких сетей. В рамках обзора выделены основные особенности таких сетей и проанализированы результаты исследований в этой области. Построены базовые сценарии передачи сообщений без повторений с фиксированными значениями скорости, по адаптивному механизму подстройки скорости с повторениями. Описание сценариев проекта позволит использовать проект для исследования новых сценариев сети LoRaWAN. Целью дальнейших исследований является разработка способов увеличения пропускной способности в рассмотренной модели сети.

Список источников

1. LoRaWAN 1.0.3 Regional Parameters, LoRa Alliance. 2021.

2. ПНСТ «Информационные технологии. Интернет вещей. Спецификация LoRaWAN RU», ПНСТ 516–2021. 58 с.

3. LoRa Alliance Technical Committee et al. RP002–1.0.3 LoRaWAN Regional Parameters. Tech. rep. Version: RP002–1.0.3, 2021.

4. *Van den Abeele F.* Scalability analysis of large-scale LoRaWAN networks in NS-3 //IEEE Internet of Things Journal. 2017. Vol. 4. N 6. P. 2186–2198.

5. *Georgiou O., Raza U.* Low power wide area network analysis: Can LoRa scale? // IEEE Wireless Communications Letters. 2017. Vol. 6. N 2. P. 162–165.

УДК 519.25

Т. М. Татарникова*
доктор технических наук, профессор
В. В. Боженко*
аспирант, ассистент
*Санкт-Петербургский государственный университет
аэрокосмического приборостроения

ПРЕДВАРИТЕЛЬНАЯ ОБРАБОТКА ДАННЫХ В МЕДИЦИНСКИХ ИССЛЕДОВАНИЯХ

Рассматриваются особенности работы с медицинскими данными, описывается концепция предварительной обработки данных, основные этапы и особенности для проведения эффективного анализа. Приводится пример препроцессинга медицинского набора данных.
Ключевые слова: предварительная обработка данных, машинное обучение, медицинские данные.

T. M. Tatatnikova*
Dr. Sc. Tech., Professor
V. V. Bozhenko*
PhD Student, Assistant
*St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

DATA PREPROCESSING IN MEDICAL RESEARCH

The features of working with medical data are considered, the concept of data preprocessing, the main stages and features for effective analysis are described. An example of preprocessing of a medical data set is given.
Keywords: data preprocessing, machine learning, medical data.

Когда говорят про Data Science в медицине, часто имеют в виду обработку снимков, улучшение качества диагностики благодаря распознаванию изображений. Однако также искусственный интеллект (ИИ) применяется для поддержки решений врача (анализа истории болезни и предложения решений), анализа рисков при лечении пациентов, помощи в планировании и проведении клинических испытаний, предсказании болезней или эпидемий.

Одним из трендов современности является большое количество данных, которые необходимо как-то обрабатывать и анализировать. Существуют различные виды данных: генетические (ДНК), сигналы (электрокардиограмма), биохимия (анализы крови), изображения (флюорография, УЗИ), табличные данные о болезнях, лекарствах, различная государственная статистика [1].

К барьерам развития ИИ в медицине можно отнести тот факт, что данные не структурированы, часто бывают неполные, что может привести к некорректным результатам. Кроме того, необходимо думать о безопасности, так как есть риск непредсказуемых диагнозов и рекомендаций, которые будет выдавать ИИ, все равно необходима ручная валидация результатов. Также в связи с тем, что

исследования могут повлиять на здоровье людей, то ответственность остается на специалисте, при этом главный принцип – не навредить. Клинические исследования также должны проходить сертификацию. Помимо этого, специалист по машинному обучению не всегда может корректно трактовать результаты, поэтому часто необходимо работать в связке с врачами-диагностами [2].

Для грамотного проведения исследований важно, чтобы данные, которые используются для анализа, были предварительно обработаны. Этот этап необходим, потому что медицинские данные могут иметь вид, который не позволяет напрямую провести статистический анализ или применить методы машинного обучения [3].

В работе будет идти речь о табличных наборах, собранных в лечебном учреждении. В реальных задачах количество записей и признаков в наборах данных может быть очень большим. В собранных таблицах часто встречаются пропущенные значения, которые необходимо обрабатывать. На рис. 1 представлена таблица с анализами, состоящая из 27 столбцов и 142 083 строки, большая часть столбцов имеет огромное количество пропущенных значений.

```
RangeIndex: 142083 entries, 0 to 142082
Data columns (total 27 columns):
 #   Column                 Non-Null Count   Dtype
---  ------                 --------------   -----
 0   Sample_ID              142083 non-null  object
 1   Patient_ID             142082 non-null  object
 2   Gender                 142082 non-null  object
 3   Age                    142082 non-null  float64
 4   Гемоглобин             128475 non-null  float64
 5   Эритроциты             128475 non-null  float64
 6   MCHC                   128475 non-null  float64
 7   MCH                    128475 non-null  float64
 8   MCV                    128475 non-null  float64
 9   RDW-CV                 128094 non-null  float64
 10  RDW-SD                 128085 non-null  float64
 11  Скорость оседания      118737 non-null  float64
 12  C-P_БЕЛОК              1902 non-null    float64
 13  C-P_БЕЛОК_НОРМ         3144 non-null    float64
 14  B12                    1305 non-null    float64
 15  ЖЕЛ_СЫВ                7391 non-null    float64
 16  ЖЕЛ_СПОСОБ             764 non-null     float64
 17  Коэф. нас трансфа жел  1104 non-null    float64
 18  Ретикулоциты           1442 non-null    float64
 19  Ретикулоциты, %        1442 non-null    float64
 20  ТРАНСФЕРРИН            1269 non-null    float64
 21  ФЕРРИТИН               3496 non-null    float64
 22  ФОЛИЕВАЯ_КИСЛОТА       730 non-null     float64
 23  HFR                    1441 non-null    float64
 24  IRF                    1442 non-null    float64
 25  LFR                    1442 non-null    float64
 26  MFR                    1441 non-null    float64
```

Рис. 1. Оценка набора данных с анализами

Существуют различные техники для обработки таких значений. Обычно если пустых значений немного, то их убирают из дальнейшего исследования [4]. В этом примере больше половины признаков содержат порядка 98 % пропусков. Есть две возможности – исследовать набор данных на заполненных строках либо заполнить пропуски определенным образом. Именно в этот момент необходима консультация человека, связанного с этими данными. Заполнение такого количества значений нулями слишком сильно сдвинет средние значения по каждому признаку. Рекомендуется заполнить данные значения либо на основе средних показателей, либо показателей среднего референса лаборатории по каждому анализу. Более сложный вариант – использовать замену

пропусков с помощью прогнозирования методом регрессии, что позволит получить количественные значения на основе других показателей.

В таком наборе данных нет дубликатов, поэтому дополнительных действий по их обработке не требуется.

При проверке типов данных видно, что лишь столбец Gender нужно привести из строкового в числовой с помощью one-hot-encoding, так как строковые значения не используются при реализации моделей для анализа.

Также в данных могут встречаться аномалии. Например, при просмотре описательной статистики по числовым столбцам можно увидеть отрицательные значения возраста, нулевые показатели анализов, которые вряд ли могут быть правдивыми (рис. 2). От таких значений необходимо избавляться или при возможности выяснить причины, по которым отрицательный возраст появился и обработать данную ошибку.

	Age	Гемоглобин	Эритроциты	MCHC
count	142082.000000	128475.000000	128475.000000	128475.000000
mean	29.429660	111.850469	4.257400	323.529846
std	26.682756	12.324084	0.571862	20.893952
min	-37.000000	19.000000	0.630000	0.000000
25%	3.000000	107.000000	3.950000	311.000000
50%	29.000000	115.000000	4.320000	326.000000
75%	48.000000	119.000000	4.620000	339.000000
max	118.000000	129.000000	9.270000	915.000000

Рис. 2. Аномалии данных (пример)

В поле гемоглобин некоторые результаты кажутся слишком низкими по сравнению со средним значением, можно построить график boxplot, чтобы оценить распределение значений в данном столбце (рис. 3). Если наблюдение в 1,5 раза превышает межквартильный размах 3 квартиля, наблюдение считается выбросом, как правило, удаляется из дальнейшего анализа.

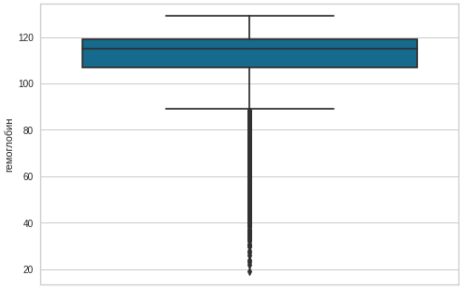


Рис. 3. График boxplot для признака Гемоглобин

Кроме того, необходимо оценить корреляцию между признаками. Если в дальнейшем предполагается выполнить кластеризацию целесообразно удалить мультиколлинеарные признаки [5]. Так, из таблицы (рис. 4) видно, что MCV и MCHC имеют высокую корреляцию. Если обратиться к медицинской интерпретации, то MCHC – средняя концентрация гемоглобина в эритроците, а MCV – средний объем эритроцита, то есть связь между этими величинами очевидна.

	Age	Гемоглобин	Эритроциты	MCHC	MCH	MCV
Age	1.000000	-0.328871	-0.374180	-0.516556	0.154274	0.462091
Гемоглобин	-0.328871	1.000000	0.477546	0.562725	0.295219	0.055620
Эритроциты	-0.374180	0.477546	1.000000	-0.067169	-0.674440	-0.750019
MCHC	-0.516556	0.562725	-0.067169	1.000000	0.529580	0.080926
MCH	0.154274	0.295219	-0.674440	0.529580	1.000000	0.883769
MCV	0.462091	0.055620	-0.750019	0.080926	0.883769	1.000000

Рис. 4. Фрагмент матрицы корреляций

Большинство алгоритмов машинного обучения используют Евклидово расстояние между двумя точками данных в их вычислениях. Из-за этого признаки больших величин будут весить больше в расчетах расстояния, чем признаки с низкими величинами. Чтобы избежать этого используется стандартизация, то есть для применения дальнейших исследований данные преобразуют к единому масштабу с помощью StandardScaler, что позволяет привести показатели из разных единиц измерения к единому виду [4].

После того как данные предварительно обработаны и приведены к единому масштабу, можно применять методы машинного обучения, например, кластеризацию. Задача кластерного анализа заключается в выделении по эмпирическим данным резко различающихся групп (кластеров) объектов, которые схожи между собой внутри каждой из групп. В медицинских исследованиях можно определить группы пациентов с разными показателями, чтобы выделить основные характеристики каждой группы [6].

В этой статье были рассмотрены основные этапы предобработки и первичного анализа медицинского набора данных. Предварительная обработка данных делает их наиболее полными, а также подготавливает для дальнейшего применения алгоритмов анализа. От корректности данного шага зависит также правильность будущей модели. Необработанные данные до очистки и обработки обычно не готовы для получения правильных выводов и качественных результатов, использование моделей на необработанных данных может привести к некорректным результатам, а иногда сырые данные и вовсе непригодны для анализа, и применение методов машинного обучения невозможно. Если допустить ошибку в первичном анализе данных, есть вероятность переобучения модели или получения данных, которые могут ввести в заблуждение.

Список источников

1. *Цветкова Л. А., Черненко О. В.* Технология больших данных в медицине и здравоохранении России и мира // Врач и информационные технологии. 2016. С. 60–73.

2. *Васюта Е. А., Подольская Т. В.* Проблемы и перспективы внедрения искусственного интеллекта в медицине // Государственное и муниципальное управление. Ученые записки. 2022. № 1. С. 25–32.

3. *Боженко В. В., Игошин А. Н., Бакин Е. А.* Система статистической обработки медицинских данных // Научная сессия ГУАП. СПб.: ГУАП, 2019. С. 255–259.

4. Data Preprocessing in 2023. URL: https://research.aimultiple.com/data-preprocessing/ (дата обращения: 15.03.2023).

5. *Mertz D.* Cleaning Data for Effective Data Science. Birmingham: Packt Publishing, 2021. 498 p.

6. *Татарникова Т. М.* Анализ данных. СПб.: ГЭУ, 2018. 85 с.

УДК 621.391

Ф. А. Таубин*
доктор технических наук, профессор
А. Н. Трофимов*
кандидат технических наук, доцент
*Санкт-Петербургский государственный университет
аэрокосмического приборостроения

КОДЫ-ПРОИЗВЕДЕНИЯ С ВНУТРЕННИМИ МНОГОМЕРНЫМИ РЕШЕТКАМИ ДЛЯ МНОГОУРОВНЕВОЙ ФЛЕШ-ПАМЯТИ

Рассмотрена схема кодирования с использованием кода-произведения, позволяющая существенно расширить перечень приемлемых каскадных конструкций для многоуровневой NAND флеш-памяти. Схема базируется на комбинировании компонентных высокоскоростных двоичных БЧХ-кодов в качестве внешней ступени и внутренних кодов на основе многомерных сигнальных множеств, обладающих гибкой структурой с широким диапазоном варьирования параметров и допускающих сравнительно простую организацию мягкого декодирования.
Ключевые слова: каскадное кодирование, коды-произведения, многомерные решетки, многоуровневая флеш-память, ID-AGN-модель.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, соглашение № FSRF-2020-0004 «Научные основы построения архитектур и систем связи бортовых информационно-вычислительных комплексов нового поколения для авиационных, космических систем и беспилотных транспортных средств».

F. A. Taubin*
Dr. Sc. Tech., Professor
A. N. Trofimov*
PhD Sc. Tech., Associate Professor
*St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

PRODUCT CODES OVER MULTIDIMENSIONAL LATTICES FOR THE MULTILEVEL FLASH MEMORY

A product code scheme for multilevel NAND flash memory is considered. The scheme expands significantly the list of acceptable concatenated constructions for the flash memory channel. It consists of combination of component high-speed binary BCH codes in outer stage, and inner codes designed as a finite subset of multidimensional signal constellations. This scheme has a flexible structure with a wide tradeoffs range between key parameters and achieves low implementation complexity of soft decision decoding.
Keywords: concatenated coding scheme, product codes, multidimensional lattices, multilevel flash memory, ID-AGN model.

Введение

Помехоустойчивое кодирование является составной частью технологии производства флеш-памяти. Наибольшей эффективностью как в плане помехо-

устойчивости, так и в плане гибкости конструкции, обладают кодовые схемы, основанные на использовании нескольких кодов. К таким схемам относятся каскадные коды и коды-произведения (product codes). В обеих схемах кодирование осуществляется с использованием двух ступеней – внешней и внутренней.

Среди возможных вариантов внутреннего кода следует выделить многомерные сигнальные множества, представляющие собой многомерные решетки и обладающие гибкой структурой с широким диапазоном варьирования параметров и допускающие, как правило, сравнительно простую организацию мягкого декодирования. Каскадное кодирование с внешним кодом Рида – Соломона и многомерным сигнальным множеством в качестве внутренней ступени оказывается весьма перспективным и привлекательным решением для повышения надежности хранения данных в NAND флеш-памяти [1] [4].

В ряде сценариев высокая сложность декодирования внешнего кода Рида – Соломона может оказаться серьезным ограничением даже при реализации внешней ступени кодирования вне чипа (off-chip). При наличии подобного рода ограничений потенциально конкурентными могут оказать конструкции на основе кодов-произведений. В таких кодах-произведениях в качестве внутренних кодов могут быть использованы коды, представляющие собой конечные подмножества многомерных решеток, а в качестве внешних – двоичные коды со сравнительно невысокой сложностью декодирования. [5], [6]. Описание конструкции кода-произведения с внутренним кодом, представляющим собой подмножество многомерной целочисленной решетки, приводится далее после краткого изложения рассматриваемой модели искажений в NAND флеш-памяти.

Модель искажений в NAND флеш-памяти

Будем полагать, что искажения сигнала, характеризующего величину уровня заряда в ячейке NAND флеш-памяти в процессе записи/считывания, описываются моделью с аддитивным гауссовым шумом, дисперсия которого зависит от уровня записи (input-dependent additive Gaussian noise, ID-AGN). Подробное изложение этой модели искажений сигнала в NAND флеш-памяти представлено в [3], [4], [7]. Для связности изложения, ограничимся здесь лишь кратким изложением рассматриваемой модели. Обозначим упорядоченную по возрастанию последовательность целевых уровней (состояний) напряжения в ячейке как $x_0, x_1, ..., x_{q-1}$; наименьший по величине целевой уровень x_0 соответствует состоянию «стерто». Гауссовская аппроксимация условной плотности распределения считываемого из ячейки сигнала y для состояния x_0 имеет вид

$$p_{y|x}(y|x_i) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma(x_i)} \exp\left(-\frac{(y - x_i)^2}{2\sigma(x_i)^2} \right),$$

где значение целевого уровня (состояния) x_i и дисперсия шума $\sigma(x_i)^2$ в состоянии x_i определяются числом циклов перезаписи N и длительностью хранения данных T.

Схема кодирования с использованием кода-произведения

В рассматриваемой схеме кодирования с использованием кода-произведения кодирование осуществляется с использованием двух ступеней – внешней и внутренней. На внешней ступени кодирование осуществляется высокоскоростным двоичным кодом со сравнительно невысокой сложностью декодирования. Например, это может быть высокоскоростной код двоичный БЧХ. В качестве внутреннего кода используется подмножество многомерной целочисленной решетки.

Кодирование использованием кода-произведения осуществляется следующим образом. Входные блоки, состоящие из kK_1 двоичных символов, разбиваются на k подблоков, состоящие из K_1 символов. Каждый подблок кодируется внешним двоичным (N_1, K_1) кодом C_{out} со скоростью $R=K_1/N_1$. Полученные k кодовых слов располагаются как строки матрицы размера $k\times N_1$. Каждый столбец полученной матрицы кодируется внутренним кодом B_0. Код B_0 представляет собой множество последовательностей, состоящих из n символов над алфавитом $A=\{0,1,\ldots,q-1\}$, где q – число уровней записи ячейки флеш-памяти; иначе говоря, код B_0 есть некоторое подмножество целочисленной решетки $\mathbb{Z}^n$. Элементы алфавита A связаны с входными уровнями (уровнями записи) ячейки памяти посредством взаимно однозначного отображения I множества A на множество $\{x_0, x_1,., x_{q-1}\}$ вида $I(i)=x_i$, $i=0,1,\ldots, q-1$. Будем полагать далее, что $m=\log_2 q$ целое число, то есть ячейка памяти может хранить m бит данных. Таким образом, кодовое слово кода-произведения представляет собой матрицу размера $n\times N_1$, элементы которой есть символы q-ичного алфавита A. Объем внутреннего кода равен $|B_0|=2^k$, его скорость $R_0=\log_2|B_0|/n=k/n$ бит на q-й символ. Общая скорость кода-произведения $R_{общ}$, определяющая значение плотности записи в ячейку флеш-памяти $R_{общ}=R_1R_0=K_1\log_2|B_0|/(N_1n)=(kK_1)/(N_1n)$ бит/ячейка.

Детальное описание регулярных методов построения внутренних кодов $B_0\subseteq\mathbb{Z}^n$, структура предложенных кодов и варианты конструкций приведены в [3], [4]. Примеры одного из вариантов конструкций внутреннего кода B_0 – на основе решеток Барнса – Уолла, для флеш-памяти с четырьмя состояниями приведены в табл. 1. Параметр δ в табл. 1 представляет собой минимальное евклидово расстояние кода B_0, которое в самом первом приближении определяет его помехоустойчивость.

Будем полагать далее, что в качестве внешнего кода C_{out} в рассматриваемой конструкции кода-произведения используется двоичный код БЧХ. Предполагается использование кодов с значением скорости $R_1=0.96$, 0.98 и 0.99. Коды с этими фиксированными значениями скорости получены из двоичных кодов БЧХ путем укорочения. Примеры исходных двоичных кодов БЧХ и их укорочения для использования в качестве внешнего кода перечислены в табл. 2.

Таблица 1

Параметры конструкций внутреннего кода B_0 на основе решеток Барнса – Уолла

№	Размерность решетки n	Исходная решетка Барнса – Уолла	Объем внутреннего кода 2^k	Квадрат минимального расстояния δ^2	Скорость кода R_0, бит/символ
1	7	E_7	2^{11}	3	11/7=1.571
2	8	E_8	2^{12}	4	8/12=1.5
3	8	RE_8	2^8	8	8/8=1.0
4	16	Λ_{16}	2^{20}	8	20/16=1.25

Таблица 2

Примеры двоичных кодов БЧХ для использования в качестве внешних кодов

Исходный двоичный код БЧХ		Укороченный двоичный код БЧХ C_{out}	
(N_1, K_1, d_1)	R_1	(N_1, K_1, d_1)	R_1
(511,493,5) (1023,993,7) (1023,983,9) (2047,1992,11) (2047,1992,11)	0.9648 0.9707 0.9609 0.9731 0.9678	(450,432,5) (750,720,7) (1000,960,9) (1375,1320,11) (1650,1584,13)	0.96
(511,502,3) (1023,1003,5) (2047,2014,7) (4095,4035,11) (4095,1023,13)	0.9824 0.9804 0.9839 0.9853 0.9824	(450,441,3) (1000,980,5) (1650,1617,7) (3000,2940,11) (3600,3528,13)	0.98
(1023,1013,3) (4095,4071,5) (4095,4059,7) (8191,8126,11) (8191,8113,13)	0.9902 0.9941 0.9912 0.9921 0.9905	(1000,990,3) (2400,2376,5) (3600,3564,7) (6500,6435,11) (7800,7722,13)	0.99

Декодирование кода-произведения выполняется в два этапа. Вначале независимо друг от друга декодируются N_1 внутренних кодов B_0. Каждый код B_0 декодируется по максимуму правдоподобия (МП) с использованием мягких решений, в качестве которых выступают компоненты n-мерного вектора сигналов, считываемых из n ячеек памяти. Затем независимо друг от друга декодируются k внешних БЧХ кодов в режиме исправления ошибок.

Список источников

1. RS-enhanced TCM for multilevel flash memories / J. Oh, J. Ha, J. Moon, G. Ungerboeck // IEEE Transactions on Communications. 2013. Vol. 61. N 5. P. 1674–1683.

2. *Dolecek L., Cassuto Y.* Channel coding for nonvolatile memory technologies: Theoretical advances and practical considerations // Proc. of the IEEE. 2017. N 9. P. 1705–1724.

3. *Таубин Ф. А., Трофимов А. Н.* Каскадное кодирование на основе многомерных решеток и кодов Рида – Соломона для многоуровневой флеш-памяти // Труды СПИИРАН. 2018. Вып. 2 (57). С. 75–103.

4. *Таубин Ф. А., Трофимов А. Н.* Каскадное кодирование для многоуровневой флеш-памяти с исправлением ошибок малой кратности во внешней ступени // Труды СПИИРАН. 2019. Вып. 18 (5). С. 1149–1181.

5. *Yang C., Chakrabarti C.* Product code schemes for error correction in MLC NAND flash memories // IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems. 2012. Vol. 20. N 12. P. 2302–2314.

6. *Kim D., Narayanan K., Ha J.* Symmetric Block-Wise Concatenated BCH Codes for NAND Flash Memories // IEEE Transactions on Communications. 2018. Vol. 66. N 10. P. 4365–4380.

7. Multilevel Flash Memories: Channel modeling, Capacities and Optimal Coding Rates / X. Huang, A. Kavcic, X. Ma, G. Dong // International Journal on Advances in Systems and Measurement. 2013. Vol. 6. N 3, 4. P. 364–373.

УДК 004.89.032.26

В. Н. Толстых*
кандидат технических наук, доцент
*Санкт-Петербургский государственный университет
аэрокосмического приборостроения

О РАЗВИТИИ МЕТОДОВ КЛАССИФИКАЦИИ И РЕГРЕССИИ

Рассмотрены перспективы развития методов регрессии и классификации данных, которые в настоящее время опираются на технологию нейронных сетей. У этой технологии есть слабые места, к которым относятся: большие затраты времени на обучение сети, нестабильность процесса обучения и перспектива переобучения. Вместе с тем в России параллельно разрабатывались конкурентные регрессионные и классификационные методы, возможности которых не до конца еще изучены.
Ключевые слова: искусственные нейронные сети, метод группового учета аргументов, классификация, регрессия, аппроксимация.

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

ON THE DEVELOPMENT OF CLASSIFICATION AND REGRESSION METHODS

In the article prospects of methods mathematical regression and classification are considered. Most of them are based on artificial neural networks technology, which have some problematic features: long time training of networks, learning process instability, and perspective of over-learning, etc. At the same time in parallel in Russia competitive methods of regression and classification were developed. Possibilities those methods are not completely investigated yet.
Keywords: artificial neural networks, group methods of data handling, classification, regression, approximation.

Введение

Математические методы регрессии позволяют установить аналитическую зависимость результатов измерений, а методы классификации позволяют отделить одни объекты от других по результатам выявленной изменчивости в измерениях. В докомпьютерное время эти методы развивались раздельно, хотя между ними много общего. Можно аппроксимировать все поступающие данные одной зависимостью, а также разделить их на характерные отрезки с различным поведением, скажем, на области роста и области падения. В первом случае это регрессия, во втором – классификация. Современные искусственные нейронные сети с успехом решают обе задачи. Вместе с тем, несмотря на признанную универсальность нейросетевого подхода, есть у него и известные недостатки. Один из них – долгое обучения сети, что требует больших вычислительных мощностей, которые не всем и не всегда доступны. К другим недостаткам относятся его склонность находить локальные оптимумы вместо глобального, склонность к переобучению, а также общая нестабильность метода, которая требует регу-

ляризации критерия сходимости (по Тихонову). Изначально развиваясь как метод классификации, с задачами регрессии нейросетевой метод справляется не лучшим образом.

Для задач, не требующих привлечения многомерной оптимизации, традиционные методы регрессии оказываются более надежными. Наиболее эффективным методом регрессии является метод наименьших квадратов, хотя и он имеет свои недостатки.

Оригинальный способ был предложен А. Г. Ивахненко в его «методе группового учета аргументов» МГУА [1]. Центральная идея метода – использование частных моделей, которые создают аргументы для следующего уровня моделей. Эта схема напоминает строение многоуровневой нейронной сети, хотя метод развивался независимо и параллельно в СССР. Другой оригинальной идеей автора явилась автоматическая генерация с последующей селекцией частных моделей, которая пока не нашла широкого применения. Третья идея – разбиение всей последовательности данных на обучающую и проверочную выборки. Ее в мире приняли и активно используют, что позволяет избегать переобучения нейросетей.

Классификация

В искусственных нейронных сетях основная идея классификации признаков заключается в построении разделяющих гиперплоскостей многомерного пространства параметров. Однако разделение гиперплоскостями не для всех случаев подходит. 16-я проблема Гильберта (решена Д. А. Гудковым [2]) гарантирует существование кривых с большим количеством несвязных компонент топологически эквивалентных сфере – замкнутых алгебраических многообразий, которыми можно эффективно отделять объекты с разными признаками. Разработанные в рамках алгебраической геометрии методы трансформации алгебраических многообразий – это еще один перспективный путь к задачам многомерной классификации.

Регрессия

В методе группового учета аргументов не используется нелинейная функция активации, которая, как правило, требует вычисления экспоненты, замедляющего работу нейросети. Это вынуждает переходить к стохастическим методам, вычисляя и используя градиент частями – батчами. Использование частных нелинейных моделей в виде многочленов младших степеней у А. Г. Ивахненко также делает зависимости нелинейными, но градиенты при этом вычисляются намного быстрее. Недостаточно проработанным остается сам алгоритм построения частных моделей, который может быть улучшен через последовательную генерацию моделей с увеличением степени полинома, при одновременном ограничении числа ее членов и, соответственно, параметров. Эту возможность дают дополнительные условия, которыми могут быть привязки к группам найденных точек или прежних аппроксимаций.

Следующий вопрос связан с выбором аппроксимирующего семейства: так ли оптимальны свертки и так ли мы ограничены использованием многочленов?

Определение [3]: *Пусть дано топологическое пространство X и два его подмножества A,B⊂X. Множество A называется плотным на множестве B, если любая окрестность любой точки B содержит хотя бы одну точку множества A. Множество A называется всюду плотным, если оно плотно в X.*

Если рассматривать множество непрерывных функций C^n на n-мерном кубе как топологическое пространство с базой, индуцированной выбранной метрикой, то можно определить всюду плотность для различных семейств многопараметрических функций, включая многочлены, ряды Фурье и в том числе сверточные нейронные сети. Развитие компьютерной техники отодвинуло на задний план аналитические методы, выдвинув вперед методы пошаговой оптимизации выбранной многопараметрической модели. Вместе с тем принципиально ничто не мешает функцию нейрона сделать изначально нелинейной: линейность нейронной модели не более чем дань традиции в моделировании нейрона естественного. Рассмотрим, как может выглядеть более совершенная модель искусственного нейрона в будущем. Формальная модель перцептрона выглядит следующим образом:

$$f(w,x)=\sigma\left(\sum_{i=1}^{m} w_i x_i + w_0\right).$$

Аргумент активатора «сигма» является линейной частью полного многочлена от m переменных. Полный многочлен степени n может выполнять ту же функцию, но без привлечения активационной функции. Его формальная запись такая:

$$p(x_1,...,x_n)=\sum\nolimits_I c_I x_1^{i_1} x_2^{i_2} ... x_n^{i_n} ,$$

где $I=(i_1,i_2,\ldots, i_n)$ – мультииндекс, а c_I – коэффициенты многочлена, зависящие от мультииндекса. Ввиду того, что все коэффициенты многочлена имеют линейное вхождение, градиент такой модели относительно быстро вычисляется. При этом аппроксимирующие свойства такой модели выше чем у нейросетевой модели с аналогичным набором параметров, подлежащим оптимизации. Применение метода градиентного спуска стало дальнейшим развитием метода группового учета аргументов, он пришел на замену методу наименьших квадратов.

Всюду плотные семейства на C^n перечисленными тремя семействами не исчерпываются. Очевидное дополнение списка – это семейство рациональных функций $F^{mn}=P^{mn}/Q^{mn}$ где m – размерность векторного пространства аргумента, а n – степень многочлена. То же можно сказать про семейство тригонометрических функций T^n. Оба семейства, очевидно, всюду плотны на C^n, поскольку они содержат в качестве подмножеств либо многочлены, либо ряды Фурье. Проблема для расширения состоит в том, что эти два семейства содержат нелинейное вхождение неопределенных коэффициентов. В первом случае это коэффи-

циенты знаменателя (b_i), во втором – период (T_i) и смещение (φ_i). Видимо, данное обстоятельство привело к тому, что эти семейства в задачах регрессии никак не используются: ни в методе наименьших квадратов, ни в методе градиентного спуска.

Вместе с тем для градиентного спуска таких семейств есть решение – это пошаговая оптимизация с вычислением градиента. Градиент ищется в виде ковектора длины $2n$

$$\nabla F(x) = \left(\ldots x^k / Q(x) \ldots, \ldots - x^k P(x) / Q^2(x) \ldots\right),$$

а его коэффициенты вычисляются в процессе спуска через систему уравнений сначала для знаменателя $Q = x^k / \nabla F$, затем для числителя $P = -\nabla F \cdot Q^2 / x^k$. При небольшом шаге спуска не столь значимо используем ли мы для вычисления градиента значения коэффициентов на этом или на предыдущем шаге. Большой плюс в использовании рациональных функций для задач регрессии заключается в том, что их поведение за границами интервала (или гиперкуба в многомерном случае) обучения контролируемо, независимо от максимальной степени многочленов числителя и знаменателя. Второй плюс модели в виде рациональной функции состоит в том, что при заданной степени многочленов, число коэффициентов удваивается, что делает модель более изменчивой. То есть рациональная функция степени n аппроксимирует на отрезке не хуже, чем многочлен в два раза большей степени $2n$. И третий несомненный плюс – ее экстраполяционные, то есть прогнозные, свойства несравненно лучше, чем у многочленов (рис. 1). Обучение моделей проходило в равных условиях с использованием многочлена и рациональной функции разной степени, но с равным числом параметров и за равное число итераций. Преимущество последней модели очевидно.

