

ВЕСТНИК ВОРОНЕЖСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (свидетельство о регистрации ПИ № ФС 77 – 74159 от 02.11.2018).

Учредитель: ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»

Подписной индекс в «Каталоге периодических изданий. Газеты и журналы» ГК «Урал Пресс» – 41891. Физические лица могут оформить подписку в интернет-магазине «Деловая пресса» <http://www.ural-press.ru/dlya-fizicheskikh-lits/>

Журнал «Вестник Воронежского государственного технического университета» включен в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук.

Журнал выходит шесть раз в год

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

Главный редактор В.Р. Петренко, д-р техн. наук – Воронеж

Заместитель главного редактора И.Г. Дроздов, д-р техн. наук – Воронеж

Ответственный секретарь С.А. Малукова – Воронеж

ЧЛЕНЫ РЕДАКЦИОННОЙ КОЛЛЕГИИ:

В.Н. Бурков – д-р техн. наук – Москва;
Д.А. Новиков – д-р техн. наук – Москва;
С. Лухан-Мора – проф. – Испания;
А.К. Погодаев – д-р техн. наук – Липецк;
А.Ф. Тузовский – д-р техн. наук – Москва;
С.Л. Подвальный – д-р техн. наук – Воронеж;
В.Л. Бурковский – д-р техн. наук – Воронеж;
В.В. Куц – д-р техн. наук – Курск;
А.Г. Ивахненко – д-р техн. наук – Курск;
В.П. Смоленцев – д-р техн. наук – Воронеж;
С.Г. Бишутин – д-р техн. наук – Брянск;
В.Ф. Селиванов – д-р техн. наук – Воронеж;
О.Н. Кириллов – д-р техн. наук – Воронеж;
О.Ю. Макаров – д-р техн. наук – Воронеж;
В.П. Пашинцев – д-р техн. наук – Ставрополь;
Ю.Г. Пастернак – д-р техн. наук – Воронеж;
А.В. Ашихмин – д-р техн. наук – Воронеж;
П.П. Чураков – д-р техн. наук – Пенза;
А.А. Гладких – д-р техн. наук – Ульяновск;
А.В. Башкиров – д-р техн. наук – Воронеж

Ответственность за подбор и изложение фактов, цитат, статистических данных и прочих сведений несут авторы публикаций. Статьи, поступающие в редакцию, рецензируются. Мнение редакции может не совпадать с мнением авторов материалов. При перепечатке статей ссылка на журнал обязательна.

Адрес редакции: 394026, Воронеж, Московский проспект, дом 14, комн. 212

Телефон: +7 (473) 278-38-89

E-mail: vestnik@vorstu.ru

Издатель: ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»

Адрес издателя: 394006, Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84

© ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», 2023

12+

BULLETIN OF VORONEZH STATE TECHNICAL UNIVERSITY

The journal is registered by the Federal service for supervision of communications, information technology, and mass media (registration certificate PI № FS 77 – 74159 02 November 2018)

Founder: Federal State State-Financed Comprehensive Institution of High Education “Voronezh State Technical University”

Subscription index in the «Catalog of periodicals. Newspapers and magazines» of the «Ural Press» Group of Companies – 41891. Individuals can subscribe to it in the online store "Business Press" <http://www.ural-press.ru/dlya-fizicheskikh-lits/>

The journal "Bulletin of Voronezh State Technical University" is included into the list of peer-reviewed editions in which the results of dissertations for obtaining degrees of a Full Doctor and PhD are published.

The journal is published six times a year

EDITORIAL BOARD:

Editor-in-Chief V.R. Petrenko, Dr. Sc. (Tech.) – Voronezh
Deputy Editor-in-Chief I.G. Drozdov, Dr. Sc. (Tech.) – Voronezh

Executive secretary S.A. Malyukova – Voronezh

MEMBERS OF EDITORIAL BOARD:

V.N. Burkov – Dr. Sc. (Tech.) – Moscow;
D.A. Novikov – Dr. Sc. (Tech.) – Moscow;
Sergio Lujan Mora – Professor – Spain;
A.K. Pogodaev – Dr. Sc. (Tech.) – Lipetsk;
A.F. Tuzovskiy – Dr. Sc. (Tech.) – Moscow;
S.L. Podvalny – Dr. Sc. (Tech.) – Voronezh;
V.L. Burkovskiy – Dr. Sc. (Tech.) – Voronezh;
V.V. Kuts – Dr. Sc. (Tech.) – Kursk;
A.G. Ivakhnenko – Dr. Sc. (Tech.) – Kursk;
V.P. Smolentsev – Dr. Sc. (Tech.) – Voronezh;
S.G. Bishutin – Dr. Sc. (Tech.) – Bryansk;
V.F. Selivanov – Dr. Sc. (Tech.) – Voronezh;
O.N. Kirillov – Dr. Sc. (Tech.) – Voronezh;
O.Yu. Makarov – Dr. Sc. (Tech.) – Voronezh;
V.P. Pashintsev – Dr. Sc. (Tech.) – Stavropol;
Yu.G. Pasternak – Dr. Sc. (Tech.) – Voronezh;
A.V. Ashihmin – Dr. Sc. (Tech.) – Voronezh;
P.P. Churakov – Dr. Sc. (Tech.) – Penza;
A.A. Gladkikh – Dr. Sc. (Tech.) – Ulyanovsk;
A.V. Bashkurov – Dr. Sc. (Tech.) – Voronezh

The authors of publications are responsible for the selection and presentation of facts, quotations, statistics and other information. The articles coming to the editorial office are reviewed. The opinion of the editors may not coincide with the opinion of the authors of the materials. When reprinting articles, the link to the journal is obligatory.

Address: 394026, Voronezh, Moskovskiy prospekt, 14, office 212

Phone number: +7 (473) 278-38-89

E-mail: vestnik@vorstu.ru

Publisher: Federal State State-Financed Comprehensive Institution of High Education “Voronezh State Technical University”

Publisher address: 394006, Voronezh, 20-letiya Oktyabrya str., 84

© Voronezh State Technical University, 2023

12+

СОДЕРЖАНИЕ

Информатика, вычислительная техника и управление

Анализ и разработка решений по захвату объектов из видеопотока без предварительного обучения алгоритма распознавания сущностей А.Н. Юров, М.В. Парин	7
Анализ графовых систем управления базами данных Д.Р. Никольский, В.Ф. Барабанов, Н.И. Гребенникова, С.А. Коваленко, А.М. Нужный	13
Математическое моделирование частотного электропривода А.К. Муконин, В.А. Трубецкой, Д.А. Тонн	21
Методика разработки интерактивного макета жилого здания М.Ю. Сергеев, А.С. Багно, А.М. Нужный, Н.И. Гребенникова	28
Программа имитационного моделирования системы предиктивного управления процессом дегидрирования этилбензола О.Г. Неизвестный	32
Разработка структуры системы принятия решения при управлении БПЛА В.А. Малиновкин, Н.В. Валуиных, В.Ф. Барабанов, М.Н. Аралов, А.В. Барабанов	41
Тестовый контроль конечных автоматов Г.В. Петрухова, М.Г. Усачев, Е.В. Попова	47
Программная реализация задачи линейной оптимизации на базе муравьиного алгоритма Д.А. Баранов, М.А. Белых, В.Ф. Барабанов, Н.И. Гребенникова, В.Н. Черников	53
Моделирование распределения температуры на термоэлементе при охлаждении ламинарным потоком О.А. Дорохова, И.Л. Батаронов, Т.А. Надеина, Н.А. Ююкин	59
Обработка информации и подготовка набора данных для системы управления на основе детекции объектов с использованием машинного зрения П.Ю. Гусев, В.В. Сокольников, В.В. Ветохин, А.А. Агеев	69
Сравнительный анализ современных алгоритмов сжатия данных без потерь в составе программных решений М.С. Войтенко, А.С. Войтенко, В.В. Сафронов, В.Н. Черников, М.Н. Аралов	76
Математическая модель задачи обтекания сферы неньютоновским потоком несжимаемой жидкости при малых числах Рейнольдса В.С. Купцов, А.А. Катрахова	81

Радиотехника и связь

Алгоритм выбора подлежащих идентификации радиоканалов на основе истории контроля А.Г. Студеникин, А.Б. Токарев, И.С. Фаустов	85
Применение формирователей спектрально-эффективных радиосигналов для осуществления фазового разделения каналов С.С. Печников	94
Реконфигурируемая патч-антенна на основе полупроводниковой плазмы И.А. Баранников, С.М. Фёдоров	102
Анализ образования дефектов в конструкции планарного трансформатора в модуле электропитания А.В. Башкиров, И.С. Бобылкин, А.А. Кузёмкин	107

К вопросу о макетировании микрополосковых полосовых фильтров в лабораторных условиях А.Е. Рудь, Л.Э. Черноиванов, И.А. Арзамасцев, А.В. Гречишкин.....	115
Двухдиапазонная антенна-плавник для БПЛА самолетного типа И.С. Бобылкин, Е.А. Ищенко, С.М. Фёдоров, М.В. Парин, В.И. Николаев	120
Конструкция линзы Ротмана с основной волной магнитного типа для многолучевой антенной системы мобильного терминала спутниковой связи Ku-диапазона Ю.Г. Пастернак, В.А. Пендюрин, Д.К. Проскурин, К.С. Сафонов.....	125
Разработка архитектуры слепого распознавания линейного блочного кодирования с использованием каскадной сети А.В. Башкиров, М.В. Хорошайлова, А.С. Демикова.....	130
Моделирование и анализ коэффициентов прохождения и отражения на границе раздела сред распространения радиоволн в системах сотовой связи И.С. Киреев, И.В. Зубарев, В.Л. Бурковский, А.И. Панина.....	138
Современное состояние задач повышения помехоустойчивости канала управления беспилотных авиационных систем на основе искусственного интеллекта М.А. Ромащенко, Д.В. Васильченко, Д.А. Пухов.....	142
Анализ возможностей и методика модернизации систем управления, навигации и связи беспилотных летательных аппаратов промышленного назначения на примере изделий фирмы DJI М.В. Парин, В.В. Ветохин, С.М. Фёдоров.....	147
Антенная решетка из двухзаходных спиралей Архимеда, возбуждаемых с помощью штырей связи, погруженных в прямоугольный волновод Ю.Г. Пастернак, В.А. Пендюрин, Д.К. Проскурин, К.С. Сафонов.....	157
Применение алгоритмов машинного обучения в задаче оценки беспроводного канала связи с OFDM О.Н. Чирков, А.А. Пирогов.....	164
Проектирование блока кодирования LDPC-кода для многопользовательской системы М.В. Хорошайлова, И.В. Свиридова, И.В. Остроумов.....	170

Машиностроение и машиноведение

Определение оптимальных параметров режима лазерной сварки разнородных сплавов на основе никеля И.М. Горбач, А.Б. Булков, В.Ф. Селиванов, И.Б. Корчагин.....	177
Теоретическое исследование кинематических углов фрезы при обработке РК-профильных отверстий В.В. Куц, М.В. Митрофанов, О.Н. Кириллов.....	184
Влияние химического состава и структуры на износостойкость малоуглеродистых белых чугунов Л.С. Печенкина, И.И. Емельянов.....	192
Влияние концентрации кислорода на фазовый состав нанокмпозитов Fe-Zr-O О.В. Стогней, Н.А. Касаткин, А.В. Ситников, А.М. Дерябин.....	199

CONTENTS

Informatics, computer engineering and control

Analysis and development of solutions for capturing objects from video stream without pre-training of entity recognition algorithm A.N. Yurov, M.V. Parinov.....	7
Analysis of graph database management systems D. R. Nikolsky, V.F. Barabanov, N.I. Grebennikova, S.A. Kovalenko, A.M. Nuzhny.....	13
Mathematical modeling of a frequency electric drive A.K. Mukonin, V.A. Trubetskoy, D.A. Tonn.....	21
Methodology for developing the interactive layout of a residential building M. Yu. Sergeev, A.S. Bagno, A.M. Nuzhny, N.I. Grebennikova.....	28
Simulation program for predictive control of the ethylbenzene dehydrogenation process O.G. Neizvestny.....	32
Analysis of the main functional capabilities of unmanned aerial vehicles V.A. Malinovkin, N.V. Valuyskikh, V.F. Barabanov, M.N. Aralov, A.V. Barabanov.....	41
Test control processes of finite state machines G.V. Petrukhnova, M.G. Usachev, E.V. Popova.....	47
Software implementation of the linear optimization problem based on the ant algorithm D.A. Baranov, M.A. Belykh, V.F. Barabanov, N.I. Grebennikova, V.N. Chernikov	53
Simulation of temperature distribution on a thermoelectric element during laminar flow cooling O.A. Dorokhova, I.L. Bataronov, T.A. Nadeina, N.A. Yuyukin.....	59
Information processing and data set preparation for a control system based on object detection using machine vision P.Yu. Gusev, V.V. Sokolnikov, V.V. Vetokhin, A.A. Ageev.....	69
Comparative analysis of modern lossless data compression algorithms as part of software solutions M.S. Voitenko, A.S. Voitenko, V.V. Safronov, V.N. Chernikov, M.N. Aralov.....	76
Mathematical model of the problem of a non-newtonian incompressible flow around sphere liquids at low Reynolds numbers V. S. Kuptsov, A. A. Katrakhova.....	81

Radio engineering and communication

Algorithm for selecting identifiable radio channels based on the monitoring history A.G. Studenikin, A.B. Tokarev, I.S. Faustov.....	85
The use of generators of spectrally efficient radio signals for the implementation of phase separation of channels S.S. Pechnikov.....	94
Reconfigurable semiconductor plasma-based patch antenna I.A. Barannikov, S.M. Fedorov.....	102
Analysis of the formation of defects in the design of a planar transformer in a power supply module A.V. Bashkirov, I.S. Bobylkin, A.A. Kuzyomkin.....	107
Microstrip bandpass filters prototyping in the laboratory conditions A.E. Rud, L.E. Chernoiyanov, I.A. Arzamashev, A.V. Grechishkin.....	115

Dual band blade antenna for aircraft UAVs I.S. Bobylkin, E.A. Ishchenko, S.M. Fedorov, M.V. Parinov, V.I. Nikolaev	120
Design of a rothman lens with a fundamental wave of magnetic type for a multi-beam antenna system of a Ku-band mobile satellite communication terminal Yu.G. Pasternak, V.A. Pendyurin, D.K. Proskurin, K. S. Safonov.....	125
Development of a blind recognition architecture for linear block coding using a cascade network A.V. Bashkirov, M.V. Khoroshailova, A.S. Demikhova.....	130
Analysis of transmission and reflection coefficients at the interface of radio wave propagation media in cellular communication systems I.S. Kireev, I.V. Zubarev, V.L. Burkovsky, A.I. Panina.....	138
Current state of the tasks increasing the interference immunity of radio communication channels based on artificial intelligence systems M.A. Romashchenko, D.V. Vasilchenko, D.A. Puhov.....	142
Analysis of the possibilities and methods for upgrading control, navigation and communication systems for industrial unmanned aerial vehicles using the example of DJI products M.V. Parinov, V.V. Vetokhin, S.M. Fedorov.....	147
Antenna array of double-way Archimedean spirals excited using communication pins immedied into a rectangular waveguide Yu.G. Pasternak, V.A. Pendiurin, D.K. Proskurin, K. S. Safonov.....	157
Application of machine learning algorithms in the task of evaluating a wireless communication channel with OFDM O.N. Chirkov, A.A. Pirogov.....	164
Designing an LDPC coding block for a two-user system M.V. Khoroshailova, I.V. Sviridova, I.V. Ostroumov.....	170

Mechanical engineering and science of machines

Determination of optimal parameters of the laser welding mode of various nickel-based alloys I.M. Gorbach, A.B. Bulkov, V.F. Selivanov, I.B. Korchagin.....	177
Theoretical study of cutter kinematic angles when machining profile holes with equiaxed shape V.V. Kuts, M.V. Mitrofanov, O.N. Kirillov.....	184
Influence of chemical composition and structure on wear resistance of low carbon white cast irons L.S. Pechenkina, I.I. Emelianov.....	192
Influence of oxygen concentration on the phase composition of Fe-Zr-O nanocomposites O.V. Stognei, N.A. Kasatkin, A.V. Sitnikov, A.M. Deryabin.....	199

Информатика, вычислительная техника и управление

DOI 10.36622/VSTU.2023.19.6.001

УДК 544.42

АНАЛИЗ И РАЗРАБОТКА РЕШЕНИЙ ПО ЗАХВАТУ ОБЪЕКТОВ ИЗ ВИДЕОПОТОКА БЕЗ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО ОБУЧЕНИЯ АЛГОРИТМА РАСПОЗНАВАНИЯ СУЩНОСТЕЙ

А.Н. Юров, М.В. Паринов

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

Аннотация: рассмотрены алгоритмические решения библиотеки компьютерного зрения, которые позволяют отслеживать объекты по захвату некоторой фрагментной области в видеопотоке. Перечислены дополнительные программные библиотеки, набор которых необходим для создания программного решения на основе ядра Linux. Рассмотренные вспомогательные библиотеки не требовательны к аппаратной части вычислительных систем и могут быть установлены на микрокомпьютеры типа Raspberry Pi, Orange PI, FriendlyARM, NVIDIA Jetson. Кроме того, приведена структура проектного решения в виде диаграммы классов с описанием функциональных методов в ней. На основе предложенной структуры классов, и опираясь на реализацию алгоритмов в библиотеке компьютерного зрения, было создано приложение, в котором производится захват и удержание объекта в видеопотоке с выводом координат изменения объекта в процессе движения указанного объекта. Работа приложения была протестирована на некотором предварительно подготовленном видеопотоке, а также в реальном времени на произвольных объектах. Выявлены неточности в работе приложения, связанные с типовыми алгоритмами захвата и удержания объектов без предварительного обучения. Подготовлена кроссплатформенная структура приложения на основе программного средства автоматизации сборки программного обеспечения из исходного кода, позволяющая обеспечить простой, а также единый интерфейс управления, и подготовить процесс установки и сборки пакетов. Разработка подготовлена для использования в операционной системе Linux Manjaro на базе 64-х разрядной архитектуры, однако с использованием генератора автоматизированной системы сборки проектов можно подготовить реализацию программы для ОС Windows

Ключевые слова: слежение за объектом, библиотека компьютерного зрения, алгоритмы распознавания сущностей, программные системы с открытым исходным кодом

Благодарности: работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания (проект № FZGM-2023-0011)

Введение

При отслеживании объектов без предварительного обучения программные модули могут использовать свободные программные решения с открытым исходным кодом, так и проприетарные инструменты с обязательным лицензированием. Из открытых инструментов для разработки наиболее популярной является библиотека компьютерного зрения OpenCV [1-3].

В OpenCV реализованы несколько классов с готовыми алгоритмами, которые позволяют отслеживать объекты по захвату некоторого фрагмента из записанного видеопотока или получения данных напрямую с видеокamеры (web-камеры). Функциональные возможности при использовании указанных классов существенно облегчат разработку приложений по захвату фрагмента изображения с последующим слежением за ним [5, 6].

TrackerKCF — класс OpenCV, который основан на алгоритме Kernelized Correlation Filters

(KCF) и позволяет отслеживать объекты в видеопотоке. Основное преимущество TrackerKCF заключается в его способности отслеживать объекты с высокой точностью и скоростью. Он использует корреляционные фильтры, чтобы найти наилучшее соответствие между шаблоном объекта и текущим кадром видео. Это позволяет ему отслеживать объекты даже при изменении их размера, положения и освещения. Кроме того, класс TrackerKCF обладает высокой устойчивостью к шуму и помехам, что делает его оптимальным выбором для отслеживания объектов в реальных условиях. Для класса выполнена реализация дополнительных функций, таких как отслеживание нескольких объектов одновременно и обновление модели отслеживания в реальном времени. Функциональные возможности класса TrackerKCF представляют собой мощный инструмент для отслеживания объектов в OpenCV, который обеспечивает высокую точность и скорость работы. Применение указанного класса может быть использовано в приложениях, таких как видеонаблюдение, ав-

томатическое вождение и дополненная реальность.