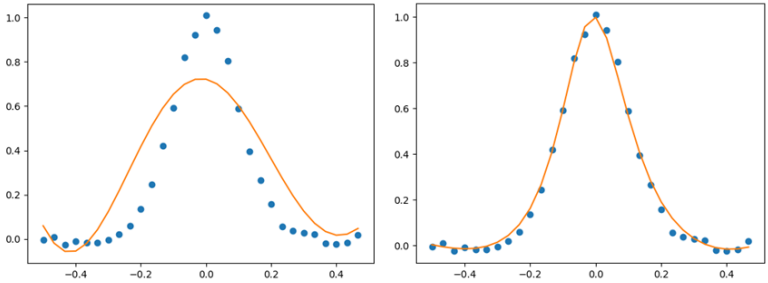


Рис. 1. Пример использования многочлена 12-й степени (слева) и рациональной функции 6-й степени (справа) для аппроксимации функции плотности нормального распределения

Заключение

Вычислительные эксперименты [4], [5] показали перспективность предлагаемых вариантов улучшения существующих методов классификации и ре-

грессии, особенно на малоразмерных данных с высокой изменчивостью значений аргумента. Практическая ценность развития этого подхода в упрощении моделей и самого процесса обучения нейросетей.

Список источников

1. *Ивахненко А. Г.* Самообучающиеся системы распознавания и автоматического управления. К.: Техніка, 1969.

2. *Полотовский Г. М.* В. В. Морозов, Д. А. Гудков и первая часть 16-й проблемы Гильберта // Ученые записки Казанского университета, 2012.

3. URL: https://dic.academic.ru/dic.nsf/ruwiki/854396 (дата обращения: 01.03.2023).

4. *Tolstykh V., Tolstykh I.* Generalization of Artificial Neuron. Proc. of the Int. Workshop «Soft Computing and the Measurements», 2000.

5. *Толстых В. Н., Толстых И. В., Ульянова Н. С.* Исследованием методов аппроксимации с нелинейными параметрами. Proc. of the Int. Workshop «Soft Computing and the Measurements», 2002.

УДК 621.391

А. Н. Трофимов*
кандидат технических наук, доцент
Ф. А. Таубин*
доктор технических наук, профессор
*Санкт-Петербургский государственный университет
аэрокосмического приборостроения

АНАЛИЗ ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТИ КОДОВ-ПРОИЗВЕДЕНИЙ С ВНУТРЕННИМИ МНОГОМЕРНЫМИ РЕШЕТКАМИ ДЛЯ МНОГОУРОВНЕВОЙ ФЛЕШ-ПАМЯТИ

Для многоуровневой NAND флеш-памяти выполнен анализ помехоустойчивости кодов-произведений с внутренними многомерными решетками и внешними компонентными БЧХ-кодами. Анализ проведен применительно к модели, отражающей основные физические особенности ячейки NAND флеш-памяти с неравномерно расположенными целевыми уровнями записи напряжения в ячейке памяти и дисперсией шума, зависящей от записанного значения (input-dependent additive Gaussian noise, ID-AGN). Продемонстрирована высокая эффективность использования во внешней ступени высокоскоростных компонентных БЧХ кодов, исправляющих 3…5 ошибок.
Ключевые слова: коды-произведения, многомерные решетки, коды БЧХ, многоуровневая флеш-память, ID-AGN модель, вероятность ошибки.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, соглашение № FSRF-2020-0004 «Научные основы построения архитектур и систем связи бортовых информационно-вычислительных комплексов нового поколения для авиационных, космических систем и беспилотных транспортных средств».

A. N. Trofimov*
PhD Sc. Tech., Associate Professor
F. A. Taubin*
Dr. Sc. Tech., Professor
*St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

PERFORMANCE EVALUATION OF PRODUCT CODES OVER MULTIDIMENSIONAL LATTICES FOR THE MULTILEVEL FLASH MEMORY

Performance evaluation of a product codes over multidimensional signal constellations with outer BCH codes for a model of multilevel NAND flash memory channel is presented. Performance analysis is fulfilled for the model reflecting the basic physical features of a flash memory cell with non-uniform target voltage levels and noise variance dependent on the recorded value (input-dependent additive Gaussian noise, ID-AGN). The high efficiency of high-rate component BCH codes in the outer stage correcting 3.5 errors is shown.
Keywords: product codes, multidimensional lattices, BCH codes, multilevel flash memory, ID-AGN model, bit error rate.

Введение

В [1] была предложена конструкция кода-произведения для многоуровневой NAND флеш-памяти, базирующаяся на использовании кодов компонентных высокоскоростных кодов БЧХ во внешней ступени и подмножества многомерной целочисленной решетки в качестве внутренней ступени. В [1] представлен перечень вариантов кодов-произведений для многоуровневой NAND флеш-памяти, полученных исходя из рационального сочетания дистанционных характеристик, плотности записи и сложности декодирования. В этой работе выполнен анализ помехоустойчивости некоторых конструкций из представленных в [1] применительно к указанной в [1] двухэтапной процедуре декодирования кода-произведения. Вероятность ошибки декодирования внешнего кода оценивается с использованием обычной техники суммирования биномиального распределения, а вероятность ошибки декодирования на бит для внутреннего кода – с использованием обобщения оригинального подхода, разработанного ранее в [2], [3].

Анализ помехоустойчивости схемы кодирования на основе кода-произведения

Стандартная оценка вероятности ошибки на бит при декодировании двоичного внешнего кода в канале с независимыми ошибками может быть записана как [4]

$$P_b \le \sum_{i=t+1}^{N_1} \frac{i+t}{N_1} C_{N_1}^{i} p_b^{i} (1-p_b)^{N_1-i}, \qquad (1)$$

где p_b – вероятность ошибки декодирования по МП двоичного символа внутреннего кода B_0; N_1 – длина внешнего кода C_{out}; t – максимальное число ошибок, исправляемых кодом. Вероятность ошибки на бит, возникающая при ошибочном декодировании слова, определяется как $p_b = \overline{k_e}/k$, где $\overline{k_e}$ – среднее число ошибочных бит на выходе декодера внутреннего кода B_0 после декодирования одного слова. Среднее число ошибочных бит $\overline{k_e}$ может быть найдено как $\overline{k_e} \le M^{-1} \sum_{\mathbf{x}} \sum_{\mathbf{x}' \ne \mathbf{x}} P_e(\mathbf{x} \to \mathbf{x}' \mid \mathbf{x}) K_e(\mathbf{x}, \mathbf{x}')$. В этом равенстве $P_e(\mathbf{x} \to \mathbf{x}' \mid \mathbf{x})$ – вероятность ошибки декодирования для кода из двух слов $\mathbf{x}$ и $\mathbf{x}'$ при условии, что было передано слово $\mathbf{x}$, $K_e(\mathbf{x}, \mathbf{x}')$ – число бит, в которых отличаются сообщения, соответствующие кодовым словам $\mathbf{x}$ и $\mathbf{x}'$, $M=|B_0|=2^k$, а суммирование по $\mathbf{x}$ и $\mathbf{x}'$ здесь и далее выполняется по всем словам кода B_0. Очевидно, что $K_e(\mathbf{x}, \mathbf{x}')=(\mathbf{a}(\mathbf{x}) \oplus \mathbf{a}(\mathbf{x}'))$, где $\mathbf{a}(\mathbf{x})$, $\mathbf{a}(\mathbf{x}')$ – битовые последовательности (сообщения), соответствующие кодовым словам $\mathbf{x}$ и $\mathbf{x}'$ соответственно, $w_H(\cdot)$ – обозначение веса Хэмминга. Далее определим функцию

$$F(Y) \triangleq \frac{1}{M} \sum_{\mathbf{x}} \sum_{\mathbf{x}' \ne \mathbf{x}} P_e(\mathbf{x} \to \mathbf{x}' \mid \mathbf{x}) Y^{K_e(\mathbf{x}, \mathbf{x}')}.$$

Очевидно, что $\overline{k_e} \le dF(Y)/dY\big|_{Y=1}$. Вероятность $P_e(\mathbf{x} \to \mathbf{x}' \,|\, \mathbf{x})$ может быть найдена как [2], [3]

$$P_e(\mathbf{x} \to \mathbf{x}' \,|\, \mathbf{x}) = \frac{1}{\pi}\int_0^\infty \mathrm{Re}\frac{\prod_{l=1}^{n} c_z(\alpha - j\beta; x^{(l)}, x'^{(l)})}{\beta + j\alpha}\, d\alpha, \qquad (2)$$

где $c_z(\omega;\ x,\ x')$ – характеристическая функция случайной величины, $z(y|x,\ x')=\ln(p_{y|x}(y|x')/p_{y|x}(y|x))$, то есть, $c_z(\omega; x, x') = \overline{\exp(j\omega z(y \,|\, x, x'))}$, где черта сверху означает усреднение по функции плотности вероятности $p_{y|x}(y|x)$. Свободный параметр β в правой части может быть положен равным 1/2. Для канала записи, заданного ID-AGN моделью, $c_z(\omega;\ x,\ x')$ задается следующим равенством [2], [3]

$$c_z(\omega; x, x') = \frac{\sigma(x)^{j\omega}\sigma(x')^{1-j\omega}}{\sqrt{j\omega\sigma^2(x) + (1-j\omega)\sigma^2(x')}} \exp\left(-\frac{j\omega(1-j\omega)(x-x')^2}{2(j\omega\sigma^2(x) + (1-j\omega)\sigma^2(x'))}\right).$$

Для кодовых решеток, имеющих практическое значение, справедливо представление $K_e(\mathbf{x}, \mathbf{x}') = \sum_{l=1}^{n} k_e^{(l)}(x^{(l)}, x'^{(l)})$, где $k_e^{(l)}(x, x')$ – число различающихся разрядов в битовых метках, соответствующих ребрам кодовой решетки на l-м уровне, отмеченным кодовыми символами x и x'. Ясно, что $k_e^{(l)}(x, x') = w_H(a^{(l)}(x) \oplus a^{(l)}(x'))$, где $a^{(l)}(x)$, $a^{(l)}(x')$ – битовые метки, соответствующие ребрам кодовой решетки, отмеченным символами x и x' соответственно. Тогда можно записать, что

$$F(Y) = \frac{1}{\pi M}\sum_{\mathbf{x}}\sum_{\mathbf{x}' \ne \mathbf{x}}\int_0^\infty \mathrm{Re}\frac{\prod_{l=1}^{n} c_z(\alpha - j\beta; x^{(l)}, x'^{(l)}) Y^{k_e^{(l)}(x^{(l)}, x'^{(l)})}}{\beta + j\alpha}\, d\alpha. \qquad (3)$$

Поскольку для любого значения аргумента ω $c_z(\omega;x,x)=1$; $k_e^{(l)}(x, x) = 0$, то

$$F(Y) = \frac{1}{\pi M}\int_0^\infty \mathrm{Re}\frac{D(\alpha - j\beta, Y) - M}{\beta + j\alpha}\, d\alpha,$$

где $D(\omega, Y) = \sum_{\mathbf{x}}\sum_{\mathbf{x}'}\prod_{l=1}^{n} c_z(\omega; x^{(l)}, x'^{(l)}) Y^{k_e(x^{(l)}, x'^{(l)})}$. Значит, для вероятности ошибки на бит p_b можно записать следующее неравенство $p_b \le k^{-1}\, dF(Y)/dY\big|_{Y=1} = k^{-1}\lim_{\varepsilon\to 0}(F(1+\varepsilon) - F(1))/\varepsilon$, или $p_b \lesssim k^{-1}$ $(F(1+\varepsilon)$ – $F(1))/\varepsilon$ при $\varepsilon \ll 1$. Задача вычисления этой границы состоит из двух этапов: 1) получение выражения для функции; 2) вычисление интеграла (3) для $Y=1$ и $Y=1+\varepsilon$, для чего обычно требуется численное интегрирование. Окончательно

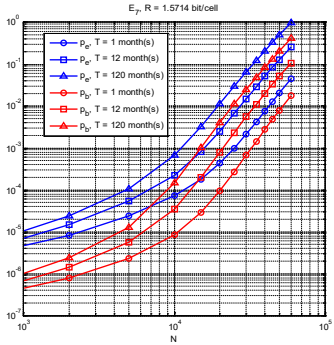
можно записать, что $p_b \lesssim k^{-1}\,(J(1+\varepsilon) - J(1))/\varepsilon$ при $\varepsilon \ll 1$, где использовано обозначение

$$J(Y) \triangleq \frac{1}{\pi M}\int_0^{\infty} \mathrm{Re}\frac{D(\alpha - j\beta, Y)}{\beta + j\alpha}\,d\alpha. \qquad (4)$$

Численные результаты

Результаты вычисления оценки вероятности ошибки на бит p_b с использованием выражения (4) для вариантов внутреннего кода № 1 и 4 из представленных в табл. 1 в [1], показаны на рис. 1. Эти кривые представляют собой зависимости верхней границы вероятности p_b от числа циклов перезаписи N для различных значений времени хранения (retention time) T. На этих же рисунках представлены зависимости границы вероятности ошибки декодирования по МП слова внутреннего кода p_e. Техника оценивания вероятности ошибки p_e сходна с техникой получения оценки p_b и представлена в [2], [3]. Из приведенных графиков следует, что значение p_b заметно меньше, чем значение p_e. Это различие особенно велико для каналов с хорошими условиями записи/чтения, то есть при малых значениях N и T. Такое соотношение объясняется тем, что наиболее вероятные ошибки декодирования слова внутреннего кода приводят к небольшому числу ошибочно декодированных информационных битов. Это обстоятельство, очевидно, имеет положительное влияние на вероятность ошибки декодирования на бит P_b на внешней ступени декодирования, которая вычисляется по формуле (1).

Вариант №1



Вариант №4

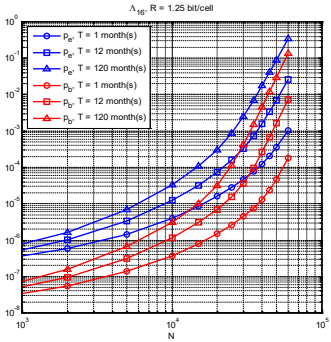


Рис. 1. Вероятности ошибки декодирования внутреннего кода на слово p_e и на бит p_b

В качестве иллюстрации приведем примеры вычисления границы вероятности ошибки на бит P_b (см. (1)), возникающей при декодировании кода-

произведения, для вариантов № 1 и 4 и укороченных двоичных кодов БЧХ, перечисленных в [1] в табл. 2 со значением скорости 0.96 на внешней ступени (рис. 2). Из рассмотрения графиков, показанных на рис. 2, и сравнения их с кривыми, представленными на рис. 1, следует, что внешняя ступень кодирования оказывается очень эффективной. Она обеспечивает снижение вероятности ошибки на бит на выходе декодера кода-произведения до величины порядка 10^{-15} при очень незначительном снижении общей скорости, определяющей величину плотности записи информации в ячейки флеш-памяти. Скорость кода-произведения $R_{общ}$ снижается по сравнению со скоростью внутреннего кода R_0 на единицы процентов, но вероятность ошибки на бит снижается за счет этого на несколько порядков и достигает требуемого уровня, например, 10^{-15}. Этот эффект наблюдается и для других вариантов кодирования, для которых уровень вероятности ошибки на бит может быть еще более понижен за счет увеличения длины внешнего кода.

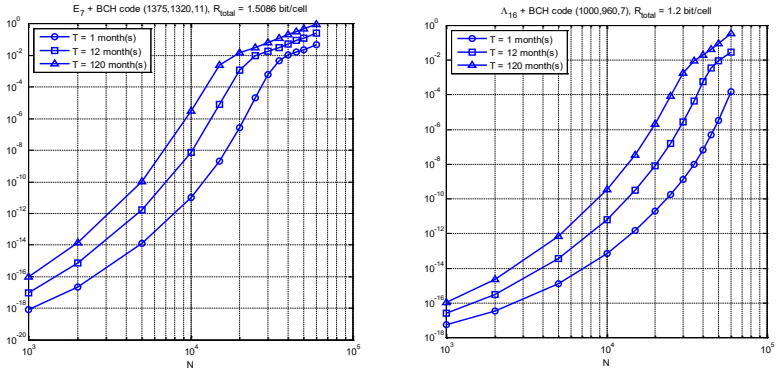


Рис. 2. Вероятность ошибки декодирования кода-произведения на бит P_b*:*
внутренний код– код № 1 и код № 4; внешний код – укороченный код БЧХ, R_1*=0.96*

Список источников

1. *Таубин Ф. А., Трофимов А. Н.* Коды-произведения с внутренними многомерными решетками для многоуровневой флеш-памяти // Волновая элентроника и инфокоммуникационные системы: XXVI Междунар. научн. конф. Ч. 3.

2. *Трофимов А. Н., Таубин Ф. А.* Вычисление аддитивной границы вероятности ошибки декодирования с использованием характеристических функций // Информационно-управляющие системы. 2021. № 4. С. 71–85.

3. *Таубин Ф. А., Трофимов А. Н.* Каскадное кодирование на основе многомерных решеток и кодов Рида – Соломона для многоуровневой флеш-памяти // Труды СПИИРАН. 2018. Вып. 2 (57). С. 75–103.

4. *Кларк Д., Кейн Д.* Кодирование с исправлением ошибок в системах цифровой связи. М.: Радио и связь. 1987.

УДК 629.735.33

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

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНИК УСКОРЕНИЯ АЛГЕБРАИЧЕСКИХ ОПЕРАЦИЙ, ВЫПОЛНЯЕМЫХ МОБИЛЬНЫМИ АГЕНТАМИ БЕЗОПАСНОСТИ

Приводятся результаты проведения вычислительных экспериментов при реализации техник ускорения операций, выполняемых в конечных полях, с целью найти компромисс между требуемыми объемами памяти для хранения элементов конечных полей в теле агента безопасности и временем генерации таковых при жестких ограничениях на память у мобильных агентов безопасности.
Ключевые слова: мобильные агенты безопасности, вычислительные операции, конечное поле, алгоритм Зетча.

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

INVESTIGATION OF TECHNIQUES FOR ACCELERATION ALGEBRAIC OPERATIONS PERFORMED BY MOBILE SECURITY AGENTS

The paper presents the results of computational experiments in the implementation of various techniques for accelerating operations performed in finite fields in order to find a compromise between the required memory volumes for storing elements of finite fields in the security agent body and the generation time of such under strict memory restrictions for mobile security agents.
Keywords: mobile security agents, computational operations, finite field, Zech algorithm.

Введение

Современные системы управления информационной безопасностью, такие как SCC и SIEM-решения, реализуются в агентном исполнении, где на сторону агентов различного типа возложена основная функциональность по реализации аналитических целей, в том числе таких, как сервисы аутентификации и верификации контролируемых программных сущностей [1]. Часто такие агенты называют агентами безопасности. При этом сами агенты безопасности могут быть реализованы как в стационарном, так и мобильном исполнении, мигрирующие в границах контролируемой IT-инфраструктуры.

Жизненный цикл агентов безопасности предусматривает в ходе реализации целевых задач необходимость межагентных коммуникаций с сохранением целостности и конфиденциальности коммуникационных сообщений. Для этого применяют различного рода криптографические примитивы (эллиптические кривые, хэш-функции и т. п.) и алгоритмы (схемы Мак – Элиса, Эль – Гамаля, Шнорра, алгоритм Чаума и т. п.), которые в свою очередь требуют оптимиза-

ции вычислительных ресурсов при выполнении операций в конечных полях. Особенно это важно для мобильных агентов безопасности.

В статье приводятся результаты проведения вычислительных экспериментов при реализации техник ускорения операций, выполняемых в конечных полях с целью найти компромисс между требуемыми объемами памяти для хранения элементов конечных полей в теле агента безопасности и временем генерации таковых при жестких ограничениях на память у мобильных агентов безопасности. Исходя из опыта практических реализаций мобильных агентов безопасности [1], [2] объем памяти, который можно выделить под хранение в теле агента элементов конечных полей, измеряется всего лишь десятками килобайт. Поэтому при проведении исследований в данном случае требовалось определить максимально допустимые характеристики конечных полей, которые позволят агенту хранить и выполнять операции в конечных полях в объеме, не превышающей 100 Кбайт. При этом модельное время выполнения элементарных операций не должно превышать 1 секунду.

Будем рассматривать эксперименты, проведенные для операций над полиномами в конечных полях Галуа.

Пусть

$$p_1(x)=\sum_{i=0}^{n} c_i x^i \text{ и } p_2(x)=\sum_{i=0}^{m} d_i x^i \text{ –}$$

полиномы на конечным полем Галуа GF(q) со степенями n и m соответственно; q – характеристика поля. Тогда выражения (1) соответствует сложению и вычитанию полиномов, а выражение (2) умножению

$$p_1(x)+p_2(x)=\sum_{i=0}^{\max(n.m)} (c_i+d_i)x^i;$$

$$p_1(x)-p_2(x)=\sum_{i=0}^{\max(n.m)} (c_i-d_i)x^i; \qquad (1)$$

$$p_1(x)\cdot p_2(x)=\sum_{i=1}^{n+m}\left(\sum_{\substack{h=i+j\\ i=\overline{1,n};\, j=\overline{1,m}}} c_i d_j\right)x^h. \qquad (2)$$

Следует отметить, что выполнение операций (1)–(2) с вычислительной точки зрения для агентов не представляет каких-либо сложностей, так как они выполняются как обычные операции над элементами массивов с приведением коэффициентов по модулю характеристики простого подполя (табл. 1). Но мобильные агенты безопасности функционируют с критически ограниченными вычислительными ресурсами (и по времени, и по объему памяти) и требуют ускорения даже этих операции. Используем для этого логарифм Зетча в случае наличия в теле агента построенного конечного поля.

Таблица 1

Априорная оценка вычислительной сложности алгебраических операций

№	Операция	Алгоритм	Асимптотическая сложность по времени
1.	Вычисление значения полинома в точке	Тривиальное вычисление	$O(n^3)$, n=deg(p(x))
2.	Вычисление значения полинома в точке	Метод Горнера	O(n), n=deg(p(x))
3.	Вычисление обратного мультипликативного (обратного элемента по умножению в поле)	Расширенный алгоритм Евклида	$O(n^2 (m - n + 1))$, m=deg(p_1(x)), n=deg(p_2(x))
4.	Вычисление обратного мультипликативного (обратного элемента по умножению в поле)	Вычисление обратного элемента по умножению через возведение коэффициента в степень равную функции Эйлера от характеристики поля без единицы	$O(n^{q-q/p})$, n=deg(p(x)), $q=\|GF(q)\|$, p – характеристика простого подполя
5.	Вычисление обратного мультипликативного (обратного элемента по умножению в поле)	Вычисление обратного элемента через построенное поле	O(1)
6.	Выполнение умножения в поле	Покоэффициентное умножение элементов поля	$O(n^2)$, n=deg(p(x))
7.	Выполнение умножения в поле	Умножение с помощью степенного представления	O(1)
8.	Выполнение сложения в поле	По коэффициентное сложение элементов поля	O(n), n=deg(p(x))
9.	Выполнение сложения в поле	Сложение с помощью логарифма Зетча	O(1)
10.	Выполнение деления в поле	Деление элементов поля с поиском обратного элемента по умножению с помощью расширенного алгоритма Евклида	$O(n^2 (m - n + 1))$, m=deg(p_1(x)), n=deg(p_2(x))
11.	Выполнение деления в поле	Деление элементов поля с помощью умножение на обратный	O(1)

Логарифм Зетча представляет собой функцию $a^{Z(x)} = a^x - 1$, где $a \in GF(q)$, а сложение двух элементов поля можно представить в виде выражения (3)

$$a^i + a^j = a^{\min(i,j)}\left(a^{\max(i,i)-\min(i,j)} + 1\right). \quad (3)$$

Поскольку умножение в степенной форме представления элементов конечного поля выполняется с вычислительной сложностью **O**(1) [3], то если для каждого элемента поля записать номер степени, представляющий сумму этого элемента с единицей, то сложение элементов поля также может быть выполне-

но со сложностью **O**(1). Алгоритм поиска логарифма Зетча требует введения обозначений (4)–(5).

Обозначим N(x) – нумератор элемента поля, а N(Z(x)) – нумератор логарифма зетча этого элемента поля

$$N(x)=\sum_{i=0}^{k} x_i p^i, \tag{4}$$

где k – степень расширения поля; p – характеристика простого подполя

$$N\left(Z\left(x\right)\right)=\begin{cases} N\left(x\right)-p+1, \text{ при } N\left(x\right)\equiv p-1 \bmod p \\ N\left(x\right)+1, \text{ при } N\left(x\right)\neq p-1 \bmod p \end{cases}. \tag{5}$$

Тогда алгоритм поиска логарифма Зетча включает следующие шаги.

Шаг 1. Найти *N(x)* для каждого элемента поля.

Шаг 2. Найти *N(Z(x))* для каждого *N(x)*.

Шаг 3. Вычислить логарифм Зетча путем поиска совпадений *N(Z(x))* и *N(x)* для каждого элемента поля.

Отметим, что шаг 3 можно оптимизировать (уменьшить в два раза число поисковых сравнений) вследствие утверждений (6), доказанных в [3]

$$Z\left(q-x-1\right)=Z\left(x\right)-x \bmod \left(q-1\right),\ Z\left(0\right)=0, \text{ для } q=2,$$

$$Z\left(\frac{q-1}{2}\right)=0, \text{ для } q\neq 2. \tag{6}$$

Кроме того, механизмы асинхронного поиска при наличии у агентской пратформы параллельных λ-вычислителей позволяют также значительно ускорить операции с векторным представлением элементов конечного поля. Для реализации операции деления необходим поиск обратного мультипликативного элемента, что выполняются либо возведением примитивного элемента поля в степень равную функции Эйлера от q без единицы, либо расширенным алгоритмом Евклида. Функция Эйлера имеет асимптотическую сложность **O**($\sqrt{n}$), но для вычисления мультипликативного обратного элемента в первом случае требуется выполнить q –q/p (p – характеристика простого подполя) умножений, имеющих сложность **O**(n^2), а в случае расширенного алгоритма Евклида нужно выполнить **O**($n^2(m-n+1)$), где m и n – степени полиномов. Следовательно, алгоритм Евклида очевидно выгоднее при вычислениях, однако гораздо проще хранить степени примитивного элемента для каждого из элементов поля, что позволит выполнять операции умножения и деления в поле за **O**(1).

Приведем в формальном виде алгоритм деления полиномов в конечном поле.

Вход: $p_1\left(x\right)=\sum_{i=0}^{n} c_i x^i$ и $p_2\left(x\right)=\sum_{i=0}^{m} d_i x^i$ – полиномы на конечным полем Галуа GF(q) со степенями n и m соответственно; q – характеристика поля.

Алгоритм: for k in [m-n;0] $s_k = \frac{c_k + n}{d_n}$ $\{$ *for j in [n+k–1;k]* $c_j = c_j - s_k d_{j-k}$ $\}$

return $s(x) = \sum_{i=0}^{m-n} s_i x^i$, $r(x) = \sum_{i=0}^{n-1} r_i x^i$.

Выход алгоритма: $s(x) = \sum_{i=0}^{m-n} s_i x^i$, и $r(x) = \sum_{i=0}^{n-1} r_i x^i$. такие, что $p_1(x) = s(x) p_2(x) + r(x)$ и $\deg(r(x)) < \deg(p_2(x))$.

В ходе функционирования агенту зачастую приходится решать задачу своего переквантования [4] (переход в режим выполнения операций в вычислительном поле с отличной от начальной характеристики). При переквантовании требуется иметь примитивный многочлен для построения конечного поля с новой характеристикой. Поэтому в минимальный набор библиотеки операций над конечными полями для агента включена функция для проверки полинома на примитивность. Для этого использован алгоритм на базе малой теоремы Ферма, позволяющий выделить малую ближайшую окрестность, где в ходе перебора осуществляется поиск примитивного многочлена. Отметим, что для всякого нормализованного неприводимого полинома *p(x)* степени n над полем GF(q) справедлива делимость $p(x) \left| x^{q^n} - 1 \right.$. Нормализованный неприводимый полином *p(x)* является примитивным, если помимо выполнения делимости $p(x) \left| x^{q^n} - 1 \right.$. для него выполняется неделимость $p(x) \backslash x^k - 1$ при $k < q^n - 1,\ k \in Z$. Следовательно, вместо проверки неделимости полинома p(x) и всех возможных многочленов степени *n–1* на GF(*q*) со сложностью **O**(*qn*), можно провести проверку за **O**(*n*).

Функционал реализован в виде динамической библиотеки операций, использован язык программирования C++. Объем итогового dll-файла составляет 44 килобайта. При моделировании использован процессор 12th Gen Intel(R) Core (TM) i5–12500H. Результаты генерации поля и логарифма Зетча для полей с разными характеристиками представлены в табл. 2. При наличии в теле агента значений конечного поля реализации операций сложения, вычитания, деления и вычисления значения многочлена занимали менее миллисекунды вне зависимости от характеристики в диапазоне от *q=2* до *q=17*, при этом тестировались полиномы со степенями до 1E+4.

Таблица 2

Экспериментальные результаты генерации полей с разными характеристиками

q	2	3	5	11	17	101	251	401	653	997	2287
m=1											
t, мс	0,012	0,015	0,018	0,043	0,105	5	46	287	1257	4319	51833
V, Кб	0,273	0,372	0,423	0,611	0,917	4,527	10,972	17,418	28,246	43,027	98,457

q	2	3	5	11	17	101	251	401	653	997	2287
m=2											
t, мс	0,016	0,037	0,088	3,913	199	72661	>10E5	>10E5	>10E5	>10E5	>10E5
V, Кб	0,346	0,516	1,642	5,761	16,017	>10E2	>10E2	>10E2	>10E2	>10E2	>10E2
m=3											
t, мс	0,036	1,993	9,022	3931	>10E5	>10E5	>10E5	>10E5	>10E5	>10E5	>10E5
V, Кб	0,463	1,616	5,649	15,051	>10E2	>10E2	>10E2	>10E2	>10E2	>10E2	>10E2
m=5											
t, мс	3,6	39	595	>10E5	>10E5	>10E5	>10E5	>10E5	>10E5	>10E5	>10E5
V, Кб	1,323	11,16	87,649	>10E2	>10E2	>10E2	>10E2	>10E2	>10E2	>10E2	>10E2

В заключение следует отметить, что наличие в теле агента безопасности сформированного конечного поля позволяет практически в реальном масштабе времени выполнять криптографические алгоритмы. Практически значимым результатом проведенного исследования является экспериментальное подтверждение возможности выполнять алгебраические операции и переквантование агента в реальном масштабе времени (<1 сек.) для расширенных конечных полей с характеристиками не более $q=5^5$.

Список источников

1. *Беззатеев С. В., Фомичева С. Г., Супрун А. Ф.* Повышение эффективности мультиагентных систем информационной безопасности методами постквантовой криптографии // Проблемы информационной безопасности. Компьютерные системы. 2022. № 4 (52). С. 71–88.

2. *Фомичева С. Г.* Моделирование мобильных агентов в киберфизических системах // Волновая электроника и инфокоммуникационные системы: XXIII Междунар. научн. конф. СПб.: ГУАП, 2020. С. 368–374.

3. *Zech J.* (1910) [1849]. Tafeln der Additions- und Subtractions-Logarithmen für sieben Stellen Berlin: Weidmann'sche Buchhandlung. Archived from the original. URL: https://archive.org/details/tafelnderadditi00zechgoog (дата обращения: 24.02.2023).

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, FRUCT 2017. 2017. P. 69–76.

УДК 51–76:517.9

А. А. Щеголева*
магистрант
М. Д. Поляк*
старший преподаватель
*Санкт-Петербургский государственный университет
аэрокосмического приборостроения

ПРИМЕНЕНИЕ АЛГОРИТМА НЕЛИНЕЙНОЙ АДАПТАЦИИ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ ВТОРОГО ПОРЯДКА С НЕСЛУЧАЙНЫМ ВОЗМУЩЕНИЕМ

Рассмотрено применение алгоритма нелинейной адаптации для системы «хищник-жертва» с неслучайным возмущением. Приведены аналитические выводы о возможных режимах работы системы при различных значениях целевой переменной. Представлены результаты компьютерного моделирования для двух видов неслучайного возмущения.
Ключевые слова: теория синергетического управления, метод АКАР, алгоритм нелинейной адаптации, хищник-жертва, ТРР-модель, математическое моделирование.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 23-29-00336).

A. A. Shchegoleva*
Postgraduate Student
M. D. Polyak*
Senior Lecturer
*St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

APPLICATION OF THE NONLINEAR ADAPTATION ALGORITHM FOR MODELING SECOND ORDER DYNAMIC SYSTEMS WITH NON-RANDOM DISTURBANCE

The article considers the application of the nonlinear adaptation algorithm for the predator-prey system with non-random perturbation. Analytical conclusions about possible operating modes of the system at different values of the target variable are presented. The results of computer modeling for two types of non-random perturbation are presented.
Keywords: synergetic control theory, ADAR method, nonlinear adaptation algorithm, predator-prey, TPP model, mathematical modeling.

Введение

Проблема эвтрофикации водоемов связана с рядом факторов, таких как плохая очистка сточных вод, изменение температуры воды, миграция теплолюбивых таксонов в более северные широты. Часть этих факторов являются абиотическими, то есть они оказывают внешнее воздействие на экосистему водного объекта. Некоторые из них сложно или практически невозможно регулировать (например, температура воды), что не дает возможности напрямую влиять на систему и предотвращать эвтрофикацию воды, которая нередко сопровождает-

ся цветением фитопланктона. Тем не менее, если соответствующие службы будут иметь прогноз относительно вероятности цветения воды и его объемов, то могут быть предприняты меры, которые ослабят эффект цветения и его последствия.

Одним из вариантов получения такого прогноза является построение математических моделей и их компьютерное моделирование. В научной литературе есть множество моделей, которые описывают взаимодействие фитопланктона и его естественного хищника зоопланктона. В [1] описывается двухкомпонентная Toxin-Producing-Phytoplankton (TPP) модель взаимодействия токсичного фитопланктона и зоопланктона. Токсичный фитопланктон действует на другие виды (в том числе зоопланктон) и обладает саморегулирующейся активностью. Токсичный фитопланктон также может цвести с определенной частотой, его токсины имеют негативное воздействие на зоопланктон, что снижает давление хищников на жертв.

Поскольку не существует единой модели цветения фитопланктона, то все существующие модели являются базовыми для их последующей модификации. Под модификацией модели мы понимаем создание новых устойчивых режимов работы модели и их аналитическое описание. Одним из возможных подходов к модификации является применение методик управления в экологических системах. По аналогии с техническими системами введенное управление будет выполнять две задачи: анализ и синтез. Задача анализа – поиск реакций системы при различном воздействии на нее и определение ее свойств, задача синтеза – выбор такого управления, при котором исходный объект с управлением дает системы с нужными характеристиками. Мы рассмотрим применение алгоритма непрерывной адаптации для неслучайного возмущения (Nonlinear Adaptation algorithm for a Deterministic object (NAD)) для синтеза регулятора системы с неопределенностью в описании правой части.

Алгоритм непрерывной адаптации для неслучайного возмущения

В исследовании применения новых практик синергетического управления [2]–[4] для расширения существующих систем, которые могут применяться для моделирования цветения фитопланктона, существенное место занимают вопросы применения методик управления для систем со случайным и неслучайным возмущениями. Такие системы менее устойчивые за счет введения внешних воздействий, которые могут вывести систему из устойчивого состояния. Как часть такого исследования рассмотрим постановку задачи управления нелинейным объектом с неслучайным возмущением. В [5] описан алгоритм нелинейной адаптации как модификация классического метода аналитического конструирования агрегированных регуляторов (АКАР). Приведем основные шаги построения регулятора согласно NAD-алгоритму:

1) расширение фазового пространства системы за счет перемещения возмущения в дополнительную переменную z, которая является моделью неслучайного возмущения;

2) синтез регулятора по методу АКАР согласно иерархии n-го количества макропеременных ($\psi_1, \psi_2, ..., \psi_n$), определяющих внешне- и внутрисистемные динамические инварианты системы. На последнем этапе синтеза используется макропеременная вида $\psi^e = \psi + kz$ ($k = const > 0$), где ψ – целевая макропеременная; k – коэффициент влияния шума на движение изображающей точки (ИТ) системы вдоль траектории.

Как и в классическом АКАРе должно выполняться условие $\psi^e(t) = 0, t \to \infty$ для решения которой макропеременная должна доставлять глобальный минимум функционалу качества (1)

$$\Phi^e = \int_0^\infty \left[\left(\psi^e(t) \right)^2 + T_e^2 \left(\dot{\psi}^e(t) \right)^2 \right] dt \to \min \tag{1}$$

И соответственно быть решением уравнения Эйлера – Лагранжа (2):

$$T_e \dot{\psi}^e(t) + \psi^e(t) = 0, t \to \infty; \tag{2}$$

3) в итоге получим управление u_{NAD}, которое должно обеспечивать асимптотически устойчивое и робастное движение в окрестности макропеременной $\psi(t) = 0, t \to \infty$.

ТРР-модель

ТРР-модель (3) имеет следующие предположения:

1) популяция токсичного фитопланктона растет согласно логистическому закону;

2) взаимодействие с зоопланктоном имеет вид функционального ответа 2-го типа по Холлингу;

3) токсины оказывают подавляющее воздействие на рост зоопланктона

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= r x_1 \left(1 - \frac{x_1}{K} \right) - \alpha f(x_1) x_2 \\ \dot{x}_2 &= \beta f(x_1) x_2 - \mu x_2 - \theta g(x_1) x_2, \\ f(x_1) &= g(x_1) = \frac{x_1}{\gamma + x_1} \end{aligned} \tag{3}$$

где x_1, x_2 – популяции фитопланктона и зоопланктона; $\alpha, \beta, \mu, \theta$ – коэффициенты взаимодействия между видами; γ – коэффициент полунасыщения.

Базовая ТРР-модель имеет три устойчивых решения, которые можно вычислить по заданным коэффициентам системы:

1) $E_0(0,0)$ – тривиальное решение;

2) $E_1(K,0)$ – вымирание зоопланктона, в водной среде остается только фитопланктон

$$E_2\left(x_1^*, x_2^*\right),$$

где $x_1^* = \dfrac{\gamma\mu}{\beta-\mu-\theta}$; $x_2^* = \dfrac{Kr\beta^2\gamma - \mu r\beta\gamma^2 - 2Kr\beta\gamma\theta - K\mu r\beta\gamma + \mu r\gamma^2\theta + Kr\gamma\theta^2 + K\mu r\gamma\theta}{Ka\mu^2 + 2Ka\mu\theta - 2Ka\beta\mu + Ka\theta^2 - 2Ka\beta\theta + Ka\beta^2}$

Система с управлением

Расширим ТРР-модель (3) введением целевой макропеременной вида (4), где x_1^* – целевое значение популяции фитопланктона

$$\psi = x_1 - x_1^*. \tag{4}$$

Поставим задачу управления объектом (5), где z – модель шума. Добавим в систему третье уравнение, описывающее изменение неслучайного возмущения на систему (шаг 1 согласно NAD-алгоритму). Коэффициент пропорциональности $\eta > 0$ является параметром системы управления; ψ – целевая макропеременная

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= rx_1\left(1-\frac{x_1}{K}\right) - \alpha f(x_1)x_2 + u + z, \\ \dot{x}_2 &= \beta f(x_1)x_2 - \mu x_2 - \theta g(x_1)x_2, \\ \dot{z} &= \eta\psi. \end{aligned} \tag{5}$$

Синтезируя систему согласно основным шагам NAD-алгоритма, получим систему с управлением (6)

$$\begin{gathered} \dot{x}_1 = rx_1\left(1-\frac{x_1}{K}\right) - \alpha f(x_1)x_2 + u + z, \\ \dot{x}_2 = \beta f(x_1)x_2 - \mu x_2 - \theta g(x_1)x_2, \\ f(x_1) = g(x_1) = \frac{x_1}{\gamma + x_1}, \\ \dot{z} = \eta\psi, \\ u = -\frac{\psi^e}{T_1} - \left(rx_1\left(1-\frac{x_1}{K}\right) - \alpha f(x_1)x_2\right) - z - k\eta\psi, \\ \psi = x_1 - x_1^*, \\ \psi^e = \psi + kz. \end{gathered} \tag{6}$$

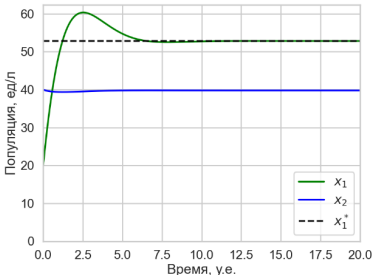
Система (6) имеет три режима работы:

1) устойчивый режим работы при $x_1^* = \dfrac{\gamma\mu}{\beta-\mu-\theta}$;

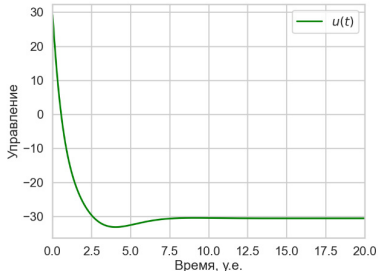
2) вымирание зоопланктона при $x_1^* < \dfrac{\gamma\mu}{\beta-\mu-\theta}$;

3) экспоненциальный рост популяции зоопланктона при $x_1^* > \dfrac{\gamma\mu}{\beta-\mu-\theta}$

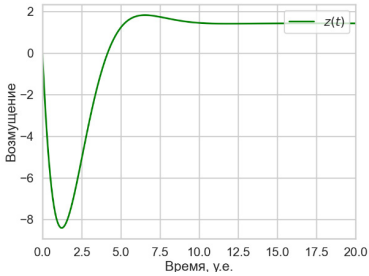
.



а) Популяции фитопланктона и зоопланктона



б) Управление



в) Возмущение

Рис. 1. Численное решение системы (6) с возмущением $\xi = 2$. *Параметры системы:*

$$x_1(0)=20,\ x_2(0)=40,\ z(0)=0,\ x_1^* \approx 52,\ T_1=5,\ k=2,\ \eta=0.5,\ r=2,\ K=108,$$
$$\alpha=0.7,\ \beta=0.6,\ \mu=0.3654,\ \theta=0.2,\ \gamma=5$$

Из трех режимов наиболее интересным является первый – когда обе популяции принимают устоявшееся положительное значение в финальной точке. Существенным ограничением является строго определенное значение переменной x_1^*, которое допускает такое поведение системы. Возможная интерпретация полученных точек связана с определением оптимального значения популяции фитопланктона, которое позволяет сосуществовать в системе двум видам. Если значение меньше оптимального, то это приводит к вымиранию или миграции хищников, в противном случае переизбыток жертв ведет к быстрому росту количества хищных особей. Переизбыток жертв поддерживается за счет постоян-

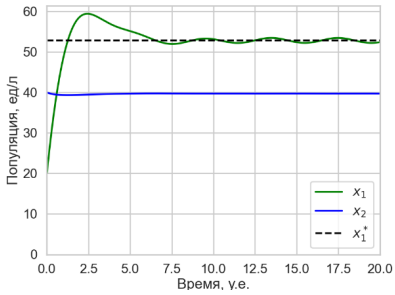
ного воздействия управления, которое поддерживает популяцию в заданном состоянии.

Компьютерное моделирование

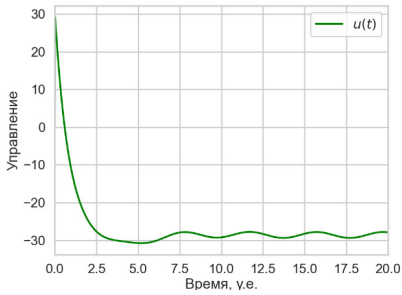
В качестве неслучайного возмущения рассмотрим два случая:

1) $\xi = const$ как постоянный источник шума;

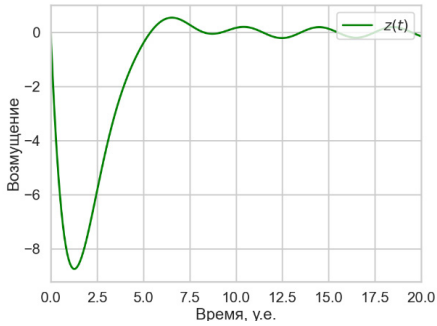
2) $\xi(t) = \sin\left(\frac{\pi t}{2}\right)$ – возмущение представляет собой гармоническое колебание.



а) Популяции фитопланктона и зоопланктона



б) Управление



в) Возмущение

Рис. 2. Численное решение системы (6) с возмущением $\xi(t) = \sin\left(\frac{\pi t}{2}\right)$. *Параметры системы:* $x_1(0) = 20$, $x_2(0) = 40$, $z(0) = 0$, $x_1^* \approx 52$, $T_1 = 5$, $k = 2$, $\eta = 0.5$, $r = 2$, $K = 108$, $\alpha = 0.7$, $\beta = 0.6$, $\mu = 0.3654$, $\theta = 0.2$, $\gamma = 5$

Результаты компьютерного моделирования для первого случая представлены на рис. 1. Как видно из рис. 1*а,* система находится в устойчивом состоянии, управление переводит систему в новое состояние согласно целевой макропеременной.

Другим случаем является гармоническое возмущение. Результаты численного моделирования представлены на рис. 2. Популяция фитопланктона достигает целевого значения несмотря на постоянные колебания. Результаты моделирования подтверждают, что система устойчивая с более сложным возмущением, управление постоянно корректирует управляющее воздействие в соответствии с отклонением от цели.

Заключение

В статье приведена система с двумя видами неслучайного возмущения: постоянное возмущение и гармоническое возмущение. Для обеих систем приведены результаты компьютерного моделирования, которые подтверждают теоретические выводы об устойчивости системы при выполнении заданного условия относительно целевой переменной. Регулятор, синтезированный по новому NAD-алгоритму, успешно корректирует систему согласно целевому многообразию.

Список источников

1. *Chattopadhayay J., Sarkar R.* Toxin-producing Plankton May Act as a Biological Control for Planktonic Blooms – Field Study and Mathematical Modelling // Journal of Theoretical Biology. 2002. № 215 (3). P. 333–344.

2. *Колесников А. А.* Синергетика и проблемы теории управления. М.: Физматлит, 2004. 504 с.

3. *Колесников А. А., Кузьменко А. А.* Методы АКАР и АКОР в задачах синтеза нелинейных систем управления // Мехатроника, автоматизация, управление. 2016. № 10. С. 657–669.

4. *Колесникова С. И.* Синтез управления нелинейным объектом второго порядка с неполным описанием // Автоматика и телемеханика. 2018. № 9. С. 18–30.

5. *Kolesnikov A., Kolesnikova S.* Synthesis Algorithm for a Continuous Robust Regulator on a Manifold for a Manipulator under Non-Random Noise Conditions // 2020 International Russian Automation Conference (RusAutoCon), 2020.

УДК 621.39

Н. А. Янковский*
ассистент
*Санкт-Петербургский государственный университет
аэрокосмического приборостроения

СЕТЕВОЕ КОДИРОВАНИЕ В МЕЖМАШИННЫХ КОММУНИКАЦИЯХ

Предложена схема передачи данных, основанная на сетевом кодировании, для алгоритма двухэтапного случайного доступа в системах массовых межмашинных коммуникаций. Численные результаты показывают, что использование предложенной схемы позволяет значительно снизить задержку передачи сообщения в восходящем канале для всех рассматриваемых количеств пользовательских устройств в соте. При этом усложнение процедуры декодирования позволило обеспечить более высокий уровень надежности передачи данных. Цель исследования – разработка схемы передачи данных в восходящем канале связи, позволяющей снизить среднюю задержку при сохранении требований к надежности передачи.
Ключевые слова: сетевое кодирование, межмашинные коммуникации, беспроводные сети, двухэтапный случайный доступ, восходящий канал связи.

N. A. Yankovskii*
Assistant
*St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

NETWORK CODING IN MACHINE-TO-MACHINE COMMUNICATIONS

Purpose of this work is to develop a data transmission scheme in the upstream communication channel, which allows to reduce the average delay while maintaining the requirements for transmission reliability. A data transmission scheme based on network coding was proposed for a two-stage random access algorithm in mass machine-to-machine communication systems. The effectiveness of the proposed solution was tested using simulation modeling. Numerical results show that the use of the proposed scheme makes it possible to significantly reduce the delay in transmitting a message in the uplink for all the considered numbers of user devices in the cell. At the same time, the complication of the decoding procedure allowed for a higher level of reliability of data transmission.
Keywords: network coding, massive machine type communications, wireless networks, 2-step random access, uplink channel.

Введение

В технологическом стандарте пятого поколения (5G) для сотовых систем [1], [2] предполагается поддержка ряда новых сервисов и приложений. Среди них есть критически важные приложения (включая промышленную автоматизацию и автономные транспортные средства), которые должны поддерживаться сверхнадежной связью с низкой задержкой (URLLC) [3]–[5].

В этой статье предлагается подход, основанный на использовании сетевого кодирования (NC) в mMTC. В рассматриваемом подходе пакеты NC, которые представляют собой линейные комбинации блоков исходных данных, передаются вместе с исходными пакетами данных. В частности, пакеты NC гене-

рируются с использованием скользящего окна исходных пакетов данных, и по этой причине предлагаемый подход называется скользящим NC (SNC). Этот подход позволяет приемнику декодировать последовательность закодированных пакетов «на лету» с заданной задержкой декодирования. В результате, когда передатчик генерирует последовательность пакетов и желает доставить каждый пакет с гарантированной задержкой, предлагаемый подход может быть использован для обеспечения высокой надежности передачи при сохранении требуемой задержки или же обеспечить снижение задержки передачи данных, сохранив уровень надежности.

Модель системы

В рассматриваемой модели имеется N устройств, каждое из которых имеет свою неограниченную очередь сообщений и пуассоновский входной поток с заданной интенсивностью. Все время разбито на фреймы одинаковой длины, если у устройства на момент начала фрейма есть сообщение, то оно считается активным и пытается произвести передачу данных по восходящему каналу связи на базовую станцию.

Для передачи данных используется двухэтапная процедура случайного доступа [6]. На первом этапе (рис. 1) устройство случайным образом выбирает преамбулу и передает ее совместно с данными (MsgA), при этом каждой преамбуле соответствует свой подканал передачи. Если несколько устройств на первом этапе выберет одну и ту же преамбулу, то произойдет коллизия и сообщения всех пользователей, выбравших эту преамбулу, будут декодированы неудачно. На втором этапе в случае успешного декодирования полученного сообщения базовая станция отправляет положительную квитанцию обратно на устройство (MsgB).

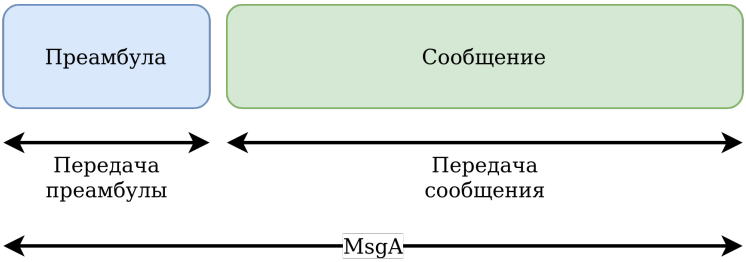


Рис. 1. Передача преамбулы и сообщения по восходящему каналу связи

В этой работе используются следующие допущения:

- рассматривается двоичный канал со стиранием. Это подразумевает, что при передаче сообщения с вероятностью P_e произойдет ошибка и сообщение будет невозможно правильно декодировать;

- предполагается, что в нисходящем канале связи ошибки отсутствуют, таким образом, устройство всегда узнает, было ли корректно доставлено сообщение или нет.

Надежная передача данных

Для удобства описания сначала дадим определения используемым переменным. Время, затрачиваемое на передачу преамбулы, обозначается как T_{pr}, время передачи пакетов обозначается как T_{tx}, а время обработки полученного пакета или обратной связи обозначается как T_{dp}. В зависимости от размера пакета, качества канала и стратегии планирования время передачи T_{tx} может варьироваться от одного до нескольких TTI. Учитывая небольшие пакеты трафика URLLC, предполагаем, что $T_{pr}=T_{dp}=T_{tx}=1$ TTI, как и в [7], [8].

Для критически важного приложения может потребоваться декодировать каждый пакет с определенной задержкой, а сбои декодирования, вызывающие повторные передачи в HARQ, могут привести к значительным потерям производительности приложения. Таким образом, при передаче пакетов желательно иметь достаточно низкую частоту ошибок декодирования, чтобы свести к минимуму количество повторных передач.

Для решения этой проблемы предлагается использовать подход на основе сетевого кодирования. Исходное сообщение разбивается на m блоков равной длины X_1, X_2, X_m. При передаче в первом TTI передается исходное сообщение без изменений, а в последующих TTI вместо копий передаются линейные комбинации из блоков исходного сообщения.

Рассмотрим пример формирования сообщения для k=2 и m=4. На рис. 2 показан формат передаваемого сообщения для данных параметров. При этом во втором TTI передаются линейные комбинации блоков X_j и X_{j-k+1}.

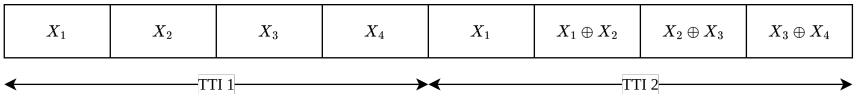


Рис. 2. Формат сообщения при k=2 и m=4

Численные результаты

Для оценки эффективности было произведено сравнение предложенной схемы на основе сетевого кодирования со схемой *K*-повторений с помощью имитационного моделирования. Сравнение происходило по следующий двум важным критериям:

- средняя задержка передачи сообщения;
- вероятность потери сообщения из-за серии неудачных передач.

На рис. 3 изображены графики зависимости средней задержки и вероятности неудачной передачи сообщения от числа устройств в соте.

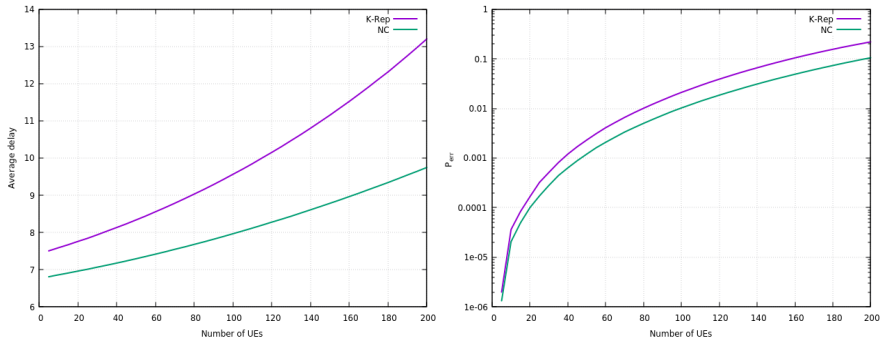


Рис. 3. График зависимости средней задержки от общего числа устройств в системе

Заключение

В этой статье была предложена схема скользящего сетевого кодирования, дающая прирост производительности за счет лучшего использования ресурсов канала. В результате данная схема сетевого кодирования может использоваться для снижения средней задержки передачи сообщения по восходящему каналу связи при сохранении исходной вероятности неудачной передачи или же для увеличения надежности передачи при сохранении средней задержки. Интересным развитием исследования данной темы может стать поиск схем, основанных на сложении битовых блоков данных в недвоичном поле, а также поиск оптимальных схем скользящего сетевого кодирования для различных значений параметра k (числа повторений).

Список источников

1. 5G: A tutorial overview of standards, trials, challenges, deployment, and practice / M. Shafi, A. Molisch, P. Smith et al. // IEEE J. Selected Areas in Communications. 2017. Vol. 35. P.1201–1221.

2. *Agiwal M., Roy A., Saxena N.* Next generation 5G wireless networks: A comprehensive survey // IEEE Communications Surveys Tutorials. 2016. Vol. 18. N 3. P. 1617–1655.

3. Enabling technologies for ultra-reliable and low latency communications: From PHY and MAC layer perspectives / G. Sutton, J. Zeng, R. Liu et al. // IEEE Communications Surveys Tutorials. 2019. Vol. 21. N 3. P. 2488–2524.

4. 3GPP. Study on physical layer enhancements for NR ultra-reliable and low latency case (URLLC) (release 16). 3GPP TR 38.824 V2.0.1, 2019.

5. 5G Americas.New services and applications with 5G ultra-reliable low-latency communication. 5G Americas, 2020. URL: https://www.5gamericas.org/new-services-applications-with-5g-ultra-reliable-low-latency-communications (дата обращения: 15.02.2023).

6. Radio Resource Control (RRC) Protocol specification, document TS 38.331 V16.1.0, 3GPP, Sophia, Antipolis, France, Jul. 2018

7. System level analysis of K-repetition for uplink grant-free URLLC in 5G NR / T. Jacobsen, R. Abreu, G. Berardinelli et al. // European Wireless 2019; 25th European Wireless Conf., May. 2019. P. 1–5.

8. Grant-Free Access for URLLC Service / Y. Liu, Y. Deng, M. Elkashlan et al. // IEEE Journal on Selected Areas in Communications. 2021. Vol. 39. N 3. P.741–755.

ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА
И СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

УДК 681.51

М. С. Брунов*
старший преподаватель
Е. Ю. Ватаева*
старший преподаватель
Н. Л. Гречкин*
ассистент
В. Ф. Шишлаков*
доктор технических наук, профессор
*Санкт-Петербургский государственный университет
аэрокосмического приборостроения

СИНТЕЗ ПИД-РЕГУЛЯТОРА ОБОБЩЕННЫМ МЕТОДОМ ГАЛЕРКИНА

Рассмотрен вопрос, связанный с определением коэффициентов ПИД-регулятора САУ при полиномиальной аппроксимации нелинейного элемента. В качестве математического аппарата применяется обобщенный метод Галеркина. Результаты вычислений приводятся.
***Ключевые слова*:** ПИД-регулятор, полиномиальная аппроксимация, обобщенный метод Галеркина, нелинейная САУ.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, соглашение № FSRF-2023-0003 «Фундаментальные основы построения помехозащищенных систем космической и спутниковой связи, относительной навигации, технического зрения и аэрокосмического мониторинга».

M. S. Brunov*
Senior Lecturer
E. Y. Vataeva*
Senior Lecturer
N. L. Grechkin*
Assistant
V. F. Shishlakov*
Dr. Sc. Tech., Professor
*St. Petersburg State Marine Technical of University

SYNTHESIS OF A PID – CONTROLLER BY THE GENERALIZED GALERKIN METHOD

The issue related to the determination of the coefficients of the PID – controller ACS with a polynomial approximation of a nonlinear element is considered. The generalized Galerkin method is used as a mathematical apparatus. The calculation results are given.
Keywords: PID-controller, polynomial approximation, generalized Galerkin method, nonlinear automatic control system.

Обеспечение заданных показателей качества работы нелинейных систем автоматического управления (САУ) в переходных режимах представляет собой

весьма сложную задачу, правильное решение которой во многом связано с построением адекватной математической модели [1].

Поскольку в состав систем автоматического управления (САУ) и комплексов входят элементы и устройства, имеющие нелинейные характеристики, то при разработке математических моделей, степень их адекватности непосредственно связана с принятым способом аппроксимации нелинейностей.

В работе рассматривается синтез ПИД-регулятора обобщенным методом Галеркина при различной точности аппроксимации характеристики нелинейного элемента. Исходными данными для синтеза являются входы и выходы полиномиальных моделей разной точности. На рис. 1 представлена исследуемая схема, в которой нелинейная характеристика аппроксимируется полиномиально

$$y(x) = y(x_0) + a_1(x - x_0) + a_2(x - x_0)^2 + \ldots + a_n(x - x_0)^n.$$

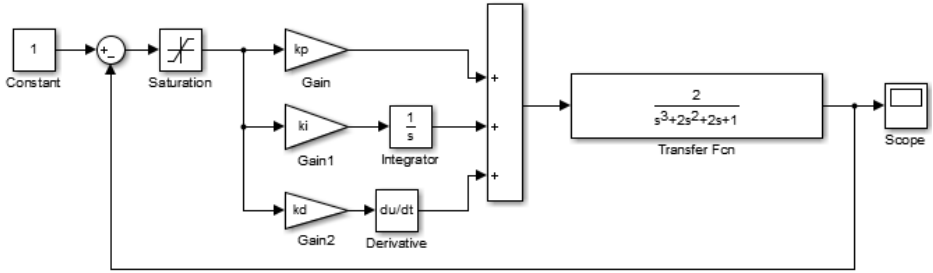


Рис. 1. Математическая модель исследуемой системы

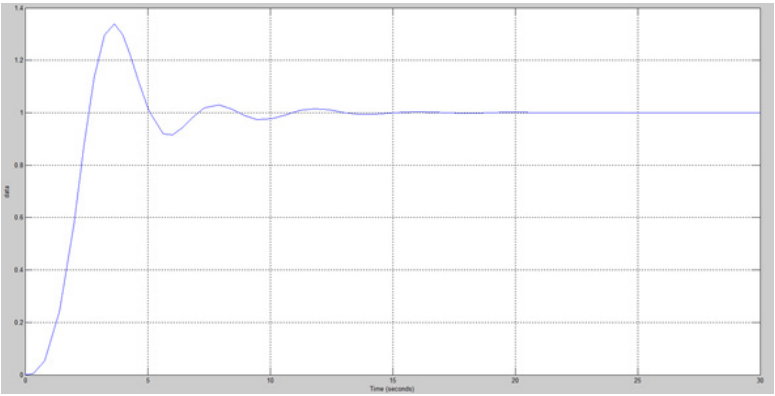


Рис. 2. Переходной процесс системы без коррекции

Динамика системы описывается следующим дифференциальным уравнением

$$\left[\left(s^4+2s^3+2s^2+s\right)\right]\cdot x^0(t)+\left[2\left(sK_d+sK_p+K_i\right)\right]\cdot F\left[x^0(t)\right]=$$
$$=\left(s^4+2s^3+2s^2+s\right)\cdot f(t),$$

где K_d, K_p, K_i – параметры регулятора, подлежащие определению.

В качестве желаемого программного движения был задан процесс следующего вида

$$x^0(t)=H\cdot e^{-\alpha t},$$

где $\alpha=\dfrac{3\div 4}{T_{ПП}}$.

Как было указано в [2], с математической точки зрения задача синтеза параметров законов управления сводится к поиску минимума целевой функции, построенной на основе уравнений Галеркина

$$J=\sum_{q=1}^{m}\left\{\int_0^{\infty}\left[\sum_{i=0}^{n}a_i\left(c_k\right)A_{qi}+\sum_{i=0}^{u}b_i\left(c_k\right)B_{qi}-\sum_{i=0}^{v}e_i\left(c_k\right)C_{qi}\right]\right\}^2,\min_{c_k}J\to 0,$$

где a_i, b_i, e_i – вещественные постоянные коэффициенты полиномов оператора обобщенного дифференцирования D степеней n, u, v, являющиеся в общем случае функциями варьируемых параметров c_k закона управления системы; A_{qi}, B_{qi}, C_{qi} – интегралы Галеркина вида

$$C_{qi}=\int_0^{\infty}D^i\left\{1(t)\right\}e^{-\rho_q t}dt=\rho_q^{i-1},\quad A_{qi}=\int_0^{\infty}D^i\left\{e^{-\alpha t}1(t)\right\}e^{-\rho_q t}dt=\frac{\rho_q^i}{\alpha+\rho_q},$$

$$B_{qi}=\int_0^{\infty}D^i\left\{\sum_{g=0}^{l}z_g\left[x_0e^{-\alpha t}\right]^g 1(t)\right\}e^{\rho_q t}dt=B_{qg}\rho_q^{i-1},$$

$$i=0,1,...,u,\ q=1,2,...,m,\ g=1,2,...l,$$

где $B_{qg}=\sum_{g=0}^{l}\dfrac{z_g x_0^g\rho_q}{g\alpha+\rho_q},\ g=1,2,...,l.$

В ходе решения поставленной задачи были получены коэффициенты полинома для различных степеней (табл. 1). На рис. 3 и 4 приведена аппроксимация нелинейного элемента при различных степенях полинома [3].