TrackerCSRT — класс OpenCV с алгоритмом отслеживания объектов, который основан на методе CSRT (Channel and Spatial Reliability Tracker), где комбинируется информация о цвете и пространственной структуре объекта для достижения высокой точности отслеживания.

TrackerMIL — класс OpenCV с алгоритмом отслеживания объектов, основанный на методе инкрементного обучения на основе леса интегральных изображений (Multiple Instance Learning, MIL). Он используется для отслеживания движущихся объектов на видео. Алгоритм TrackerMIL работает следующим образом: сначала он создает модель объекта, который нужно отслеживать, на основе набора положительных и отрицательных примеров. Затем он использует эту модель для отслеживания объекта на последующих кадрах видео. TrackerMIL имеет несколько преимуществ. Во-первых, он способен отслеживать объекты, которые меняют свою форму или размер во время движения. Во-вторых, он обладает высокой скоростью работы, что позволяет использовать его в реальном времени. В-третьих, он устойчив к шуму и изменениям освещения.

TrackerTLD — класс с алгоритмом отслеживания объектов, основанный на методе обнаружения и отслеживания признаков, известном как TLD (Track, Learn and Detect). Этот алгоритм позволяет отслеживать объекты на видео или в реальном времени, используя информацию о их внешнем виде и движении.

TrackerGOTURN — класс с алгоритмом GOTURN (Generic Object Tracking Using Regression Networks), который использует нейронные сети для регрессии. Он был разработан для точного отслеживания объектов в видеопотоке. GOTURN использует сверточные нейронные сети для обучения модели, которая может предсказывать смещение объекта между двумя кадрами видео. Эта модель обучается на большом наборе данных, содержащем пары изображений и соответствующих смещений объектов.

Основная идея GOTURN заключается в том, чтобы использовать регрессию для предсказания смещения объекта, а не классификацию. Это позволяет более точно отслеживать объекты, особенно при их быстром движении или изменении размера.

TrackerMedianFlow является частью модуля отслеживания объектов в библиотеке OpenCV. Он предоставляет реализацию алго-

ритма отслеживания MedianFlow, который используется для отслеживания объектов на видео. Алгоритм MedianFlow основан на вычислении оптического потока между кадрами видео и последующем отслеживании объекта на основе этого потока. Он работает путем вычисления перемещения пикселей между кадрами и нахождения наиболее вероятного перемещения объекта.

TrackerMOSSE — класс в OpenCV, который представляет собой реализацию алгоритма MOSSE (Minimum Output Sum of Squared Error) для отслеживания объектов на видео. Алгоритм MOSSE является одним из наиболее популярных алгоритмов отслеживания объектов и основан на использовании корреляционных фильтров.

Основная идея алгоритма MOSSE заключается в том, чтобы обучить фильтр на изображении объекта, который будет использоваться для отслеживания этого объекта на последующих кадрах видео. Фильтр обучается на основе набора образцов объекта и использует метод минимизации суммы квадратов ошибок. Затем фильтр применяется к новым кадрам видео для определения положения объекта.

TrackerBoosting — алгоритм отслеживания объектов в библиотеке OpenCV. Он основан на методе адаптивного бустинга, который использует набор слабых классификаторов для создания сильного классификатора. Алгоритм TrackerBoosting работает следующим образом: сначала он создает набор слабых классификаторов, которые могут классифицировать объекты на основе некоторых признаков, таких как цвет, текстура или форма. Затем он комбинирует эти слабые классификаторы в сильный классификатор, который может эффективно отслеживать объекты на видео или в реальном времени. Преимущества TrackerBoosting включают высокую точность отслеживания объектов, устойчивость к изменениям в освещении и фоне, а также возможность отслеживания нескольких объектов одновременно.

Алгоритмические решения и трекары слежения за объектами рассмотрены в работах [4, 7-10].

Компонентная база для создания приложения с использованием OpenCV

При проектировании и создании программных продуктов по захвату объектов оптимальным выбором будет использование операционной системы на основе ядра Linux,

так как семейство таких операционных систем имеет открытую архитектуру, нетребовательно к аппаратным ресурсам и может быть установлено на микрокомпьютеры типа Raspberry Pi, Orange PI, FriendlyARM, NVIDIA Jetson и ряд других.

Для разработки решений по анализу и захвату данных (изображений) из видеопотока потребуется, кроме библиотеки компьютерного зрения, потребуются следующие модули:

— hdf5 — библиотека общего назначения и формат файлов для хранения научных данных;

— vtk — программная система для трехмерной компьютерной графики, обработки и визуализации изображений;

— glew — кроссплатформенная библиотека над OpenGL;

— spdlog — кроссплатформенная библиотека протоколирования с высокой скоростью работы на языке C++. На рис. 1 показаны необходимые компоненты для подключения к проекту.

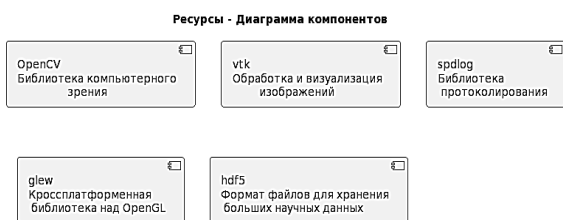


Рис. 1. Компонентная база приложения

Проектирование программного решения по захвату объекта и слежение за ним в видеопотоке

В разработке приложения с потоком видеоданных, полученным с видеокамеры или сохраненным предварительно фрагментом, рекомендуется использовать объектно-ориентированный подход, где ключевым объектом выступает главный класс приложения, в котором производится подключение дополнительных классов с вышеуказанными алгоритмическими реализациями: TrackerBoosting, TrackerTLD, TrackerKCF и т.д.

Функционально класс состоит из группы открытых методов, решающих следующие задачи:

DetectSomeObject(int deviceID) — метод, для которого в качестве параметра передается индекс-параметр для работы с камерой, либо с записанным предварительно видеофрагментом. Кроме того, в методе определяется область (за-

дается индивидуальным определением размеров $\{(x1,y1), (x2,y2)\}$), за которой будет закреплена работа класса-трекера движения;

InitDetectSomeObject() — метод по инициализации одного из классов трекеров;

CaptureSomeObjectProcess() — главный метод, в котором обрабатывается видеопоток. В случае использования видеокамеры видеопоток обрабатывается в реальном времени. Метод имеет доступ к окну предварительного просмотра, где отображаются данные о производительности обработки захваченного изображения, отклонения координат для центра захваченного объекта в видеопотоке $\{IPX, IPY\}$ и ряда других.

Остальные методы главного класса позволяют реализовать концепцию 3-5-0, чтобы обеспечить правильное управление ресурсами и предотвратить проблемы, связанные с копированием, присваиванием и уничтожением объектов класса, что особенно важно при работе с динамической памятью или другими ресурсами, которые требуют явного управления.

Второстепенный класс DrawElements необходим для отображения геометрических примитивов в виде линий, точек и т.д. над видеопотоком в приложении, а также расчетных методов, которые востребованы для построения геометрических изображений в области захвата объекта.

CreatePointRectangle() — метод по созданию ключевых точек некоторого прямоугольника по захвату объекта — необходимы для создания контура по периметру цели;

SetDataField(Mat &frame, Rect &roi) — метод по извлечению кадра и захваченного изображения из видеоряда;

intersection(Point2f o1, Point2f p1, Point2f o2, Point2f p2, Point2f &r) — метод поиска базовой точки отклонения объекта по четырем ключевым точкам;

DrawVisualization() — метод по визуализации контура захвата в видеопотоке.

По итогу проектирования была предложена следующая диаграмма разработки проекта по захвату и слежению за объектом без предварительного обучения, которая представлена на рис. 2.

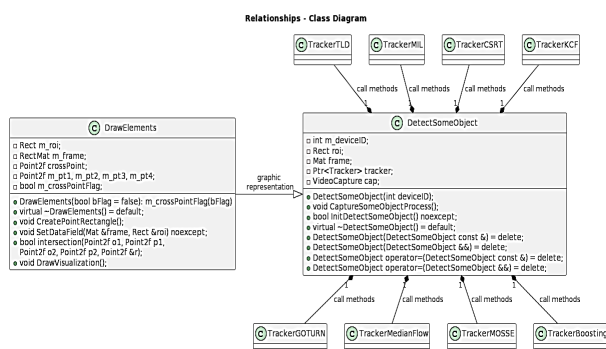


Рис. 2. Общая структура проекта с использованием классов захвата объекта и слежению за ним

Реализация проектного решения по захвату объекта

На основе предложенной структуры классов и опираясь на реализацию классов в библиотеке компьютерного зрения OpenCV, было создано приложение, в котором производится захват и удержание объекта в видеопотоке с выводом координат изменения объекта {IPX, IPY} в процессе движения указанного объекта. Тестирование было проведено с использованием ряда классов OpenCV:

— с алгоритмом трекара TrackerKCF были получены результаты, представленные на рис. 3 и 4. Алгоритм в работе характеризуется средней точностью детектирования захваченного объекта, а сам видеопоток обрабатывается с высоким коэффициентом производительности (fps), что положительно скажется на использовании микро-ЭВМ с пониженным энергопотреблением. В случае потери объекта выводится информационное сообщение (рис. 5).

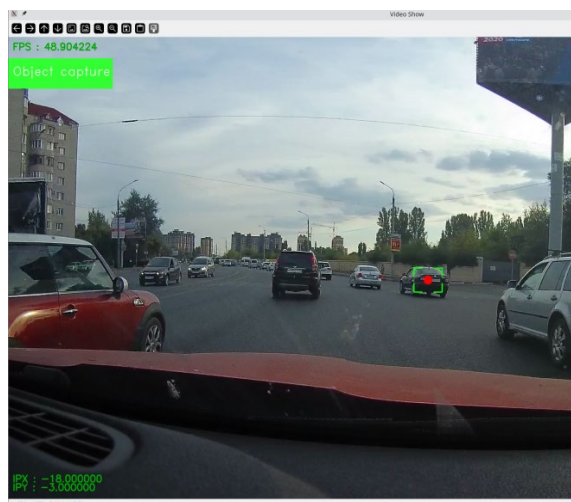


Рис. 3. Работа алгоритма TrackerKCF. Захват объекта и отслеживание изменений его координат

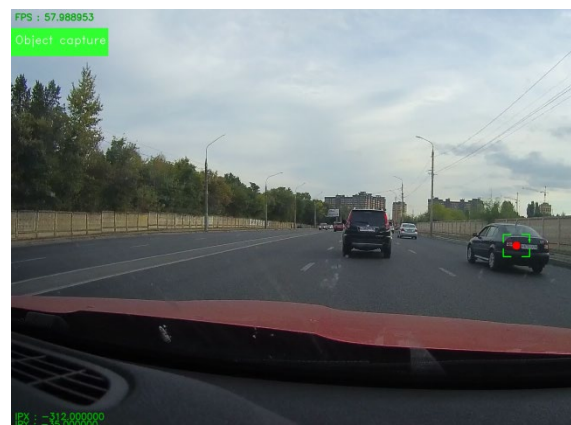


Рис. 4. Работа алгоритма TrackerKCF. Перемещение объекта

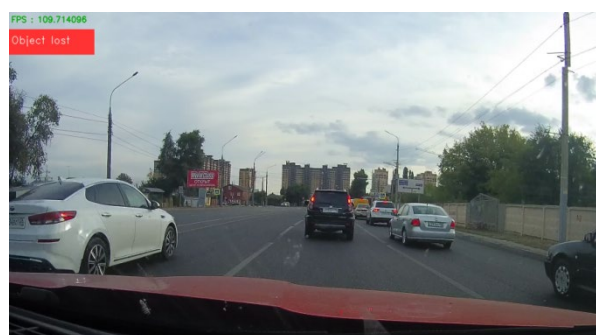


Рис. 5. Работа алгоритма TrackerKCF. Потеря объекта из поля захвата фрагмента изображения

— с алгоритмом трекара TrackerMIL были получены результаты, представленные на рис. 6. Алгоритм работает на уровне трекара TrackerKCF, а сам видеопоток обрабатывается с низким коэффициентом производительности.

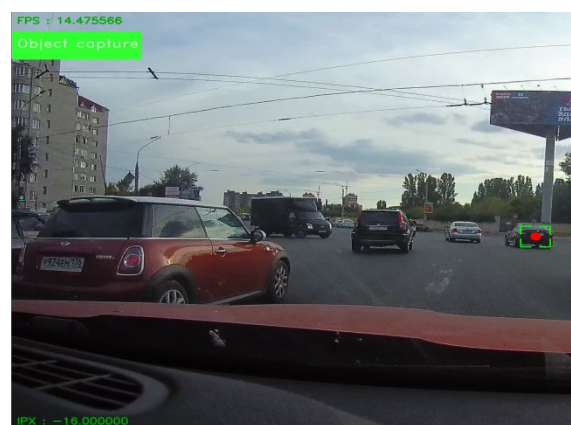


Рис. 6. Работа алгоритма TrackerMIL

— с алгоритмом трекара TrackerCSRT были получены результаты, представленные на рис. 7. Алгоритм работает неустойчиво, объект «пропадает» для указанного алгоритма, хотя при просмотре объект «виден», сам ви-

деопоток обрабатывается со средним коэффициентом производительности.

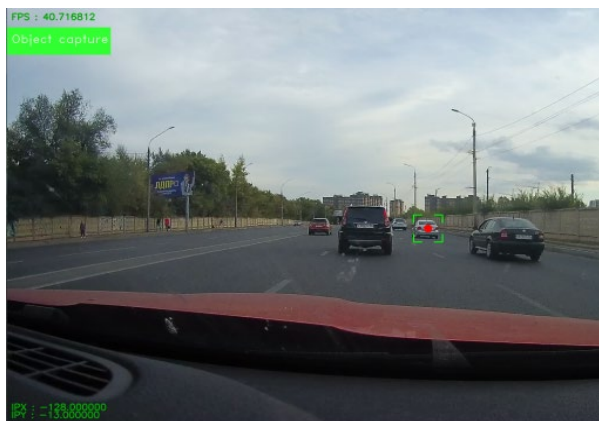


Рис. 7. Работа алгоритма TrackerCSRT

Набор остальных классов с алгоритмами слежения захваченных объектов указаны в OpenCV4 как `cv::legacy`, т.е. являются устаревшими решениями, которые были сохранены для обратной совместимости с предыдущими версиями в библиотеке компьютерного зрения. Рекомендуется использовать более современные альтернативы, так как устаревшие классы могут иметь ограниченную функциональность или быть менее эффективными по сравнению с новыми реализациями.

Заключение

В работе рассмотрены алгоритмические решения библиотеки компьютерного зрения, которые позволяют отслеживать объекты по захвату некоторой фрагментной области в видеопотоке.

Предложен перечень компонентов, который необходим при разработке программного решения на основе ядра Linux, а сами компоненты не требовательны к аппаратной части вычислительных систем и могут быть установлены на микрокомпьютеры типа Raspberry Pi, Orange PI, FriendlyARM, NVIDIA Jetson.

Подготовлена структура проектного решения и представлена в виде диаграммы клас-

сов с описанием функциональных методов в ней. На основе предложенной структуры классов и опираясь на реализацию классов в библиотеке компьютерного зрения OpenCV, было создано приложение, в котором производится захват и удержание объекта в видеопотоке с выводом координат изменения объекта в процессе движения указанного объекта.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания (проект № FZGM-2023-0011).

Литература

1. An Experimental Comparison of Different Object Tracking Algorithms / N. Raghava, K. Gupta, I. Kedia and A. Goyal // International Conference on Communication and Signal Processing (ICCSPP), Chennai, India. 2020. Pp. 0726-0730.
2. Huang R. and Peng S. Efficient Combining Key-points and Correlation Filter for Long-Term Tracking // 2nd IEEE Advanced Information Management, Communicates, Electronic and Automation Control Conference (IMCEC), Xi'an, China, 2018. Pp. 188-192.
3. Henriques J.F., Caseiro R., Martins P. High-Speed Tracking with Kernelized Correlation Filters // IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence. 2015. 37(3). Pp. 583-596.
4. Bolme D.S., Beveridge J.R., Draper B.A. Visual object tracking using adaptive correlation filters. 2010. 119(5). Pp. 2544-2550.
5. Kwon J., Lee K.M. Tracking by Sampling Trackers // International Conference on Computer Vision. IEEE Computer Society. 2011. Pp. 1195-1202.
6. Qiu, G.N.; Quan, H.M. Moving object detection algorithm based on symmetrical-differencing and background subtraction. Comput. Eng. Appl. 2014, 50, Pp. 158-162.
7. Lindeberg T. Scale Selection Properties of Generalized Scale-Space Interest Point Detectors. Journal of Mathematical Imaging & Vision. 2013. 46(2). Pp. 177-210.
8. Danelljan M., Khan F.S., Felsberg M. Adaptive Color Attributes for Real-Time Visual Tracking// Computer Vision and Pattern Recognition. IEEE. 2014. Pp. 1090-1097.
9. Babenko B., Yang M.H., Belongie S. Robust Object Tracking with Online Multiple Instance Learning // IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence, 2011. 33(8). Pp.1619-1632.
10. Chen D., Yuan Z., Wu Y. Constructing Adaptive Complex Cells for Robust Visual Tracking // IEEE International Conference on Computer Vision. 2013. Pp. 1113-1120.

Поступила 30.10.2023; принята к публикации 15.12.2023

Информация об авторах

Юров Алексей Николаевич – канд. техн. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: klt@vorstu.ru, тел. +7 (951) 548-63-12

Паринов Максим Викторович – канд. техн. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: klt@vorstu.ru, тел. +7 (920) 211-70-87

ANALYSIS AND DEVELOPMENT OF SOLUTIONS FOR CAPTURING OBJECTS FROM VIDEO STREAM WITHOUT PRE-TRAINING OF ENTITY RECOGNITION ALGORITHM

A.N. Yurov, M.V. Parinov

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract: the article considers algorithmic solutions of the computer vision library, which allow to track objects by capturing some fragment area in the video stream. Additional program libraries are listed, the set of which is necessary to create a software solution based on the Linux kernel. The considered auxiliary libraries are not demanding to the hardware part of computing systems and can be installed on microcomputers Raspberry Pi, Orange PI, FriendlyARM, NVIDIA Jetson. In addition, the paper presents the structure of the design solution in the form of a class diagram with a description of functional methods in it. Based on the proposed class structure and relying on the implementation of algorithms in the computer vision library, an application was created, in which the object is captured and held in a video stream with the output of coordinates of the object change in the process of the specified object movement. The work of the application was tested on some pre-prepared video stream, as well as in real time on arbitrary objects. In addition, inaccuracies in the application's operation were revealed of the application related to typical algorithms of capturing and holding objects without preliminary training. A cross-platform application structure based on a software tool for automating the assembly of the software from source code, allowing to provide a simple as well as unified management interface and to prepare the process of installing and building packages. The development is prepared for use in Linux Manjaro operating system based on 64-bit architecture, but with the use of the generator of the automated system of project building it is possible to prepare implementation of the program for Windows.