Таблица 1

Показатель степени, g	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5
g=2	-0.0107	1.2774	-0.9243	-	-	-
g=3	-0.0174	1.4095	-1.3356	0.3107	-	-
g=4	0.0026	0.8464	1.7575	-5.1437	2.9715	-
g=5	0.0125	0.4853	4.7435	-14.0940	13.9304	-4.6724

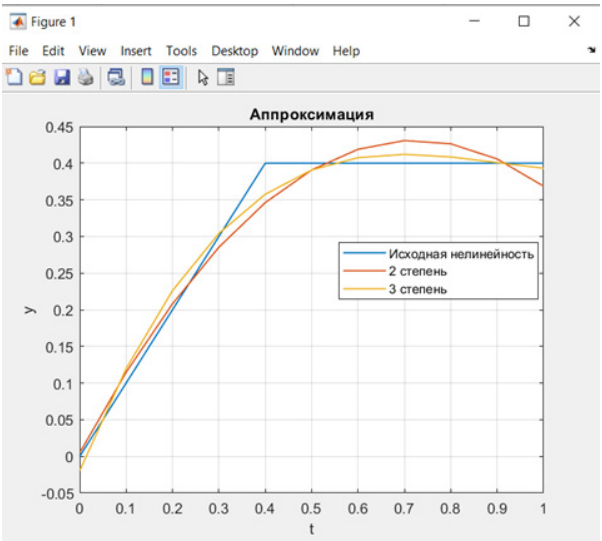


Рис. 3. Аппроксимация нелинейного элемента полиномом 2 и 3 степенями

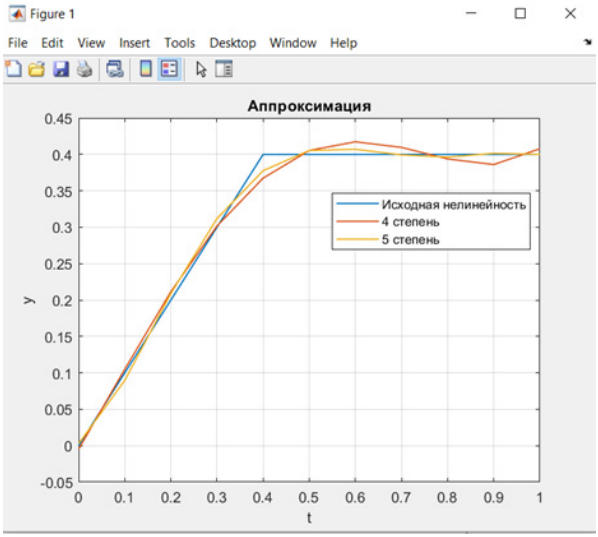


Рис. 4. Аппроксимация нелинейного элемента полиномом 4 и 5 степенями

Далее были получены коэффициенты ПИД-регулятора при различных степенях полинома (табл. 2). На рис. 5 приведен переходной процесс скорректированной системы при различной точности полиномиальных моделей.

Таблица 2

Коэффициент ПИД - регулятора	Полином пятой степени	Полином четвертой степени	Полином третьей степени	Полином второй степени
K_d	0.6271	0.6281	0.6356	0.6560
K_p	0.2936	0.2928	0.2879	0.2780
K_i	0.1150	0.1152	0.1159	0.1170

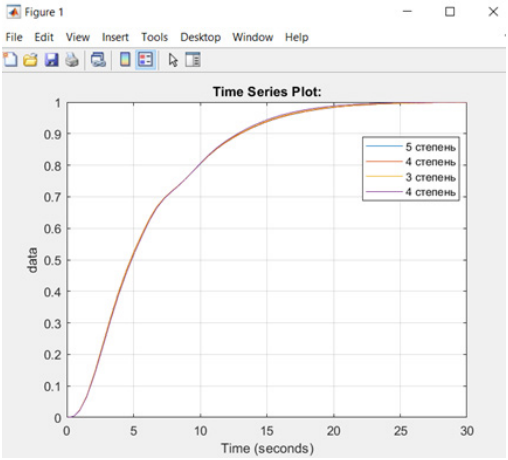


Рис. 5. Переходной процесс скорректированной системы при различных показателях степеней полинома

В работе был рассмотрен синтез ПИД-регулятора системы автоматического управления при полиномиальной аппроксимации нелинейного элемента. Получены при различных показателях степени коэффициенты K_d, K_p, K_i и переходные процессы системы на основании этого можно сделать вывод о том, что данная система малочувствительная к уменьшению точности модели нелинейного элемента.

Список источников

1. *Sun X., Liu N., Shen R.* Nonlinear PID Controller ParametersOptimization Using ImprovedParticle Swarm OptimizationAlgorithm for the CNC System. Appl. Sci. 2022, 12, 10269.

2. *Никитин А. В., Шишлаков В. Ф.* Параметрический синтез нелинейных систем автоматического управления: монография / Под ред. В. Ф. Шишлакова. СПб.: ГУАП, 2003.

3. *Shishlakov V., Vataeva E., Reshetnikova N.* Synthesis of control lawsof electromechanical systems under polynomial approximation of characteristics of nonlinear elements // MATEC Web Conf. Vol. 161. 2018.

УДК 62.529

А. В. Бубнов*
доктор технических наук, профессор
В. К. Федоров*
доктор технических наук, профессор
Б. А. Косарев*
кандидат технических наук, доцент
А. А. Охотников*
старший преподаватель
Г. А. Кощук*
старший преподаватель
*Омский государственный технический университет

СГЛАЖИВАНИЕ ПРОФИЛЯ МОЩНОСТИ ПОТРЕБИТЕЛЯ ПРИ ПОМОЩИ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ

КВ-радиостанции являются потребителями с резко переменным характером нагрузки. Один из способов сгладить профиль мощности таких потребителей – интеграция в их систему электроснабжения электростанций малой мощности. В исследовании выполнен расчет параметров системы электроснабжения КВ-радиостанции с распределенными источниками энергии, показаны конструктивные особенности системы и приведен алгоритм управления.
***Ключевые слова*:** возобновляемые источники энергии, алгоритм управления, КВ-радиостанция, распределенные источники энергии, профиль мощности.

A. V. Bubnov*
Dr. Sc. Tech., Professor
V. K. Fedorov*
Dr. Sc. Tech., Professor
B. A. Kosarev*
PhD Sc. Tech., Assistant Professor
A. A. Okhotnikov*
Senior Lecturer
G. A. Koshchuk*
Senior Lecturer
*Omsk State Technical University, Omsk

SMOOTHING THE LOAD PROFILE OF THE CONSUMER USING DISTRIBUTED ENERGY RESOURCES

High frequency radio stations are consumers with a sharply – variable nature of the load. One way to smooth the load profile of such consumers is to integrate small power plants into their power supply system. In the study, the calculation of the parameters of the power supply system high frequency radio stations with distributed energy resources was performed, the design features of the system were shown, and the control algorithm was given.
Keywords: renewable energy sources, control algorithm, high frequency radio station, distributed energy resources, load profile.

Введение

Одним из способов уменьшить пиковою нагрузку потребителя (сгладить профиль мощности) в обмен на стимулирующие выплаты от поставщика электроэнергии является интеграция в систему его внутреннего электроснабжения электростанции малой мощности. Такие электростанции в научно-технической литературе получили название «распределенные источники энергии» (РИЭ) [1], [2].

В настоящее время развитие РИЭ на основе возобновляемых источников энергии является одним из основных направлений развития мировой энергетики [3], [4].

В работе рассмотрена возможность сглаживания профиля мощности КВ-радиостанции при помощи внедрения в систему ее внутреннего электроснабжения устройства на основе РИЭ.

Суточный график нагрузки КВ-радиостанции имеет резко переменный характер (рис. 1).

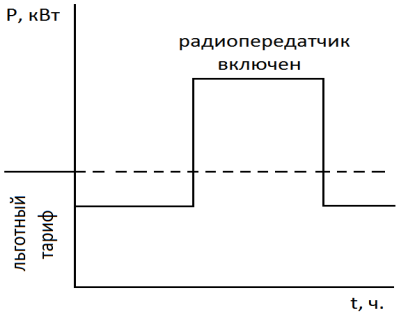


Рис. 1. Упрощенный суточный график нагрузки КВ-радиостанции

Резкому увеличению электропотребления КВ-радиостанции соответствует включение радиопередатчика в начале сеанса связи. После завершения сеанса связи радиопередатчик выключают. В зависимости от мощности излучения радиопередатчика электропотребление КВ-радиостанции может быть мгновенно увеличено в 2–7 раз.

Использование энергии от устройства на основе РИЭ позволяет компенсировать электропотребление радиопередатчика КВ-радиостанции во время сеанса связи. Так, достигается сглаживание профиля мощности КВ-радиостанции [5].

Устройство для сглаживания профиля мощности не обеспечивает автономную работу КВ-радиостанции. Поэтому КВ-радиостанция постоянно подключена к прилегающей распределительной сети через трансформаторную подстанцию. К шинам подстанции подключается устройство для сглаживания профиля мощности, обеспечивая снижение электропотребления КВ-

радиостанцией из прилегающей внешней системы электроснабжения во время сеанса связи (рис. 2).

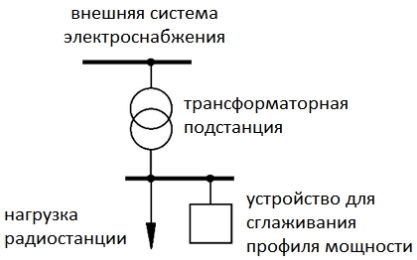


Рис. 2. Упрощенная однолинейная схема питания нагрузки КВ-радиостанции

Расчет параметров устройства и описание алгоритма работы

Для облегчения доставки и ввода в эксплуатацию, повышения механической прочности и снижения массогабаритных показателей устройство для сглаживания профиля мощности размещается в контейнере.

Внутри контейнера монтируются следующие сборочные единицы: генерирующая установка на основе двигателя внутреннего сгорания, блок системы автоматического управления, генерирующая установка на основе возобновляемого источника энергии, сетевой инвертор с аккумуляторной батареей, состоящее из трех систем шин и двух выключателей распределительное устройство (рис. 3).

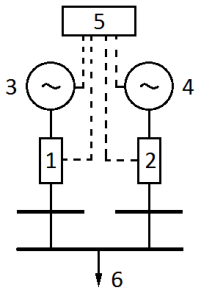


Рис. 3. Структурная схема устройства для сглаживания профиля мощности:
1, 2 – выключатели; 3 – солнечная электростанция; 4 – двигатель внутреннего сгорания;
5 – система автоматического управления; 6 – распределительное устройство

Алгоритм работы устройства заключается в следующем. При запросе на включение радиопередатчика САУ контролирует уровень заряда батареи. При соответствии уровня заряда батареи допустимому значению через сетевой инвертор батарея подключается на параллельную работу с внешней сетью и ра-

диопередатчиком (выключатель 1 включен), затем включается радиопередатчик. При достижении заданного уровня разряда батареи САУ выполняет запуск ДВС, подключение ДВС на параллельную работу с внешней сетью и радиопередатчиком (выключатель 2 включен), отключение батареи (выключатель 1 выключен). Аккумуляторная батарея постоянно подключена через сетевой инвертор к солнечной электростанции и имеет емкость достаточную для сглаживания профиля мощности КВ-радиостанции.

Рассмотрим пример осуществления устройства для сглаживания профиля мощности КВ-радиостанции, показывающий его конструктивные особенности и подтверждающий возможность достижения технического результата.

Пусть при включении радиопередатчика мощность нагрузки радиостанции превышает заданную сетевой компанией величину на 3 кВт в течение часа.

Для осуществления сеансов связи без превышения заданного электропотребления предлагается использовать устройство для сглаживания профиля мощности КВ-радиостанции.

Кратко опишем технические характеристики силового оборудования устройства, а также при помощи схем покажем его конструктивные особенности. В качестве РИЭ используется фотоэлектрическая установка с площадью батареи 21 м^2 и с последовательно-параллельным соединением панелей, обеспечивающим выходное напряжение 60 В и выходной ток 50 А. В качестве накопителя энергии используются 4 аккумуляторные батареи с суммарной емкостью 100 А·ч и с напряжением 12 В. В устройстве используется сетевой инвертор с опцией поиска точки максимальной мощности. В качестве резервного источника используется трехфазный газовый генератор с номинальной мощностью 5,5 кВт и номинальным фазным током 8 А.

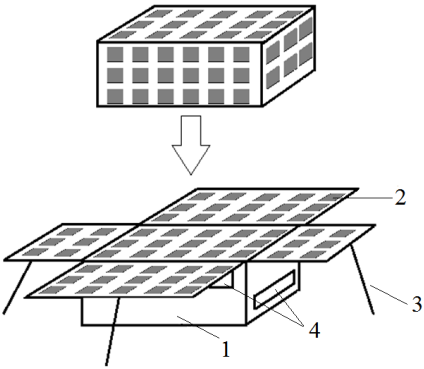


Рис. 4. Схема разворота солнечных панелей устройства после доставки на территорию радиостанции: 1 – контейнер; 2 – солнечная панель; 3 – откидная опора для фиксации солнечной панели; 4 – обеспечивающие естественную конвекцию сквозные отверстия

Для РУ используются управляемые трехполюсные выключатели с номинальным значением рабочего тока 8 А. Силовые кабели выполнены одножиль-

ными медными проводниками с сечением 1,5 мм^2 с изоляцией на напряжение до 1 кВ. Ошиновка РУ выполнена медными шинами круглого сечения с диаметром 6 мм. Блок САУ построен на однокристальном 8-разрядном микроконтроллере, обладающим достаточными техническими характеристиками для реализации алгоритма управления устройством для сглаживания профиля мощности, и связан со сборочными единицами телекоммуникационными кабелями, выполненными из оптоволокна.

В устройстве площадь поверхности контейнера эффективно используется для размещения солнечных панелей. При этом солнечные панели крепятся к боковым сторонам контейнера при помощи поворотных петель. Петли позволяют после доставки устройства на территорию предприятия расположить все солнечные панели в вертикальной плоскости (рис. 4).

Результаты имитационного моделирования работы устройства

Выполнено моделирование работы устройства. Получен график зависимости мощности нагрузки КВ-радиостанции и напряжения в точке питания от времени (рис. 5).

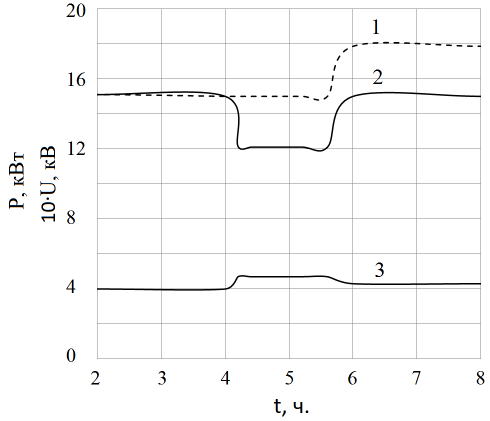


Рис. 5. Зависимость мощности нагрузки КВ-радиостанции и напряжения в точке питания от времени: 1 – профиль мощности КВ-радиостанции без подключения устройства; 2 – профиль мощности КВ-радиостанции при подключении устройства; 3 – напряжение в точке питания КВ-радиостанции

По результатам моделирования можно сделать следующие выводы. При помощи устройства осуществляется сглаживание профиля мощности КВ-радиостанции до заданного уровня электропотребления. Заданное опережающее включение АБ через инвертор на параллельную работу с сетью приводит к увеличению напряжения в точке питания КВ-радиостанции. При включении КВ

– радиопередатчика уровень напряжения уменьшается, однако превышает значение напряжения до подключения устройства сглаживания.

Выводы

Предложен способ сглаживания профиля мощности потребителя с резкопеременным характером нагрузки на примере КВ-радиостанции при помощи гибридной системы электроснабжения. Гибридная система электроснабжения представляет собой устройство, которое состоит из солнечной электростанции, генерирующей установки на основе двигателя внутреннего сгорания и блока управления. Выполнен расчет параметров силового оборудования и конструкции устройства. По результатам моделирования при помощи устройства достигается сглаживание профиля мощности, однако отмечено незначительное увеличение напряжения в точке питания КВ-радиостанции. Отклонение напряжения может быть уменьшено за счет изменения соотношения активной и реактивной выходных мощностей сетевого инвертора солнечной электростанции [6].

Список источников

1. *Ehsan A., Yang Q.* Optimal integration and planning of renewable distributed generation in the power distribution networks: A review of analytical techniques // Appl. Energ. 2018. Vol. 210. P. 44–59.

2. *Fathabad A., Cheng J., Pan K.* Data-Driven Planning for Renewable Distributed Generation Integration // IEEE Transactions on Power Systems. 2020. Vol. 35. N 6. P. 4357–4368.

3. *Бык Ф. Л., Илюшин П. В., Мышкина Л. С.* Особенности и перспективы развития распределенной энергетики в России // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. 2021. Т. 64. № 6. С. 78–87.

4. *Статкевич А. В., Тимофеев С. С., Шишлаков В. Ф.* Современные ветроэнергетические установки: обзор и тенденции развития // Волновая электроника и инфокоммуникационные системы: Материалы XXV Междунар. научн. конф., Санкт-Петербург, 30 мая – 3 июня 2022 года. СПб.: ГУАП, 2022. С. 257–261.

5. *Косарев Б. А., Кривальцевич С. В., Охотников А. А*. Электротехническая система с распределенной генерацией радиоцентра с резко переменным характером нагрузки // Омский научный вестник. 2022. № 1 (181). С. 55–60.

6. *Salehi N., Martínez-García H., Velasco-Quesada G.* Comprehensive Review of Control Strategies and Optimization Methods for Individual and Community Microgrids // IEEE Access. 2022. Vol. 10. P. 15935–15955.

УДК 621.3.019.3

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

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ИНТЕНСИВНОСТИ ОТКАЗОВ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Представлена методика прогнозирования интенсивности отказов привода дверного блока вагона электропоезда, предложено использовать серую модель на основе статистической информации о неисправностях, которые поступают из эксплуатации, проведена оценка точности прогноза интенсивности отказов.
Ключевые слова: интенсивность отказов, прогнозирование, серая модель, обработка статистических данных, привод двери.

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

PREDICTING THE FAILURE RATE OF ELECTROMECHANICAL SYSTEMS

The article presents a technique for predicting the failure rate of the electric train car door unit drive, it is proposed to use a gray model based on statistical information about malfunctions that come from operation, and an assessment of the accuracy of failure rate prediction is carried out.
Keywords: failure rate, prediction, gray model, statistical data processing, door drive.

Прогнозирование показателей надежности можно определить следующим образом: на основании имеющихся данных о процессе, протекающем некоторое время назад, высказать суждение и дать количественную оценку изменения этого процесса в будущем [1].

Наиболее широкое применение на практике находят статистические модели прогноза, например, регрессионный анализ.

Реляционный серый анализ (Grey relational analysis – GRA), или грей-метод, был предложен Д. Денгом из Хуачжунского университета науки и технологий в 1982 году. Данная модель использует определенную концепцию информации: определяет ситуацию без информации как «черную», а ситуацию с полной информацией – как «белую». Однако ни одна из этих идеализированных ситуаций никогда не возникает в реальных задачах. Фактически, ситуации между этими крайностями, которые содержат частичную информацию, описываются как «серые», туманные или нечеткие [2].

В большинстве исследований серая модель представлена как GM (m, n), где m – порядок; n – количество переменных в уравнении моделирования.

Этот метод подходит для прогнозирования поведения нелинейных временных рядов. Данный подход относится к нестатистическим методам про-

гнозирования и особенно эффективен в условиях недостаточного числа наблюдений [3].

В общем виде схема этапов прогнозирования представлена на рис. 1.

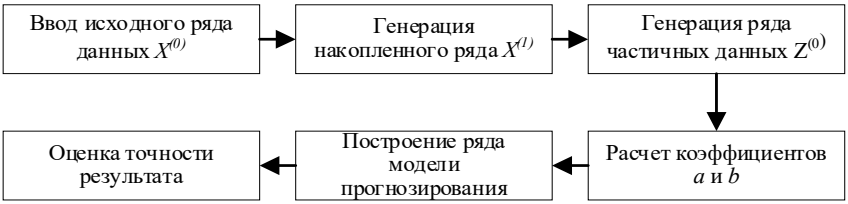


Рис. 1. Схема этапов прогнозирования

Исходные данные для прогнозирования представляют собой статистику отказов привода дверного блока электропоезда [4] за четыре с половиной года.

Согласно статистическим данным среди случаев отказов дверного блока этого типа наиболее часто встречаются следующие: неисправность контроллера управления дверным блоком, отказы привода двери, неисправность световой и звуковой сигнализации, неисправность датчиков положения пневматического цилиндра, неисправности подшипников.

Первичную обработку данных и расчет показателей надежности произведем на базе MS Excel. Примеры результатов расчета показателей надежности привода дверного блока представлены в табл. 1.

Таблица

Результаты расчетов показателей надежности – наработки на отказ и интенсивности отказов

Месяц и год	Количество отказов в месяц	Средняя наработка на отказ, месяц	Средняя наработка на отказ, час	Накопленные значения наработки на отказ, час	λ(t)	λ(t) накопленная
дек. 17	3	6,33	4712,00	13859,83	0,000212224	0,001245996
июн. 18	9	6,78	4880,00	43949,97	0,000204918	0,002547844
фев. 19	30	10,50	7056,00	105151,48	0,000141723	0,003809559
мар. 20	10	10,10	7514,40	173333,79	0,000133078	0,006712735
фев. 21	1	14,00	9408,00	256389,79	0,000106293	0,008424355
мар. 22	3	0,33	248,00	325131,39	0,004032258	0,010239765

Для прогнозирования интенсивности отказов дверных блоков, в условиях небольшого количества информации и требовании в получении высокой точности результатов прогнозирования, можно создать модель прогнозирования в среде MS Excel.

В качестве примера рассмотрим отказы за 5 месяцев с 01.06.2019 по 01.10.2019.

Далее используем серую модель согласно алгоритму, представленному на рис. 1.

1. Исходными данными являются отказы в заявленный период, представляющие из себя наблюдаемый временной ряд: 11,000; 16,000; 18,000; 21,000; 25,000.

2. Затем получаем накопленную последовательность: 11,000; 27,000; 45,000; 66,000; 91,000.

3. Для сглаживания этой последовательности зададим $Z^{(1)}$: Получим следующие значения: -19,00000; 36,00000; -55,50000; -78,50000 и 1; 1; 1; 1.

4. Вычислим B^T, используя функцию MS Excel «=TRANSPOSE». Получим следующую матрицу

$$B^T = \begin{bmatrix} -19,0000 & -36,0000 & -55,5000 & -78,5000 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}.$$

5. Вычислим B^TB, применив функцию «=MMULT»

$$B^T B = \begin{bmatrix} 10899,5000 & -189,0000 \\ -189,0000 & 4,0 \end{bmatrix}.$$

6. Далее найдем $(B^TB)^{-1}$

$$(B^T B)^{-1} = \begin{bmatrix} 10899,5000 & -189,0000 \\ -189,0000 & 4,0 \end{bmatrix}^{-1} = \begin{bmatrix} 0,00051 & 0,02399 \\ 0,02399 & 1,38371 \end{bmatrix}.$$

7. Вычислим произведение матриц B^T и $(B^TB)^{-1}$

$$(B^T B)^{-1} B^T = \begin{bmatrix} 0,01435 & 0,00571 & -0,00419 & -0,01587 \\ 0,92783 & 0,51993 & 0,05205 & -0,49981 \end{bmatrix}.$$

8. Найдем параметры a и b, используя функцию «=MMULT» и необходимые диапазоны ячеек. Получим следующие значения a=-0,152342 и b=12,801828.

9. Введем уравнение $x^{(1)}(k+1) = (x^{(1)}(1) - \frac{b}{a}) \cdot e^{-ak} + \frac{b}{a}$

и получим следующие значения $x^{(1)}(k+1)$: 11,000; 26,639; 44,851; 66,060; 90,759, что и будет являться спрогнозированной последовательностью.

Осуществим оценку точности прогнозирования, рассчитав абсолютную и относительную погрешность (табл. 2).

Таблица 1

Результаты прогнозирования и оценка точности

№	Исходный ряд	Спрогнозированный ряд	Абсолютная погрешность	Относительная погрешность
1	11,000	11,000	-	-
2	16,000	15,639	0,361	0,022590
3	18,000	18,212	0,212	0,011779
4	21,000	21,209	0,209	0,009951
5	25,000	24,699	0,301	0,012036
		Средняя относительная погрешность:		0,014

Принято считать [3], что среднее значение относительной погрешности всех элементов ряда для хорошего прогноза должно быть выше 0,35. В нашем случае получаем 0,014.

Спрогнозируем количество отказов на последующие периоды, последовательно используя маркер автозаполнения для требуемых диапазонов ячеек. Результат прогнозирования представлен в табл. 3, а график на рис. 2.

Таблица 3

Месяц	Исходные данные (количество отказов)	Прогноз наработки на отказ за месяц
июн. 19	11,000	11,000
июл. 19	16,000	15,639
авг. 19	18,000	18,212
сен. 19	21,000	21,209
окт. 19	25,000	24,699
ноя. 19	-	28,764
дек. 19	-	33,497
янв. 20	-	39,009
фев. 20	-	45,428
мар. 20	-	52,904

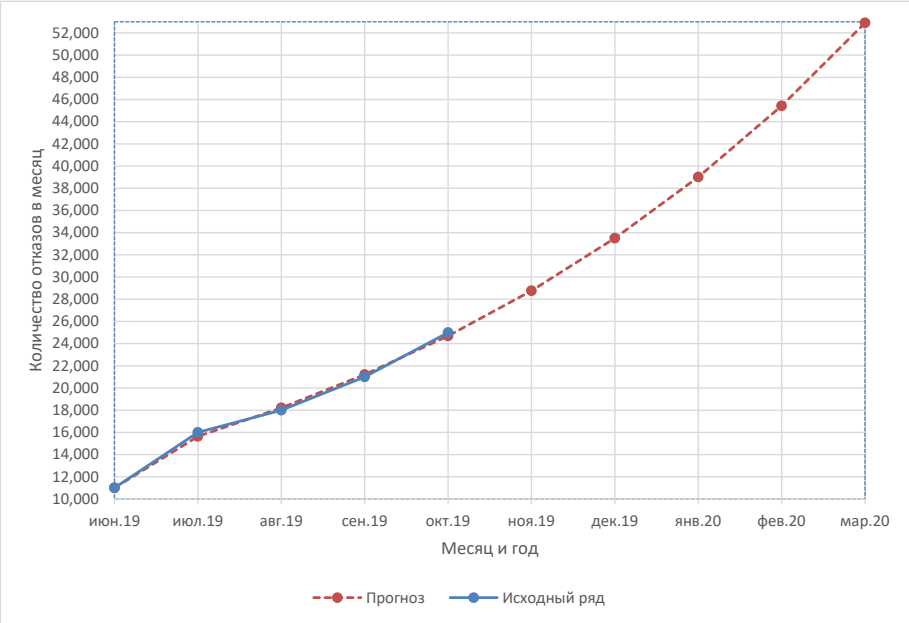


Рис. 2. Результат прогнозирования количества отказов на последующие периоды

Поскольку модель хорошо себя зарекомендовала при прогнозировании ряда с достаточно нелинейными значениями, ее можно применить и для прогнозирования кумулятивной интенсивности отказов. Используем данные о изменении интенсивности отказов с ноября 2020 года по март 2022 года и повторим все вышеприведенные расчеты. Таблица 4 отображает полученные результаты. Рисунок 3 наглядно демонстрирует исходный ряд и данные, спрогнозированные на основе серой модели.

Таблица 4

Результаты прогнозирования интенсивности отказов методом серых данных и оценка точности

№	Исходный ряд	Спрогнозированный ряд	Абсолютная погрешность	Относительная погрешность
1	9,635	9,635	-	-
2	9,635	8,802	0,833	0,086498
3	9,842	10,041	0,199	0,020216
4	10,008	11,455	1,447	0,144620
5	14,040	13,067	0,972	0,069252
		Средняя относительная погрешность:		0,080

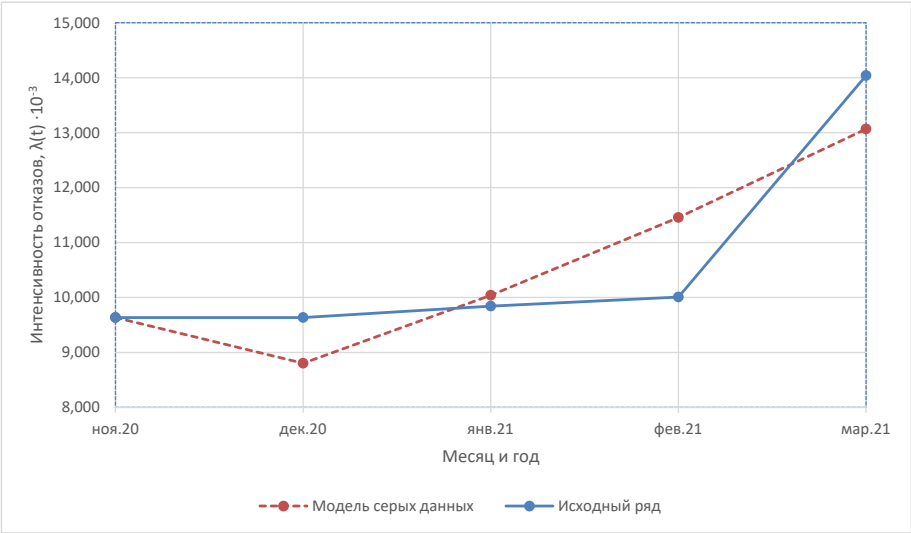


Рис. 3. Сравнение исходного ряда и прогноза методом серых данных

Спрогнозируем изменение интенсивности отказов на последующие месяцы. Результат прогнозирования представлен в табл. 5 и на рис. 4.

Таблица 5

Месяц	Исходные данные (интенсивности отказов)	Прогноз изменения интенсивности отказов за месяц
ноя. 20	9,635	9,635
дек. 20	9,635	8,802
янв. 21	9,842	10,041
фев. 21	10,008	11,455
мар. 21	14,040	13,067
апр. 21	-	14,907
май. 21	-	17,006
июн. 21	-	19,400
июл. 21	-	22,131
авг. 21	-	25,247

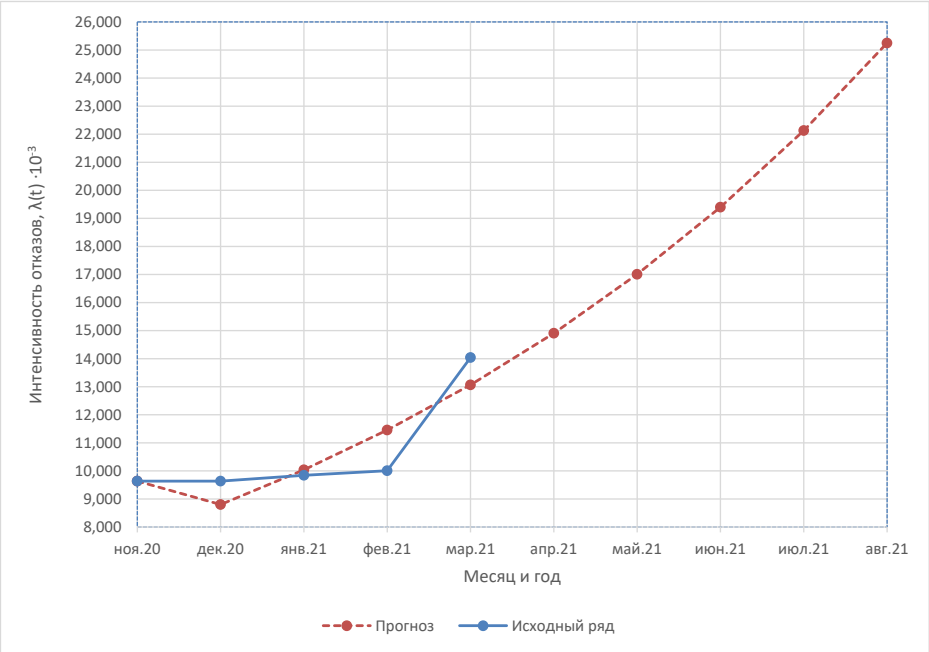


Рис. 4. Результат прогнозирования интенсивности отказов на последующие периоды

Прогнозирование количества и интенсивности отказов электромеханических систем дает возможность оптимизировать сроки проведения технического обслуживания и капитального ремонта, а также оптимизировать ремонтные коплекты в депо. Рассмотренный подход дает возможность с высокой точностью спрогнозировать значение показателей надежности.

Список источников

1. *Прохоренко В. А., Смирнов А. Н.* Прогнозирование качества систем. Минск.: Наука и техника, 1976. 200 с.

2. Multi-criteria material selections and end-of-life product strategy: Grey relational analysis approach, Materials & Design. 2007. Vol. 28. Issue 5. P. 1539–1546.

3. *Li C., Li J.* A Solution of GM (1,1) based on EXCEL. Business and Management Research. 2016. Vol. 5. N 3.

4. ТУ 5271-002-00242105-09. Дверной блок прислонно-сдвижного типа.

УДК 681.51

Е. Ю. Ватаева*
старший преподаватель
Н. Л. Гречкин*
ассистент
В. Ф. Шишлаков*
доктор технических наук, профессор
*Санкт-Петербургский государственный университет
аэрокосмического приборостроения

ПОЛИНОМИАЛЬНАЯ АППРОКСИМАЦИЯ В РЕШЕНИИ ЗАДАЧ СИНТЕЗА НЕЛИНЕЙНЫХ САУ

Рассматривается решения задачи синтеза параметров непрерывной нелинейной системы автоматического управления (САУ) при полиномиальной аппроксимации. В качестве математического аппарата применяется обобщенный метод Галеркина. Результаты синтеза приводятся.
***Ключевые слова*:** регулятор, полиномиальная аппроксимация, обобщенный метод Галеркина, нелинейная САУ.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, соглашение № FSRF-2023-0003 «Фундаментальные основы построения помехозащищенных систем космической и спутниковой связи, относительной навигации, технического зрения и аэрокосмического мониторинга».

E. Y. Vataeva*
Senior Lecturer
N. L. Grechkin*
Assistant
V. F. Shishlakov*
Dr. Sc. Tech., Professor
*St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

POLYNOMIAL APPROXIMATION IN SOLVING PROBLEMS OF SYNTHESIS OG NONLINEAR ACS

The paper considers the solution of the problem of synthesizing the parameters of a continuous nonlinear automatic control system (ACS) with polynomial approximation. The generalized Galerkin method is used as a mathematical apparatus. The results of the synthesis are given.
Keywords: controller, polynomial approximation, generalized Galerkin method, nonlinear automatic control system.

Как известно, в большинстве случаев реальные системы автоматического управления из-за различных явлений, таких как намагничивание, трение и др., являются нелинейными, по крайней мере, если рассматривать их в широком диапазоне работы. Существуют различные способы линеаризации таких систем, однако не всегда результат соответствует требуемому качеству. По этой

причине на практике инженерам часто приходится учитывать влияние нелинейностей в системах управления, что усложняет расчеты, ограничивает методы исследования, но позволяет достичь требуемых показателей качества [1], [2].

При наличии в системе нелинейности в качестве математического аппарата возможно использовать обобщенный метод Галеркина, подробная схема описана в [3]. Рассмотрим решение задачи синтеза параметров непрерывной САУ, содержащей нелинейный элемент с характеристикой $F(x)=sign(x)x^2$ (рис. 1).

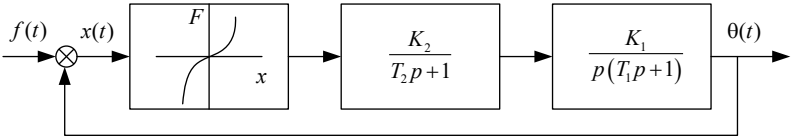


Рис. 1. Исследуемая САУ

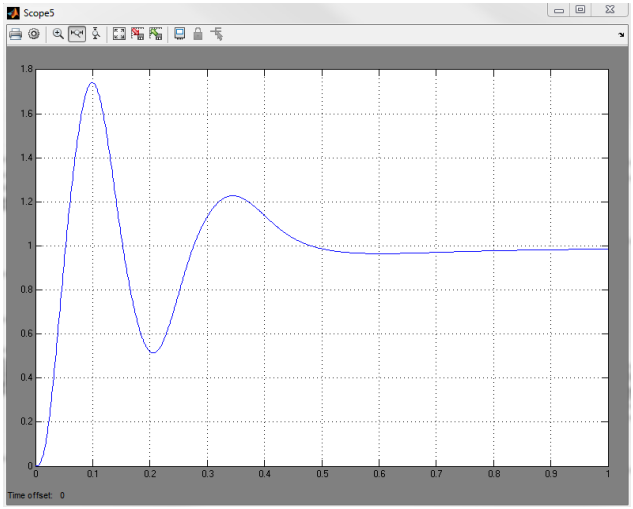


Рис. 2. Переходной процесс исследуемой системы без коррекции

Для решения задачи синтеза параметров системы нелинейность требуется аппроксимировать. Часто для такого рода задач удобно использовать полиномиальную аппроксимацию, аппроксимирующий полином которой записывается в виде

$$y(x) = y(x_0) + a_1(x - x_0) + a_2(x - x_0)^2 + \ldots + a_n(x - x_0)^n.$$

Требуется обеспечить следующие показатели качества в системе при входном ступенчатом воздействии: перерегулирование не более 25 %, время переходного процесса не более 2 с.

Из структуры, представленной на рис. 2, легко определить динамику системы, описываемую следующим дифференциальным уравнением

$$\left[p\left(T_1p+1\right)\left(T_2p+1\right)\right]x^0(t)+K_1K_2\cdot F\left[x^0(t)\right]=\left[p\left(T_1p+1\right)\left(T_2p+1\right)\right]f(t),$$

где $T_1=0.05c;\ K_1=100$ – неизменяемые параметры системы управления; $T_2,\ K_2$ – параметры регулятора, которые необходимо определить.

Требуется получить желаемое программное движение на входе нелинейности в виде процесса следующего вида (рис. 3)

$$x^0(t)=1.02e^{-3.5t}\cos\left(7.5t-0.2\right)1(t).$$

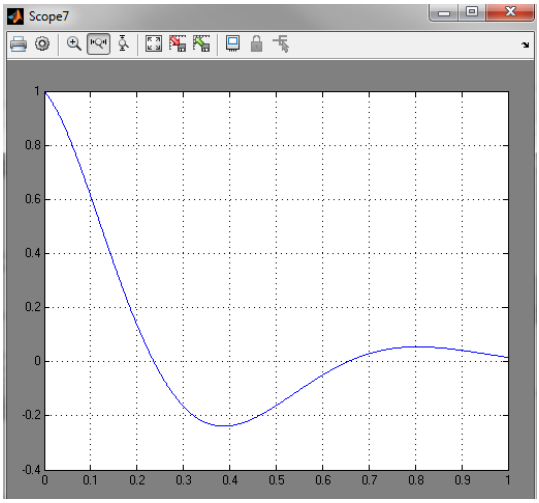


Рис. 3. Желаемое программное движение

Как было указано в [4], с математической точки зрения задача синтеза параметров законов управления сводится к поиску минимума целевой функции, построенной на основе уравнений Галеркина

$$J=\sum_{q=1}^{m}\left\{\int_0^{\infty}\left[\sum_{i=0}^{n}a_i\left(c_k\right)A_{qi}+\sum_{i=0}^{u}b_i\left(c_k\right)B_{qi}-\sum_{i=0}^{v}e_i\left(c_k\right)C_{qi}\right]\right\}^2,\min_{c_k}J\to 0,$$

где a_i, b_i, e_i – вещественные постоянные коэффициенты полиномов оператора обобщенного дифференцирования D степеней n, u, v, являющиеся в общем случае функциями варьируемых параметров c_k закона управления системы; A_{qi}, B_{qi}, C_{qi} – интегралы Галеркина вида

$$A_{qi} = \int_0^\infty D^i\left\{x^0(t)\right\}e^{-\rho_q t}dt = A_q\rho_q^{i-1}; i = 1,2,\ldots,n$$

$$B_{qi} = \int_0^\infty D^i\left\{F\left[x^0(t)\right]\right\}e^{-\rho_q t}dt = B_q\rho_q^{i-1}; i = 0,1,\ldots,u;$$

$$C_{qi} = \int_0^\infty D^i\left\{f(t)\right\}e^{-\rho_q t}dt = C_q\rho_q^{i-1}; i = 0,1,\ldots,v.$$

Вычисление рекуррентных аналитических выражений для B_{qi} при полиномиальной аппроксимации подробно рассмотрены в [5]. Был получен аппроксимирующий полином следующего вида (рис. 4)

$$y(x) = 0.6703x^3 + 0.0098x^2 + 0.3449x - 0.0058.$$

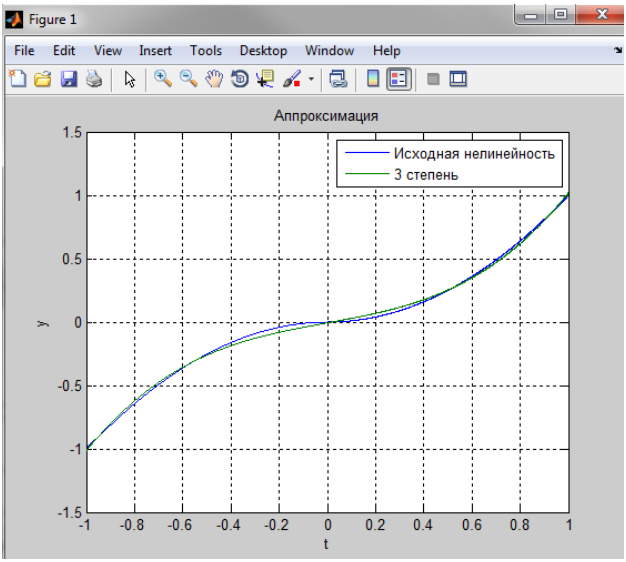


Рис. 4. Аппроксимация нелинейности типа $F(x)=sign(x)x^2$

При условии, что на искомые параметры не было наложено ограничений, в результате решения задачи синтеза значения варьируемых параметров получились следующими: $T_2=0.023c$; $K_2=0.134$.

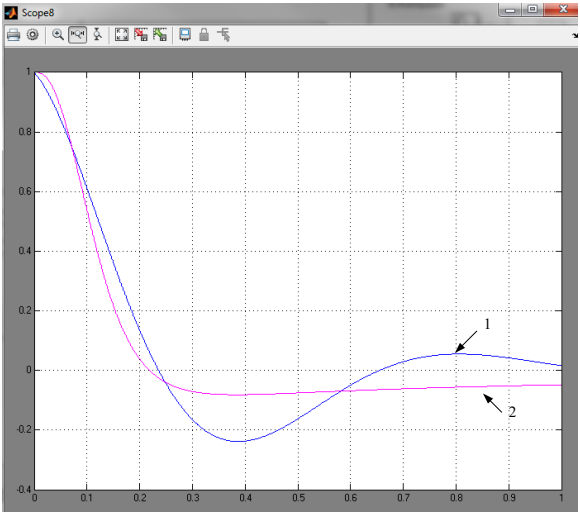


Рис. 5. Сравнение синтезированной системы с желаемым программным движением: 1 – желаемое программное движение; 2 – процесс в синтезированной системе

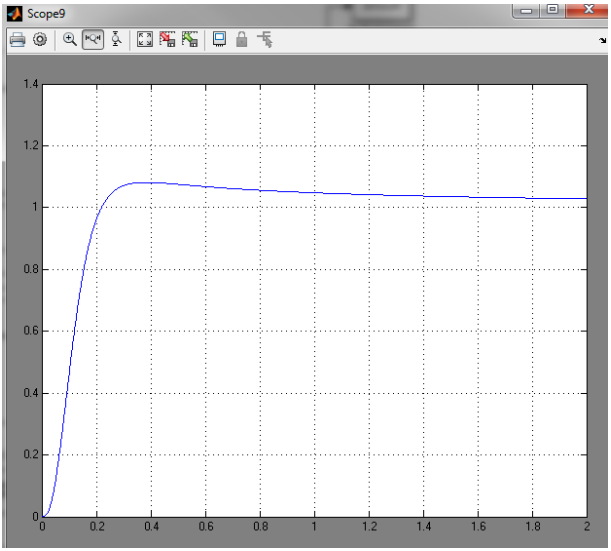


Рис. 6. Переходной процесс в скорректированной системе

Список источников

1. *Khalil H.* Nonlinear Systems. USA, 2013. 560 p.

2. *Sarty S.* Nonlinear Systems. Analysis, Stability, and Control.USA, Berkeley Publ., 1999. 675 p.

3. *Никитин А. В., Шишлаков В. Ф.* Параметрический синтез нелинейных систем автоматического управления: монография / Под ред. В. Ф. Шишлакова. СПб.: ГУАП, 2003.

4. *Шишлаков В. Ф., Шишлаков А. В., Тимофеев С. С.* Синтез САУ при различных видах аппроксимации нелинейных характеристик: теория и практика: монография. СПб.: ГУАП, 2017. 151 с.

5. *Shishlakov V., Vataeva E., Reshetnikova N.* Synthesis of control laws of electromechanical systems under polynomial approximation of characteristics of nonlinear elements // 13th International Scientific-Technical Conference on Electromechanics and Robotics «Zavalishin's Readings», 2018. Vol. 161 (2). P. 02006.

УДК 567.43

В. А. Голубков*
кандидат технических наук, доцент
Е. Ю. Ватаева*
старший преподаватель
А. Г. Федоренко*
кандидат технических наук, доцент
*Санкт-Петербургский государственный университет
аэрокосмического приборостроения

СПЕКТРАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВЫНУЖДАЮЩИХ СИЛ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ В ШАГОВОМ ДВИГАТЕЛЕ

Рассматривается анализ проводимости и индукции в воздушном зазоре шагового двигателя. Спектральные характеристики проводимости и индукции воздушного зазора шагового двигателя влияют на частотный состав механической вибрации. Анализ колебаний на этих частотах может быть использован для диагностики электромагнитной системы шагового двигателя. Также эти частоты должны быть исключены из процесса идентификации технического состояния механических узлов двигателя для увеличения достоверности результатов диагностики.
Ключевые слова: шаговый двигатель, спектральный анализ, вынуждающая сила, воздушный зазор.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, соглашение № FSRF-2023-0003 «Фундаментальные основы построения помехозащищенных систем космической и спутниковой связи, относительной навигации, технического зрения и аэрокосмического мониторинга».

V. A. Golubkov*
PhD Sc. Tech., Associate Professor
E. Y. Vataeva*
Senior Lecturer
A. G. Fedorenko*
PhD Sc. Tech., Associate Professor
*St. Petersburg State Marine Technical of University

SPECTRAL CHARACTERISTICS OF DRIVING FORCES OF ELECTROMAGNETIC ORIGIN IN A STEPPER MOTOR

This article discusses the analysis of conductivity and induction in the air gap of a stepper motor. The spectral characteristics of the conductivity and induction of the air gap of a stepper motor affect the frequency content of mechanical vibration. Analysis of oscillations at these frequencies can be used to diagnose the electromagnetic system of a stepper motor. Also, these frequencies should be excluded from the process of identifying the technical condition of the mechanical components of the engine to increase the reliability of the diagnostic results.
Keywords: stepper motor, spectral analysis, driving force, air gap.

Силы вынуждающие вибрации шагового двигателя электромагнитного происхождения в двух взаимно перпендикулярных радиальных направлениях можно записать в виде [1], [2]

$$J_{Э1} = \frac{\pi DL}{2\mu_0} \cdot \left[\beta(t,\alpha)\right]^2,$$

где D – диаметр статора двигателя; L – длина активной части ротора; $\beta(t,\alpha)$ – индукция в зазоре ротора и статора; t,α – временная и угловая координата.

Как известно, индукция в зазоре может быть определена посредством расчета магнитодвижущих сил $J_{МДС}$ и проводимости воздушного зазора $\lambda(t)$

$$\beta(t,\alpha) = J_{МДС}\lambda(t).$$

Проводимость воздушного зазора может быть рассчитана следующим образом

$$\lambda(t) = \lambda_0 \cos\theta_0 - \lambda_1 \sin\theta_0 \sum_l \theta_l \sin\left(l w_{пр} t + \Psi_l\right),$$

где λ_0, λ_1 – постоянная и переменная составляющая проводимости; θ_0, θ_l – коэффициенты разложения временной функции угла рассогласования поля статора и ротора.

Магнитодвижущая сила (МДС) сосредоточенной обмотки, приходящаяся за один полюс, определяется как [3]–[5]

$$J_{МДС} = \frac{w_i}{2},$$

где i – ток обмотки; w – число витков на полюсе.

Таким образом, МДС обмотки неизменна на длине полюсного деления, то есть распределена в пространстве вдоль округлости якоря по прямоугольному закону и в случае согласованного включения катушек может быть представлена в виде

$$J_{МДС} = \sum_D J_{d_D} \cos\upsilon\alpha,$$

где J_{d_D} – максимальное в данный момент времени значение υ-й гармоники.

Амплитуда υ-й гармоники определяется как

$$J_{d_D} = \frac{1}{\pi}\int_{-\pi}^{\pi} J_d \cos\upsilon\alpha \cdot d\alpha = \frac{J_d}{\pi}\left[\int_{-\pi}^{\pi} \cos\upsilon\alpha \cdot d\alpha + \int_{-\frac{\pi}{8}}^{\frac{\pi}{8}} \cos\upsilon\alpha \cdot d\alpha + \int_{-\frac{7\pi}{8}}^{\pi} \cos\upsilon\alpha \cdot d\alpha\right] =$$

$$= \frac{2J_d}{\pi\upsilon} \cdot \left[\sin\upsilon\frac{7}{8}\pi - \sin\upsilon\pi\right] \approx (-1)^{\upsilon}\frac{4 \cdot 8}{\pi\upsilon} J_d \sin\upsilon\frac{\pi}{16}.$$

Магнитодвижущая сила для n-й фазы имеет вид

$$J_{МДС}^{n} = \sum_{\upsilon} J_{d_D} \cos\left[\upsilon\alpha - (n-1)\frac{\pi}{4}\right],$$

ток в фазе изменяется согласно формуле

$$i_n(t) = I_0 + \sum_{m} I_{nm} \sin\left(m\frac{w_{np}}{4}t + \varphi_{nm}\right).$$

Таким образом,

$$J_{МДС}^{n} = -\sum_{\upsilon}(-1)^{\upsilon}\frac{4}{\pi\upsilon}\sin\frac{\upsilon\pi}{16}w_n I_0 \times$$

$$\times\cos\left[\upsilon\alpha - (n-1)\frac{\pi}{4}\right] - \sum_{\upsilon}\sum_{m}(-1)^{\upsilon}\frac{2}{\pi\upsilon}\sin\frac{\upsilon\pi}{16}w_n I_{nm}\cdot$$

$$\cdot\sin\left[m\frac{w_{np}}{4}t + \varphi_{nm} \mp \upsilon\alpha \pm (n-1)\frac{\pi}{4}\right].$$

Без учета следящих сил магнитная индукция в зазоре будет рассчитываться следующим образом

$$B(t,\alpha) = -(\lambda_0 + \lambda_1\cos\theta_0)\sum_{n}\sum_{\upsilon,n}(-1)^{\upsilon}\frac{4}{\pi}\frac{1}{\upsilon}\sin\frac{\upsilon\pi}{16}w_n I_0\cdot\cos\left[\upsilon\alpha - (n-1)\frac{\pi}{4}\right] -$$

$$-(\lambda_0 + \lambda_1\cos\theta_0)\sum_{n}\sum_{\upsilon}\sum_{m}(-1)^{\upsilon}\frac{3}{\pi}\frac{1}{\upsilon}\cdot$$

$$\cdot\sin\frac{\upsilon\pi}{16}w_n I_{nm}\sin\left[m\frac{w_{np}}{4}t + \varphi_{nm} \mp \upsilon\alpha \pm (n-1)\frac{\pi}{4}\right] +$$

$$+\lambda_1\sin\theta_0\sum_{\upsilon,n}(-1)^{\upsilon}\frac{4}{\pi}\sin\frac{\upsilon\pi}{16}w_n I_0\cos\left[\upsilon\alpha - (n-1)\frac{\pi}{4}\right]\cdot$$

$$\cdot\sum_{l}\theta_l\sin\left(l w_{np}t + \varphi_1\right) \mp \sum_{n}\sum_{\upsilon}\sum_{m}\sum_{l}(-1)^{\upsilon}\frac{1}{\pi}\frac{1}{\upsilon}\cdot\sin\frac{\upsilon\pi}{16}w_n I_{nm}\lambda_1\sin\theta_0\theta_l\cdot$$

$$\cdot\left[\cos\left[\left(m\frac{w_{np}}{4} \mp l w_{np}\right)t + \varphi_{nm} - \upsilon\alpha + (n-1)\frac{\pi}{4} \mp \Psi_l\right] +\right.$$

$$\left.+\cos\left[\left(m\frac{w_{np}}{4} \mp l w_{np}\right)t + \varphi_{nm} + \upsilon\alpha - (n-1)\frac{\pi}{4} \mp \varphi_l\right],\right.$$

$$B^2(t,\alpha)=-(\lambda_0+\lambda_1\cos\theta_0)^2 w^2 I_0^2\frac{16}{\pi^2}\left[\sum_n\sum_\upsilon\frac{1}{\upsilon^2}\sin^2\frac{\upsilon\pi}{16}\cdot\cos^2\left[\upsilon\alpha-(n-1)\frac{\pi}{4}\right]+\right.$$

$$+2\sum_{n_1}\sum_{n_1}\sum_{\upsilon_1}\sum_{\upsilon_2}(-1)^{\upsilon_1}(-1)^{\upsilon_2}\frac{1}{\upsilon_1\upsilon_2}\sin\frac{\upsilon_2\pi}{16}\times$$

$$\left.\times\sin\frac{\upsilon_1\pi}{16}\cos\left[\upsilon_1\alpha-(n_1-1)\frac{\pi}{4}\right]+\cos\left[\upsilon_2\alpha-(n-1)\frac{\pi}{4}\right]\right]-$$

$$-(\lambda_0+\lambda_1\cos\theta_0)^2\frac{4}{\pi^2}w^2\left[\sum_n\sum_\upsilon\sum_m\frac{1}{\upsilon^2}\sin^2\frac{\upsilon\pi}{16}I_{nm}^2\times\right.$$

$$\left.\times\frac{1}{2}(1-\cos)\left[m\frac{w_{np}}{2}t+2\left(\varphi_{nm}\mp\upsilon\alpha(n-1)\frac{\pi}{4}\right)\right]\right],$$

$$\pm\sum_{n_1}\sum_{n_2}\sum_{\upsilon_1}\sum_{\upsilon_2}\sum_{m_1}\sum_{m_1}(-1)^{\upsilon_1}(-1)^{\upsilon_2}\cdot\frac{1}{\upsilon_1}\frac{1}{\upsilon_2}\sin\frac{\upsilon_1\pi}{16}I_{n_1m_1}I_{n_2m_2}\cdot$$

$$\cdot\left[\cos\left[(m_1+m_2)\frac{w_{np}}{4}t+\varphi_{n_1m_1}\mp\varphi_{n_2m_2}-(\upsilon_1\pm\upsilon_2)\alpha+\left[(n_1-1)\mp(n_2-1)\frac{\pi}{4}\right]\right]+\right.$$

$$+\cos\left[(m_1\mp m_2)\frac{w_{np}t}{4}+\varphi_{n_1m_1}\mp\varphi_{n_2m_2}+(\upsilon_1\mp\upsilon_2)\alpha-\left[(n_1-1)\mp(n_2-1)\right]\right]+$$

$$+\lambda_1^2\sin^2\theta_0\frac{16}{\pi^2}w^2I_0^2\left[\sum_\upsilon\sin^2\frac{\upsilon\pi}{16}\cos^2\left[\upsilon\alpha-(n-1)\frac{\pi}{4}\right]+\frac{1}{4}\sum_{\upsilon_1}\sum_{\upsilon_2}\sum_{n_1}\sum_{n_2}(-1)^{\upsilon_1}(-1)^{\nu_2}\times\right.$$

$$\left.\times\left(\pm\cos\frac{\upsilon_1\mp\upsilon_2}{16}\pi\right)\cos\left((\upsilon_1\mp\upsilon_2)\alpha-\left[(n_1-1)\mp(n_2-1)\right]\frac{\pi}{4}\right)\right]\cdot\left[\frac{1}{2}\sum_l\theta_l^2\times\right.$$

$$\left.\times\left[1-\cos\left(2lw_{np}t+2\Psi_l\right)\right]\pm\sum_{l_1}\sum_{l_2}\theta_{l_2}\theta_{l_1}\cos\left[(l_1\mp l_2)w_{np}t+\Psi_{l_1}\mp\Psi_{l_2}\right]\right]+$$

$$+\lambda_1^2w^2\sin^2\theta_0\frac{1}{\pi^2}\cdot\left[\sum_n\sum_\upsilon\sum_m\sum_l\frac{1}{\upsilon^2}\sin^2\frac{\upsilon\pi}{16}I_{nm}^2\theta_l^2\left[2+\cos\left[\left(m\frac{w_{np}}{2}\mp 2lw_{np}\right)t+\right.\right.\right.$$

$$\left.+2\left(\varphi_{nm}-\upsilon\alpha+(n-1)\frac{\pi}{4}\mp\Psi_l\right)\right]+$$

$$+\cos\left[\left(m\frac{w_{np}}{2}\mp 2lw_{np}\right)t+2\left(\varphi_{nm}+\upsilon\alpha-(n-1)\frac{\pi}{4}\mp\Psi_l\right)\right]\mp$$

$$\mp\sum_{n_1 n_2}\sum_{\upsilon_1\upsilon_2}\sum_{m_1 m_2}\sum_{l_1 l_2}(-1)^{\upsilon_1}(-1)^{\nu_2}\frac{1}{\upsilon_1\upsilon_2}\sin\frac{\upsilon_2\pi}{16}\sin\frac{\upsilon_1\pi}{16}w^2 I_{n_1 m_1} I_{n_2 m_2}\theta_{l_1}\theta_{l_2}\cdot$$

$$\left[\begin{array}{l}\cos\left[(m_1\mp m_2)\frac{w_{np}}{4}-(l_1\mp l_2)w_{np}\right]t+\varphi_{n_1 m_1}\mp\varphi_{n_2 m_2}+\\ +(\upsilon_1\mp\upsilon_2)\alpha-\left[(n_1-1)\mp(n_2-1)\right]\frac{\pi}{4}-\left(\Psi_{l_1}\pm\Psi_{l_2}\right)\end{array}\right]+$$

$$+\cos\left[\begin{array}{l}\left[(m_1\mp m_2)\frac{w_{np}}{4}+(l_1\mp l_2)w_{np}\right]t+\varphi_{n_1 m_1}\mp\varphi_{n_2 m_2}+\\ +(\upsilon_1\mp\upsilon_2)\alpha-\left[(n_1-1)\mp(n_2-1)\right]\frac{\pi}{4}\mp\Psi_{l_1}\mp\Psi_{l_2}\end{array}\right]+$$

$$+\cos\left[\begin{array}{l}\left[(m_1\mp m_2)\frac{w_{np}}{4}-(l_1\mp l_2)w_{np}\right]t+\varphi_{n_1 m_1}\mp\varphi_{n_2 m_2}-\\ -(\upsilon_1\mp\upsilon_2)\alpha-\left[(n_1-1)\mp(n_2-1)\right]\frac{\pi}{4}-\Psi_{l_1}\pm\Psi_{l_2}\end{array}\right]+$$

$$+\cos\left[\begin{array}{l}\left[(m_1\mp m_2)\frac{w_{np}}{4}-(l_1\mp l_2)w_{np}\right]t+\varphi_{n_1 m_1}\mp\varphi_{n_2 m_2}-\\ -(\upsilon_1\mp\upsilon_2)\alpha-\left[(n_1-1)\mp(n_2-1)\right]\frac{\pi}{4}+\Psi_{l_1}\pm\Psi_{l_2}\end{array}\right].$$

Таким образом, анализ формулы расчета $B^2(t,\alpha)$ позволяет сделать вывод, что электромагнитная вибрация проявляется на частотах

$$m\frac{w_{np}}{2};\ (m_1\mp m_2)\frac{w_{np}}{4}t;\ 2lw_{np};\ (l_1\pm l_2)w_{np};\ m\frac{w_{np}}{2}\mp 2lw_{np};$$

$$(m_1\mp m_2)\frac{w_{np}}{4}\pm(l_1\mp l_2)w_{np},$$

где m_1, m_2, m_1, l, l_1, l_2 – целые числа; w_{np} – частота приемистости (переключения обмоток шагового двигателя).

Эти частоты необходимо исключить из диагностики погрешностей изготовления и сборки узлов.

Список источников

1. Вибрация и шум электрических машин малой мощности / Л. К. Волков, Р. Н. Ковалев, Г. Н. Никифоров и др. Л.: Энергия, 1979. 223 с.

2. *Каасик П. Ю.* Магнитное поле и параметры электрических машин: учеб. пособие. Л.: ЛЭТИ, 1981. 98 с.

3. *Шубов И. Г.* Шум и вибрация электрических машин. Л.: Энергоатомиздат, 1986. 223 с.

4. Дискретный электропривод с шаговыми двигателями / Под ред. М. Г. Чиликина. М.: Энергия, 1971. 401 с.

5. *Бессонов Л. А.* Теоретические основы электротехники. Электромагнитное поле. М.: Гардарика, 2007.

УДК 62.529

С. В. Кривальцевич*
кандидат физико-математических наук
Б. А. Косарев*,*
кандидат технических наук, научный сотрудник, доцент
*Омский научный центр СО РАН (Институт радиофизики и физической электроники)
**Омский государственный технический университет

ВЛИЯНИЕ КОЛЕБАНИЙ ТЕМПЕРАТУРЫ НА ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ КВ-РАДИОСТАНЦИИ С ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ УСТАНОВКОЙ

Исследовано влияние колебаний температуры на технические характеристики системы электроснабжения КВ-радиостанции с интегрированной фотоэлектрической установкой. По результатам экспериментов отмечено смещение точки максимальной мощности фотоэлектрической батареи. Предложено учитывать влияние колебаний температуры на выходную мощность фотоэлектрической батареи в алгоритмах управления и параметрах настройки системы автоматического управления.
Ключевые слова: система автоматического управления, распределенные источники энергии, фотоэлектрическая установка, фотоэлектрическая батарея.

Работа выполнена по государственному заданию Омского научного центра СО РАН (номер госрегистрации проекта 122011200349-3).

S. V. Krivaltsevich*
PhD Sc. Phys.-Math.
B. A. Kosarev*,*
PhD Sc. Tech., Researcher Employee, Associate Professor
*Omsk Scientific Center SB RAS (Institute of Radiophysics and Physical Electronics)
**Omsk State Technical University

INFLUENCE OF TEMPERATURE VARIATIONS ON THE TECHNICAL CHARACTERISTICS OF THE POWER SUPPLY SYSTEM OF HF RADIO STATION WITH A SOLAR POWER PLANT

In the work, the influence of temperature fluctuations on the technical characteristics of the power supply system of the HF radio station with an integrated solar power plant is investigated. According to the results of the experiments, a shift of the maximum power point was noted. It is proposed to take into account the effect of temperature fluctuations on the output power of a solar power plant in control algorithms and settings of the automatic control system.
Keywords: automatic control system, distributed energy resources, solar power plant, photovoltaic battery.

Введение

Распределенная генерация (РГ) электроэнергии заключается в ее генерации в непосредственной близости от потребителя, при этом, установленная мощность отдельного объекта не должна превышать 25 МВт [1]. РГ позволяет использовать доступные энергоресурсы, в том числе возобновляемые источники энергии, такие как фотоэлектрические установки (ФУ). Также интеграция объектов РГ в узлы нагрузки позволяет повысить устойчивость их режима при резко-переменном характере величины нагрузки потребителя [2]. К потребителям с резко-переменным характером нагрузки, в том числе толчковой, относятся дуговые печи, мощные электродвигатели, коротковолновые и длинноволновые радиостанции и радиоцентры. В условиях экономического управления спросом (льготная тарифная ставка на электроэнергию, если в заданный интервал времени не превышается заданная поставщиком электроэнергии величина нагрузки, [3], [4]) такие потребители могут сгладить профиль мощности путем внедрения в систему внутреннего электроснабжения объектов РГ.

В этой работе рассматривается техническая реализация такого способа снижения пиковой нагрузки потребителя на примере КВ-радиостанции [5].

В качестве объекта РГ выбрана ФУ. В фотоэлектрической батарее ФУ в качестве активного элемента используются полупроводниковые материалы (кремний, арсенид галия и др.). Параметры любого полупроводникового материала зависят от температуры [6]. Поэтому при рассмотрении возможности сглаживания профиля мощности КВ-радиостанции при помощи ФУ возникла задача оценить влияние на ее работу колебаний температуры окружающей среды.