Key words: object tracking, computer vision library, entity recognition algorithms, open source software systems

Acknowledgments: the research was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation as a part of the state assignment (project no. FZGM-2023-0011)

References

1. Raghava N., Gupta K., Kedia I., Goyal A. "An Experimental Comparison of Different Object Tracking Algorithms", *2020 International Conference on Communication and Signal Processing (ICCSP)*, Chennai, India, 2020, pp. 0726-0730, doi: 10.1109/ICCSP48568.2020.9182101.
2. R. Huang and S. Peng, "Efficient Combining Keypoints and Correlation Filter for Long-Term Tracking", *2018 2nd IEEE Advanced Information Management, Communicates, Electronic and Automation Control Conference (IMCEC)*, Xi'an, China, 2018, pp. 188-192, doi: 10.1109/IMCEC.2018.8469530.
3. Henriques J.F., Caseiro R., Martins P. et al. "High-Speed Tracking with Kernelized Correlation Filters", *IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence*, 2015, no. 37(3), pp. 583-596.
4. Bolme D.S., Beveridge J.R., Draper B.A. et al. "Visual object tracking using adaptive correlation filters", 2010, no. 119(5), pp. 2544-2550.
5. Kwon J., Lee K.M. "Tracking by Sampling Trackers. In: International Conference on Computer Vision", *IEEE Computer Society*, 2011, pp. 1195-1202.
6. Qiu, G.N.; Quan, H.M. "Moving object detection algorithm based on symmetrical-differencing and background subtraction", *Comput. Eng. Appl.*, 2014, no. 50, pp. 158-162.
7. Lindeberg T. "Scale Selection Properties of Generalized Scale-Space Interest Point Detectors", *Journal of Mathematical Imaging & Vision*, 2013, no. 46(2), pp.177-210.
8. Danelljan M., Khan F.S., Felsberg M. et al. "Adaptive Color Attributes for Real-Time Visual Tracking", *Computer Vision and Pattern Recognition. IEEE*, 2014, pp. 1090-1097.
9. Babenko B., Yang M.H., Belongie S. "Robust Object Tracking with Online Multiple Instance Learning", *IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence*, 2011, no. 33(8), pp. 1619-1632.
10. Chen D., Yuan Z., Wu Y. et al. "Constructing Adaptive Complex Cells for Robust Visual Tracking", *IEEE International Conference on Computer Vision*, 2013, pp. 1113-1120.

Submitted 30.10.2023; revised 15.12.2023

Information about the authors

Alexey N. Yurov – Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: kitp@vorstu.ru, tel.: +7 (951) 548-63-12

Maksim V. Parinov - Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: kitp@vorstu.ru, tel.: +7 (920) 211-70-87

АНАЛИЗ ГРАФОВЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ БАЗАМИ ДАННЫХ**Д.Р. Никольский, В.Ф. Барабанов, Н.И. Гребенникова, С.А. Коваленко, А.М. Нужный****Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия**

Аннотация: в современном информационном обществе обработка данных стала важным инструментом для принятия обоснованных решений и достижения успеха во многих областях деятельности. Для хранения данных используют разные виды систем управления базами данных (СУБД), каждая из которых обладает своими уникальными функциями, преимуществами и вариантами использования. Графовые СУБД предлагают большое количество инструментов и методов анализа и обработки данных. Был произведен обзор графовой СУБД Neo4j, мультимодальных СУБД Virtuoso и ArangoDB, с поддержкой графовой модели данных и графовой СУБД Memgraph. Каждая из СУБД обладает своим рядом особенностей и преимуществ при использовании. Были освещены основные свойства каждой из этих СУБД и приведены основные сценарии их использования. Рассмотрены преимущества и недостатки существующих предложенных на рынке СУБД и предпосылки к разработке метаграфовой СУБД. Предлагается модель данных для разрабатываемой СУБД и архитектура ее программного обеспечения, включая некоторые особенности ее реализации на уровне хранилища объектов. Разработанная модель предполагает оптимальное моделирование сложных процессов и обработку больших объемов сложных сетевых данных

Ключевые слова: графовые СУБД, графовая модель данных, Neo4j, Virtuoso, ArangoDB, Memgraph, метаграф, метаграфовая СУБД

Введение

Современный мир переживает бурное развитие информационных технологий, хранение и обработка данных играет в нем ключевую роль. Все, начиная от социальных сетей и интернета вещей, и заканчивая биоинформатикой и анализом финансовых рынков, зависят от эффективной организации и анализа данных. В этом контексте графовые системы управления базами данных (графовые СУБД) взяли на себя миссию управления и извлечения информации из сложных систем, где отношения между данными играют решающую роль.

Графовые СУБД стали настоящим прорывом в области хранения и анализа данных. Они предоставляют инструменты для моделирования и обработки данных, в которых важны не только сами сущности, но и связи между ними. Это особенно актуально в мире, где информация переплетена сложными взаимосвязями, и где понимание закономерностей в этих связях может определять успех при принятии стратегических решений.

Например, в сфере социальных сетей, графовые СУБД демонстрируют выдающуюся способность для эффективного моделирования социальных графов и анализа сложных взаимосвязей между пользователями, предоставляя

ценные аналитические инсайты как для бизнес-целей, так и для научных исследований. В области биоинформатики эти системы играют важную роль, способствуя моделированию сложных биологических взаимосвязей и выявлению генов, связанных с различными заболеваниями. Также графовые СУБД применяются в рекомендательных системах для выдачи персонализированных рекомендаций на основе анализа пользовательских предпочтений и активности. При анализе транспортных сетей и систем графовые СУБД способствуют более эффективному моделированию дорожных сетей и транспортных маршрутов, что позволяет оптимизировать их структуру и функционирование. В борьбе с финансовым мошенничеством, графовые системы баз данных играют ключевую роль в выявлении аномалий и связей между подозрительными финансовыми операциями. Графовые базы данных применяются для составления баз знаний и онтологий, а также проектирования систем анализа событий в сложных предметных областях.

Выбор СУБД для обзора

В данной статье предлагается обзор основных игроков рынка графовых СУБД. Для рассмотрения были выбраны 4 СУБД из топа рейтинга 2023 года [1]:

- Neo4j (графовая);
- Virtuoso (мультимодельная);
- ArangoDB (мультимодельная);
- Memgraph (графовая).

Выбор этих СУБД обусловлен различием их возможностей, позиционирования, используемых моделей данных и особенностями, которые будут описаны в этой статье. Каждая СУБД будет рассмотрена с позиций ее особых характеристик, конкурентных преимуществ, рыночных показателей и моделей монетизации.

Neo4j

Neo4j занимает первое место рейтинга графовых СУБД по версии db-engines.com. Эта СУБД предоставляет графовый движок, оптимизированный с целью обеспечения производительности и способности к масштабированию. С использованием высокопроизводительной и распределенной кластерной архитектуры, Neo4j позволяет успешно реализовать сложные сценарии использования, включая операционно-аналитическую обработку данных (OLTP) и задачи в области науки о данных, сохраняя при этом полное соблюдение ACID и целостности данных.

Neo4j считается лидером рынка - его платформу для работы с графовыми данными используют более 200 тысяч разработчиков, более 800 коммерческих клиентов, причем десятки из них развертывают графовые базы данных с многомиллиардными узлами и связями.

Neo4j предоставляет доступ к данным при помощи следующих интерфейсов взаимодействия:

- Bolt protocol;
- Cypher query language;
- Java API;
- Neo4j-OGM;
- RESTful HTTP API;
- Spring Data Neo4j;
- TinkerPop 3.

Данная СУБД обладает конкурентными преимуществами, представленными ниже.

- высокая производительность. По утверждениям авторов Neo4j, запросы, занимающие секунды/минуты/часы, выполняются в Neo4j за миллисекунды, что позволяет заказчикам эффективно масштабироваться без ущерба для производительности и целостности данных. Это достигается за счет параллельной обработки массивов данных [2].

- эффективное использование аппаратного обеспечения. При использовании Neo4j заказчикам часто требуется в 10 раз меньше оборудования, чем при использовании других графовых баз данных, особенно построенных на основе реляционных, NoSQL и RDF баз данных.

- платформенезависимость. Neo4j работает в локальной сети, в облаке и на любой об-

лачной платформе. Свобода выбора и возможность развертывания в любом месте обеспечивает эффективность работы в нескольких облаках, ускоряет выход на рынок, повышает гибкость разработки и рентабельность инвестиций.

- язык запросов Cypher. Neo4j предоставляет язык запросов Cypher, используемый для навигации в графе и поиска подграфов. Этот декларативный язык является де-факто стандартом в сообществе разработчиков, что делает его высоко востребованным.

- схема данных. Гибкая схема позволяет базе данных быстро и без сбоев адаптироваться к изменяющемуся бизнесу, обеспечивая больший результат за меньшее время и с меньшим риском.

- графовый ML для предприятий. Благодаря 50 алгоритмам в 6 категориях, формату с малым объемом памяти, позволяющему сжимать аналитические графы на 75%, распараллеливаемой и массово масштабируемой архитектуре Neo4j GraphDataScience (GDS) является первым в отрасли Graph ML для предприятий.

На своем сайте Neo4j предоставляет кейсы успешного использования этой СУБД в различных областях обработки и анализа данных [3], таких как:

- рекомендательные системы;
- управление мастер-данными;
- СКУД;
- компьютерные сети;
- борьба с мошенничеством;
- анализ сетевых данных;
- искусственный интеллект на основе знаний в графовом представлении;
- интернет вещей.

Neo4j используют 20 из 20 крупнейших финансовых учреждений, 9 из 10 ведущих высокотехнологичных компаний, 7 из 10 крупнейших мировых розничных сетей, 3 из 5 крупнейших производителей самолетов, 8 из 10 крупнейших страховых компаний, все 20 крупнейших банков Северной Америки, 8 из 10 крупнейших автопроизводителей, 3 из 5 крупнейших отелей мира и 7 из 10 крупнейших телекоммуникационных компаний.

Эту СУБД используют более 800 коммерческих клиентов и более 4300 стартапов. Среди основных заказчиков – eBay, Walmart, Cisco, Citibank, ING, UBS, HP, CenturyLink, Telenor, TomTom, Telia, Comcast, Scripps Interactive Networks, The National Geographic Society, Airbus, Orange, AT&T, Verizon, DHS, US Army, Pitney Bowes, Vanguard, Microsoft, IBM, Thomson Reuters, Amadeus Travel, Caterpillar, Volvo Cars и

многие другие. При этом лицензия GPL v3 предполагает свободу в коммерческом использовании СУБД при отсутствии поддержки. Коммерческие лицензии Neo4j предлагаются в версии Neo4j Enterprise, которая включает корпоративные функции и поддержку мирового класса.

Virtuoso

Virtuoso [4] – это современная многомодельная СУБД для управления данными, представленными в виде табличных отношений (таблиц) и/или коллекций RDF-триплетов. Это высокопроизводительная, масштабируемая, безопасная платформа, основанная на открытых стандартах.

Данная СУБД предлагает рынку ряд ключевых преимуществ.

Производительность и масштабируемость. На примере Dbpedia [5] и порожденного ею LOD Cloud [6], то есть децентрализованной коллекции баз данных, создающих в облаке граф знаний, доступный круглосуточно для декларативного взаимодействия людей и ботов с использованием языка запросов SPARQL Virtuoso показывает высокие показатели доступности и производительности.

Движок обработки данных Virtuoso позволяет использовать язык SPARQL и расширение SQL, основанное на открытых стандартах, сочетая таким образом ACID и масштабируемость этого языка с семантически обоснованными навигационными возможностями SPARQL.

Тонкие политики доступа к данным, основанные на семантике отношений между сущностями защищаемых ресурсов и людьми и/или ботами, ищущими доступ к этим ресурсам, позволяют реализовать широкий спектр пользовательских приложений на базе Virtuoso.

Virtuoso – многоцелевая система, успешно применяемая в различных сферах обработки данных и в различных отраслях промышленности. Она используется для анализа данных и виртуализации данных, обеспечивая виртуальный доступ к информации из различных источников. Графы знаний предприятия, подкрепляемые искусственным интеллектом, создаются и управляются с использованием Virtuoso, что обогащает информацию и облегчает управление данными. CRM системы, озера данных и MDM-системы получают преимущества от Virtuoso, обеспечивая доступ к данным и управление информацией. Virtuoso также применяется в системах искусственного интеллекта для интеграции, доступа и управления данными.

В отраслях финансовых услуг и страхования, фармацевтике, здравоохранении, розничной торговле, страховании, нефтегазовой отрасли и телекоммуникаций, Virtuoso обеспечивает эффективную обработку и управление данными, повышая точность и упрощая доступ к информации.

Virtuoso используется в производственных процессах таких организаций, как Евросоюз (EU), правительство США, DeutscheBank, SchneiderElectronics, Bayer, Syngenta, Bloomberg, Viacom, BASF, Sanofi, GE и других компаниях [7], предлагая ряд лицензий для коммерческого использования. Например, использование по лицензии GPL v2, а также тонко-настраиваемые модели лицензирования для корпоративных клиентов.

ArangoDB

ArangoDB[8] – мультимодельная графовая база данных с открытым исходным кодом. Реализуя концепцию "граф и не только", ArangoDB объединяет возможности графов с JSON-документами, хранилищем типа "ключ-значение" и системой полнотекстового поиска, позволяя комбинировать все эти модели данных с помощью единого декларативного языка запросов.

ArangoDB предлагает возможности для разработки широкого спектра приложений благодаря своей организации данных. Например, ArangoDB может использоваться как полноценное хранилище документов, графовая база данных, поисковая система или любая комбинация этих технологий, предоставляя доступ к данным при помощи языка AQL. При этом предлагается высокая степень согласованности данных – с использованием нескольких одномодельных баз данных возникает проблема согласованности данных. Эти базы данных не предназначены для взаимодействия друг с другом, поэтому для обеспечения согласованности данных между различными моделями необходимо реализовать определенную функциональность транзакций. В ArangoDB единая внутренняя база данных управляет различными моделями данных с поддержкой ACID-транзакций.

Также ArangoDB предлагает следующий стек технологий для развертывания и использования:

– ArangoDB OASIS – управляемое облако для ArangoDB, обеспечивающее полностью управляемое и контролируемое развертывание кластеров любого размера.

– ArangoML – при построении инфраструктуры машинного обучения производственного уровня ArangoMLPipeline обеспечивает поддержку общего хранилища метаданных.

– ArangoSearch – нативно интегрированный кроссплатформенный механизм индексирования, текстового поиска и ранжирования информации, оптимизированный по скорости и памяти.

Кроме того, ArangoDB поддерживает вертикальное и горизонтальное масштабирование.

На сайте ArangoDB представлены сценарии использования СУБД в реальных компаниях [9].

Нативная многомодельность в ArangoDB используется для широкого спектра проектов в различных отраслях и компаниях. Самые распространенные сценарии использования – платформы "единой точки зрения", кибербезопасность, моделирование в производстве, СКУД, обнаружение мошенничества, рекомендательные движки, разработка характеристик в машинном обучении и искусственном интеллекте или управление компьютерными сетями и мониторинг.

ArangoDB указывает Cisco, Barclays, Refinitive, SiemensMentor, Kabbage, Liaison, Douglas, MakeMyTrip, Kaseware, Demonware, Brainhub, OxfordUniversity, IC Manage, Actify и другие компании как своих основных клиентов.

ArangoDB имеет более 7 миллионов загрузок и более 500 производственных инсталляций. Среди заказчиков – компании из списка Fortune 10 и Fortune 500. В рейтинге GartnerPeerInsight [10] ArangoDB признана одной из самых высокорейтинговых операционных баз данных с рейтингом 4,7 из 5 и в четвертый раз подряд выбрана ведущей графовой базой данных на G2.

Как и многие другие СУБД, ArangoDB предлагает лицензирование APL 2.0 для CommunityEdition и коммерческие лицензии для ArangoDBEnterprise.

Memgraph

Memgraph [11] – графовая СУБД, использующая модель графа свойств, которая хранит данные в терминах объектов, их атрибутов и связей, которые их соединяют. Эта модель считается наиболее естественным и эффективным способом моделирования различных процессов и предметных областей. В отличие от остальных участников обзора, Memgraph ориентируется на использование in-memogu хранилища,

что положительно сказывается на производительности.

Memgraph предлагает прямое подключение к потоковой инфраструктуре, чтобы облегчить создание конвейеров данных и ETL (extract, transform, load) процессов из таких источников, как Kafka и Amazon S3. Кроме того, Memgraph предоставляет стандартный интерфейс Cypher для запросов к данным, который способен расширяться при помощи процедур модулей запросов Python и C++. В стандартной комплектации пакета ПО Memgraph предоставляет более сотни различных алгоритмов обработки графов.

Позиционируя себя как Neo4j с улучшенной производительностью, Memgraph показывает высокие показатели скорости обработки данных и оптимальность их хранения [12].

Memgraph предлагает следующие сценарии использования [13]:

- графовые алгоритмы в биоинформатике;
- анализ социальных сетей;
- анализ криптовалютных сетей;
- маршрутизация в телекоммуникационных сетях;
- маршрутизация в транспортных сетях;
- построение рекомендательных систем;
- кибербезопасность;
- графы знаний;
- борьба с мошенничеством;
- СКУД.

Memgraph предоставляет открытую лицензию BSL 1.1 и APL 2.0 для бесплатного пользования CommunityEdition, также предлагая платные лицензии MemgraphCloud для корпоративных клиентов.

Сравнительная характеристика обозреваемых СУБД

Сравнение основного функционала и основных особенностей обозреваемых в работе СУБД представлено в табл. 1.

Как видно, самой зрелой технологией из списка является СУБД Virtuoso. Она также предоставляет наибольший набор различных моделей данных, которые можно хранить и обрабатывать в СУБД, обеспечивая связность между ними, поддерживает введение схем в данные, пользовательские индексы и процедуры. При этом Virtuoso оставляет для пользователя возможность использовать in-memogu вычисления, чтобы обеспечить наибольшую производительность обработки запросов.

Таблица 1

Сравнительная характеристика обозреваемых СУБД

СУБД	Год запуска	Модель данных	Схема данных	Ин- темо- р у	Пользователь- ские индексы	Пользователь- ские процедуры	Триг- геры
Neo4j	2007	Графы	Отсутствует	Нет	Да (подключаемые системы индексирования)	Да	Да
Virtuo- so	1998	Мульти модель- ная (Докумен- ты, графы, XML, реляци- онная, RDF, поисковый движок)	Присутствует (Табличная схема, RDF кортежи из трех и четырех элементов, XML схема, пользователь- ские типы UDT (user- definedtypes))	Да	Да	Да (Virtuoso PL)	Да
Aran- goDB	2012	Мульти модель- ная (Докумен- ты, графы, ключ-значение, поисковый движок)	Отсутствует (автоматически определяется из данных)	Нет	Да	Да (JavaScript)	Нет
Memgr aph	2017	Графы	Отсутствует (опциональная)	Да	Да (Elastic search)	Да	Да

Предпосылки создания метаграфовой СУБД

В настоящее время существует не менее 16 моделей данных, используемых в различных СУБД [1] и они не закрывают все потребности пользователей. На самом деле более 16, потому что в представленном в [1] списке не представлены многомерные СУБД, СУБД для хранения картографической информации, системы для обработки больших данных и ряд других. В случае хранения и обработки больших объемов данных проявляются следующие обусловленные отдельными моделями недостатки: реляционная модель не обеспечивает необходимой скорости обработки данных, графовая модель при её тотальном применении в масштабах предприятия приводит к слишком сложной запутанной структуре графа, модели NoSQL не обеспечивают требуемой сложности структур данных. Всё это заставляет искать новые модели данных, которые хотя бы частично помогут найти удобные компромиссные решения, удовлетворяющие отдельные категории пользователей.

Одной из таких моделей является метаграфовая. Метаграфовая модель является естественным развитием плоской графовой модели, но обеспечивает структуризацию графа, предоставляя любое необходимое число уровней вложенности графовых структур. Впервые ме-

таграфы были предложены в [14]. После этого разные авторы предложили ещё несколько видов метаграфов [15].

Среди различных видов метаграфов одним из широко распространённых является аннотированный метаграф [16, 17], представленный и используемый более чем в 100 публикациях. Этот вид метаграфов можно считать уже получившим признание в научном сообществе, и он обладает более широкими возможностями по структуризации данных по сравнению с другими видами метаграфов благодаря наличию и метавершин, и метарёбер, а также свойству аннотированности. Дополнительным мотивом в пользу его выбора в качестве модели данных для построения СУБД является наличие предыдущих проектов построения СУБД на его основе [18 - 21].

Проект метаграфовой СУБД

Метаграф, ввиду его семантической полноты, позволяет предложить новый класс систем управления данными - СУБД, модель данных которой основана на метаграфах. Существующие подходы к решению этой задачи являются приложениями над существующими СУБД с различными моделями данных. Это ведет к необходимости разработки специального приложения-прослойки, которое формирует

пользовательское представление метаграфа на основе записей в используемой СУБД и манипулирует этими записями при помощи высокоуровневой абстрактной логики.