Методика эксперимента

В качестве ФУ были использованы соединенные параллельно фотоэлектрические модули с номинальным выходным напряжением около 17 В. Фотоэлектрические модули через контроллер заряда с широтно-импульсной модуляцией подключались к аккумуляторной батарее с номинальным напряжение 12 В. Батарея через сетевой инвертор может питать активно-индуктивную нагрузку, имитирующую нагрузку КВ-радиостанции. При этом основную часть мощности компенсирует переток из внешней электросистемы, которая постоянно подключена через сетевой инвертор к нагрузке КВ-радиостанции. Подключение аккумуляторной батареи через сетевой инвертор к электросистеме КВ-радиостанции соответствует уменьшению ее электропотребления из внешней электросистемы.

Так как наибольшей энергоэффективностью ФУ обладает в летние месяцы, рассматривался только диапазон положительных температур. В качестве источника тепла использовался электронагревательный элемент с возможностью выдачи направленного потока нагретого воздуха с периодическим изменением его направления. Температура фотоэлектрических модулей контролировалась датчиком температуры, размещенным на их лицевой поверхности.

В качестве источника излучения, имитирующего солнечное излучение, использовалась галогенная лампа. Плотность потока излучения контролировалась размещенным на фотоэлектрических модулях фотодиодом. Величина плотности потока излучения задавалась изменением сопротивления реостата в цепи питания галогенной лампы. При проведении измерений поддерживался поток излучения 306 Вт/м^2.

Схема экспериментального стенда представлена на рис. 1.

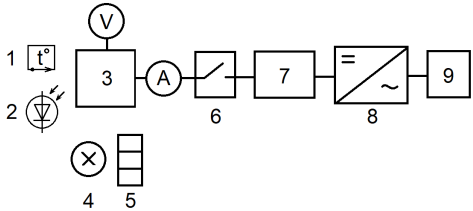


Рис. 1. Схема экспериментального стенда: 1 – датчик температуры; 2 – датчик плотности потока излучения; 3 – фотоэлектрическая батарея; 4 – галогенная лампа; 5 – электронагревательный элемент; 6 – контроллер заряда аккумуляторной батареи; 7 – аккумуляторная батарея; 8 – сетевой инвертор; 9 – КВ-радиостанция

Вольтамперные характеристики фотоэлектрической батареи были измерены путем постепенного увеличения величины нагрузки КВ-радиостанции и регистрации соответствующих значений напряжения и тока при комнатной температуре и при повышенной температуре (электронагревательный элемент включен). На основании вольтамперных характеристик были рассчитаны кривые выходной мощности фотоэлектрической батареи для комнатной и повышенной температур.

Результаты эксперимента и их обсуждение

На основании результатов измерений получены кривые выходной мощности фотоэлектрической батареи (рис. 2).

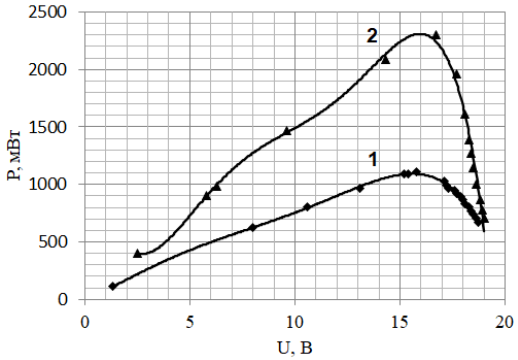


Рис. 2. Кривые выходной мощности фотоэлектрической батареи: 1 – при температуре 29 °С; 2 – при температуре 50 °С

Кривые выходной мощности фотоэлектрической батареи имеют экстремум при напряжении 16 В – точку максимальной мощности (ТММ). При изменении температуры н 21 °С ТММ увеличивается на 109 %. Контроллер заряда или сетевой инвертор могут осуществлять автоматический поиск ТММ. Однако с точки зрения системы автоматического управления (САУ) объектом РГ представляет интерес разработка алгоритма, направленного не на получение максимального количества энергии от ФУ, а на поддержание ее заданного значения ΔР. В любой момент времени ΔР должно соответствовать набросу нагрузки КВ-радиостанции $\Delta P_н$. Если ΔР меньше $\Delta P_н$, тогда ФУ не компенсирует наброс нагрузки. Если ΔР больше $\Delta P_н$, тогда ФУ вызывает переток мощности во внешнюю сеть. Переток мощности во внешнюю сеть недопустим без согласования с сетевым оператором, заменой устройств релейной защиты и автоматики (РЗА), изменением параметров настройки и алгоритмов работы РЗА.

Независимость ΔР от температуры САУ может обеспечивать путем прогнозирования смещения ТММ на основании базы данных о смещении кривой выходной мощности при колебаниях температуры и соответственного изменения величины балластной активной нагрузки объекта РГ или включения резервного генератора.

Заключение

Объекты РГ, содержащие солнечную электростанцию, могут быть использованы для уменьшения пикового электропотребления потребителей с резко – переменным характером нагрузки. При этом следует учитывать, что на выходную мощность ФУ влияют колебания температуры окружающей среды. Согласно экспериментальным данным при увеличении температуры на 21 °С ТММ фотоэлектрической батареи смещается на 109 %. Независимость выходной мощности ФУ от температуры может обеспечивать САУ путем прогнозирования смещения ТММ на основании базы данных о смещении кривой мощности при колебаниях температуры и соответственного изменения величины балластной активной нагрузки объекта РГ или включения резервного генератора.

Список источников

1. *Гуревич Ю. Е., Илюшин П. В.* Особенности расчетов режимов в энергорайонах с распределенной генерацией: монография. Нижний Новгород: НИУ РАНХиГС, 2018. 280 с.

2. *Илюшин П. В.* Мобильные генерирующие установки в электроэнергетических системах: международный и отечественный опыт, перспективы применения // Энергетик. 2022. № 3. С. 31 – 36.

3. *Дзюба А. П., Соловьева И. А.* Механизмы управления спросом на энергоресурсы в промышленности // Journal of New Economy. 2020. Vol. 21. N 3. P. 175–195.

4. Multi-objective optimal dispatching of demand response-enabled microgrid considering uncertainty of renewable energy generations based on two-level iterative

strategy / Y. Meng, Y. Wang, S. Sun, S. Wang, H. Zhang // Energy Reports. 2023. Vol. 9. P. 1842–1858.

5. Устройство для сглаживания профиля мощности КВ-радиостанции: Патент РФ 216305 МПК F03B 13/00/ Б. А. Косарев, С. В. Кривальцевич, 05.05.2022.

6. *Kirovskaya I., Ekkert A., Mironova E.* Physical and Chemical Properties of Semiconductor Adsorbents of InP – CdBVI Systems. J. Surf. Investig. 2021. Vol. 15. P. 178–182.

УДК 621.32

В. П. Кузьменко*
кандидат технических наук, доцент
В. В. Булатов*
кандидат технических наук, доцент
*Санкт-Петербургский государственный университет
аэрокосмического приборостроения

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РЕСУРСОВ ЛАМП БЫТОВОГО ОСВЕЩЕНИЯ

Представлена методика оценки ресурса ламп бытовых приборов, разработана экспериментальная установка для проведения исследований основных видов ламп, получены зависимости температуры ламп от времени после включения и отключения питания и зависимости освещенности от количества циклов включения/выключения.
Ключевые слова: бытовые лампы, ресурс, испытания, температура, освещенность.

V. P. Kuzmenko*
PhD Sc. Tech., Associate Professor
V. V. Bulatov*
PhD Sc. Tech., Associate Professor
*St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

EXPERIMENTAL STUDY OF HOUSEHOLD LIGHTING LAMP RESOURCES

The article presents a methodology for assessing the resource of lamps for household appliances, developed an experimental setup for researching the main types of lamps, obtained the dependences of the temperature of the lamps on time after turning on and off the power, and the dependence of illumination on the number of on/off cycles.
Keywords: household lamps, service life, tests, temperature, illumination.

Одним из нормированных показателей надежности ламп является ресурс. Согласно [1] ресурс – это суммарная наработка объекта от начала его эксплуатации или ее возобновления после ремонта до момента достижения объектом предельного состояния. У бытовых ламп обычно принято считать ресурс, выражаемый в часах или циклах включения/выключения, однако с развитием световых технологий возникают новые способы выражения ресурса, например, в процентном от номинального спада (деградации) светового потока с течением времени [2]. Новые способы определения и выражения ресурса современных бытовых ламп связаны с увеличением срока службы отдельных элементов изделия – источников света, элементов пускорегулирующей аппаратуры. Кроме того, с развитием композитных материалов растет и качество светорассеивающих элементов ламп.

Так, например, бытовая светодиодная лампа с течением времени может не выйти из строя полностью и продолжать работать, но уже не выдавать указанных в паспорте изделия номинальных параметров. Это обуславливает

необходимость учета ухудшающихся с течением времени характеристик и пересмотра понятия «исправность» для данного типа изделий.

На основании вышеизложенного была сформулирована цель данного исследования – получение экспериментальных данных и зависимостей значений ресурса основных параметров бытовых ламп. Анализ такого рода экспериментальных данных позволяет внести вклад в уточнение оценки параметров освещенности ламп различного типа.

Для проведения исследования ресурсов ламп были выбраны следующие типы с соответствующими характеристиками [3]–[7] (табл. 1).

Таблица 1

Характеристики исследуемых ламп

№	Модель лампы	Тип лампы	Потребляемая мощность, Вт	Угол светового потока, град.	Цветовая температура, К	Световой поток, лм	Срок службы, ч
1	Navigator	Светодиодная	7	270	2700	525	30 000
2	Jazz-way	Светодиодная	7	160	5000	560	30 000
3	Uniel golden	Светодиодная	5	360	2700	450	30 000
4	КЭЛЗ М 50	Накаливания	70	~300	2700	710	1 000
5	Smile light	Компактная люминесцентная лампа	30	-	2700	2255	8 000

К характерным типам отказов ламп бытового освещения можно отнести следующие:

а) для ламп накаливания:
– испарение вольфрамовой нити;
– некачественные патроны;
– чувствительность к вибрации;
б) для люминесцентных ламп:
– распыление эмиссионной смеси;
– отказ электронного блока питания;
– выход из строя люминофора;
– распыление ртути;
в) для светодиодных ламп:
– перегрев;
– механические повреждения;
– несовместимость химических материалов и их старение;
– деградация светового потока;
– старение люминофора;
– обрыв электрической цепи;
–высыхание конденсатора.

В процессе исследования ресурса ламп оценим деградацию светового потока и безотказность, путем многократного повторения циклов включения и

выключения. Для этого разработаем алгоритм испытаний и установку для проведения исследований.

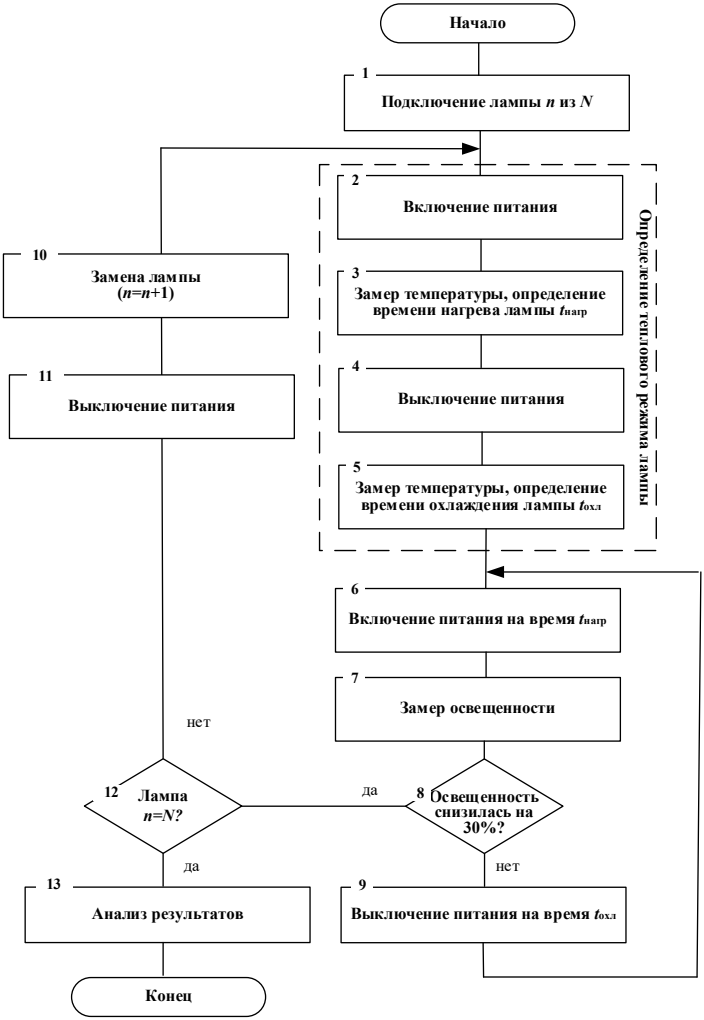


Рис. 1. Блок-схема алгоритма проведения экспериментального исследования ресурсов ламп бытового освещения

Учитывая, что заявленный срок службы современных светодиодных ламп освещения (кроме ламп накаливания и люминесцентных ламп) составляет от 30 тысяч часов (см. табл. 1), то проведения испытаний с целью проверки ресурса ламп путем продолжительного включения является трудоемкой задачей. Отсю-

да возникает необходимость в применении методик ускоренных испытаний. При проведении испытаний дополнительным критерием отказа будет считаться также снижение светового потока на более чем 30 %. Это будет определяться косвенно путем измерений освещенности.

Ускорение испытаний осуществляется за счет циклического включения и отключения лампы. Определение оптимального времени цикла является одним из этапов разработанного алгоритма (рис. 1), так как это позволит приблизить условия испытаний к реальному режиму эксплуатации.

Для реализации представленного алгоритма разработана лабораторная установка, схема которой представлена на рис. 2.

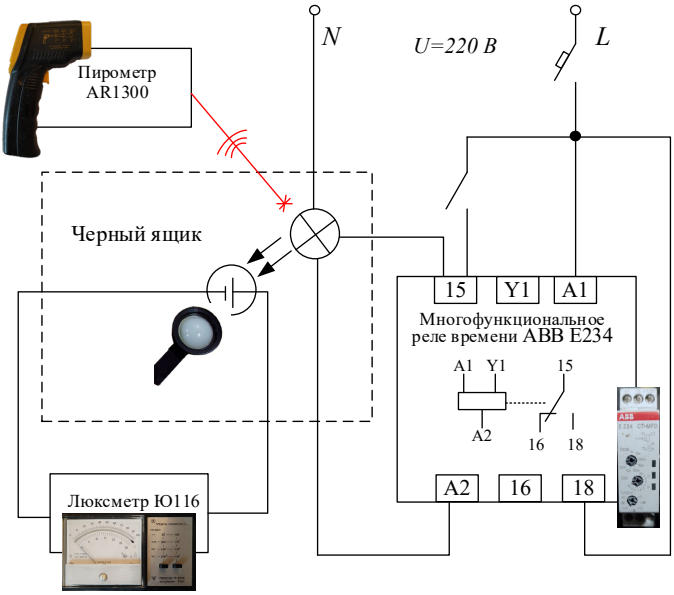


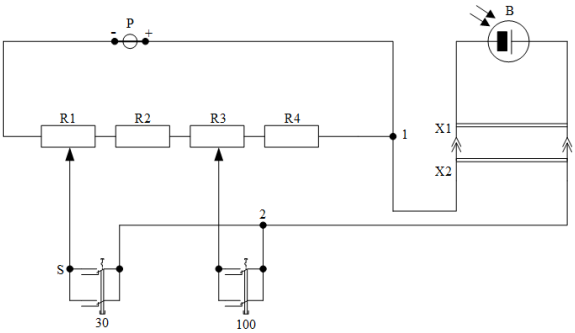
Рис. 2. Схема стенда экспериментальных исследований ресурса ламп бытового освещения

В состав стенда входят следующие основные функциональные элементы:

а) люксметр Ю116 для измерения освещенности (рис. 3). Шкалы прибора градуированы в люксах: первая шкала 100 делений, вторая 30 делений;

б) высокоточный пирометр модели AR1300, который может измерять температуру от -50 до 480 град.;

в) многофункциональное реле времени фирмы ABB модель E234 CT-MFD. 12. В данном реле можно выставить диапазон выдержки от 0,5 с до 100 ч. В реле установим режим «мигания» (повтор равных временных интервалов «начало»).



а) *б)*

Рис. 3. Люксметр Ю116: а – внешний вид; б – принципиальная схема

Внешний вид стенда, включающий помимо перечисленных элементов камеру для установки ламп черного цвета, автоматический выключатель и выключатель в обход реле, представлен на рис. 4.

Рис. 4. Внешний вид стенда экспериментальных исследований ресурса ламп бытового освещения

В соответствии с алгоритмом были проведены исследования выбранного набора ламп бытового освещения различных типов (светодиодные, компактная люминесцентная, лампа накаливания).

Результаты первого этапа исследований, а именно определения теплового режима с целью установления циклического времени включения и выключения, представлены в виде графиков и их регрессионных моделей на рис. 5 и 6.

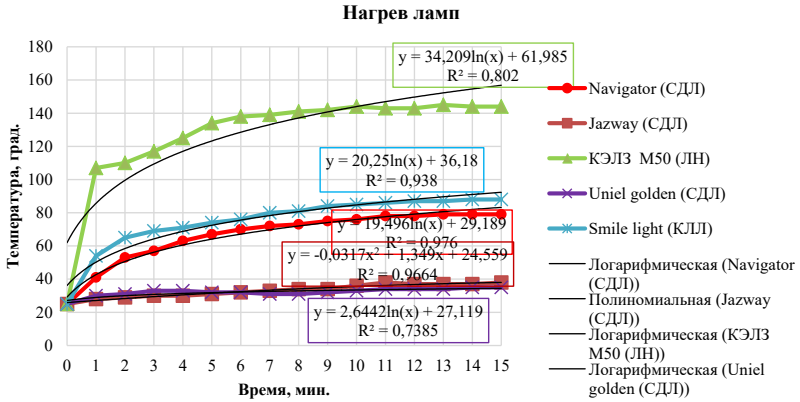


Рис. 5. Зависимости изменения температуры ламп от времени после включения питания (нагрев)

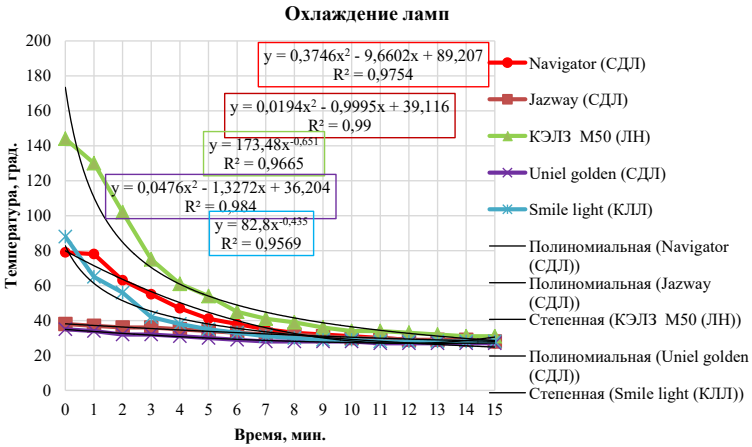


Рис. 6. Зависимости изменения температуры ламп от времени после отключения питания (охлаждение)

По результатам эксперимента было определено время выхода на номинальный режим, которое составило 15 минут. Используя регрессионный анализ, получаем оптимальное время цикла включения/выключения для испытаний ламп по ресурсу.

Стоит отметить, исходя из полученных зависимостей, что график нагрева имеет, как правило, логарифмический характер для рассматриваемых типов ламп, тогда как при охлаждении зависимости описываются полиноминальным законом для светодиодных ламп и степенным для лампы накаливания и компактной люминесцентной лампы.

Далее поочередно были испытаны лампы на ресурс. Полученная зависимость циклов от освещенности представлена на рис. 7.

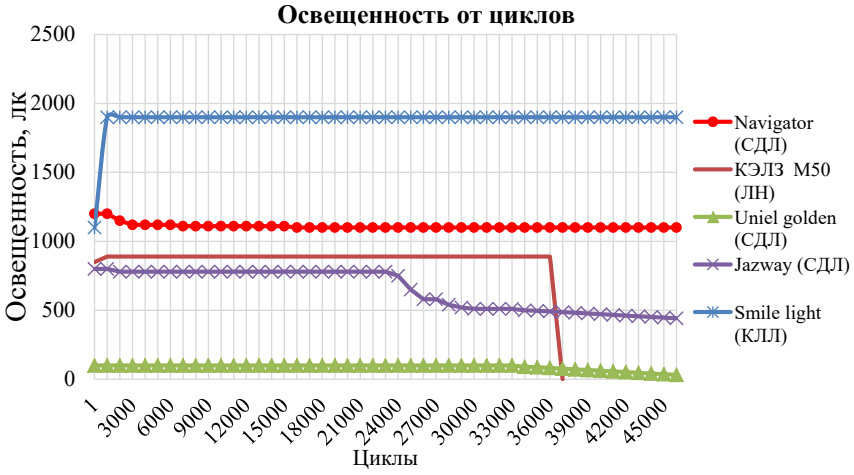


Рис. 7. Экспериментальная зависимость освещенности от количества циклов

По результатам проведенных исследований могут быть сделаны следующие выводы:

– лампа накаливания имеет наименьший ресурс (отказ произошел после 39 000 циклов);

– световой поток светодиодных ламп: Navigator – не наблюдалось снижения светового потока; Uniel golden – незначительное снижение (в пределах 12 % по освещенности); Jazzway– значительное снижение (на 25 %);

– заявленные в технической документации значения светового потока светодиодных ламп и ламп накаливания не подтверждаются результатами эксперимента.

Представленная установка проведения испытаний может быть использована отделами технического контроля на производствах осветительного оборудования.

Список источников

1. ГОСТ Р 27. 102-2021 Надежность в технике. Надежность объекта. Термины и определения. М.: Стандартинформ, 2021. 46 с.

2. *Кузьменко В. П. Шишлаков В. Ф., Соленый С. В.* Исследовательские испытания светодиодных источников света // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2019. Т. 62. № 7. С. 632–640.

3. URL: http://www.navigator-light.ru/lamps/ (дата обращения: 14.02.2023).

4. URL: https://jazz-way.com (дата обращения: 14.02.2023).

5. URL: https://uniel.ru/catalog/istochniki-sveta/lampy-vintage/il-v-g125-60-golden-e27-vw01/(дата обращения: 14.02.2023).

6. URL: https://kelz.ru/catalog/lamp-on_m50/(дата обращения: 14.02.2023).

7. URL: https://szsa.ru/upload/files/commercial.pdf (дата обращения: 14.02.2023).

УДК 681.5

А. Л. Ляшенко*
кандидат технических наук, доцент
*Санкт-Петербургский государственный университет
аэрокосмического приборостроения

РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ ТЕПЛОВЫХ ПОЛЕЙ ГАЗОРАЗРЯДНОЙ ТРУБКИ ГАЗОВЫХ CO_2-ЛАЗЕРОВ

Рассмотрено устройство газовых CO_2-лазеров. В качестве примера рассмотрена лазерная газоразрядная трубка RECI W6 (130-160 Вт). Представлено обоснование необходимости охлаждения активной среды CO_2-лазера. В связи с этим формулируется и решается задачи разработки системы охлаждения и управления температурой охлаждающей жидкости. Разработанное программное обеспечение позволяет проводить моделирование тепловых процессов в газоразрядных трубках.
Ключевые слова: лазер, анализ, дифференциальное уравнение, моделирование, контроль, система охлаждения, обработка информации, управление.

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

DEVELOPMENT OF A MODEL OF THERMAL FIELDS OF A GAS-DISCHARGE TUBE OF GASEOUS CO2 LASERS

The structure of gaseous CO2 lasers is considered. As an example, a laser gas discharge tube RECI W6 (130-160 W) is considered. A substantiation of the necessity of cooling the active medium of a CO2 laser is presented. In this regard, the problems of developing a cooling system and controlling the temperature of the coolant are formulated and solved. The developed software makes it possible to simulate thermal processes in gas-discharge tubes.
Keywords: Laser, analysis, differential equation, modeling, control, cooling system, information processing, control.

Введение

Основные требования к новым технологиям в настоящее время заключаются, прежде всего, в их экологической чистоте, энергетической и ресурсной экономичности, полной автоматизации при сохранении требований высокой производительности и максимального экономического эффекта [1].

Лазерная технология относится к разряду новых технологий, что видно как из факторов ее распространяющихся применений, так и из ее очевидных преимуществ.

В настоящее время лазеры нашли широчайшее применение во всех областях человеческой деятельности в связи с этим создание новых лазеров и лазерных комплексов, несомненно, является важной задачей.

Постановка задачи

Функционирование лазеров сопровождается повышением рабочей температуры активного элемента, а также других частей лазерного комплекса. Это определяет необходимость системы охлаждения.

Например, процессы накачки лазерной смеси в CO_2-лазерах и генерации неизбежно сопровождаются нагревом газа. Эффективность усиления активной среды CO_2-лазера существенно зависит от температуры рабочей смеси. По достижении некоторой критической температуры инверсная заселенность лазерной смеси исчезает. При оптимальных температурах смеси достигается максимальная инверсия. Поэтому одним из основных условий работы CO_2-лазера является недопустимость перегрева лазерной смеси выше оптимального значения [2].

Отвод теплоты от рабочей смеси может осуществляться либо в результате отвода тепла к охлаждаемой стенке разрядной трубки, либо путем замены нагретой порции газа новой. В соответствии с этим по способу охлаждения рабочей смеси газоразрядные CO_2-лазеры можно разделить на лазеры с диффузионным и конвективным охлаждением.

В качестве примера рассмотрим установку с ГРТ RECI W6 (130-160 Вт) (рис. 1).

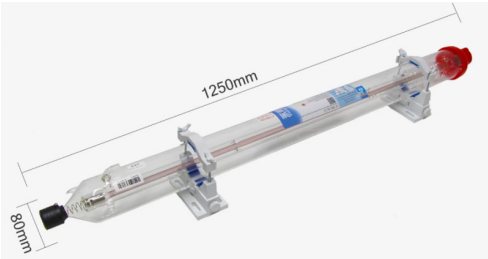


Рис. 1. Лазерная трубка RECI W6 (130-160 Вт)

CO_2-лазер с диффузионным охлаждением (ЛДО) рабочей смеси (рис. 2) состоит из охлаждаемой водой разрядной трубки, внутри которой с помощью системы электродов создается газоразрядная плазма.

Рис. 2. Устройство CO_2-лазера с диффузионным охлаждением

По торцам разрядной трубки размещены зеркала резонатора: глухое зеркало и полупрозрачное (или с отверстием) зеркало [3].

Решение задачи

Для разработки системы охлаждения газовой смеси составим математическую модель, с помощью которой исследуем тепловые процессы, протекающие в газоразрядной трубке (ГРТ). Конструкция ГРТ представляет собой теплообменный аппарат «труба в трубе».

В рассматриваемой ГРТ используется жидкостный тип охлаждения. В качестве охлаждающей жидкости используется дистиллированная вода. Необходимо разработать систему управления, обеспечивающую поддержание температуры газовой смеси на заданном уровне.

При составлении математической модели (ММ) учтем, что скорость прокачки воды и размеры живого сечения трубопроводов позволяют рассматривать течение жидкости как ламинарное. В связи с этим при моделировании тепловых процессов в движущемся потоке жидкости в соответствие с [4] мы можем использовать уравнение (3) вместо уравнений Навье – Стокса.

При описании тепловых процессов в ГРТ применялись уравнения теплопроводности. В качестве примера запишем фрагмент ММ.

Для газовой смеси:

$$\frac{\partial T_1(x,\phi,R,t)}{\partial t} = a_1 \left[\begin{array}{l} \dfrac{\partial^2 T_1(x,\phi,R,t)}{\partial R^2} + \dfrac{1}{R}\dfrac{\partial T_1(x,\phi,R,t)}{\partial R} + \\ + \dfrac{1}{R^2}\dfrac{\partial^2 T_1(x,\phi,R,t)}{\partial \phi^2} + \dfrac{\partial^2 T_1(x,\phi,R,t)}{\partial x^2} \end{array} \right] - \vartheta_1 \frac{\partial T_1(x,\phi,R,t)}{\partial x}. \quad (1)$$

Для стенки трубки с газовой смесью:

$$\frac{\partial T_2(x,\phi,R,t)}{\partial t} = a_2 \left[\begin{array}{l} \dfrac{\partial^2 T_2(x,\phi,R,t)}{\partial R^2} + \dfrac{1}{R}\dfrac{\partial T_2(x,\phi,R,t)}{\partial R} + \\ + \dfrac{1}{R^2}\dfrac{\partial^2 T_2(x,\phi,R,t)}{\partial \phi^2} + \dfrac{\partial^2 T_2(x,\phi,R,t)}{\partial x^2} \end{array} \right]. \quad (2)$$

Для охлаждающей жидкости:

$$\frac{\partial T_3(x,\phi,R,t)}{\partial t} = a_3 \left[\begin{array}{l} \dfrac{\partial^2 T_3(x,\phi,R,t)}{\partial R^2} + \dfrac{1}{R}\dfrac{\partial T_3(x,\phi,R,t)}{\partial R} + \\ + \dfrac{1}{R^2}\dfrac{\partial^2 T_3(x,\phi,R,t)}{\partial \phi^2} + \dfrac{\partial^2 T_3(x,\phi,R,t)}{\partial x^2} \end{array} \right] - \vartheta_3 \frac{\partial T_3(x,\phi,R,t)}{\partial x}. \quad (3)$$

Для стенки охлаждающей трубки:

$$\frac{\partial T_4(x,\phi,R,t)}{\partial t} = a_4 \left[\begin{array}{l} \dfrac{\partial^2 T_4(x,\phi,R,t)}{\partial R^2} + \dfrac{1}{R}\dfrac{\partial T_4(x,\phi,R,t)}{\partial R} + \\ + \dfrac{1}{R^2}\dfrac{\partial^2 T_4(x,\phi,R,t)}{\partial \phi^2} + \dfrac{\partial^2 T_4(x,\phi,R,t)}{\partial x^2} \end{array} \right]. \quad (4)$$

Для воздушной среды ГРТ:

$$\frac{\partial T_5(x,\phi,R,t)}{\partial t} = a_5 \left[\begin{array}{l} \dfrac{\partial^2 T_5(x,\phi,R,t)}{\partial R^2} + \dfrac{1}{R}\dfrac{\partial T_5(x,\phi,R,t)}{\partial R} + \\ + \dfrac{1}{R^2}\dfrac{\partial^2 T_5(x,\phi,R,t)}{\partial \phi^2} + \dfrac{\partial^2 T_5(x,\phi,R,t)}{\partial x^2} \end{array} \right]. \quad (5)$$

Для внешней трубки корпуса ГРТ:

$$\frac{\partial T_6(x,\phi,R,t)}{\partial t} = a_6 \left[\begin{array}{l} \dfrac{\partial^2 T_6(x,\phi,R,t)}{\partial R^2} + \dfrac{1}{R}\dfrac{\partial T_6(x,\phi,R,t)}{\partial R} + \\ + \dfrac{1}{R^2}\dfrac{\partial^2 T_6(x,\phi,R,t)}{\partial \phi^2} + \dfrac{\partial^2 T_6(x,\phi,R,t)}{\partial x^2} \end{array} \right]. \quad (6)$$

После получения полной ММ с учетом граничных условий был проведен численный эксперимент, по результатам которого был произведен расчет настроек регулятора. Далее произведем моделирование замкнутой системы управления при различных режимах.

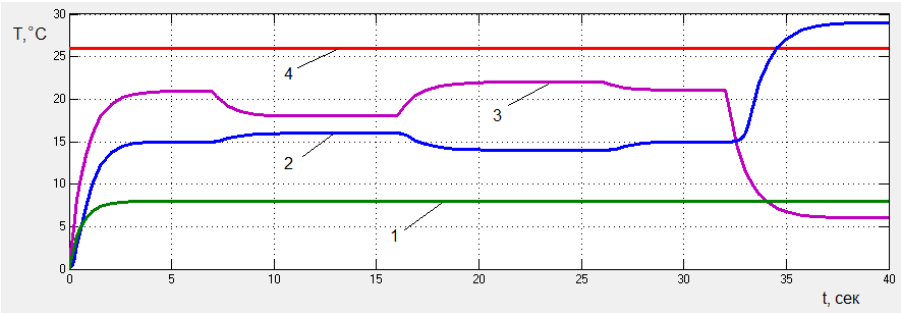


Рис. 3. Графики переходных процессов: 1 – значения температуры воды на входе в канал; 2 – значения температуры ГРТ; 3 – скорость воды (ось значений скорости на рисунке не представлена); 4 – значения температуры окружающей среды

Заключение

Проведенные эксперименты показали работоспособность математической модели и написанной на ее основе компьютерной программы. Разработанное

программное обеспечение (ПО) позволяет моделировать тепловые процессы в ГРТ, а полученные в результате моделирования результаты дают возможность более точно рассчитать настройки регулятора для системы охлаждения.

Список источников

1. *Климков Ю. М., Хорошев М. В.* Лазерная техника: учеб. пособие. М.: МИИГАиК, 2014. 143 с.

2. *Курочкин Ю. В.* Специальное технологическое оборудование и оснастка лазерной обработки: учеб. пособие. М.: МГИУ, 1999. 90 с.

3. Расчет системы охлаждения лазерной установки: метод. указания / сост. А. И. Довгялло и др. Самара, 2010. 32 с.

4. *Лыков А. В.* Теория теплопроводности. М.: Высшая школа, 1967. 599 с.

УДК 681.5

С. Л. Морева*
кандидат технических наук, доцент
А. Л. Ляшенко*
кандидат технических наук, доцент
*Санкт-Петербургский государственный университет
аэрокосмического приборостроения

РОЛЬ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ В УПРАВЛЕНИИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИМИ ОБЪЕКТАМИ

Рассмотрено определение и назначение цифровых двойников, а также изложен принцип их работы. Определена важность математического описания объектов и протекающих в них процессов при разработке цифровых двойников. В качестве примера рассмотрен комплекс «Виртуально-цифровая АЭС с ВВЭР», сценарии его применения и перспективы развития цифровых двойников.
Ключевые слова: цифровой двойник, математическая модель, анализ, контроль, проектирование, обработка информации, управление.

S. L. Moreva*
PhD Sc. Tech., Associate Professor
A. L. Lyashenko*
PhD Sc. Tech., Associate Professor
*St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

THE ROLE OF DIGITAL TWINS IN THE MANAGEMENT OF ENERGY FACILITIES

The definition and purpose of digital twins are considered, as well as the principle of their operation. The importance of the mathematical description of objects and the processes occurring in them in the development of digital twins is determined. As an example, the complex «Virtual-digital NPP with VVER» is considered and scenarios for its application are considered. The prospects for the development of digital twins are considered.
Keywords: Digital twin, mathematical model, analysis, control, design, information processing, management.

Введение

Впервые идея цифрового двойника (Digital Twin – DT), или виртуальной модели, была предложена в 2002 году американским ученым М. Гривсом.

В настоящее время цифровые двойники (ЦД) получили широкое применение по всему миру и становятся все более востребованными в России. Что представляют собой ЦД? Цифровые двойники представляют собой новое направление, концепция которого считается промышленной революцией, которая призвана помочь предприятию с принятием важных решений с помощью в обнаружения проблем, точности предсказания отказов оборудования, систем, проектирования и для модернизации оборудования [1].

Развитие ЦД поддерживается в первую очередь крупными предприятиями, связанными с непрерывным производством и относящимися, прежде всего к металлургической отрасли, горнодобывающей промышленности и энергетике. Кроме того, применение ЦД распространилось не только на технологические производства, но и на медицинскую, строительную, машиностроительную отрасли.

Основа цифрового двойника

ЦД представляет собой цифровую копию технологического оборудования и протекающего в нем процесса, помогающую быстрее обнаруживать проблемы, возникающие на объекте в процессе его эксплуатации и точнее предсказывать их последствия.

В основе цифрового двойника лежит математическое описание процессов (рис. 1), имеющих место на реальном технологическом оборудовании в рассматриваемых условиях эксплуатации. Как правило, ЦД объединен с имеющейся на производстве системой управления технологического процесса и оснащен автоматизированным рабочим местом оперативного персонала.

Рис. 1. Принцип работы цифрового двойника

Математическая модель соединяют с физическим оборудованием и измерительными приборами. В процессе эксплуатации оборудования возможны изменения его характеристик, в связи с этим должна осуществляться тщательная верификация математической модели в соответствии с изменением параметров моделируемого объекта или процесса.

Математическая модель ЦД является эталоном, наличие которого дает возможность обнаруживать различные отклонения в работе оборудования еще на ранней стадии развития дефектов. Это позволяет прогнозировать техническое состояние оборудования при различных режимах работы.

Пример цифрового двойника

В качестве примера рассмотрим комплекс «Виртуально-цифровая АЭС с ВВЭР» представляющий собой масштабный проект, который относят к классу

цифровых двойников. Платформа позволяет проводить мультифизическое моделирование стационарных и динамических режимов, характерных для энергоблоков атомных электростанций (АЭС) технологии водо-водяных энергетических реакторов (ВВЭР), решать инженерные задачи на этапе проектирования и эксплуатации энергоблоков АЭС с реакторными установками (РУ) типа ВВЭР.

Расчетные коды дают возможность построения моделей энергоблоков для численного анализа их работы как в режимах нормальной эксплуатации, так и в случае аварий.

В состав программного комплекса входит 8 модулей, из которых 3 служат для теплогидравлических процессов в контурах и помещениях защитной оболочки.

Сценарии применения цифровых двойников

На АЭС имеется несколько вариантов применения цифровых технологий.

Во-первых, ЦД используется для разработки набора рекомендаций по эксплуатации оборудования в штатных режимах, а также поиска оптимальных решений в работе РУ. Для этого производится сопоставление информации о процессах, содержащейся в математической модели с показаниями с датчиков, установленных на объекте. Далее производятся предварительные расчеты, по результатам которых можно получить картину процессов, протекающих в оборудовании при различных режимах эксплуатации. Затем информацию, поступающую с датчиков, необходимо добавить в метамодель, определить интересующий нас режим работы и задать особенности процесса, по результатам расчетов получить оптимальные параметры работы РУ в рассматриваемых условиях. Полученные результаты предоставляются оперативному персоналу в виде рекомендаций либо в виде управляющих воздействий в АСУ ТП.

Во-вторых, ЦД может использоваться в виде системы диагностики. С его помощью можно оценивать наличие и степень отклонений технологических параметров от заданных и прогнозировать их изменение в дальнейшем.

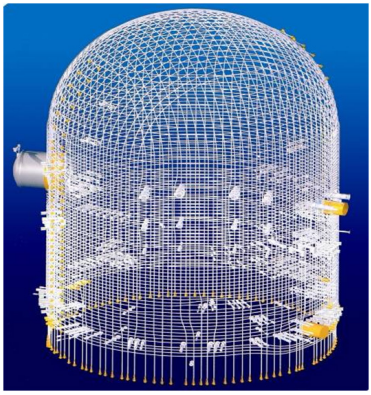


Рис. 2. 3D-модель системы НДС защитной оболочки реактора

ЦД позволяет выявлять отклонения параметров технологического процесса, исследовать их динамику, сравнивать полученные результаты с моделью развития дефекта, на основании чего прогнозируется остаточный ресурс. На рис. 2 изображена модель системы напряженно-деформированного состояния (НСД) с расположениями датчиков в внутренней защитной оболочке РУ.

На рис. 3 изображено рассмотрение деформации колонны НДС от удара.

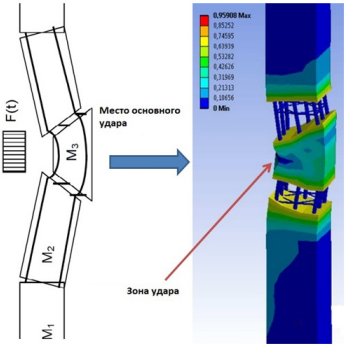


Рис. 3. Детальное рассмотрение последствий удара

Помимо этого, ЦД применяется в качестве виртуального тренажера, который позволяет проводить обучение оперативного персонала для отработки различных сценариев с целью подготовки персонала к работе на АЭС в том числе и в нештатных ситуациях.

Перспективы развития цифровых двойников

Технология цифровых двойников позволяет получить дополнительные проценты повышения выработки или снижения износа и энергопотребления без замены и реконструкции дорогостоящего промышленного оборудования.

Технология ЦД будет развиваться по пути объединения конструкторских, проектных и эксплуатационных данных для формирования достоверных моделей, а также унификации методик создания и тиражирования решений.

Моделирование ситуаций различной опасности позволит рассмотреть поведение АСУ ТП на АЭС и возможность модернизации энергоблока. Также демонстрация расчетных возможностей цифрового двойника путем сравнения его значений со значениями, полученными в результате теплогидравлического расчета позволит повысить безопасность функционирования РУ.

Список источников

1. *Прохоров А., Лысачев М.* Цифровой двойник. Анализ, тренды, мировой опыт. М.: ООО «АльянсПринт», 2020. 237 с.

2. Физические и конструкционные особенности ядерных энергетических установок с ВВЭР: учеб. пособие для вузов / С. Б. Выговский и др. Национальный исследовательский ядерный университет «Московский инженерно-физический институт», 2011. 376 с.

3. *Крылов А.* Цифровые двойники в промышленности. Возможности и перспективы // РИТМ машиностроения. 2021. № 2.

4. Программно-технический комплекс «Виртуально-цифровая АЭС с ВВЭР», Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН. https:// www.ibrae.ac.ru/contents/362 (дата обращения: 12.02.2023).

УДК 621.313

Н. В. Решетникова*
старший преподаватель
И. А. Шишков*
студент
А. Г. Панкратов*
студент
М. А. Монахов*
студент
*Санкт-Петербургский государственный университет
аэрокосмического приборостроения

УЧЕТ В МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЯХ ВЛИЯНИЯ РЕАКЦИИ ЯКОРЯ ДВИГАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Рассмотрено влияние тока нагрузки на значение реакции якоря электромеханического преобразователя ПЛ-072 У3. Построены характеристика холостого хода и нагрузочные характеристики при различных токах якоря, получены параметры обмотки якоря.
Ключевые слова: реакция якоря, магнитный поток, двигатель постоянного тока.

N. V. Reshetnikova*
Senior Lecturer
I. A. Shishkov*
Student
A. G. Pankratov*
Student
M. A. Monakhov*
Student
*St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

ACCOUNTING FOR INFLUENCE OF DC MOTOR ARMATURE REACTION IN MATHEMATICAL MODELS

The article deals with the influence of loading current on the value of armature reaction of electromechanical converter PL-072 U3. No-load and load characteristics with different armature currents were plotted. Parameters of armature winding are obtained.
Keywords: armature response, magnetic flux, DC motor.

Введение

При работе электромеханических преобразователей происходит взаимодействие подвижных и неподвижных частей, в следствие чего наблюдается двигательный или генераторный режим работы. Взаимодействие полей якоря и инвертора приводит к изменению исходных математических моделей. Именно поэтому влияние реакции якоря необходимо учитывать при работе с машинами постоянного тока.

Актуальность данного исследования заключается в том, что реакция якоря электромеханического преобразователя величина не постоянная, зависящая от текущих значений тока нагрузки. Поэтому при работе с машинами постоянного тока следует понимать законы изменения реакции якоря от тока нагрузки.

Объектом исследования является электромеханический преобразователь ПЛ-072 У3.

Цели исследования:

- построить характеристику холостого хода и нагрузочные характеристики при различных токах нагрузки;
- построить графическую зависимость тока реакции якоря от тока нагрузки.

Задачи исследования:

- исследовать зависимости тока реакции якоря от тока нагрузки;
- определить параметры обмотки якоря.

Структурная схема двигателя постоянного тока с управлением скорости вращения за счет изменения напряжения на якоре приведена на рис. 1 [1].

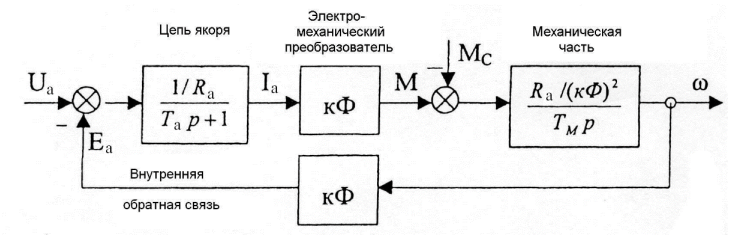


Рис. 1. Структурная схема

Электродвижущая сила машины постоянного тока определяется соотношением

$$E = C_e \Phi_{рез} n.$$

В свою очередь величина обратная $C_e\Phi_{рез}$ – коэффициент передачи двигателя

$$k_{дв} = 1/\left(C_e \Phi_{рез} \right).$$

должна быть постоянной, но, в связи с действием реакции якоря, изменяется магнитный поток, а, следовательно, и коэффициент передачи двигателя меняется [2].

Для определения реакции якоря при начальном значении тока нагрузки I_a=0,44 проводим эксперимент с реальной моделью и получаем характеристику холостого хода, а также нагрузочную характеристику в режиме генератора.

Выполняем построения характеристического треугольника на основании полученных характеристик.

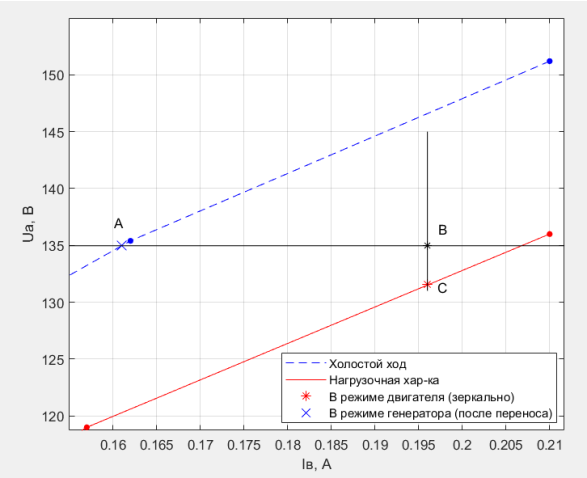


Рис. 2. Отрезки реакции якоря и собственного сопротивления

Начинаем на нагрузочной характеристике параллельно ВС строить отрезки (равные ВС), в масштабе сопротивления пропорциональные собственному сопротивлению якоря (r_a=17,26 Ом) [3], по всей нагрузочной характеристике, до того момента пока отрезок не будет касаться характеристики холостого хода (рис. 3).

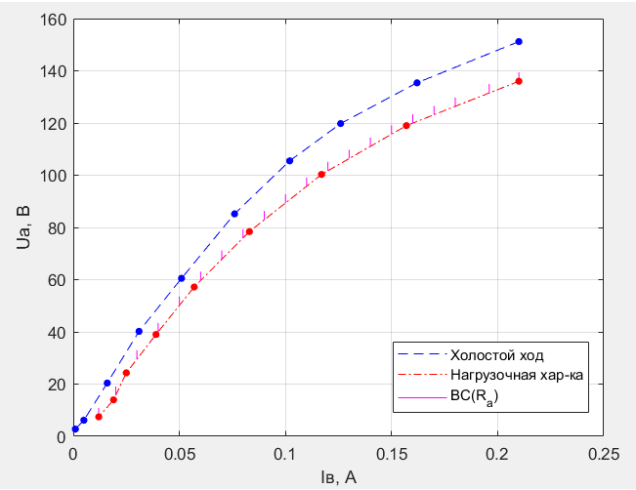


Рис. 3. Построение отрезков ВС

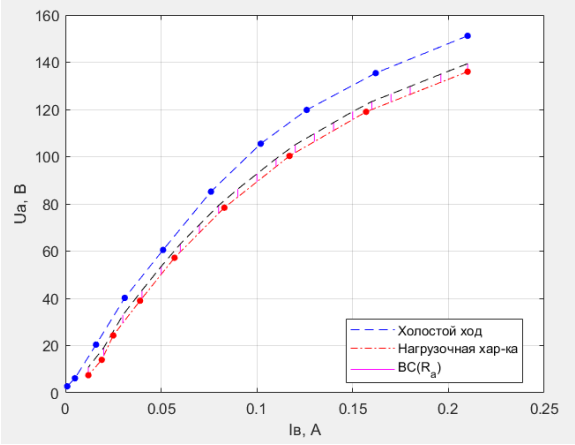


Рис. 4. Построение внутренней нагрузочной характеристики

Так как нам необходимо найти зависимость изменения тока реакции якоря от тока нагрузки, то проведем еще опыты для получения двух нагрузочных характеристик в режиме генератора, при поддержании постоянных оборотов n=1191 об/мин и токах якоря I_a=0,294 А и I_a=0,643 А. Перед снятием характеристик даем двигателю прогреется в течение 5–7 минут.

Построим данные нагрузочные характеристики (рис. 5). В одном случае I_a=0,294 А, в другом I_a=0,643 А. От каждой нагрузочной характеристики откладываем отрезок ВС (собственное сопротивление якоря) и строим линию до пересечения с линией холостого хода. Данные линии будут являться реакциями якоря в масштабе тока возбуждения при различных токах нагрузки [4].

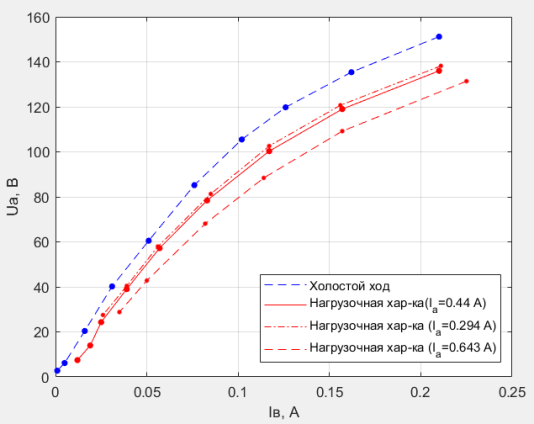


Рис. 5. Построение нагрузочных характеристик

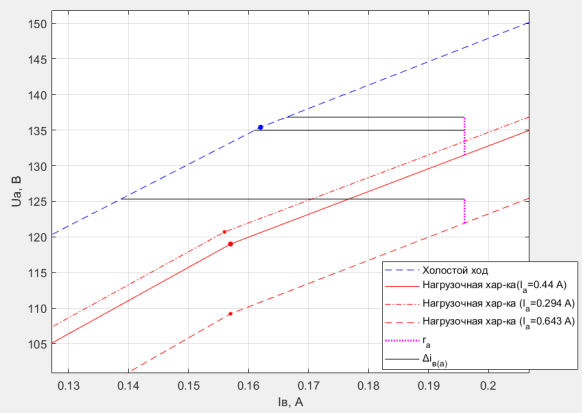


Рис. 6. Реакция якоря при различных токах якоря и одном токе возбуждения

Получаем следующие значения тока возбуждения эквивалентные реакции якоря

$$\Delta i_{в(Ia=0,294)} = 0,02972\ A;$$

$$\Delta i_{в(Ia=0,44)} = 0,035\ A;$$

$$\Delta i_{в(Ia=0,643)} = 0,0572\ A.$$

Построим графическую зависимость тока реакции якоря от тока нагрузки (рис. 7).

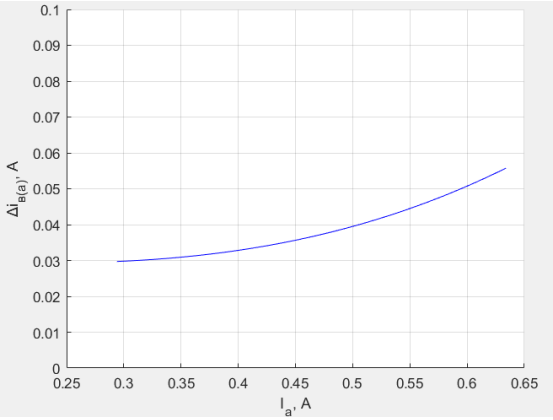


Рис. 7. Зависимость тока реакции якоря от тока якоря

Данная аппроксимированная зависимость имеет уравнение

$$\Delta i_в = 0.1523 I_a^{\ 3} + 7.417 * 10^{-15} * I_a^{\ 2} - 0.02619 * I_a + 0.03355 .$$

По данному закону изменяется магнитный поток, что приводит к изменению коэффициента передачи двигателя и это необходимо учитывать в математических моделях [5].

Рассчитаем параметры обмоток на основании полученных величин. Число витков обмотки возбуждения

$$w = \left(S_{qB} / S_q \right) * K_з ,$$

где S_{qB} – сечение обмотки; $K_з$ – коэффициент заполнения.

Сечение одного провода

$$S_q = I_в / J ,$$

где $I_в$ – ток обмотки возбуждения; $J_в$ – плотность тока (принимаем 4,5 А/мм^2).

Из расчетных формул находим параметры обмотки: сечение обмотки равно S_{qB}=213 мм^2, сечение одного провода S_q=0,435 мм^2, коэффициент заполнения $K_з$=0,8, число витков w=551.

Конструктивная постоянная двигателя C_e=2028. Магнитный поток Ф=6,26*10^{-5} Вб.

Заключение

Из результатов исследования видно, что реакция якоря зависит от тока нагрузки, при увеличении тока увеличивается численное значение реакции якоря, при этом собственное сопротивление остается неизменным. Полученная зависимость тока реакции от тока якоря необходима для уточнения коэффициента передачи двигателя ($k_{дв}$) в системах управления, который будет изменяться при изменении нагрузки, что необходимо учитывать при описании системы математической моделью. Коэффициент передачи двигателя – это обратная величина к $C_e Ф_{рез}$.

Реакцию якоря следует учитывать при расчете электромеханического преобразователя, так как под воздействием поля якоря происходит смещение геометрической нейтрали и последующее ухудшение коммутации, приводящее к нарушениям работы машины (искрению).

Список источников

1. *Сидоров С. Н.* Теория автоматического управления в задачах электропривода: учеб. пособие. Ульяновск: УлГТУ, 2013. 122 с.

2. *Брускин Д. Э., Зорохович А. Е., Хвостов В. С.* Электрические машины и микромашины. М.: Высшая школа, 1990. 528 с.

3. *Тимофеев С. С.* Определение собственного сопротивления обмотки якоря двигателя постоянного тока независимого возбуждения. СПб.: ГУАП, 2023. 9 с.

4. *Вольдек А. И.* Электрические машины // Энергия. 1974. 840 с.

5. *Дементьев Ю. Н., Чернышев А. Ю., Чернышев И. А.* Электрический привод: учеб. пособие. Томск: ТПУ, 2010. 232 с.

УДК 681.5

П. А. Рогозин*
магистрант
А. Л. Ляшенко*
кандидат технических наук, доцент
*Санкт-Петербургский государственный университет
аэрокосмического приборостроения

РАЗРАБОТКА ЛАБОРАТОРНОГО СТЕНДА ДЛЯ ВИБРОДИАГНОСТИКИ МЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Рассмотрено устройство лабораторного стенда для проведения вибродиагностики механических систем. Выбранные модели вибрации позволили произвести исследования с анализом спектральных характеристик. В качестве среды моделирования был выбран Proteus. После создания стенда и схемы в среде компьютерного моделирования проведены эксперименты, результаты которых обрабатывались с применением программно-аппаратного комплекса Arduino.
Ключевые слова: вибродиагностика, анализ, моделирование, контроль, спектр, обработка информации, Proteus, управление.

P. A. Rogozin*
Postgraduate Student
A. L. Lyashenko*
PhD Sc. Tech., Associate Professor
*St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

DEVELOPMENT OF A LABORATORY STAND FOR VIBRO-DIAGNOSIS OF MECHANICAL SYSTEMS

The design of a laboratory stand for vibrodiagnostics of mechanical systems is considered. The selected vibration models made it possible to carry out studies with the analysis of spectral characteristics. Proteus was chosen as the modeling environment. After creating the stand and the circuit in the computer simulation environment, experiments were carried out, the results of which were processed using the Arduino software and hardware complex.
Keywords: Vibrodiagnostics, analysis, modeling, management, spectrum, information processing, Proteus, control.

Введение

С каждым годом автоматизация производств достигает все больших высот, увеличивается количество бытовых и профессиональных приспособлений [1]. А следом за ростом количества такой техники неизбежно возникает необходимость ее ремонта и диагностики [3]. Полезным прибором для этой задачи может стать анализатор спектра, он же – прибор вибродиагностики механических систем.

Постановка задачи

Произведем разработку устройства вибродиагностики, структурная схема которого представлена на рис. 1. Коротко опишем общий принцип работы про-

ектируемого устройства: датчик регистрирует вибрацию объекта и подает полученные значения на анализатор данных [4], полосовые фильтры которого выделяют компоненты сигнала в необходимой области частот, а также позволяют эффективно подавлять помехи, детекторы используются для оценки амплитуды выделенных компонент и далее выводит результат в более удобной и информативной, в рамках поставленной задачи, форме.

Рис. 1. Структурная схема устройства вибродиагностики

Одной из главных задач разработки является алгоритм анализа вибросигналов [1]. Разработку и отладку такого алгоритма будем производить методом компьютерного моделирования [2].

Решение задачи

Для проведения натурного эксперимента была собрана лабораторная установка (рис. 2). Объект экспериментов – листы металла толщиной 1,5 мм. Установлены листы на опорах из пластилина (данный выбор объясняется не только удобством использования, но и отсутствием паразитных вибраций). На листах крепятся вибромотор и вибродатчик.

Для чистоты экспериментов расстояния между датчиком и мотором во всех экспериментах будут одинаковы.

Для каждого эксперимента была проведена серия измерений.

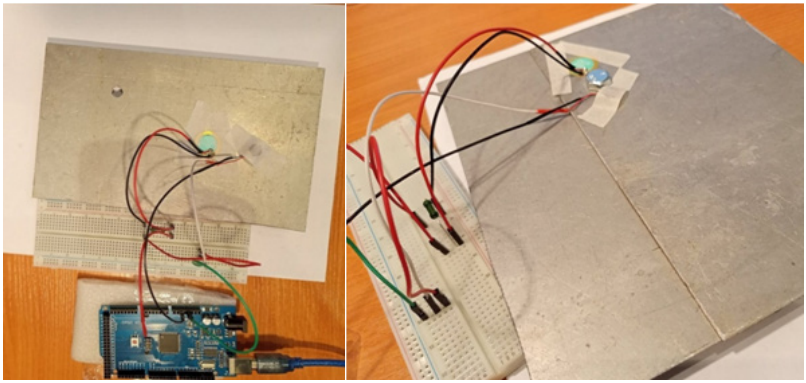


Рис. 2. Лабораторная установка

Для компьютерного моделирования была выбрана среда Proteus. На основании структурной схемы, представленной на рис. 1, предлагается вариант схемы, представленный на рис. 3.

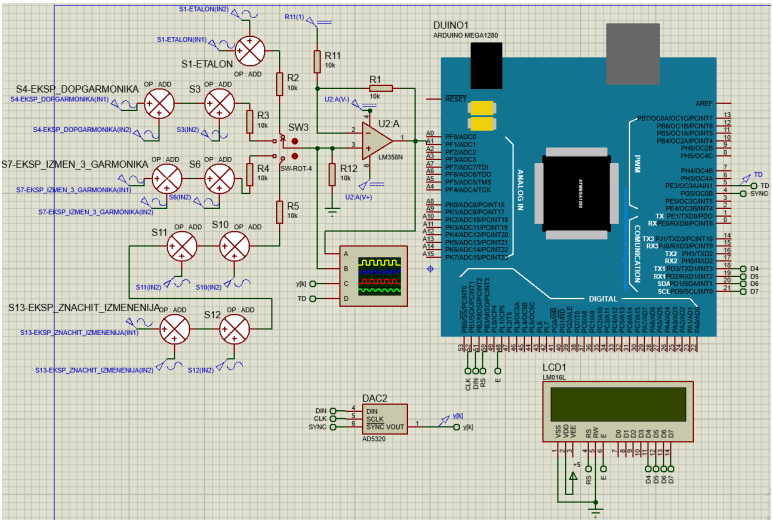


Рис. 3. Схема устройства вибродиагностики в среде Proteus

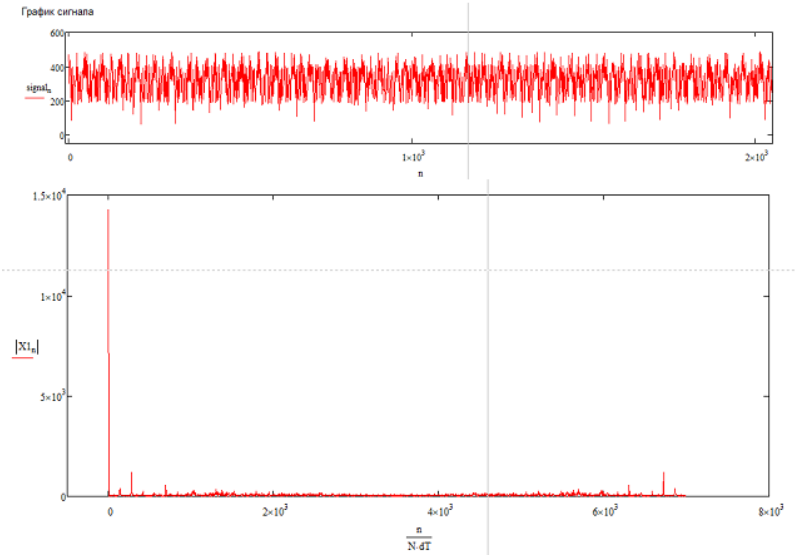


Рис. 4. Сигнал и спектр для третьего прохода четвертого эксперимента

Для каждого эксперимента была проведена серия измерений. Суть экспериментов заключается в контроле прохождения сигнала между вибродвигателем и датчиком. При этом в каждом эксперименте листы металла, на которых устанавливались двигатель и датчик, были скреплены между собой с разной степенью плотности. Кроме того, в ряде экспериментов на одном из листов были сделаны отверстия, имитирующие повреждения металла.

Заключение

Результаты экспериментов сравнивались между собой по спектру сигнала и по среднеквадратической ошибке (СКО).

Первый эксперимент проводился при плотно соединенных листах металла для получения эталонных спектра сигнала и СКО.

Далее результаты экспериментов будут сравниваться между собой:

1 и 2 эксперименты – при отсутствии гайки в креплении (то есть без силового соединения листов железа);

2 и 3 эксперименты – при наложении двух листов железа без крепления;

1 и 4 эксперименты – при наличии отверстия в листе металла.

Проведенные эксперименты показали работоспособность установки, с помощью которой была установлена зависимость между разными условиями проведения экспериментов. Полученные результаты позволяют оценивать качество механических соединений с помощью вибродиагностики.

Список источников

1. *Вохник О. М.* Моделирование и обработка стохастических сигналов и структур: учеб. пособие. М.: МГУ, 2012. 81 с.

2. *Киселев Д. Ю., Киселев Ю. В.* Диагностирование технических систем по спектральным характеристикам вибрации. Самара: СГАУ, 2014. 24 с.

3. Проведение работ по вибродиагностике. URL: https://air-part.ru/product/vibrodiagnostika/ (дата обращения:12.09.2022).

4. Датчики вибрации. URL: https://osensorax.ru/dvizhenie/datchik-vibratsii#i-2(дата обращения:11.10.2022).

УДК 621.313

С. С. Тимофеев*
старший преподаватель
А. Г. Панкратов*
студент
Д. С. Швецов*
студент
М. А. Монахов*
студент
*Санкт-Петербургский государственный университет
аэрокосмического приборостроения

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ В ДВИГАТЕЛЕ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Построена геометрическая модель двигателя ПЛ-072 У3. Описан метод решения стационарной задачи теплопроводности. Выполнено моделирование теплового заполнения электромеханического преобразователя постоянного тока в среде Elcut.
Ключевые слова: тепловое распределение, магнитный поток, электромеханический преобразователь.

S. S. Timofeev*
Senior Lecturer
A. G. Pankratov*
Student
D. S. Shvetsov*
Student
M. A. Monakhov
Student
*St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

TEMPERATURE DISTRIBUTION IN A DIRECT CURRENT MOTOR

The geometrical model of PL-072 U3 motor is constructed in the article. The method of solving the steady-state heat conduction problem is described. Modeling of thermal filling of electromechanical DC converter in Elcut environment is done.
Keywords: thermal distribution, magnetic flux, electromechanical converter.

Введение

В процессе работы электромеханического преобразователя при протекании токов возбуждения и якоря происходит нагревание конструкционных частей машины. Температурное распределение зависит от материала, расположения элемента двигателя и изменяется в зависимости от времени работы.

Актуальность данного исследования обусловлена тем, что в технических задачах необходим учет температурного распределения для построения системы охлаждения, во избежание перегрева, и стабильного функционирования

установки. Учет данных параметров позволяет получить более точные результаты измерений.