В свою очередь, подобный подход вводит несколько уровней абстракции между данными и их использованием, что сказывается как на производительности, так и на масштабируемости таких решений. В данной работе предлагается решение, по своей архитектуре изначально отвечающее требованиям по хранению сетевых моделей данных, которое лишено указанных недостатков.

Модель данных, используемая в метаграфовом хранилище, может быть представлена в виде диаграммы «Сущность - Связь», изображенной на рис. 1.

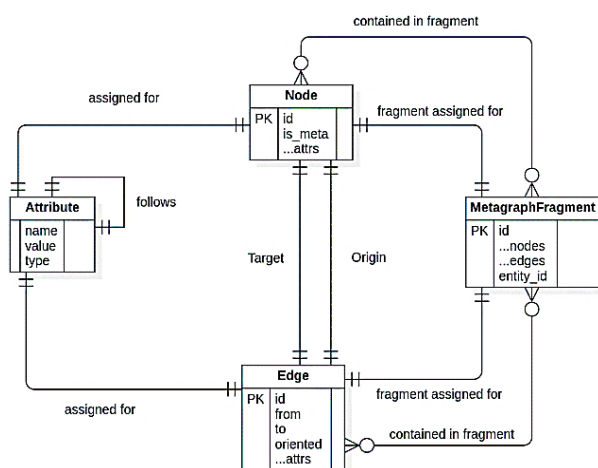


Рис. 1. Диаграмма «Сущность-Связь» разрабатываемой СУБД

Как видно, модель данных состоит из трех основных сущностей:

1. **Node** – сущность, отражающая вершину графа. В метаграфовой модели данных вершины и метавершины считаются равноправными, таким образом могут быть рассмотрены как сущности одного класса. Сущность **Node** обладает синтетическим первичным ключом для однозначной идентификации, логическим атрибутом **is_meta**, отражающим характер вершины (обычная вершина или метавершина) и набором атрибутов **attrs**, определяемых пользователем.

2. **Edge** – сущность, отражающей ребро графа. Обладает синтетическим первичным ключом, параметрами **from** и **to**, представляющими начальную и конечную вершины ребра и набором атрибутов **attrs**, определяемым пользователем.

3. **Attribute** – данная сущность отражает какой-либо атрибут сущности, с которой он связан. Атрибуты описывают различные осо-

бенности и признаки сущностей в доменной области, моделируемой при помощи графа.

У сущности **Attribute** также есть отношение **follows** к самой себе. Модель данных, используемая в разрабатываемой СУБД предполагает, что узлы и ребра не обладают детерминированным набором атрибутов (то есть модель данных является бессхемной), ввиду чего атрибуты хранятся в виде двусвязного списка. Такой подход успешно применяется в СУБД Neo4j [22]. Это необходимо для оптимального хранения атрибутов в оперативной памяти, о чем будет сказано далее.

Также на диаграмме представлена сущность, характеризующая метаграф. **MetagraphFragment** – это отражение вложенности объектов друг в друга в соответствии с определением фрагмента метаграфа. Эта сущность хранит синтетический первичный ключ, набор узлов и вершин, которые входят в фрагмент, а также хранит отображение этого фрагмента на узел или ребро графа (поле **entity_id**), составляя отношение «узел/ребро является фрагментом метаграфа».

Такой набор сущностей позволяет наиболее полно использовать метаграфовые структуры данных и составлять сложные сетевые модели для решения прикладных задач аналитики и обработки данных.

Заключение

Способность графовых СУБД выполнять сложные запросы и анализировать данные в режиме реального времени придает им ключевое значение для успешного управления информацией в современном мире, где скорость и точность являются решающими факторами.

В данной работе проведен обзор 4 основных представителей графовых СУБД на рынке. Их возможности позволяют выполнять сложное моделирование различных процессов и создание информационных сред, однако предлагаемая ими модель данных является либо семантически неполноценной, либо вызывает издержки производительности при работе с ними. Это приводит к исследованию новых структур данных и разработке СУБД, функционирующих на их основе.

Предложенная метаграфовая модель данных и разрабатываемая на ее основе СУБД позволит закрыть потребность в семантически полном и оптимальном моделировании сложных процессов и обработке большого объема сложных сетевых данных.

Литература

1. Рейтинг графовых СУБД – db-engines.com. URL: <https://db-engines.com/en/ranking/graph+dbms> (дата обращения: 23.10.2023).
2. Neo4j Enables up to 100x Faster Analytics and Real-Time Decision-Making – Neo4j Blog. URL: <https://neo4j.com/blog/neo4j-unveils-parallel-runtime-cdc/> (дата обращения: 23.10.2023).
3. Use cases – Neo4j. URL: <https://neo4j.com/use-cases> (дата обращения: 23.10.2023).
4. Virtuoso. URL: <https://virtuoso.openlinksw.com/> (дата обращения: 23.10.2023).
5. DBpedia. URL: <https://www.dbpedia.org/> (дата обращения: 23.10.2023).
6. LODCloud. URL: <https://lod-cloud.net/> (дата обращения: 23.10.2023).
7. Customer snapshot – Virtuoso. URL: <https://www.openlinksw.com/customer-snapshot> (дата обращения: 23.10.2023).
8. ArangoDB. URL: <https://arangodb.com/> (дата обращения: 23.10.2023).
9. Use cases – ArangoDB. URL: <https://arangodb.com/solutions/solutions-customers/#all> (дата обращения: 23.10.2023).
10. ArangoDB review – Gartner. URL: <https://www.gartner.com/reviews/market/cloud-database-management-systems/vendor/arangodb/product/arangodb> (дата обращения: 23.10.2023).
11. Memgraph. URL: <https://memgraph.com/> (дата обращения: 23.10.2023).
12. Benchmark – Memgraph. URL: <https://memgraph.com/benchmark> (дата обращения: 23.10.2023).
13. Use cases – Memgraph. URL: <https://memgraph.com/use-cases> (дата обращения: 23.10.2023).
14. Basu A., Blanning R. W. Metagraphs and their applications. Springer, 2007. С. 19-23.
15. Tarassov V. B., Gapanyuk Y. E. Complex Graphs in the Modeling of Multi-agent Systems: From Goal-Resource Networks to Fuzzy Metagraphs, in Artificial Intelligence (RCAI 2020) // Lecture Notes in Computer Science. 2020. Vol. 12412. PP. 177-198.
16. Samokhvalov E. N., Revunkov G. I., Gapanyuk Y. E. Metagraphs for Information Systems Semantics and Pragmatics Definition // Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Instrument Engineering. 2015. No. 1(100). PP. 83-99.
17. Terekhov V., Gapanyuk Y., Kanev A. Metagraph representation for overcoming limitations of existing knowledge bases // in 2021 28th Conference of Open Innovations Association (FRUCT). IEEE. 2021. PP. 458-464.
18. Storing Metagraph Model in Relational, Document-Oriented, and Graph Databases / V. M. Chernenkiy, Y. E. Gapanyuk, Y. T. Kaganov, I. V. Dunin, M. A. Lyaskovsky, and V. Larionov // in Selected Papers of the XX International Conference on Data Analytics and Management in Data Intensive Domains. 2018. Vol. 2277. С. 82-89.
19. The principles and the conceptual architecture of the metagraph storage system / V. M. Chernenkiy, Y. E. Gapanyuk, G. I. Revunkov, A. M. Andreev, Y. T. Kaganov, I. V. Dunin, and M. A. Lyaskovsky // Data Analytics and Management in Data Intensive Domains: 20th International Conference. Communications in Computer and Information Science. 2019. Vol. 1003. С. 73-87.
20. Distributed Metagraph DBMS Based on Blockchain Technology / A. A. Sukhobokov, V. A. Trufanov, Y. A. Stolyarov, M. R. Sadykov, O. O. Elizarov // Natural and Technical Sciences. 2021. No. 7. С. 201-209.
21. Method of storing metagraph data model in PostgreSQL DBMS / I. A. Erokhin, N. S. Grunin, A. V. Molchanov, E. A. Belousov, Y. E. Gapanyuk // in Artificial Intelligence in Management. Control, and Data Processing Systems, Proceedings of the All-Russian Scientific Conference IIASU'22. 2022. Vol. 1. С. 348-351.
22. Neo4j storage internals — Medium. URL: <https://gauravsarma1992.medium.com/neo4j-storage-internals-be8d150028db> (дата обращения: 23.10.2023).

Поступила 01.10.2023; принята к публикации 12.12.2023

Информация об авторах

Никольский Даниил Романович – аспирант кафедры автоматизированных и вычислительных систем, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: nikolsky.dan@gmail.com, ORCID: 0009-0002-4940-9838

Барabanов Владимир Фёдорович – д-р техн. наук, профессор, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: bvf@list.ru

Гребенникова Наталия Ивановна – канд. техн. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: g-naty@yandex.ru

Коваленко Сергей Александрович – аспирант, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: sergrs@yandex.ru

Нужный Александр Михайлович – канд. техн. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: nam14@mail.ru

ANALYSIS OF GRAPH DATABASE MANAGEMENT SYSTEMS

D. R. Nikolsky, V.F. Barabanov, N.I. Grebennikova, S.A. Kovalenko, A.M. Nuzhny

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Annotation: in the modern information society, data processing has become an important tool for making informed decisions and achieving success in many areas of activity. Different types of DBMS are used for data storage, each of which has its own unique functions, advantages and use cases. Graph DBMS offer a large number of tools and methods for data analysis

and processing. This paper reviews the Neo4j graph DBMS, Virtuoso and ArangoDB multimodal DBMS with the support of the graph data model and the Memgraph graph DBMS. Each of the DBMS has its own number of special features and advantages when used. This paper highlights the main properties of each of these DBMS and provides the main scenarios for their use. The advantages and imperfections of the existing DBMS offered on the market and the prerequisites for the development of a metagraphic DBMS are considered. A data model for the DBMS being developed and its software architecture are proposed, including some features of its implementation at the object storage level. The developed model provides optimal modeling of complex processes and processing of large volumes of complex network data

Key words: graph DBMS, graph data model, Neo4j, Virtuoso, ArangoDB, Memgraph, meta graph, metagraph DBMS

References

1. "Graph DBMSs rating", db-engines.com, available at: <https://db-engines.com/en/ranking/graph+dbms> (accessed 23.10.2023).
2. "Neo4j Enables up to 100x Faster Analytics and Real-Time Decision-Making", Neo4j Blog, available at: <https://neo4j.com/blog/neo4j-unveils-parallel-runtime-cdc/> (accessed 23.10.2023).
3. "Use cases", Neo4j, available at: <https://neo4j.com/use-cases> (accessed 23.10.2023).
4. "Virtuoso", available at: <https://virtuoso.openlinksw.com/> (accessed 23.10.2023).
5. "DBpedia", available at: <https://www.dbpedia.org/> (accessed 23.10.2023).
6. "LODCloud", available at: <https://lod-cloud.net/> (accessed 23.10.2023).
7. "Customer snapshot", Virtuoso, available at: <https://www.openlinksw.com/customer-snapshot> (accessed 23.10.2023).
8. "ArangoDB", available at: <https://arangodb.com/> (accessed 23.10.2023).
9. "Use cases – ArangoDB", available at: <https://arangodb.com/solutions/solutions-customers/#all> (accessed 23.10.2023).
10. "ArangoDB review", Gartner, available at: <https://www.gartner.com/reviews/market/cloud-database-management-systems/vendor/arangodb/product/arangodb> (accessed 23.10.2023).
11. "Memgraph", available at: <https://memgraph.com/> (accessed 23.10.2023).
12. "Benchmark – Memgraph", available at: <https://memgraph.com/benchmark> (accessed 23.10.2023).
13. "Use cases – Memgraph", available at: <https://memgraph.com/use-cases> (accessed 23.10.2023).
14. Basu A., Blanning R.W. "Metagraphs and their applications", Springer, 2007, doi: 10.1007/978-0-387-37234-1.
15. Tarassov V. B., Gapanyuk Y.E. "Complex Graphs in the Modeling of Multi-agent Systems: From Goal-Resource Networks to Fuzzy Metagraphs", *Artificial Intelligence (RCAI 2020), Lecture Notes in Computer Science*, 2020, vol. 12412, pp. 177-198. Springer, Cham, doi: 10.1007/978-3-030-59535-7_13
16. Samokhvalov E.N., Revunkov G.I., Gapanyuk Y.E., "Metagraphs for Information Systems Semantics and Pragmatics Definition", *Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Instrument Engineering*, 2015, no. 1 (100), pp. 83-99, doi: 10.18698/0236-3933-2015-1-83-99
17. Terekhov V., Gapanyuk Y., Kanev A., "Metagraph representation for overcoming limitations of existing knowledge bases", *2021 28th Conference of Open Innovations Association (FRUCT)*, pp. 458-464. IEEE, 2021, doi: 10.23919/FRUCT50888.2021.9347601
18. Chernenkiy V.M., Gapanyuk Y.E., Kaganov Y.T., Dunin I.V., Lyaskovsky M.A., Larionov V. "Storing Metagraph Model in Relational, Document-Oriented, and Graph Databases", *Selected Papers of the XX International Conference on Data Analytics and Management in Data Intensive Domains DAMDID/RCDL 2018, CEUR WORKSHOP PROCEEDINGS*, 2018, vol. 2277, pp. 82-89, [online] Available: <https://ceur-ws.org/Vol-2277/paper17.pdf>
19. Chernenkiy V.M., Gapanyuk Y.E., Revunkov G.I., Andreev A.M., Kaganov Y.T., Dunin I.V., Lyaskovsky M.A. "The principles and the conceptual architecture of the metagraph storage system," *Data Analytics and Management in Data Intensive Domains: 20th International Conference DAMDID/RCDL 2018, Communications in Computer and Information Science*, 2019, vol. 1003, pp. 73-87. Springer, Cham, doi: 10.1007/978-3-030-23584-0_5
20. Sukhobokov A.A., Trufanov V.A., Stolyarov Y.A., Sadykov M.R., Elizarov O.O. "Distributed Metagraph DBMS Based on Blockchain Technology", *Natural and Technical Sciences*, 2021, no. 7, pp. 201-209, doi: 10.25633/ETN.2021.07.15
21. Erokhin A., Grunin N.S., Molchanov A.V., Belousov E.A., Gapanyuk Y.E. "Method of storing metagraph data model in PostgreSQL DBMS", *Artificial Intelligence in Management, Control, and Data Processing Systems, Proceedings of the All-Russian Scientific Conference ILASU'22*, vol. 1, pp. 348-351. Moscow, BMSTU Publishing, 2022.

Submitted 01.10.2023; revised 12.12.2023

Information about the authors

Daniil R. Nikolsky - Postgraduate Student, the Department of Automated and Computer Systems, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: nikolsky.dan@gmail.com, ORCID: 0009-0002-4940-9838

Vladimir F. Barabanov – Dr. Sc. (Technical), Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: bvf@list.ru

Nataliya I. Grebennikova – Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: g-naty@yandex.ru

Sergey A. Kovalenko - Postgraduate Student, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: sergpc@yandex.ru

Alexander M. Nuzhny – Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: nam14@mail.ru

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЧАСТОТНОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА**А.К. Муконин, В.А. Трубецкой, Д.А. Тонн****Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия**

Аннотация: показано, что исследование частотного электропривода целесообразно выполнять на основе математического моделирования, также предложены простые модели для анализа среднечастотных процессов в преобразователе частоты. Проведен анализ решателей Simulink и реализуемых ими численных методов расчета систем дифференциальных уравнений при математическом моделировании частотных электроприводов. Установлено, что при математическом моделировании систем электропривода, электротехнических комплексов и систем целесообразно применять решатели с переменным шагом. В частотных электроприводах часто используются преобразователь частоты, содержащий трёхфазный диодный мост, конденсаторный фильтр и трёхфазный мостовой автономный инвертор напряжения. При трёхфазном напряжении питания преобразователя частоты 380-400 В фильтр реализуется на основе последовательно соединённых конденсаторов. Также можно отметить, что в случае необходимости упомянутые преобразователи частоты можно питать однофазным напряжением 220-230 В, подав его между любой из входных клемм трёхфазного диодного моста и общей точкой соединения конденсаторов фильтра. Проведенное математическое моделирование электропривода свидетельствует о том, что при однофазном питании возможно обеспечение номинального режима работы электродвигателя и приемлемой перегрузочной способности. Результаты математического моделирования подтверждаются экспериментальной проверкой возможности питания однофазным напряжением привода с преобразователем частоты

Ключевые слова: математическое моделирование, численный метод расчета, решатель, преобразователь частоты, трехфазный мост, частотно-регулируемый электропривод

Введение

Частотный электропривод (ЧЭП) является наиболее перспективной системой регулируемого привода. При выборе рациональной схемы ЧЭП необходимо учитывать множество факторов, в частности, влияние на питающую сеть, уровни напряжений и токов элементов преобразователя частоты (ПЧ) и т.п. Дифференциальные уравнения, описывающие процессы в ЧЭП, не имеют аналитического решения. В связи с этим анализ и синтез ЧЭП целесообразно выполнять с помощью математического моделирования.

На первом этапе для выбора рациональных схем приводов необходимо определить их возможные схемы как классические, так и нетрадиционные. На втором этапе нужно с помощью средств моделирования получить сравнительные характеристики приводов и выработать рекомендации по их проектированию.

Многообразие ЧЭП можно классифицировать по схемам преобразователей частоты. Исходя из этого, рассмотрим ряд вариантов ПЧ для частотного привода.

Варианты схем преобразователей частоты

В регулируемых электроприводах переменного тока широко используются преобразователи частоты, содержащие диодный выпрямитель, конденсаторный фильтр и трёхфазный мостовой автономный инвертор напряжения (АИН), что показано в многочисленных публикациях, например, в [1-3].

Среди таких ПЧ можно выделить схемы с трёхфазным напряжением питания 380-400 В и с однофазным напряжением 220-230 В.

Структура преобразователя с трёхфазным питанием приведена рис. 1, где приняты следующие условные обозначения: ТДМ – трёхфазный диодный мост; Ф1 – фильтр; М1 – трёхфазный двигатель; U_d – выходное напряжение звена постоянного напряжения (ЗПН).

В электрических фильтрах обычно применяют электролитические конденсаторы с допустимыми напряжениями 400-450 В. Так как в схеме на рис. 1 значение U_d выше 500 В, конденсаторы фильтра соединяют последовательно и для выравнивания напряжений шунтируют резисторами. В преобразователях частоты с однофазным питанием 220-230 В, содержащих однофазный диодный мост, нет

необходимости в последовательном соединении конденсаторов фильтра.

Максимально возможное действующее значение линейного напряжения $U_{\text{мл}}$ на выходе трёхфазного мостового АИН зависит от его входного напряжения U_d . При так называемой векторной широтно-импульсной модуляции (ШИМ) транзисторов АИН [1] можно записать

$$U_{\text{мл}} = \frac{U_d}{\sqrt{2}}. \quad (1)$$

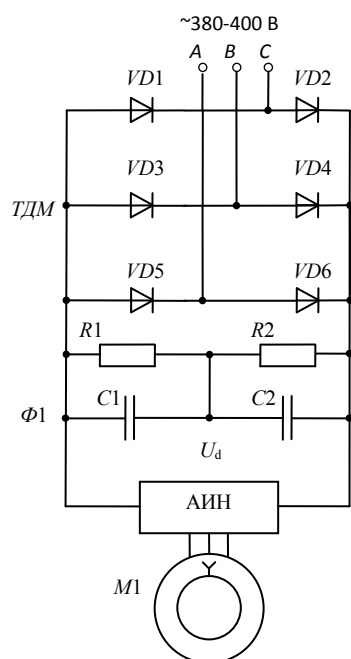


Рис. 1. Схема ПЧ с трёхфазным питанием

При входном напряжении ПЧ 220 В величины U_d лежат в окрестностях 300 В, соответственно $U_{\text{мл}}$ не превышает 220 В. Исходя из этого, трёхфазную обмотку двигателя соединяют по схеме треугольник. Недостатком такого соединения является протекание в двигателе токов нулевой последовательности.

В [4] предложена схема универсального преобразователя частоты (УПЧ), который может питаться как трёхфазным, так и однофазным напряжением, обеспечивая возможность соединения трёхфазной обмотки двигателя в звезду. Универсальный ПЧ отличается от схемы на рис. 1 тем, что общая точка конденсаторов фильтра (ОТКФ) С1, С2 соединяется с нулевым проводом трёхфазной сети.

Для УПЧ можно выделить три основных варианта питания. В первом варианте нулевой провод сети не используется, то есть ПЧ работает как классическая схема, приведенная на рис. 1.

Во втором варианте ПЧ питается от трёхфазной четырехпроводной сети, что позволяет по сравнению со схемой на рис. 1 увеличить выходное напряжение АИН и тем самым расширить диапазон регулирования скорости электропривода [4].

В третьем варианте однофазное напряжение 220В подается между ОТКФ и любой из клемм А, В, С трехфазного диодного моста (рис.1). В таком случае выпрямитель работает как удвоитель напряжения (УН). В [4] показано, что применение УН позволяет получить на выходе ПЧ даже большее напряжение, чем в схеме на рис.1.

Таким образом, для реализации ЧЭП можно предложить три рассмотренных выше схемы ПЧ.

Средства моделирования звена постоянного напряжения

В рассмотренных схемах ПЧ звено постоянного напряжения содержит диодный выпрямитель с конденсаторным фильтром. Дифференциальные уравнения таких выпрямителей не имеют аналитического решения даже при резистивной нагрузке. В преобразователе частоты выпрямитель нагружен на автономный инвертор напряжения, который описывается весьма сложными уравнениями.

Конденсаторы фильтра в ПЧ выполняют четыре функции:

- создают контур для протекания тока при размыкании транзисторных ключей АИН (функция 1);
- сглаживают пульсации выпрямленного напряжения (функция 2);
- повышают среднее выходное напряжение (функция 3);
- накапливают энергию при рекуперативном торможении двигателя (функция 4).

В соответствии с этими функциями при анализе ЗПН можно выделить высокочастотные (функция 1), среднечастотные (функции 1 и 2) и низкочастотные (функция 4) процессы. Частота процессов, связанных с функцией 1, определяется частотой коммутации транзисторов АИН и относительно высока. Частота изменения напряжения фильтра, обусловленная функциями 2,3, при частоте сети 50 Гц равна 300 Гц или 100 Гц (для схемы с УН).

Частота изменения напряжения при рекуперативном торможении определяется частотой пуско-тормозных режимов привода. В

установившемся режиме эти изменения отсутствуют.

При анализе процессов в ЗПН целесообразно использовать метод разделения движений, когда отдельно анализируются высокочастотные, среднечастотные и низкочастотные процессы.

Высокочастотные изменения в ЗПН мало влияют на среднечастотные и низкочастотные. В [4] показано, что для анализа процессов средней частоты нагрузку ЗПН можно рассматривать как звено с постоянной потребляемой мощностью (ЗППМ).

Уравнения для анализа упомянутых процессов не имеют аналитического, что свидетельствует о необходимости моделирования работы ЗПН.

Средства моделирования выпрямителя с фильтром известны. Остается определить модели нагрузки, отбирающей от выпрямителя постоянную мощность.

В качестве такой нагрузки можно предложить замкнутую релейную систему формирования тока в источнике постоянной ЭДС [5].

Произведение ЭДС и тока определяет потребляемую мощность.

Можно также нагрузить выпрямитель на переменный резистор, сопротивление которого зависит от напряжения таким образом, что мощность равна константе.

Использование предложенных моделей позволяет определять выходные напряжения выпрямителя и его влияние на питающую сеть, выбирать элементную базу.

Влияние на питающую сеть характеризуется, в частности, коэффициентом мощности, амплитудными и действующими значениями тока сети.

Коэффициент мощности одной фазы сети определяется как отношение активной мощности P к полной мощности S

$$K_M = \frac{P}{S} = \frac{P}{U \cdot I}, \quad (2)$$

где U и I – действующие (среднеквадратичные) значения фазных напряжения и тока.

Значение P рассчитывается как средняя за период T сетевого напряжения мощность

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p dt = \frac{1}{T} \int_0^T u i dt, \quad (3)$$

где p , u и i – мгновенные величины мощности, напряжения и тока сети.

Модель для определения параметров электропривода в соответствии с выражениями (2), (3) показана на рис. 2.

Входными переменными модели служат мгновенные значения напряжения u и тока i фазы сети.

Блоки RMS определяют среднеквадратичные значения напряжения U и тока I . Мгновенная мощность p определяется произведением u и i , блок Mean вычисляет активную мощность P . Блок Product 1 рассчитывает полную мощность S , а элемент Divide – коэффициент мощности K_M .

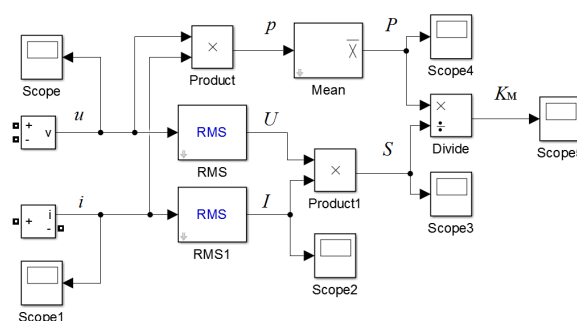


Рис. 2. Математическая модель для определения влияния на питающую сеть

Математическое моделирование частотного электропривода и его результаты

Приведенные выше предложения обеспечивают возможность с помощью простых моделей исследовать среднечастотные электрические процессы в ЗПН. Вместе с тем, эти модели не позволяют определять электромеханические переменные привода. В связи с этим во многих случаях необходимо использовать более сложные модели.

Одной из задач настоящей работы является исследование с помощью моделирования возможности подключения ПЧ, рассчитанного на трёхфазное питание, к источнику однофазного напряжения.

Как уже отмечалось, данное подключение можно обеспечить в схеме на рис. 1, подав однофазное напряжение 220-230 В между любой из входных клемм диодного моста и общей точкой конденсаторов фильтра. В этом случае звено постоянного тока работает как удвоитель напряжения.

Моделирование и экспериментальные исследования выполнялись для привода с преобразователем частоты MICROMASTER 440

Таблица 1

Решатели Simulink с переменным шагом

Решатель	Тип шага	Порядок	Область применения
ode15s	многошаговый переменного порядка	1-5	адаптивный метод для обеспечения достаточной точности решения жестких систем
ode23	одношаговый явный метод Рунге-Кутты	2-3	метод дает выигрыш в скорости решения при невысоких требованиях к точности нежестких систем
ode23s	одношаговый модифицированный метод Розенброка	2	позволяет обеспечить высокую скорость решения жестких систем при низкой точности
ode23t	метод трапеций с интерполяцией.	низкий	имеет хорошую точность при решении умеренно жестких задач.
ode23tb	явный метод Рунге-Кутты в начальной стадии решения	2	имеет низкую точности для жестких систем, но эффективней, чем решатель ode23s.
ode45	одношаговый явный метод Рунге-Кутты	4-5	классический метод, применяется в начальной пробной фазе решения, дает вполне удовлетворительные результаты.
ode113	многошаговый метод Адамса-Башворта-Мултона	выше среднего	адаптивный метод обеспечивает высокую точность решения

6SE6440-200B-7AA1 и двигателем AIP50B2. Параметры ПЧ: напряжение питания трёхфазное 380-400 В; входной ток 2,2 А; выходной ток 2,2 А. Параметры двигателя: мощность 120 Вт; номинальная частота ротора 2655 об/мин. Силовая часть ПЧ выполнена в соответствии с рис. 1, ёмкость каждого из конденсаторов фильтра равна 100 мкФ.

Моделирование выполнялось в пакете MATLAB Simulink Classroom.

При математическом моделировании электрических машин, объектов электроэнергетики, систем автоматического управления и сложных линейных и нелинейных динамических систем, непрерывных или дискретных, электроприводов различного назначения и области применения целесообразно использовать приложение Simulink с расширением SimPowerSystem, которое изначально предназначалось для моделирования в этой инженерной сфере деятельности.

Математическое моделирование в пакете Simulink реализуется комплектом прикладных программ – решателей, которые позволяют интегрировать системы обыкновенных дифференциальных уравнений, описывающих физические процессы, протекающие в тех или иных электротехнических устройствах и системах, комплексах. В Simulink для решения различного рода задач применяются решатели с фиксированным шагом или переменным шагом, а также непрерывные или дискретные решатели. Реализованные в Simulink решатели позволяют применять при математическом моделировании, приведенные в табл. 1, численные методы с переменным шагом для решения систем обыкновенных дифференциальных уравнений.

Ряд решателей, таких как ode15s, ode23s, ode23t, ode23tb, также предназначены и для решения задачи Коши для систем обыкновенных дифференциальных уравнений неявного вида. Выбор решателя для моделирования системы электропривода зависит от динамики системы, стабильность решения, скорости вычислений, надежность решателя.

В случае непрерывных систем, обладающих непрерывным или фиксированным шагом, когда состояние математической модели резко переменное или содержит разрывы, применение решателя с переменным шагом позволяет ощутимо сократить время расчета.

В этой ситуации при переменном шаге требуется гораздо меньше итераций или шагов для достижения необходимой точности расчета. Поэтому при математическом моделировании систем электропривода, электротехнических комплексов и систем целесообразно применять решатели с переменным шагом.

Основная часть модели электропривода с однофазным питанием приведена на рис. 3. В данной модели из-за громоздкости не показан ряд измерителей параметров электропривода, в частности, схема, приведенная на рис. 2.

Схема содержит трёхфазный мостовой АИН (Universal Bridge 1), питающий трёхфазный двигатель. На вход широтно-импульсного модулятора (PWM Generator) поступает трёхфазная система синусоидальных напряжений частотой 60 Гц.

Инвертор питается от удвоителя напряжения с ёмкостью каждого конденсатора 100 мкФ. Параметры источника синусоидальной ЭДС: 220 В; 50 Гц; активное сопротивление 0,1 Ом; индуктивность 0,001 Гн. Число 1 в блоке Amplitude означает, что амплитуда напряжения двигателя равна напряжению на входе АИН.

Исследовалась также модель привода с питанием от трехфазной трехпроводной сети. Эта модель отличается от схемы на рис. 3 звеном постоянного напряжения. Параметры каждой фазы трёхфазного источника ЭДС та-

кие же, как и в схеме рис. 3. Каждый из конденсаторов фильтра имеет ёмкость 100 мкФ.

На первом этапе моделирования в обеих схемах с помощью блока Step задавался номинальный момент нагрузки 0,382 Н·м. Некоторые результаты моделирования представлены в табл. 2, где приняты следующие обозначения: ω – скорость двигателя; I_m и I – амплитуда и действующее значение тока фазы сети.

Из таблицы, приведенной ниже, следует, что при однофазном питании напряжение U_d выше, чем при трёхфазном, а коэффициент мощности ниже.

Таблица 2

Результаты моделирования

Варианты питания ПЧ	ω , рад/с	U_d , В	I_m , А	I , А	K_M
С однофазным питанием	340	598	6,8	1,7	0,45
С трёхфазным питанием	340	536	1,7	0,5	0,51

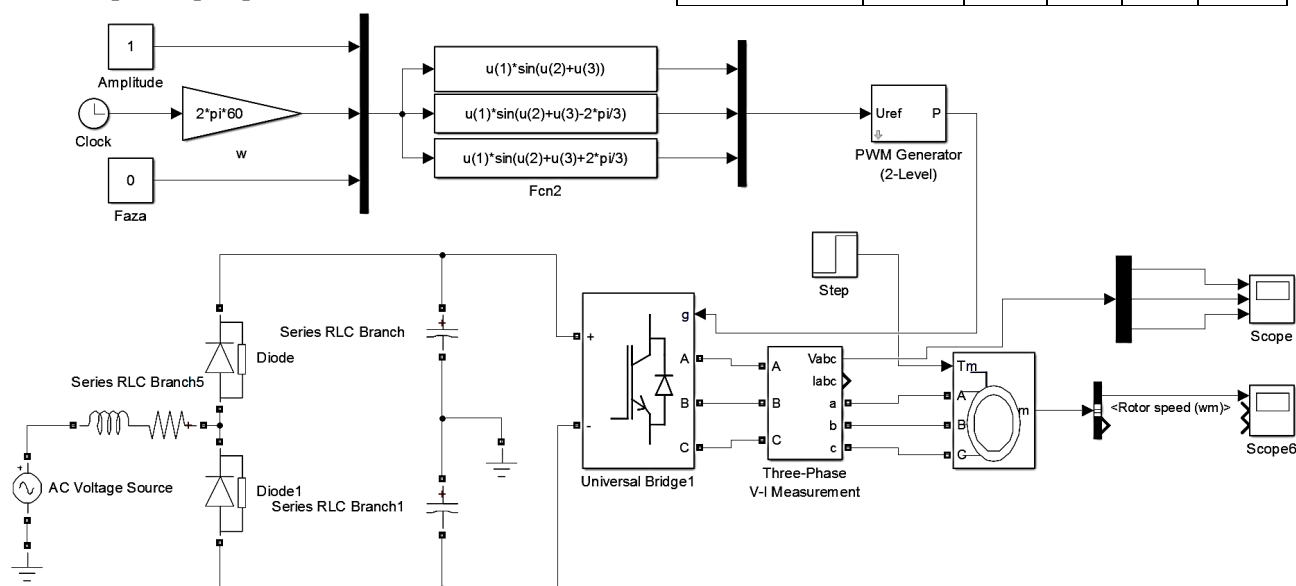


Рис. 3. Математическая модель электропривода с однофазным питанием

Скорости двигателя примерно равны. Необходимо учитывать, что в ПЧ с удвоителем напряжения ток протекает лишь в одной фазе сети. Так как заданная частота выходных напряжений инвертора не 50, а 60 Гц, при номинальном моменте нагрузки мощности двигателя примерно на 20 % выше номинальной.

На втором этапе математического моделирования сравнивались перегрузочные способности приводов. В моделях вместо блока

Step использовался блок Ramp и момент нагрузки нарастал во времени линейно со скоростью 1 Нм/с. Графики изменения скорости и напряжения U_d приведены на рис. 4.

Характеристика 1 на рис. 4 соответствует математической модели с удвоителем напряжения, а характеристика 2 – математической модели с трёхфазным питанием. Когда время $t=0,7$ с, значения U_d равны для обеих схем, а момент

нагрузки составляет 0,76 Н·м, что вдвое больше номинального момента двигателя.

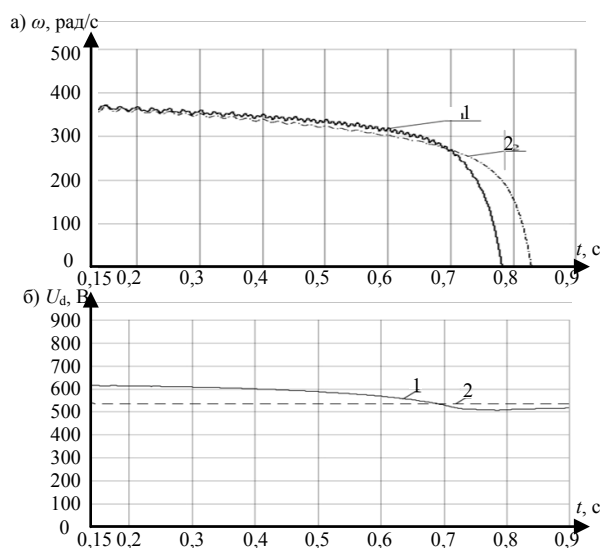


Рис. 4. Графики изменения скоростей (а) и напряжений U_d (б) при линейном нарастании момента

Из графиков следует, что при однофазном питании сохраняется приемлемая перегрузочная способность асинхронного двигателя.

Для экспериментальной проверки возможности питания однофазным напряжением привода с преобразователем MICROMASTER 440 был выведен наружу провод от общей точки конденсаторов фильтра. Однофазное напряжение подавалось между упомянутым проводом и одной из входных клемм диодного моста. Привод обеспечивал работу при номинальном моменте нагрузки и частоте питания двигателя 50 Гц.

Неудобством перехода на однофазное питание является необходимость вскрытия корпуса преобразователя частоты для присоединения к общей точке конденсаторов фильтра. На наш взгляд при производстве ПЧ целесооб-

разно выводить данную точку в клеммный узел.

Заключение

1. Выбор рациональных схем частотно-го электропривода целесообразно выполнять с помощью математического моделирования. В работе предложены простые средства моделирования для анализа среднечастотных процессов в преобразователе частоты, в частности, рекомендовано в качестве нагрузки выпрямителя использовать релейную систему формирования тока в источнике постоянной ЭДС.

2. Для анализа электромеханических процессов в приводе необходимо использовать модели, в которых выпрямитель нагружается на инвертор напряжения с подключенным к его выходу двигателем. Применение таких моделей позволило показать, что возможно питать однофазным напряжением привод, спроектированный на трехфазное питание.

Литература

1. Соколовский Г.Г. Электроприводы переменного тока с частотным управлением. М.: Издательский центр «Академия», 2006. 272 с.
2. ACS355: user's manual. URL: https://library.e.abb.com/public/1563267283574059bd87947c8b1368aa/EN_ACS355_UM_D.pdf. (дата обращения: 28.12.2017).
3. MICROMASTER 440: Betriebsanleitung. URL: https://siemens-drives.ru/files/lists/s_Directories/69_Files_1351254988_440_opi_24294529_ru_1006.pdf. (дата обращения: 06.10.2023).
4. Муконин А.К., Шиянов А.И. Частотные приводы с токовым управлением. Воронеж: ВГТУ, 2006. 142 с.
5. Муконин А.К., Богомазов А.Е. О совершенствовании характеристик частотного электропривода// Электротехнические комплексы и системы управления. 2015. № 3. С. 43-49.

Поступила 16.05.2023; принята к публикации 30.10.2023

Информация об авторах

Муконин Александр Константинович – канд. техн. наук, доцент кафедры электропривода, автоматики и управления в технических системах, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, д. 84), тел. 8(473)243-77-20, e-mail: mukonin_ak@mail.ru

Трубецкой Виктор Александрович – канд. техн. наук, доцент кафедры электропривода, автоматики и управления в технических системах, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, д. 84), тел. 8(473)243-77-20, e-mail: viktortrubetskoi@yandex.ru

Тонн Дмитрий Александрович – канд. техн. наук, доцент кафедры электропривода, автоматики и управления в технических системах, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, д. 84), тел. 8(473)243-77-20, e-mail: tonnda@mail.ru

MATHEMATICAL MODELING OF A FREQUENCY ELECTRIC DRIVE

A.K. Mukonin, V.A. Trubetskoy, D.A. Tonn

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract: it is shown that it is advisable to carry out the study of a frequency electric drive on the basis of mathematical modeling, and simple models are also proposed for the analysis of medium-frequency processes in a frequency converter. The analysis of Simulink solvers and numerical methods of calculating systems of differential equations implemented by them for mathematical modeling of frequency electric drives is carried out. It is established that in the mathematical modeling of electric drive systems, electrical complexes and systems, it is advisable to use variable-step solvers. Frequency drives often use a frequency converter containing a three-phase diode bridge, a capacitor filter and a three-phase bridge autonomous voltage inverter. With a three-phase supply voltage of the frequency converter 380-400 V, the filter is implemented on the basis of series-connected capacitors. It can also be noted that, if necessary, the mentioned frequency converters can be powered with a single-phase voltage of 220-230 V by feeding it between any of the input terminals of the three-phase diode bridge and the common connection point of the filter capacitors. The conducted mathematical modeling of the electric drive indicates that with a single-phase power supply, it is possible to ensure the rated operating mode of the electric motor and an acceptable overload capacity. The results of mathematical modeling are confirmed by experimental verification of the possibility of supplying a single-phase voltage drive with a frequency converter

Key words: mathematical modeling, numerical calculation method, solver, frequency converter, three-phase bridge, frequency-controlled electric drive

References

1. Sokolovsky G.G. "Alternating current electric drives with frequency control" (Elektroprivody peremennogo toka s chastotnym upravleniyem"), Moscow, Izdatelskiy tsentr Akademiya, 2006, 272 p.
2. ACS355: user's manual, available at: https://library.e.abb.com/public/1563267283574059bd87947c8b1368aa/EN_ACS355_UM_D.pdf (accessed 28.12.2017).
3. MICROMASTER 440: Betriebsanleitung, available at: https://siemens-drives.ru/files/lists/S_DIRECTORIES/69_Files_1351254988_440_opi_24294529_ru_1006.pdf (accessed 06.10.2006).
4. Mukonin A.K., Shiyarov A.I. "Frequency drives with current control" ("Chastotnyye privody s tokovym upravleniyem"), Voronezh, VGTU, 2006, 142 p.
5. Mukonin A.K., Bogomazov A.E. "On improving the characteristics of a frequency electric drive", *Electrotechnical complexes and control systems (Elektrotehnicheskiye komplekсы i sistemy upravleniya)*, 2015, no. 3, pp. 43-49.