Объектом исследования является электромеханический преобразователь ПЛ-072 У3.

Цели исследования:

- построить геометрическая модель двигателя ПЛ-072 У3;
- смоделировать тепловое распределение.

Задачи исследования:

- смоделировать тепловые процессы;
- сравнить экспериментальные и теоретические показатели температуры.

Допущениями так называемой классической теории нагревания являются следующие утверждения.

1. Вся электрическая машина (или ее анализируемый элемент) является единым телом, обладающим неограниченной теплопроводностью, что приводит к отсутствию градиента температуры по любому направлению в объеме машины.

2. Температура окружающей среды неизменна, то есть окружающая среда обладает неограниченной теплоемкостью.

3. Коэффициент теплоотдачи между поверхностью машины и окружающей средой не зависит от места и длительности протекания процесса.

Уравнение теплопроводности для единицы объема тела, охлаждаемого с поверхности, имеет вид

$$cp \times d\upsilon / dt = \lambda \nabla^2 \upsilon + p_0 - \alpha \times F(\upsilon - \upsilon_0) / V .$$

Уравнение трактуется как уравнение теплового баланса, в соответствии с которым выделившаяся теплота расходуется частично на повышение энтальпии тела, частично отводится в окружающую среду [1].

Для решения стационарной задачи теплопроводности как правило используется метод тепловых сопротивлений. Метод описывается как процесс преодоления тепловым потоком частей двигателя, которые представляются в виде тепловых сопротивлений, разбитых на разные оси проекции. Результатов расчета по методу эквивалентных схем с результатами точного решения двухмерных задач показало, что ошибка в определении средней температуры не превосходит 4,0 %, максимальной температуры – 7,5 %. Такая точность вполне удовлетворительна для практики.

Параметры двигателя и окружающей среды для моделирования

В этой работе проводится моделирование и решение методом численного расчета нестационарной задачи. Для моделирования была построена геометрическая модель двигателя ПЛ-072 У3, выполненная в программе AutoCAD.

Параметры окружающей среды: при постоянной температуре 17 °С, конвекция α составляет 6 Вт/К·м^2, а радиация β равна 0,85 [2].

Параметры материалов двигателя: статор – электротехническая сталь 3413, теплопроводность 86 Вт/К·м, теплоемкость 460 Дж/кг·К, плотность 7900 кг/м^3; ротор – электротехническая сталь 1211, теплопроводность 86 Вт/К·м,

теплоемкость 460 Дж/кг·К, плотность 7900 кг/м^3; корпус – алюминий АЛ4, теплопроводность 1 Вт/К·м, теплоемкость 755 Дж/кг·К, плотность 2650 кг/м^3; вал – сталь СТ30, теплопроводность 90 Вт/К·м, теплоемкость 450 Дж/кг·К, плотность 7850 кг/м^3.

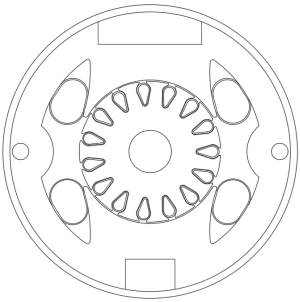


Рис. 1. Модель двигателя

Выполнение моделирования в среде Elcut

Для исследования температурного заполнения электромеханического преобразователя постоянного тока проведем машинные вычисления в среде Elcut, по вышеописанным параметрам двигателя. Ранее в статье: «Моделирование магнитного поля двигателя постоянного тока ПЛ-072 УЗ», было рассмотрено искажение магнитных линий с помощью визуализирования в среде Elcut [3].

Импортируем геометрическую модель и задаем физические параметры материалов двигателя. Моделирование начинается при условии, что температура окружающей среды равна 17 °С и двигатель до этого не был активен.

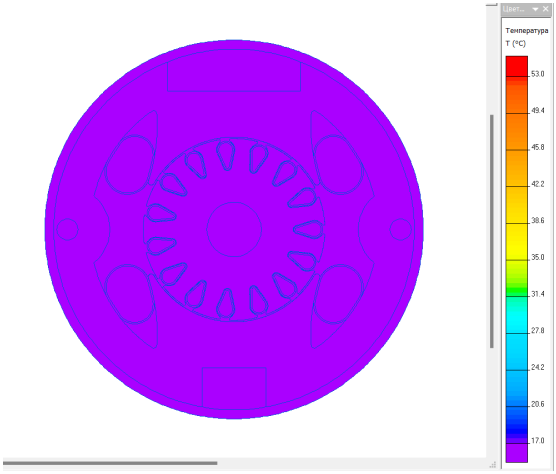


Рис. 2. Распределение температуры (начало моделирования)

Результат спустя 5 минут работы в двигательном режиме представлен на рис. 3.

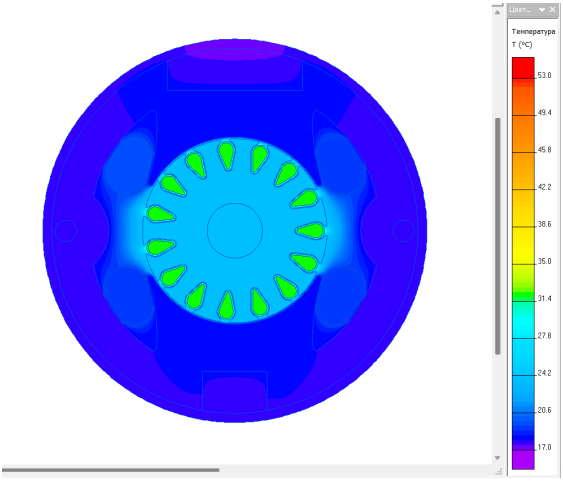


Рис. 3. Распределение температуры (спустя 5 минут)

Результат спустя 10 минут работы в двигательном режиме представлен на рис. 4.

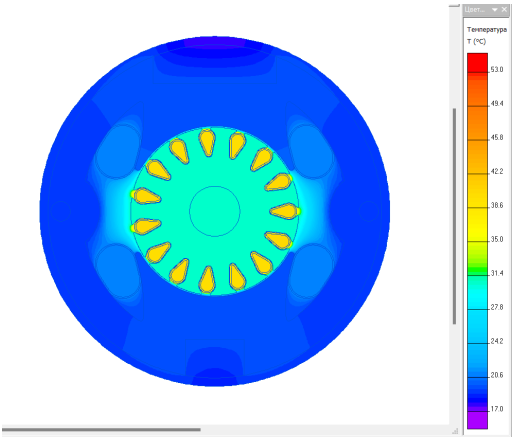


Рис. 4. Распределение температуры (спустя 10 минут)

Результат спустя 15 минут работы в двигательном режиме представлен на рис. 5.

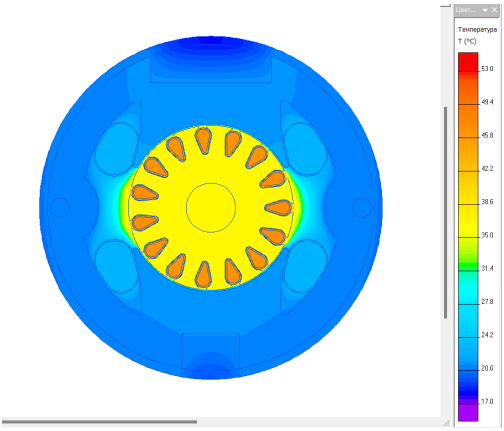


Рис. 5. Распределение температуры (спустя 15 минут)

Результат спустя 20 минут работы в двигательном режиме представлен на рис. 6, сравнение полученных данных – в табл. 1.

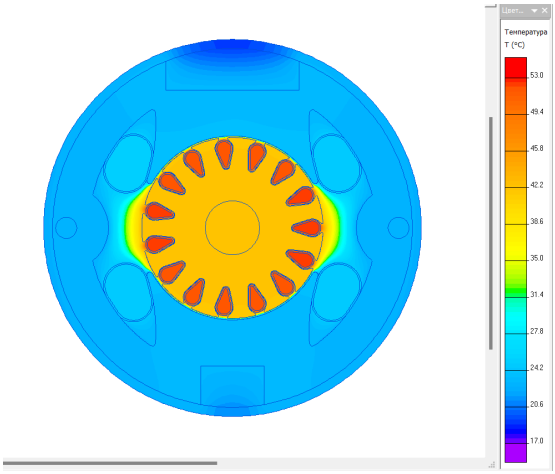


Рис. 6. Распределение температуры (спустя 20 минут)

Таблица 1

Сравнение экспериментальных и смоделированных данных

Время работы	10 минут	20 минут
Экспериментальная температура	34 градусов	45 градусов
Смоделированная температура	36 градусов	49 градусов

Заключение

По результатам моделирования можно провести сравнение экспериментальных и теоретических (смоделированных) данных. При работе двигателя в течение 10 минут разница температур составила порядка 2 градусов (эксперимент 34 градусов, моделирование 36 градусов), со временем, изменение температур росло. При работе в течение 20 минут экспериментальная температура 45 градусов, смоделированная 49 градусов.

Температурное распределение зависит от конструкционного расположения элемента и времени работы машины. Длительное использование двигателя при высоких нагрузках может привести к перегреву, если не будет подобрана необходимая система охлаждения.

Список источников

1. *Филлипов И. Ф.* Теплообмен в электрических машинах // Энергоатомиздат. 1986. 256 с.

2. *Салова И. А.* Моделирование в ELCUT: методические указания к выполнению лабораторных работ. М., 2007. 54 с.

3. *Тимофеев С. С.* Моделирование магнитного поля двигателя постоянного тока ПЛ-072 УЗ: СПб.: ГУАП, 2023. 11 с.

УДК 621.313

С. С. Тимофеев*
старший преподаватель
И. А. Шишков*
студент
Д. С. Швецов*
студент
К. С. Никитина*
студентка
*Санкт-Петербургский государственный университет
аэрокосмического приборостроения

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОБСТВЕННОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ОБМОТКИ ЯКОРЯ ДВИГАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА НЕЗАВИСИМОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ

Рассмотрено определение собственного сопротивления обмотки якоря электромеханического преобразователя ПЛ-072 У3. Построены характеристика холостого хода и нагрузочная характеристика. Графоаналитическим методом определено искомое значение сопротивления обмотки якоря.
Ключевые слова: сопротивление обмотки, магнитный поток, двигатель постоянного тока.

S. S. Timofeev*
Senior Lecturer
I. A. Shishkov*
Student
D. S. Shvetsov*
Student
K. S. Nikitina*
Student
*St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

DETERMINATION OF ARMATURE ECO-RESISTANCE OF DC MOTOR OF INDEPENDENT EXCITATION

The article deals with the determination of the armature winding auxiliary resistance of electromechanical converter PL-072 U3. No-load and load characteristics are plotted. The required value of armature winding resistance is determined by graphoanalytic method.
Keywords: armature resistance, magnetic flux, DC motor.

Введение

Электромеханические преобразователи находят широкое применение в различных областях. Электрические машины имеют разнообразные конструктивные особенности, зависящие от области применения, однако принцип работы остается неизменным. Преобразователь содержит подвижные и неподвижные элементы, которые взаимодействуют между собой. При учете данных вза-

имодействий одним из определяющих показателей является сопротивление обмотки якоря. Понимание точного численного значения, которое может значительно повысить качество проводимых экспериментов.

Актуальность данного исследования обусловлена тем, что сопротивление обмотки якоря, предоставленное в паспортных данных, может включать в себя сторонние сопротивления (проводов, щеток и т. д.), истинное значение может довольно сильно разница с измеренным.

Значения сопротивлений обмоток электрических машин находятся в довольно большом диапазоне – от долей Ом и до тысяч Ом. Измерения сопротивления обмотки якоря можно выполнять несколькими методами: омметром, с помощью амперметра и вольтметра, одинарными или двойными мостами.

Измерение сопротивления омметром является наименее точным, поэтому его применение ограничено предварительной оценкой сопротивления для обмоток от 1 Ом до 100 кОм [1].

Объектом исследования является электромеханический преобразователь ПЛ-072 У3.

Цели исследования:

- построить характеристику холостого хода и нагрузочную характеристику;
- узнать собственное сопротивление якоря.

Задачи исследования:

- изучить строение электромеханического преобразователя ПЛ-072 У3;
- построить характеристических треугольник для определения собственного сопротивления якоря.

Электромеханический преобразователь ПЛ-072 У3 состоит двух частей, неподвижной – инвертор (статор) (рис. 1) и подвижной – якорь (ротор) (рис. 2).

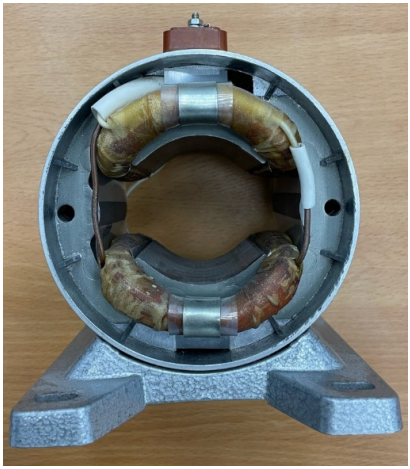


Рис. 1. Ярмо (корпус) двигателя ПЛ-072 У3 с обмоткой возбуждения

Рис. 2. Якорь двигателя ПЛ-072 У3

Для определения численного значения собственного сопротивления якоря необходимо построить характеристический треугольник, вершины которого опираются на график холостого хода и нагрузочную характеристику [2]. Катет треугольника, спроецированный на ось напряжений, является падением напряжения пропорционального собственному сопротивлению якоря.

Математическая модель

Уравнение напряжений для двигателя/генератора

$$U_a = E \pm I_a r_a .$$

Так как ЭДС имеет формулу $E = C_e \Phi_{рез} \omega$, то переписываем уравнение

$$U_a = C_e \Phi_{рез} \omega \pm I_a r .$$

Результирующий магнитный поток состоит из потока основного (поток возбуждения) и потока якоря, который может оказывать намагничивающее или размагничивающее влияние [3]. Получаем $\Phi_{рез} = \Phi_0 \pm \Phi_я$. Тогда уравнение принимает вид [4]

$$U_a = C_e \left(\Phi_0 \pm \Phi_я\right) \omega \pm I_a r_a .$$

Необходимо по графику определить собственное сопротивление обмотки якоря (r_a).

Проводим эксперимент с реальной моделью и получаем характеристику холостого хода в режиме генератора, при поддержании постоянных оборотов n=1191 об/мин. Перед снятием характеристики даем двигателю прогреется в течение 5–7 минут.

Проводим эксперимент и получаем нагрузочную характеристику в режиме генератора, при поддержании постоянных оборотов n=1191 об/мин и тока якоря I_a=0,44 А. Перед снятием характеристики даем двигателю прогреется в течение 5–7 минут.

Результаты проведенных опытов, то есть характеристика холостого хода и нагрузочная характеристика генератора представлены в виде графика на рис. 3.

В режиме двигателя снимаем рабочую точку при токе якоря I_a=0,44 А (обороты n=1191 об/мин). Переводим машину в режим генератора и снимаем рабочую точку на холостом ходу при тех же оборотах и напряжении на обмотке возбуждения. Рабочие точки отмечены на графике (рис. 4, 5)

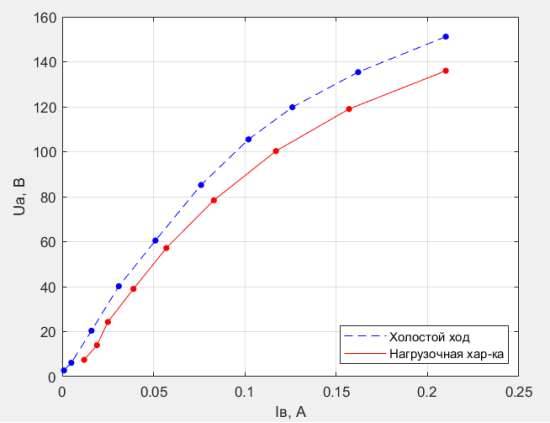


Рис. 3. Характеристики холостого хода и нагрузочная

Из графика видно, что при увеличении тока возбуждения изменяется расстояние между нагрузочной характеристикой и холостым ходом.

Отмечаем рабочую точку, снятую в режиме двигателя. Так как она снята в режиме двигателя, а нагрузочная характеристика снята в режиме генератора нам необходимо точку отобразить зеркально относительно линии номинального напряжения. Она отразится ниже характеристики холостого хода, но с такой же дельтой (обусловлено различными знаками в уравнении напряжений) [4]. Уравнение напряжений

$$U_a = E \pm I_a r_a .$$

Затем отмечаем точку, снятую в режиме генератора. По аналогии с предыдущей точкой необходимо отобразить в левую сторону (относительно прямой $I_в$=0,196 А), а также опускаем эту точку вниз до пересечения с характеристикой холостого хода. На графике (рис. 4) точками обозначены полученные значения точек, а звездочками – после отображения. На рис. 5 увеличена область с точками, для лучшей видимости.

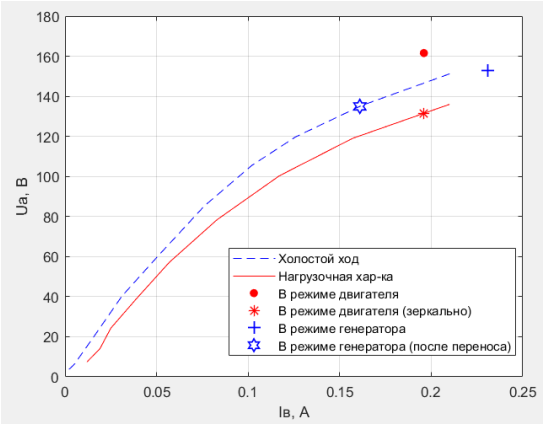


Рис. 4. Значения на характеристиках

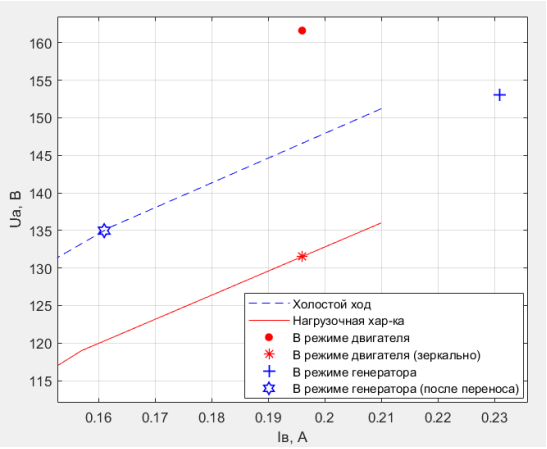


Рис. 5. Значения на характеристиках (приближено для лучшей видимости)

Построим характеристический треугольник (рис. 6), путем проведения прямых параллельных оси абсцисс ($I_в$) и оси ординат (U_a).

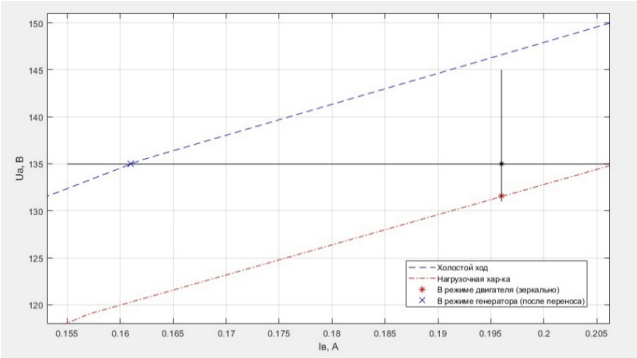


Рис. 6. Построение характеристического треугольника

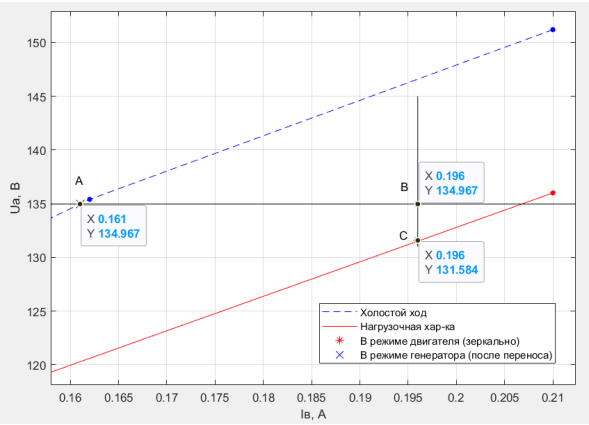


Рис. 7. Определение координат полученных точек

Для удобства отметим точки A, B, C (рис. 7). Вычислим длину отрезка BC (он будет пропорционален собственному сопротивлению якоря)

BC=3,38266.

Следовательно, собственное сопротивление якоря

$r_{a=}$17,26 Ом.

Заключение

Из результатов исследования на примере двигателя ПЛ-072 У3 можно сделать вывод, что любой электромеханический преобразователь обладает собственным сопротивлением якоря. Данное значение может быть экспериментально найдено путем получения характеристики холостого хода и нагрузочной характеристики. Численное значение собственного сопротивления якоря нахо-

дится путем построения характеристического треугольника и последующего определения длины одного из катетов спроецированного на ось токов (для двигателя ПЛ-072 У3 сопротивление якоря r_a=17,26 Ом). Значение, измеренное омметром, равно: 26 Ом. Этот метод дает достаточно точный результат по сравнению с измерением омметром, при котором будут учитываться сопротивления проводов, контактное сопротивление щеток и т. д.

Список источников

1. *Иванов-Смоленский А. В.* Электрические машины: учебник для вузов. Т. 1. М.: МЭИ, 2004. 656 с.

2. *Брускин Д. Э., Зорохович А. Е., Хвостов В. С.* Электрические машины и микромашины. М.: Высшая школа, 1990. 528 с.

3. *Вольдек А. И.* Электрические машины // Энергия. 1974. 840 с.

4. *Дементьев Ю. Н., Чернышев А. Ю., Чернышев И. А.* Электрический привод: учеб. пособие. Томск: ТПУ, 2010. 232 с.

СОДЕРЖАНИЕ

ОБРАБОТКА И ПЕРЕДАЧА ИНФОРМАЦИИ В ИНФОКОММУНИКАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ

Агарков Н. Е. СИСТЕМНЫЙ ПОДХОД В РАЗРАБОТКЕ ПРИЗЕМНЫХ ПЕРЕДАЮЩИХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИ МАЛЫХ АНТЕНН ДКМВ-ДИАПАЗОНА С СОГЛАСУЮЩИМИ УСТРОЙСТВАМИ 4

Беззатеев С. В., Елина Т. Н., Дубинина А. В. РЕАЛИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИИ СМАРТ-КОНТРАКТОВ В СИСТЕМЕ ЭЛЕКТРОННОГО ДОКУМЕНТООБОРОТА 11

Белявский В. С., Борисовская А. В. ОБЗОР МЕТОДОВ ОЦЕНКИ СРЕДНЕГО ВОЗРАСТА ИНФОРМАЦИИ В СИСТЕМАХ МАССОВОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ 16

Богатырев В. А., Богатырев С. В., Сивов В. В. МОДЕЛЬ ДОСТУПНОСТИ КЛАСТЕРА ПРИ АКТУАЛИЗАЦИИ ИНФОРМАЦИИ ПОСЛЕ ВОССТАНОВЛЕНИЯ УЗЛОВ 21

Богатырев В. А., Абрамова Е. А. НАДЕЖНОСТЬ РЕКОНФИГУРИРУЕМОЙ СЕТИ С ПЕРЕКЛЮЧЕНИЕМ СЕГМЕНТОВ 26

Боженко В. В., Зорин И. А. ПРИМЕНЕНИЕ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ К ЗАДАЧЕ РАСПОЗНАВАНИЯ ТЕКСТА 32

Бурков А. А., Тюрликов А. М., Рачугин Р. О. ОЦЕНКА ЧИСЛА АБОНЕНТОВ В СИСТЕМЕ ДЛЯ МНОГОКАНАЛЬНОГО АЛГОРИТМА АЛОХА С ФАЗОЙ ИССЛЕДОВАНИЯ И ОРТОГОНАЛЬНЫМИ ПРЕАМБУЛАМИ 37

Дмитриев А. В., Пойманова Е. Д. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА НА БАЗЕ МИКРОКОНТРОЛЛЕРА ДЛЯ РАСПОЗНАВАНИЯ ГОЛОСОВЫХ КОМАНД 42

Дмитриев А. О., Штеле Б. Э., Яковлев М. К., Степанов Н. В. ЗАДЕРЖКА ПЕРЕДАЧИ ИНТЕРНЕТ-РАДИОСВЯЗИ 47

Егоров В. В., Маслаков М. Л. СЛЕПАЯ ОЦЕНКА ДИСПЕРСИИ ШУМОВОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ ДЛЯ МОДУЛИРОВАННЫХ СИГНАЛОВ НА ОСНОВЕ МАЛОЙ ВЫБОРКИ 52

Зулкашев Р. С., Поляк М. Д. АЛГОРИТМ СИНТЕЗА ДАТАСЕТА ДЛЯ ЗАДАЧИ ДИАРИЗАЦИИ 58

Исаева М. Н., Овчинников А. А. ОБ ОСОБЕННОСТЯХ ПОИСКА ИНФОРМАЦИОННЫХ СОВОКУПНОСТЕЙ БЛОЧНО-ПЕРЕСТАНОВОЧНЫХ НИЗКОПЛОТНОСТНЫХ КОДОВ ПРИ ИСПРАВЛЕНИИ ПАКЕТОВ ОШИБОК 64

Ковальчук К. В., Исаева М. Н. СПОСОБЫ РЕАЛИЗАЦИИ ПЕРЕХВАТА И ПОДМЕНЫ ПАКЕТОВ В СЕТИ 69

Мариенко Е. А., Колесникова А. Ю., Смородская С. К., Степанов Н. В. ОЦЕНКА ЗАДЕРЖКИ ВЫВОДА ДАННЫХ В FLIGHTRADAR24 74

Пастухова Е. В., Романова Ю. С. ПРИКЛАДНОЙ ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ: ЭКСПЕРТНЫЕ СИСТЕМЫ 79

Романова Ю. С., Пастухова Е. В. ЭВОЛЮЦИОННЫЕ ВЫЧИСЛЕНИЯ В АНАЛИЗЕ СИСТЕМ..... 83

Сажаева С. А., Борисовская А. В. ОЦЕНКА ВЕРОЯТНОСТИ ДОСТАВКИ ИНФОРМАЦИИ О СОБЫТИИ В СЕНСОРНЫХ СЕТЯХ СО СЛУЧАЙНЫМ МНОЖЕСТВЕННЫМ ДОСТУПОМ..... 87

Сениченкова Я. О., Поляк М. Д. РАСПОЗНАВАНИЕ МУЗЫКАНТОВ СИМФОНИЧЕСКОГО ОРКЕСТРА ПО ИЗОБРАЖЕНИЯМ МЯГКИХ ТКАНЕЙ ГОЛОВЫ 92

Синицын А. А., Галаев А. С., Степанов Н. В. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СИМУЛЯТОРА NS-3 ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ СЕНСОРНЫХ СЕТЕЙ, ПОСТРОЕННЫХ ПО ТЕХНОЛОГИИ LORAWAN..... 98

Татарникова Т. М., Боженко В. В. ПРЕДВАРИТЕЛЬНАЯ ОБРАБОТКА ДАННЫХ В МЕДИЦИНСКИХ ИССЛЕДОВАНИЯХ..... 103

Таубин Ф. А., Трофимов А. Н. КОДЫ-ПРОИЗВЕДЕНИЯ С ВНУТРЕННИМИ МНОГОМЕРНЫМИ РЕШЕТКАМИ ДЛЯ МНОГОУРОВНЕВОЙ ФЛЕШ-ПАМЯТИ 108

Толстых В. Н. О РАЗВИТИИ МЕТОДОВ КЛАССИФИКАЦИИ И РЕГРЕССИИ 113

Трофимов А. Н., Таубин Ф. А. АНАЛИЗ ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТИ КОДОВ-ПРОИЗВЕДЕНИЙ С ВНУТРЕННИМИ МНОГОМЕРНЫМИ РЕШЕТКАМИ ДЛЯ МНОГОУРОВНЕВОЙ ФЛЕШ-ПАМЯТИ 118

Фомичева С. Г. ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНИК УСКОРЕНИЯ АЛГЕБРАИЧЕСКИХ ОПЕРАЦИЙ, ВЫПОЛНЯЕМЫХ МОБИЛЬНЫМИ АГЕНТАМИ БЕЗОПАСНОСТИ..... 124

Щеголева А. А., Поляк М. Д. ПРИМЕНЕНИЕ АЛГОРИТМА НЕЛИНЕЙНОЙ АДАПТАЦИИ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ ВТОРОГО ПОРЯДКА С НЕСЛУЧАЙНЫМ ВОЗМУЩЕНИЕМ..... 130

Янковский Н. А. СЕТЕВОЕ КОДИРОВАНИЕ В МЕЖМАШИННЫХ КОММУНИКАЦИЯХ..... 137

ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА И СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

Брунов М. С., Ватаева Е. Ю., Гречкин Н. Л., Шишлаков В. Ф. СИНТЕЗ ПИД-РЕГУЛЯТОРА ОБОБЩЕННЫМ МЕТОДОМ ГАЛЕРКИНА..... 143

Бубнов А. В., Федоров В. К., Косарев Б. А., Охотников А. А., Кощук Г. А. СГЛАЖИВАНИЕ ПРОФИЛЯ МОЩНОСТИ ПОТРЕБИТЕЛЯ ПРИ ПОМОЩИ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ 148

Булатов В. В. ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ИНТЕНСИВНОСТИ ОТКАЗОВ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ..... 154

Ватаева Е. Ю., Гречкин Н. Л., Шишлаков В. Ф. ПОЛИНОМИАЛЬНАЯ АППРОКСИМАЦИЯ В РЕШЕНИИ ЗАДАЧ СИНТЕЗА НЕЛИНЕЙНЫХ САУ 161

Голубков В. А., Ватаева Е. Ю., Федоренко А. Г. СПЕКТРАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВЫНУЖДАЮЩИХ СИЛ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ В ШАГОВОМ ДВИГАТЕЛЕ 167

Кривальцевич С. В., Косарев Б. А. ВЛИЯНИЕ КОЛЕБАНИЙ ТЕМПЕРАТУРЫ НА ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ КВ-РАДИОСТАНЦИИ С ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ УСТАНОВКОЙ 173

Кузьменко В. П., Булатов В. В. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РЕСУРСОВ ЛАМП БЫТОВОГО ОСВЕЩЕНИЯ 178

Ляшенко А. Л. РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ ТЕПЛОВЫХ ПОЛЕЙ ГАЗОРАЗРЯДНОЙ ТРУБКИ ГАЗОВЫХ СО2-ЛАЗЕРОВ 186

Морева С. Л., Ляшенко А. Л. РОЛЬ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ В УПРАВЛЕНИИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИМИ ОБЪЕКТАМИ 191

Решетникова Н. В., Шишков И. А., Панкратов А. Г., Монахов М. А. УЧЕТ В МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЯХ ВЛИЯНИЯ РЕАКЦИИ ЯКОРЯ ДВИГАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА 196

Рогозин П. А., Ляшенко А. Л. РАЗРАБОТКА ЛАБОРАТОРНОГО СТЕНДА ДЛЯ ВИБРОДИАГНОСТИКИ МЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ 203

Тимофеев С. С., Панкратов А. Г., Швецов Д. С., Монахов М. А. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ В ДВИГАТЕЛЕ ПОСТОЯННОГО ТОКА 207

Тимофеев С. С., Шишков И. А., Швецов Д. С., Никитина К. С. ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОБСТВЕННОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ОБМОТКИ ЯКОРЯ ДВИГАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА НЕЗАВИСИМОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ 213

Научное издание

XXVI Международная научная конференция

ВОЛНОВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА И ИНФОКОММУНИКАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ

Сборник статей

Часть 1

ISBN: 978-5-8088-1842-2

9 785808 818422

Ответственный за выпуск
В. И. Казаков

Редакторская подготовка *Е. В. Тороповой*
Компьютерная верстка *А. Н. Колешко*

Подписано к печати 11.05.2023. Дата выхода в свет: 29.05.2023. Формат 60×84 1/16.
Усл. печ. л. 13,0. Уч.-изд. л.15,7. Тираж 150 экз. Заказ № 222.

Редакционно-издательский центр ГУАП
190000, г. Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д. 67, лит. А

Распространяется бесплатно