Submitted 16.05.2023; revised 30.10.2023

Information about the authors

Alexander K. Mukonin, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Department of Electric Drive, Automation and Control in Technical Systems, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), tel. 8(473)243-77-20, e-mail: mukonin_ak@mail.ru

Victor A. Trubetskoy, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Department of Electric Drive, Automation and Control in Technical Systems, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: viktortrubetskoi@yandex.ru, tel. 8(473)243-77-20

Dmitry A. Tonn, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Department of Electric Drive, Automation and Control in Technical Systems, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), tel. 8(473)243-77-20, e-mail: tonnda@mail.ru

МЕТОДИКА РАЗРАБОТКИ ИНТЕРАКТИВНОГО МАКЕТА ЖИЛОГО ЗДАНИЯ**М.Ю. Сергеев, А.С. Багно, А.М. Нужный, Н.И. Гребенникова****Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия**

Аннотация: рассмотрен подход к разработке интерактивного макета жилого здания с применением программного средства Unity. Этапами разработки являются: трехмерное моделирование, уточнение функциональности строительных объектов, интерактивность (взаимодействие с заказчиком), меблировка, визуализация результата с применением анимации и динамических эффектов. Рассмотрена методика применения интерактивных 3D-моделей для создания и визуализации макетов жилых зданий. Применение данного подхода обеспечивает возможность исследовать здание с различных ракурсов, изменять дизайн в режиме реального времени и использовать результаты проектирования в различных форматах, включая презентации и веб-сайты. Интерактивный макет здания позволяет принимать обоснованные решения на ранних этапах проектирования и обеспечивает новые средства визуализации и оценки данных решений. Рассмотрены функциональные возможности интерактивного макета здания и типовые действия по выбору компонентов оформления внутренних помещений. Предложены этапы разработки интерактивной модели здания. Преимущества использования интерактивной 3D-модели включают улучшенную визуализацию и контроль качества решения на ранних этапах проектирования строительных объектов. При взаимодействии с заказчиком на основе анализа смоделированного помещения можно улучшить цветовые решения, компоновку мебели, включая взаимодействие с окружающей средой и удобство использования

Ключевые слова: интерактивный макет здания, программные средства проектирования объекта

Введение

Жилищная индустрия важна в современном обществе, и интерактивные макеты жилых зданий играют ключевую роль в удовлетворении потребностей клиентов. Они создают реалистичную картину будущего жилья, помогая клиентам принимать обоснованные решения по составу объектов, их компоновке, цветовым гаммам. Интерактивные макеты также улучшают коммуникацию между участниками проекта, сокращая время, затраты на разработку и ошибки. Исследование направлено на создание эффективного интерактивного макета жилого здания и оценку его преимуществ по сравнению с традиционными методами визуализации.

Цель исследования – разработка и изучение практической применимости интерактивных макетов в сфере строительства и дизайна.

Метод решения задачи проектирования строительных объектов

Интерактивные 3D-модели являются эффективным инструментом для создания и визуализации макетов жилых зданий. Они позволяют пользователям свободно исследовать здание с различных ракурсов, изменять дизайн в режиме реального времени и доступны для использования в различных форматах, включая

презентации и веб-сайты. Это обеспечивает глубокое понимание и возможность принимать обоснованные решения на ранних этапах проектирования. Также интерактивные 3D-модели доступны для потенциальных покупателей и застройщиков, позволяя им провести виртуальный тур и оценить преимущества здания [1,5].

Инструментарий разработки

Популярные приложения для проектирования и моделирования, такие как Autodesk Revit, SketchUp, ArchiCAD, 3ds Max и Rhino, являются платными и требуют дорогостоящих лицензий. Для молодых фирм с ограниченными финансовыми возможностями более доступным вариантом может быть использование игровых движков. Два самых популярных игровых движка на сегодняшний день – "Unreal Engine" и "Unity". В отличие от "Unreal Engine", "Unity" доступен без обязательной покупки лицензии. Программное приложение Unity предоставляет возможность разработки приложений для различных платформ, имеет интегрированную среду разработки и поддерживает различные языки программирования, включая C#, JavaScript и Boo [1, 3, 6].

Методика построения интерактивного макета жилого здания

Построение интерактивного макета жилого здания состоит из нескольких этапов.

Этап 1. Определение функционала интерактивной модели.

Для того чтобы разработать приложение необходимо знать конечный набор функций интерактивного макета и понимать порядок работы со средой разработки.

Интерактивный макет жилого здания включает ключевые элементы для полной визуализации и оценки будущего комплекса. Это трехмерная визуализация здания, фасадов и

окружающей территории, интерактивность и навигация, возможность добавления мебели и декора, функциональность объектов внутри здания и анимации и эффекты. Все эти элементы помогают пользователям лучше представить будущее жилье и принять информированное решение о строительстве или покупке [2].

Исходя из вышеописанного, можно составить схему разработки интерактивного макета, показанную на рис. 1.



Рис. 1. Схема набора функций интерактивного макета жилого здания

Этап 2. Разработка интерактивного макета.

Соблюдение порядка разработки важно для создания интерактивного макета по нескольким причинам. Организация работы команды становится более эффективной, обеспечивается постепенное совершенствование макета и целостность проекта. Порядок разработки помогает контролировать качество работы, согласованность и управление рисками.

После того, как определено функциональное назначение строительного объекта, следует выполнить типовой набор действий, представленный на рис. 2.

Каждый этап разработки интерактивного макета имеет свои задачи и цели. Это создание трехмерной модели здания, разработка интерактивности и навигации, интеграция мебели и декора, разработка функциональности объектов, добавление анимации и эффектов, тестирование и обратная связь, и, наконец, представление окончательной версии заказчику [8].

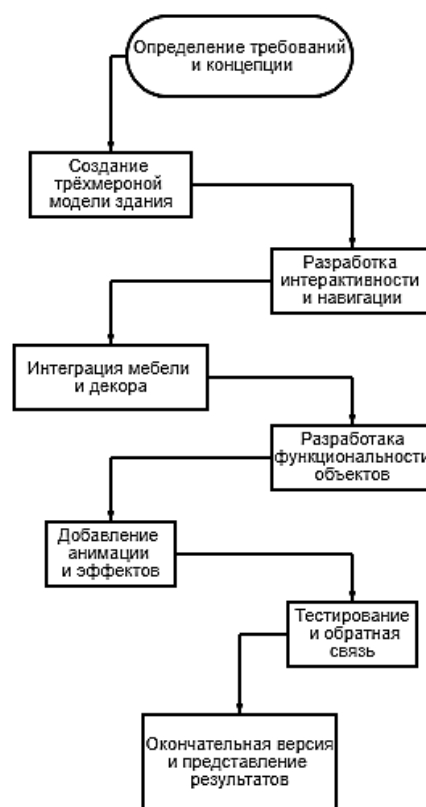


Рис. 2. Порядок разработки интерактивного макета

Этап 3. Описание готового решения. Готовое решение включает набор спроектированных помещений, имеющих выбранный вариант цветовой реализации, мебель и ее компоновку, световые решения и другие параметры [8].

Пример реализации интерактивной модели дома

Результаты интерактивного моделирования следующие: за основу была взята типичная загородная вилла для отдыха с двумя этажами. Модель здания выбрана составной, то есть каждая часть в нем является отдельным объектом. Был создан интерьер, и разработаны скрипты для интерактивных взаимодействий с окружением, таким как свет, мебель и двери.

Общие виды здания показаны на рис. 3-5.

Заключение

В исследовании для создания интерактивного макета жилого здания использовалась программная среда разработки Unity. Результаты моделирования можно использовать для оценки эффективности макета и организации взаимодействия заказчика и проектировщика.

Интерактивная форма представления макета здания поможет выявить плюсы и минусы будущего здания, удобство использования, реалистичность и возможность взаимодействия с окружающей средой. На основе интерактивного макета можно сделать улучшение проекта, включая исправление технических проблем, улучшение детализации и функциональности макета. Итоговая оценка эффективности макета будет основана на сравнении с поставленными целями и ожиданиями. Результаты и анализ позволят сделать выводы о достижении целей и предложить рекомендации для улучшения макета в будущем.

Макет позволяет взаимодействовать с виртуальным пространством, менять параметры и оценивать функциональность и эстетику. Использование трехмерного моделирования, интерактивности и анимации придает макету реалистичность. Преимущества включают улучшенную визуализацию и контроль качества решения на ранних этапах проектирования строительных объектов [1-4, 7].



Рис. 3. Общий вид дома

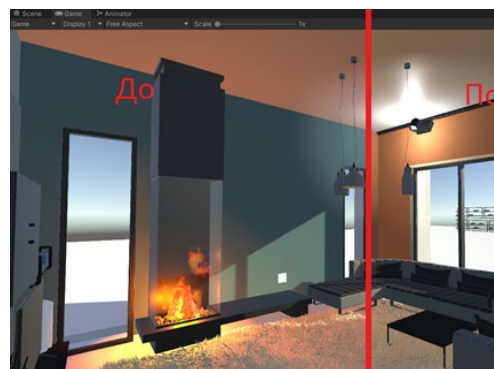


Рис. 4. Редактирование цветковых решений

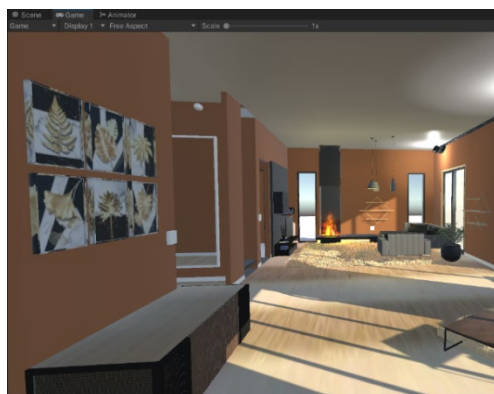


Рис. 5. Интерьер помещения

Литература

1. Хокинг Дж. Unity в действии. Мультиплатформенная разработка на C#. 2-е межд. издание. СПб.: Питер, 2022. 352 с.
2. Ламмерс К. Шейдеры и эффекты в Unity. Книга рецептов. М.: ДМК-Пресс, 2016. 274 с.
3. Stagner A.R. Unity Multiplayer Games. Birmingham: Pact Publishing, 2013. 242 с.
4. Торн А. Основы анимации в Unity. М.: ДМК-Пресс, 2016. 176 с.
5. Гейг М. Разработка игр на Unity 2018 за 24 часа. М.: Эксмо, 2020. 464 с.
6. Албахари Дж., Албахари Б. Справочник C# 7.0: полное описание языка. М.: Вильямс, 2018. 1024 с.
7. Официальный сайт Unity. URL: <http://www.unity.com> (дата обращения: 15.03.2023).
8. Бонд Дж. Г. Unity и C#. Геймдев от идеи до реализации. СПб: Питер, 2022. 928 с.

Информация об авторах

Сергеев Михаил Юрьевич – канд. техн. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: mikesergeev@mail.ru

Багно Артём Сергеевич – студент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: prisada28@gmail.com

Нужный Александр Михайлович – канд. техн. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: g-naty@yandex.ru

Гребенникова Наталия Ивановна – канд. техн. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: g-naty@yandex.ru

METHODOLOGY FOR DEVELOPING THE INTERACTIVE LAYOUT OF A RESIDENTIAL BUILDING

M. Yu. Sergeev, A.S. Bagno, A.M. Nuzhny, N.I. Grebennikova

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract: an approach to developing an interactive model of a residential building using the Unity software is considered. The stages of development are: three-dimensional modeling, clarification of the functionality of construction objects, interactivity (interaction with the customer), furnishing, visualization of the result using animation and dynamic effects. The methodology for using interactive 3D models to create and visualize models of residential buildings is considered. Using this approach provides the ability to examine a building from different angles, change the design in real time, and use the design results in a variety of formats, including presentations and websites. An interactive building layout allows you to make informed decisions early in the design process and provides new tools for visualizing and evaluating these decisions. The functionality of an interactive building layout and typical actions for selecting interior design components are considered. The stages of developing an interactive building model are proposed. The benefits of using an interactive 3D model include improved visualization and quality control of the solution in the early stages of construction design. When interacting with the customer, based on the analysis of the simulated room, it is possible to improve color schemes, furniture layout, including interaction with the environment and ease of use

Key words: interactive layout of the building, object design software

References

1. Hocking J. "Unity in action. Multiplatform game development in C#" ("Unity v deystvii. Multiplatformennaya razrabotka na C#"), St. Petersburg: Piter, 2022, 352 p.
2. Lammers K. "Unity Shaders and Effects. Book of recipes" Sheydery i efekty v Unity. Kniga retseptov", Moscow, DMK-Press, 2016, 274 p.
3. Stagner A.R. "Unity Multiplayer Games", Birmingham, Pact Publishing, 2013, 242 p.
4. Torn A. "Unity Animation Essentials" ("Osnovy animatsii v Unity"), Moscow, DMK-Press, 2016, 176 p.
5. Geig M. Unity 2018 Game Development in 24 Hours / M. Geig. – Moscow: Eksmo, 2020 – 464 p.
6. Albahari J., Albahari B. "C# 7.0 in a Nutshell: The Definitive Reference" ("Spravochnik C# 7.0: polnoye opisaniye yazyka"), Moscow, Williams, 2018, 1024 p.
7. "Unity official website", available at: <http://www.unity.com>.
8. Bond J.G. "Introduction to Game Design, Prototyping, and Development: From Concept to Playable Game with Unity and C#" ("Unity i C#. Geymdev ot idei do realizatsii"), St. Petersburg: Piter, 2022, 928 p.

Submitted 20.08.2023; revised 01.12.2023

Information about the authors

Mikhail Y. Sergeev – Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: mikesergeev@mail.ru

Artyom S. Bagno – Student, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: prisada28@gmail.com

Alexander M. Nuzny – Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: nam14@mail.ru

Natalia I. Grebennikova – Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: g-naty@yandex.ru

**ПРОГРАММА ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ СИСТЕМЫ ПРЕДИКТИВНОГО
УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ ДЕГИДРИРОВАНИЯ ЭТИЛБЕНЗОЛА****О.Г. Неизвестный****Воронежский государственный университет инженерных технологий, г. Воронеж, Россия**

Аннотация: рассмотрено специализированное программное приложение, предназначенное для исследования и прогнозирования динамики системы предиктивного управления процессом дегидрирования этилбензола в производстве стирола. Программа имеет модульную структуру. По совокупности выполняемых функций и опций, приложение относится к классу многофункциональных программных средств. Программное обеспечение является инструментом для проведения имитационного моделирования и параметрического синтеза динамических систем в рамках концепции модельно-ориентированного проектирования. Предоставленные пользователю инструменты позволяют выполнить следующие этапы модельно-ориентированного проектирования автоматизированных управляющих систем: моделирование объекта управления; построение горизонтов прогноза изменения параметров состояния процесса; параметрический синтез регулирующего устройства; моделирование системы управления; сравнительный анализ результатов моделирования систем, реализующих пропорционально-интегрально-дифференциальный закон управления, и управление на базе предиктивного регулятора с помощью прогнозирующих моделей; формирование и непрерывное пополнение информационной базы возможных динамических сценариев протекания процессов при различных настройках МРС-регулятора. Предусмотрено два режима работы приложения, что позволяет использовать его функционал в проектных организациях для научных исследований, инженерных расчетов действующих лабораторных и промышленных установок дегидрирования этилбензола. Также оно может быть использовано в качестве компьютерной обучающей программы для цикла профессиональных дисциплин направлений подготовки обучающихся в высшей школе, связанных с автоматизацией управления в технических системах и цифровизацией химико-технологических процессов

Ключевые слова: дегидрирование этилбензола, программное обеспечение, имитационное моделирование, параметрический синтез, предиктивное управление

Введение

На современном этапе научно-технического развития, независимо от используемой научной концепции проектирования автоматизированных систем управления техническими и технологическими объектами, начальной стадией разработки является создание алгоритмического обеспечения (АО) АСУТП. Важными задачами процесса синтеза АО, особенно при использовании в качестве основного подхода к созданию систем управления модельно – ориентированного проектирования, являются:

- создание математической модели объекта управления [1-2];
- разработка имитационной модели АСУ [3];
- идентификация и оптимизация параметров моделей.

В настоящее время, для решения этих задач, используется совокупность пакетов прикладных программ и интегрированных сред. При этом возможна интеграция SCADA-систем и систем имитационного моделирования для снижения затрат на разработку АО и повышения качества синтеза АСУ. В связи с этим, воз-

никает потребность в разработке специализированных компьютерных систем, позволяющих комплексно и эффективно решать совокупность данного класса задач [4].

В рамках проведенных научных исследований, направленных на разработку системы предиктивного функционального управления, реализующей алгоритм упреждающего расчета управляющих воздействий для такого сложного динамического объекта как процесс каталитического дегидрирования этилбензола в производстве стирола, разработано программное обеспечение (ПО) для имитационного моделирования АСУ.

Функциональность ПО

Программное обеспечение создано на основе разработанных математических моделей процесса дегидрирования, а также предложенных алгоритмов оценки параметров регулирующего устройства и расчета величин управляющих воздействий [5-7].

Заложенный в данное приложение функционал позволяет использовать и программно эмулировать подход к управлению, при использовании которого математическая модель реального объекта используется в контуре АСУ в

качестве структурного элемента, осуществляющего прогнозирование динамики изменения параметров состояния [8-9].

При этом, ПО предоставляет пользователю возможность проводить следующие операции и процедуры:

- имитационное моделирование физико-химических процессов, протекающих в реакторном блоке дегидрирования этилбензола при различных условиях проведения технологического процесса, а также таких параметров состояния реакционной среды как: температура, объем, парциальные давления, мольные парциальные объемы и теплоемкости компонентов реакционной среды [5];

- имитационное моделирование процесса с учетом динамики изменения закоксованности и активности каталитического слоя реактора [6];

- построение горизонтов прогноза изменения параметров состояния процесса с целью формирования базы динамических сценариев (базы знаний) предиктивной АСУ;

- оценка параметров MPC-регулятора системы управления;

- выполнение перерасчета и коррекции динамических траекторий параметров состояния процесса в зависимости от изменения параметров MPC-регулятора.

- программное эмулирование работы автоматизированной системы управления температурным режимом протекания процесса дегидрирования, использующей для расчета управляющих воздействий MPC-регулятор;

- программное эмулирование работы автоматизированной системы управления температурным режимом протекания процесса дегидрирования, использующей для расчета управляющих воздействий ПИД-регулятор;

- сравнительный анализ результатов имитационного моделирования динамики автоматизированной системы при реализации метода предиктивного управления и управления по отклонению регулируемой величины соответственно.

Структура ПО

В качестве инструмента разработки ПО использовался пакет прикладных программ *MATLAB* и встроенные в него библиотеки интегрированных сред *Simulink* и *AppDesigner*. Программная архитектура приложения имеет модульную структуру. Функциональными элементами (модулями) являются блоки, созданные как с использованием CASE-технологий среды *Simulink*, так самостоятельно разработанные на языке

Matlab. В соответствии с характером взаимодействия программных модулей, а также логикой и алгоритмом обмена данными между ними, структура программного обеспечения является иерархической. Каждый модуль создан в рамках концепции построения иерархии подсистем, которая реализована с помощью инструментов среды *Simulink*, заложенных в функциональный блок «Subsystem» (виртуальная подсистема). Все подсистемы структурно являются совокупностью исполняемых макро- и микромодулей. Инструментальные возможности среды разработки, гибкость настройки функциональных блоков обеспечивают расчет и синхронизацию обмена данными между программно реализованными математическими моделями технологического процесса и системы управления. Это позволяет осуществить динамический принцип взаимодействия между имитационными моделями [10]. Таким образом, создан инструмент, выполняющий программное эмулирование АСУ, а также оценку эффективности предложенной прогнозной модели и параметрического синтеза MPC-регулятора в сравнении с результатами имитационного моделирования автоматизированной системы, реализующей ПИД-закон управления.

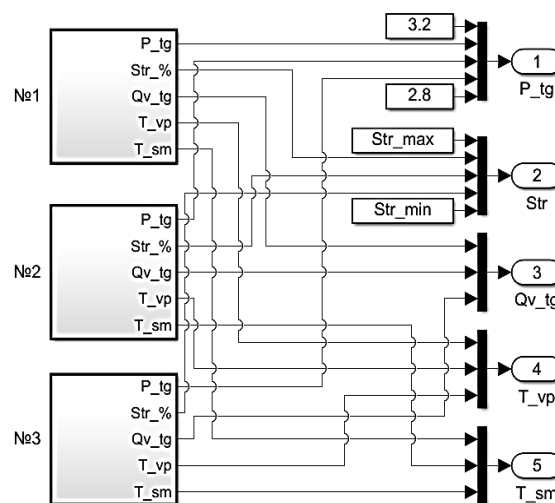


Рис. 1. Структура программного обеспечения

На рис. 1 представлена программная структура верхнего иерархического уровня компонентов разработанного приложения, который содержит в себе три системы (макромодуля), реализующие расчет модели физико-химических процессов, протекающих в реакторе дегидрирования и моделей системы управления:

1. Система расчета прогнозной модели процесса (Блок № 1).

2. Система имитационного моделирования АСУТП, реализуемая на базе МРС-регулятора (Блок № 2).

3. Система имитационного моделирования АСУТП, в которой в качестве управляющего устройства используется ПИД-регулятор (Блок № 3).

Функциональная структура блока № 1 (рис. 2) представляет собой совокупность подсистем, выполняющих:

- моделирование теплообменных процессов в пароперегревательной печи реакторного блока (блок 1.1);

- расчет теплообменных процессов в смешительной камере и по длине реакторного блока, при этом осуществляется моделирование динамики параметров состояния реакционной смеси (блок 1.2);

- оценку степени активности каталитического слоя реактора с учетом динамики экранирования его поверхности коксом (блок 1.3);

- расчет, оптимизацию и построение динамической траектории изменения управляющего воздействия на основе прогноза падения активности каталитического слоя реактора.

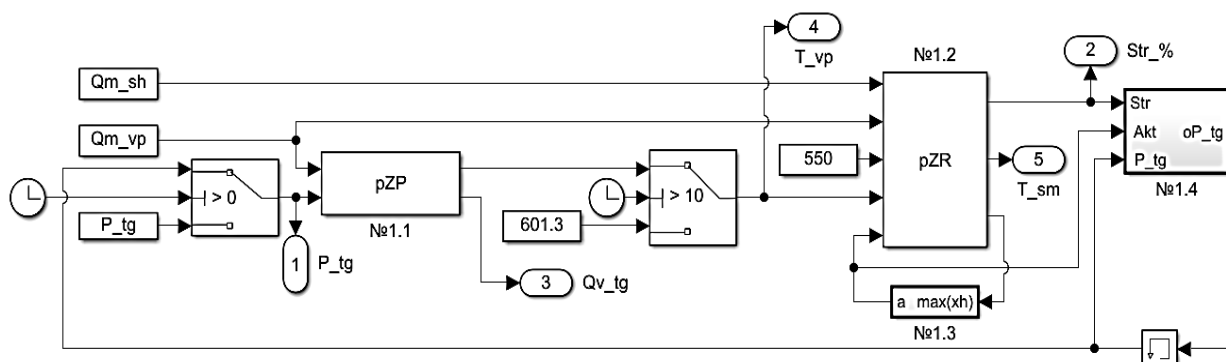


Рис. 2. Блок №1 – подпрограмма расчета прогнозной модели технологического процесса

Второй программный макромодуль (блок № 2) приложения (рис. 3) является системой имитационного моделирования предиктивной АСУТП, которая осуществляет имитационное моделирование работы системы управления процессом с использованием прогнозирующей модели и МРС-регулятора в качестве структурных элементов АСУТП. При этом, она включает в себя пять подсистем, которые выполняют следующие функции:

- расчет контура регулирования расхода топливного газа в пароперегревательную печь реактора (блок 2.1);

- моделирование теплообменных

процессов в пароперегревательной печи реакторного блока (блок 2.2);

- расчет динамики теплообменных процессов в смешительной камере и по длине реакторного блока, а также моделирование динамики параметров состояния реакционной смеси (блок 2.3);

- оценку степени активности каталитического слоя реактора с учетом динамики экранирования его поверхности коксом (блок 2.4);

- расчет, оптимизацию и построение предсказательной траектории изменения управляющего воздействия на основе прогноза изменения активности каталитического слоя реактора (блок 2.5).

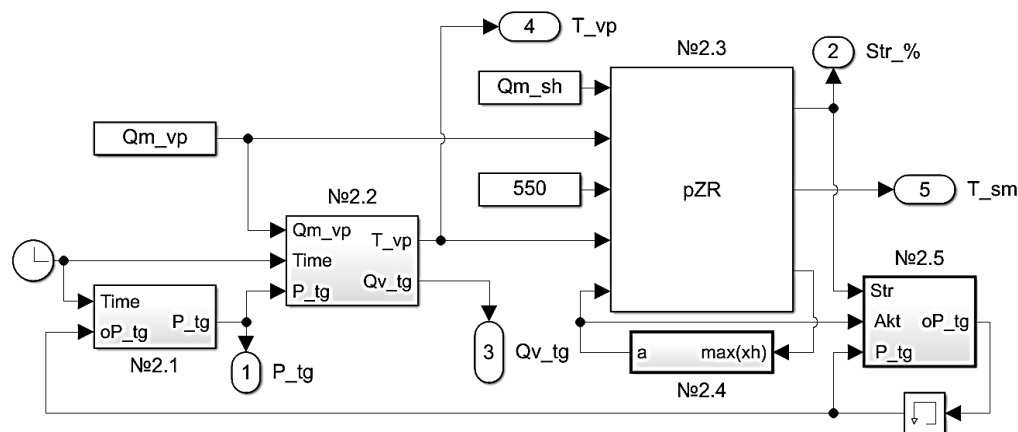


Рис. 3. Блок №2 – подпрограмма расчета АСУТП с МРС-регулятором

Блок № 3 (рис. 4) является третьей подсистемой, функциональное назначение которой заключается в эмуляции работы системы управления процессом, реализующей управление с помощью ПИД-регулятора. Также как и блок № 2, данная система включает в себя пять

модулей, выполняющих расчет контура регулирования расхода топливного газа в пароперегревательную печь реактора (блок 3.1). Вычислительные процессы и операции, выполняемые блоками 3.2 - 3.5, а также их структура идентичны соответствующим блокам в системе № 2.

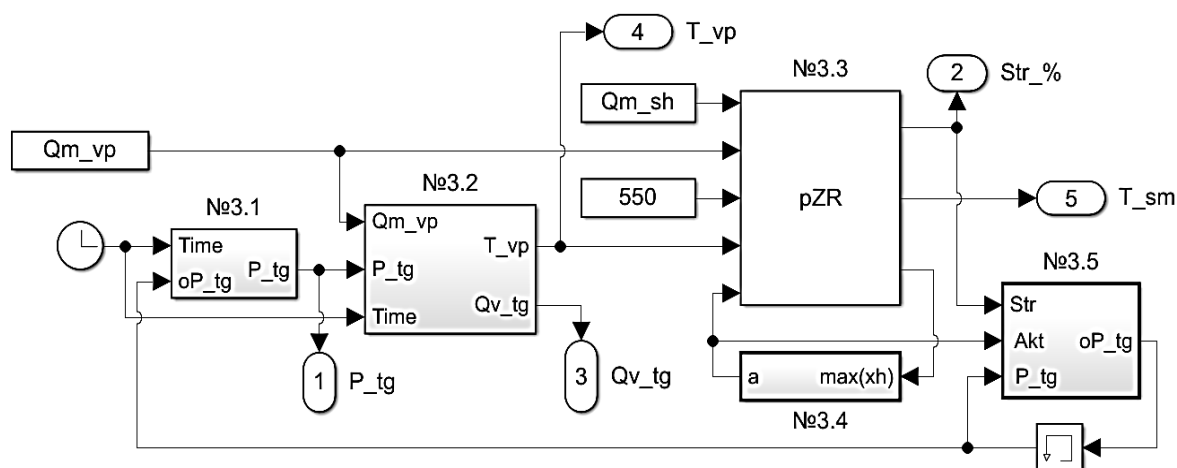


Рис. 4. Блок №3 – подпрограмма расчета АСУТП с ПИД-регулятором

Алгоритм функционирования ПО

Алгоритм работы программного обеспечения сводится к выполнению следующей последовательности математических и логических операций, а также операций взаимодействия с пользователем через графический интерфейс:

1. Запуск пользователем программного обеспечения.

2. Выбор режима работы программы:

- «Моделирование МРС-системы управления»;
- «Моделирование МРС- и ПИД-систем управления».

3. Ввод значений технологических параметров процесса.

4. Ввод настроек МРС-регулятора: значения горизонта прогноза, горизонта управления, весового коэффициента задающего сигнала, весового коэффициента скорости изменения управляющего сигнала.

5. Проверка корректности введенных значений горизонта прогноза и горизонта управления (значение горизонта управления не может быть больше или равно значению горизонта прогноза).

6. В случае выбора режима «Моделирование МРС-системы управления» осуществляется выполнение следующих вычислительных процессов:

- расчет траекторий изменения значений технологических параметров по прогнозной модели процесса;

- имитационное моделирование динамики системы управления, функционирующей на базе МРС-регулятора.

7. В случае выбора режима «Моделирование МРС- и ПИД-систем управления» осуществляется выполнение следующих вычислительных процессов:

- расчет траекторий изменения значений технологических параметров по прогнозной модели процесса;

- имитационное моделирование динамики системы управления, функционирующей на базе МРС-регулятора;

- имитационное моделирование динамики системы управления, функционирующей на базе ПИД-регулятора.

8. Если пользователь принимает решение, что полученные динамические траектории системы не соответствуют заданным требованиям, то повторно выполняются пункты 4-7 данного алгоритма.

9. Вывод на экран монитора результатов имитационного моделирования и параметрического синтеза МРС-регулятора.

10. Вывод результатов имитационного моделирования системы управления и параметров МРС-регулятора в файл формата .xlsx (Excel-файл).

11. Завершение работы программы.

Укрупненная блок-схема данного алгоритма приведена на рис. 5.

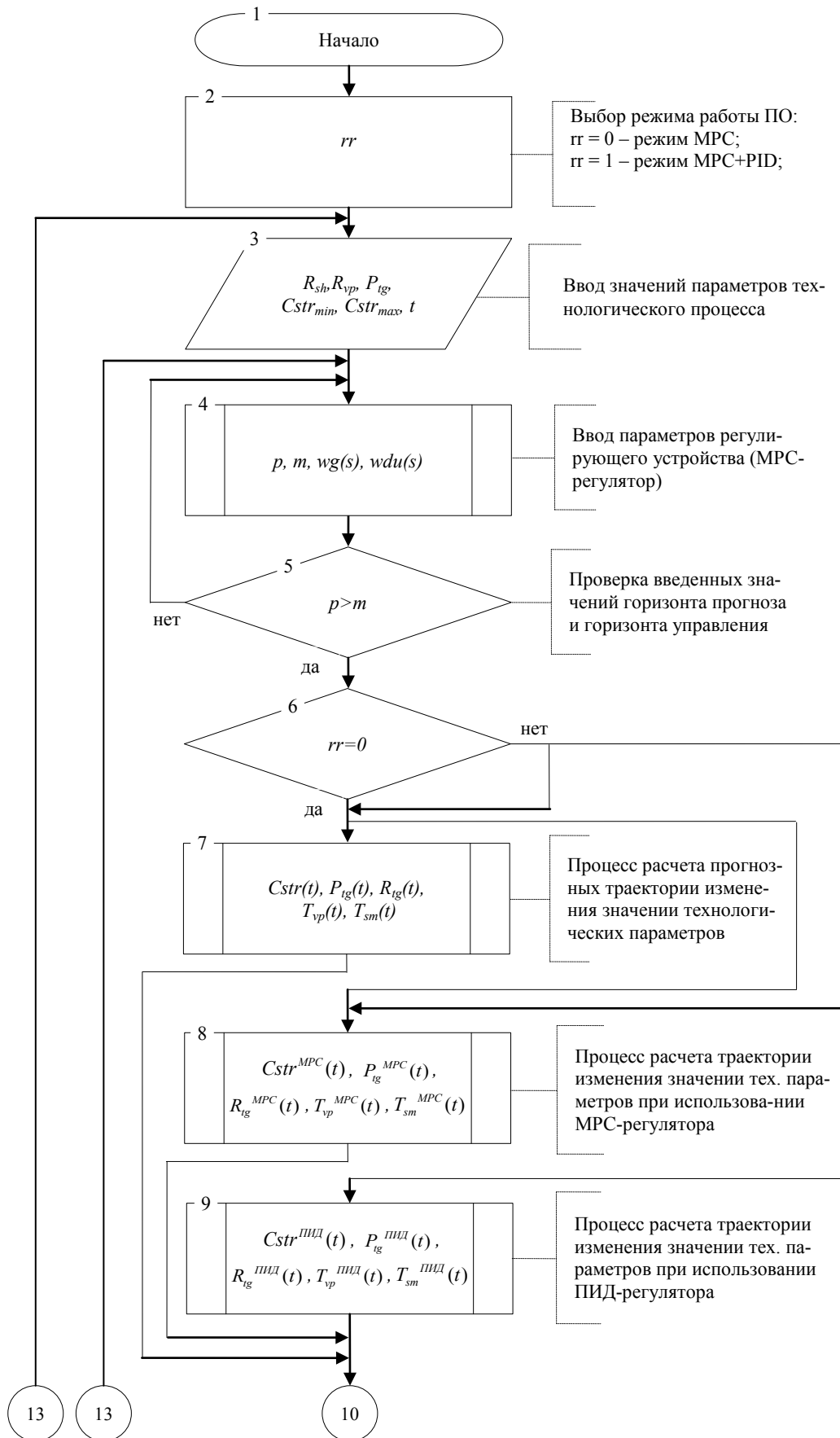


Рис. 5. Укрупненная блок-схема алгоритма работы программы

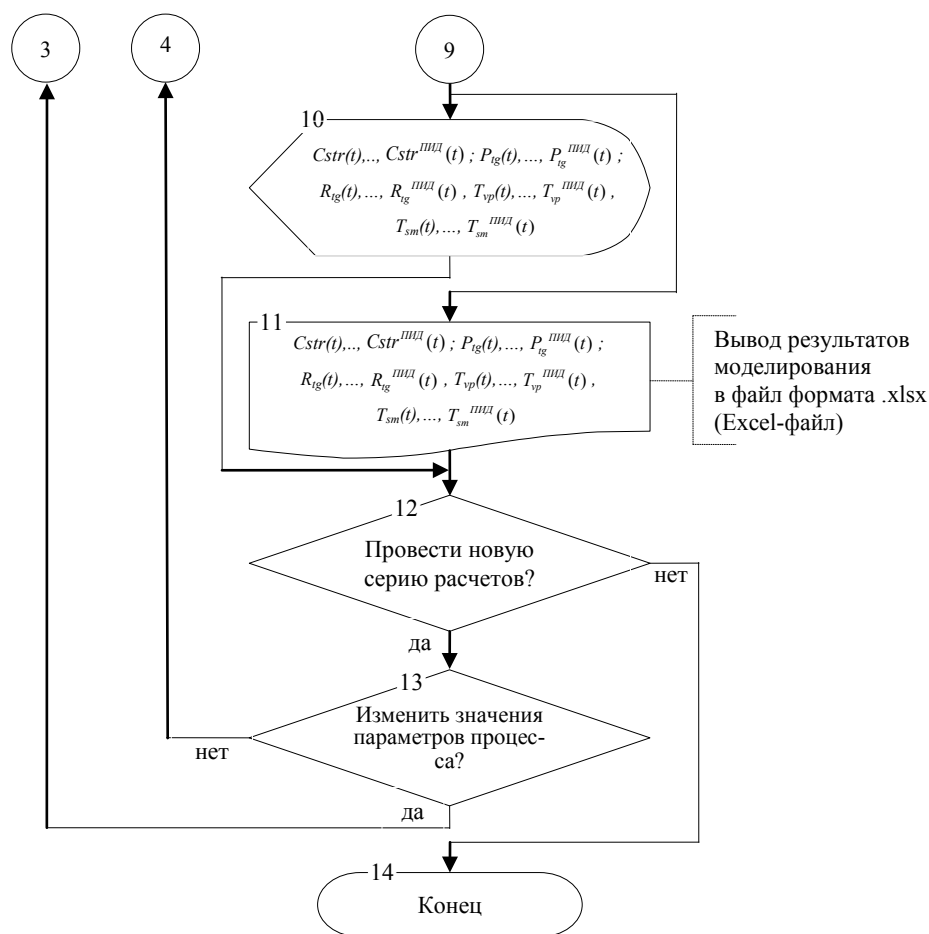


Рис. 5. Укрупненная блок-схема алгоритма работы программы (окончание)

На рис. 5: rr – логическая переменная, принимающая значения «0» или «1», и, показывающая, какой режим работы программного обеспечения выбран пользователем (режим «Лабораторной работы» или режим «Промышленной установки»); R_{sh} – массовый расход шихты, т/ч; R_{vp} – массовый расход пара, т/ч; $P_{иг}$ – давление топливного газа, кгс/см²; $Cstr_{min}$ – минимальный допустимый выход целевого продукта, %; $Cstr_{max}$ – максимальный допустимый выход целевого продукта, %; t – время протекания технологического процесса; p – горизонт прогноза; m – горизонт управления; $wg(s)$ – весовой коэффициент задающего сигнала; $wdu(s)$ – весовой коэффициент скорости изменения управляющего сигнала; $Cstr(t)$, $Cstr^{MPC}(t)$, $Cstr^{ПИД}(t)$ – значения концентрации стирола, рассчитанные по прогнозной модели, и в результате имитационного моделирования АСУ на базе MPC-регулятора и ПИД-регулятора соответственно, %; $P_{иг}(t)$, $P_{иг}^{MPC}(t)$, $P_{иг}^{ПИД}(t)$ – значение давления топливного газа, рассчитанные по прогнозной модели, и в результате имитационного моделирования АСУ на базе MPC-регулятора и ПИД-

регулятора соответственно кгс/см²; $R_{иг}(t)$, $R_{иг}^{MPC}(t)$, $R_{иг}^{ПИД}(t)$ – величины расхода топливного газа, рассчитанные по прогнозной модели, и в результате имитационного моделирования АСУ на базе MPC-регулятора и ПИД-регулятора соответственно, м³; $T_{вр}(t)$, $T_{вр}^{MPC}(t)$, $T_{вр}^{ПИД}(t)$ – значения температуры греющего пара рассчитанные по прогнозной модели, и в результате имитационного моделирования АСУ на базе MPC-регулятора и ПИД-регулятора соответственно, °C; $T_{см}(t)$, $T_{см}^{MPC}(t)$, $T_{см}^{ПИД}(t)$ – значения температуры парозтилбензольной смеси, рассчитанные по прогнозной модели, и в результате имитационного моделирования АСУ на базе MPC-регулятора и ПИД-регулятора соответственно, °C.

Интерфейс ПО

После запуска приложения на экране компьютера отображается стартовое окно программы (рис. 6).

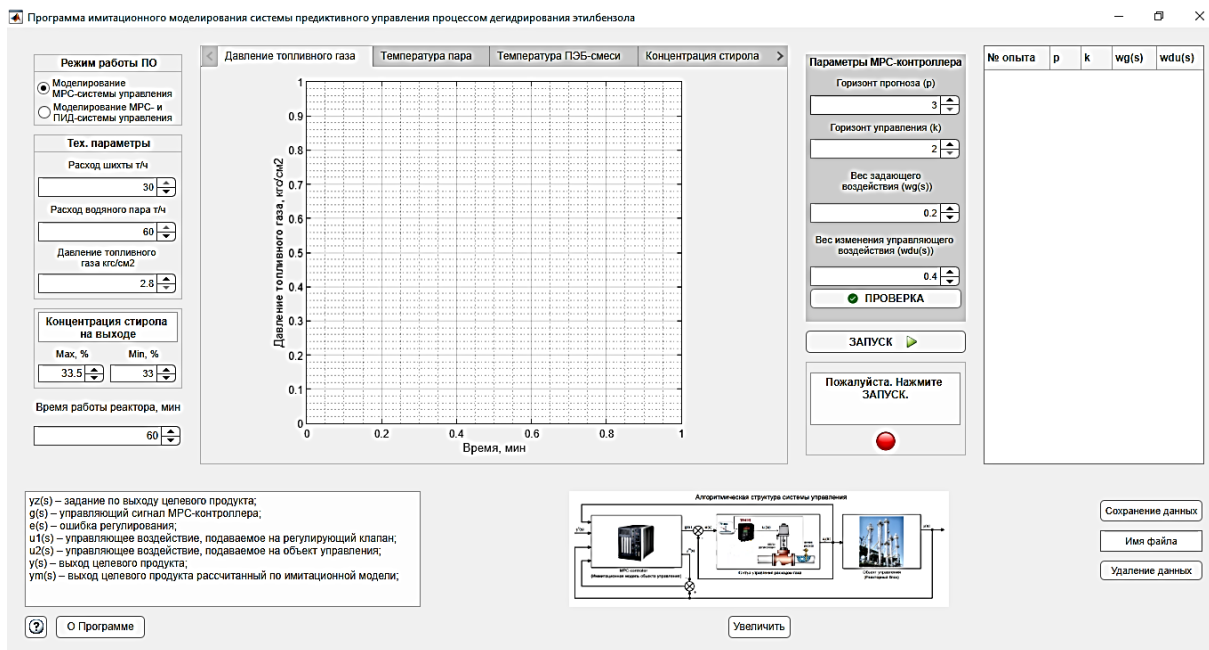


Рис. 6. Интерфейс стартового окна программного обеспечения

№ опыта	p	k	wg(s)	wdu(s)
1	3	2	0.2	0.4
2	5	2	0.2	0.4
3	10	2	0.2	0.4
4	15	2	0.2	0.4

Рис. 7. Таблица параметров трс-регулятора, используемых при имитационном моделировании системы

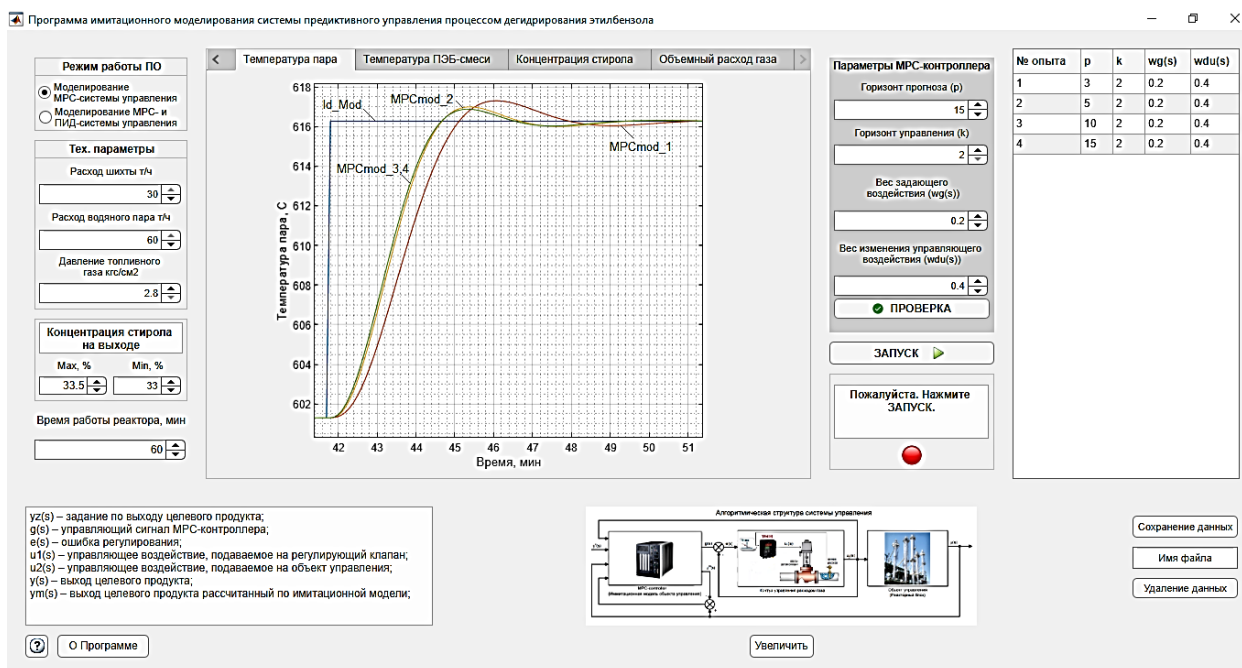


Рис. 8. Вывод в графическую область динамических траекторий изменения температуры пара на выходе из пароперегревательной печи

IdMod – прогнозная траектория изменения величины расхода топливного газа;
 MPCmod – график переходного процесса системы управления расходом топливного газа, реализующей метод PFC- управления с использованием MPC-регулятора в контуре управления

В правом верхнем окне программы расположена табличная область, в которую осуществляется запись значений параметров MPC-регулятора, для каждого из проведенных вычислительных экспериментов (рис. 7).

На стартовом окне приложения расположена графическая область, в которую осуществляется вывод результатов имитационного моделирования динамики объекта управления и результатов программного эмулирования работы системы управления при различных величинах настроек предиктивного регулирующего устройства. Графическая область содержит пять вкладок, каждая из которых отображает траектории изменения параметров состояния процесса: давление и расход топливного газа, поступающего в пароперегревательную печь, температура реакционной смеси на входе в реактор, концентрация стирола, температура водяного пара на выходе из пароперегревательной печи. Пример вывода результатов исследования динамики объекта представлены на рис. 8. Также приложение предоставляет возможность сохранить полученные результаты вычислительных экспериментов в электронную таблицу формата .xlsx офисного пакета MSExcel.

Выводы

Таким образом, предоставленные пользователю инструменты разработанного программного приложения обеспечивают выполнение рассмотренных выше задач процесса модельно-ориентированного проектирования предиктивной АСУ. ПО может быть использовано в проектных организациях для подготовки исходных данных при проектировании технологических линий и подготовки проектной документации производства стирола. Также, данное приложение может быть интегрировано в структуру действующих АСУТП для их трансформации в системы предиктивного функционального управления с последующим повышением производ-

ственных и экономических показателей эффективности процессов.

Литература

1. Мишта П.В., Бызов П.Г. Применение систем моделирования при разработке АСУТП // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2010. № 1 (61). С. 136.
2. Мишта П.В., Васильева Е.В. Моделирование. Новый метод проектирования АСУТП // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2010. № 1 (61). С. 144-146.
3. Берденников А.А., Ларионов М.В., Ушаков С.И. Имитационное моделирование работы функциональных блоков систем автоматического управления // Системы управления и обработки информации. 2019. № 2 (45). С. 5-13.
4. Михайлова К.Э., Петуховская В.Р., Соколич П.Ю. Моделирование подсистем АСУТП в среде динамического моделирования технических систем Simintech // Химия. Экология. Урбанистика. 2020. Т. 4. С. 298-302.
5. . Исследование изменения состава параэтилбензольной шихты в реакторе производства стирола с учетом парциальных давлений реагентов / С. Л. Подвальный, А. П. Попов, С. Г. Тихомиров, О. В. Карманова, О. Г. Неизвестный, Е. Н. Ковалева // Теоретические основы химической технологии. 2020. Т. 54. № 6. С. 775-783.
6. Моделирование кинетики процесса дегидрирования этилбензола с учетом дезактивации каталитического слоя реактора / В.К. Битюков, А.П. Попов, С.Г. Тихомиров, О.Г. Неизвестный // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. 2017. Т. 79. № 1 (71). С. 73-80.
7. Синтез системы управления процессом дегидрирования этилбензола на основе метода прогнозирующего функционального управления / С.Л. Подвальный, А.П. Попов, С.Г. Тихомиров, О.Г. Неизвестный // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2020. Т. 16. № 6. С. 7-14.
8. Ю. В. Шариков, Ф. Ю. Шариков. Системы управления с использованием математических моделей технологических объектов в контуре управления. Автоматизация технологических процессов // MathDesigner, 2016. № 1. С. 4-8.
9. Шариков Ю.В., Ткачев И.В., Снегирев Н.В. Моделирование оптимального управления нелинейным объектом // Теоретические основы химической технологии. 2020. Т. 54. № 5. С. 572-583.
10. Тимченко В.С. О принципах разработки программного комплекса имитационного моделирования состоящего из независимых имитационных моделей // Интеллектуальные системы управления на железнодорожном транспорте. Компьютерное и математическое моделирование: труды седьмой научно-технической конференции, 2018. С. 184-188.

Поступила 07.10.2023; принята к публикации 11.12.2023

Информация об авторе

Неизвестный Олег Геннадьевич – программист 2-й категории управления информационных технологий, Воронежский государственный университет инженерных технологий (394036, Россия, г. Воронеж, проспект Революции, д. 19), тел. +8 (951) 550 88 76, e-mail: o.neizvestnyi@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0121-3521>

SIMULATION PROGRAM FOR PREDICTIVE CONTROL OF THE ETHYLBENZENE DEHYDROGENATION PROCESS

O.G. Neizvestny

Voronezh State University of Engineering Technology, Voronezh, Russia

Abstract: a specialized software application designed to study and predict the dynamics of a predictive control system for the process of ethylbenzene dehydrogenation in styrene production is considered. The program has a modular structure. Based on the set of functions and options it performs, the application belongs to the class of multifunctional software. The software is a tool for carrying out simulation modeling and parametric synthesis of dynamic systems within the framework of the concept of model-based design. The tools provided to the user allow the following stages of model-based design of automated control systems to be performed: modeling of the control object; constructing forecast horizons for changes in process state parameters; parametric synthesis of a control device; control system modeling; comparative analysis of the results of modeling systems that implement the proportional-integral-differential control law and control based on a predictive controller using predictive models; formation and continuous updating of the information base of possible dynamic scenarios of processes with different settings of the MPC controller. There are two modes of operation of the application, which allows its functionality to be used in design organizations for scientific research, engineering calculations of existing laboratory and industrial ethylbenzene dehydrogenation plants. Also, it can be used as a computer training program for a series of professional disciplines in areas of training for students in higher education related to automation of control in technical systems and digitalization of chemical technological processes

Key words: ethylbenzene dehydrogenation, software, simulation modeling, parametric synthesis, predictive control

References

1. Mishta P.V., Byzov P.G. "Modeling systems Application in the development of automated control systems", *Proceedings of the Volgograd State Technical University (Izvestiya Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2010, no. 1 (61), p. 136.
2. Mishta P.V., Vasilyeva E.V. "Modeling. A new method of automated control system design", *Proceedings of the Volgograd State Technical University (Izvestiya Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2010, no. 1 (61), pp. 144-146.
3. Berdennikov A.A., Larionov M.V., Ushakov S.I. Simulation modeling operation of automatic control systems functional blocks // Information management and processing systems. 2019. No. 2 (45). pp. 5-13.
4. Mikhailova K.E., Petukhovskaya V.R., Sokolchik P.Yu. "Modeling of automated control system subsystems in the environment of dynamic modeling of Simintech technical systems", *Chemistry. Ecology. Urbanistics (Khimiya. Ekologiya. Urbanistika)*, 2020, vol. 4, pp. 298-302.
5. Podvalny S.L., Popov A.P., Tikhomirov S.G., Karmanova O.V., Neizvestny O.G., Kovaleva E.N. "Researching of changes in the paraethylbenzene charge composition in a styrene production reactor taking into account the reagents partial pressures", *Theoretical Foundations of Chemical Technology (Teoreticheskiye osnovy khimicheskoy tekhnologii)*, 2020, vol. 54, no. 6, pp. 775-783.
6. Bitukov V.K., Popov A.P., Tikhomirov S.G., Neizvestny O.G. "Modeling of the kinetics of the ethylbenzene dehydrogenation process taking into account the deactivation of the catalytic layer of the reactor", *The Bulletin of Voronezh State University of Engineering Technology (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta inzhenernykh tekhnologiy)*, 2017, vol. 79, no. 1 (71), pp. 73-80.
7. Podvalny S.L., Popov A.P., Tikhomirov S.G., Neizvestny O.G. "Synthesis of a control system for the process of ethylbenzene dehydrogenation based on the method of predictive functional control", *The Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2020, vol. 16, no. 6, pp. 7-14.
8. Sharikov Yu.V., Sharikov F.Yu. "Control systems using mathematical models of technological objects in the control loop. Automation of technological processes", *MathDesigner*, 2016, no. 1, pp. 4-8.
9. Sharikov Yu.V., Tkachev I.V., Snegirev N.V. "Optimal control modeling of a nonlinear object", *Theoretical foundations of chemical technology (Teoreticheskiye osnovy khimicheskoy tekhnologii)*, 2020, vol. 54, no. 5, pp. 572-583.
10. Timchenko V.S. "On the principles of the simulation software package development consisting of independent simulation models", *Intelligent control systems for railway transport. Computer and mathematical modeling (ISUZHT-2018): proc. of the seventh scientific and technical conf.*, 2018, pp. 184-188.

Submitted 07.11.2023; revised 11.12.2023

Information about the author

Oleg G. Neizvestny – Programmer the 2nd category, the Department of Information Technology Management, Voronezh State University of Engineering Technology (19 prosp. Revolyutsii, Voronezh 394036, Russia), tel.: +8 (951) 550 88 76, e-mail: o.neizvestnyi@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0121-3521>

РАЗРАБОТКА СТРУКТУРЫ СИСТЕМЫ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЯ ПРИ УПРАВЛЕНИИ БПЛА

В.А. Малиновкин, Н.В. Валуйских, В.Ф. Барабанов, М.Н. Аралов, А.В. Барабанов

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

Аннотация: область применения беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) всё больше расширяется. Они способны выполнять такие задачи, как доставка грузов, поиск пропавших, мониторинг и определение незаконных действий, проведение измерений уровня радиаций, температуры, взятие проб материалов для их анализа. Следует отдельно упомянуть, что БПЛА вносят свой вклад в спасательные операции, тушение пожаров, орошение полей и в военные действия. Рассмотрены основные функциональные возможности беспилотных летательных аппаратов, такие как высокое качество аэрофотосъемки, точное определение геопозиции, удаленное управление устройством. Определены следующие недостатки БПЛА: отсутствие функционала или наличие функционала с низкой точностью по проведению маршрута и его корректировки в зависимости от внешних факторов, потеря удаленного управления при утрате связи с дроном или поломкой камеры. Был произведен обзор интеллектуальных систем поддержки принятия решений на основе машинного обучения, глубоких сетей, Байесовских сетей и теории игр. Представлена сравнительная характеристика по ключевым параметрам: базовая принадлежность, необходимость обучения, время на обучение, точность, производительность, главные задачи при использовании и структура, объяснение выбора Байесовских сетей для решения поставленной задачи. Также в статье были предложены решения по устранению ранее упомянутых недостатков. Система принятия решений на базе Байесовской сети способна обрабатывать несколько источников данных, таких как информация о проложенном пути, информация от второстепенных источников с координатами труднодоступной местности и информация с распознанных изображений; а также способна принимать решение о дальнейшем передвижении. Такая реализация способна не только решить обозначенные проблемы, но и повысить показатель отказоустойчивости в системе управления БПЛА

Ключевые слова: беспилотные летательные аппараты, система принятия решений, машинное обучение, глубокие сети, теория игр, Байесовские сети

Введение

В настоящее время беспилотные летательные аппараты приобрели широкое использование в различных сферах деятельности человека. Так, например, беспилотные летательные аппараты (БПЛА) могут выполнять следующие задачи: доставка грузов, поиск пропавших, мониторинг и определение незаконных действий, проведение измерений уровня радиаций, температуры, взятие проб материалов для их анализа и т.д. Также дроны принимают участие в спасательных операциях, тушениях пожаров, осуществляют непрерывный мониторинг с целью распознавания опасности, в военных конфликтах.

Нередко участие БПЛА в той или иной операции гарантирует сохранение жизни и здоровья человека. Однако на текущий момент распространено удаленное управление беспилотниками [1]. Компания Yandex отходит от концепции использования такого рода управления и выпустила свой наземный дрон, который самостоятельно определяет препятствия и пре-

одолевает их. Такие роботы уже активно используются в сфере доставки грузов [2].

Программное управление БПЛА является актуальной задачей на сегодняшний день, так как пока нет достижения желаемых показателей качества и быстродействия. Однако с покрытием этой задачи рамки использования беспилотных летающих аппаратов значительно расширятся.

Обзор функциональных возможностей беспилотных летательных аппаратов

Рассмотрим основные функциональные преимущества беспилотных летательных аппаратов [3].

1) высокое качество аэрофотосъемки. Конструкция БПЛА включает в себя наличие камеры высокого разрешения, что позволяет производить аэрофотосъемку и получать данные, которые используются для аккумулирования и построения моделей для анализа поверхности.

2) точное определение геопозиции. Программное обеспечение с системой GPS позволяет с достаточно высокой точностью двигаться к поставленной цели, совершать маневры и возвращаться на базу посадки.

3) удаленное управление устройством. Беспилотные летательные аппараты могут управляться дистанционно, транслируя изображение на экран пилота. С помощью этой ключевой особенности устройства способны проникать в труднодоступные места, предоставляя возможность анализа изображения операторам [4].

За счет своей структуры беспилотные дроны могут быть использованы в экстремальных ситуациях. Однако существуют отрицательные стороны, которые не позволяют в полной мере раскрыть потенциал аппаратов, такие как: отсутствие функционала или наличие функционала с низкой точностью по проведению маршрута и его корректировки в зависимости от внешних факторов, эффективное взаимодействие между БПЛА. Кроме этого удалённое управление становится невозможным при потере связи с дроном или поломкой камеры.

При запрограммированном движении дрона стоит задача не только достижения поставленной цели с высокой точностью, но и гибкости ее исполнения. В ситуации, когда следует сменить трек своего пути, отклонение от маршрута или прокладывания нового путем анализа местности, БПЛА показывает низкую работоспособность. Такая ситуация, как показывает практика, заканчивается поломкой аппарата.

Для решения такого рода задач необходимо внедрение интеллектуальной системы поддержки принятия решений (ИСППР). Рассмотрим основные модели системы на базе машинного обучения, глубокого обучения, Байесовских сетей и теории игр.

Обзор интеллектуальных систем поддержки принятия решений

Машинное обучение

Модели ИСППР на базе машинного обучения созданы для обработки, аккумулирования входных данных с последующим обучением. Само обучение может быть контролируемым и самостоятельным. При контролируемом обучении предоставляется связка входных значений и получаемого результата. Точность такого подхода пропорциональна количеству предоставленных данных для обучения. Для этого обучения используются такие алгоритмы, как линейная и логистическая регрессия, мультиклассовая квалификация и метод опорных векторов. Этот вариант машинного обучения является наиболее популярным, так как можно регулировать покрытие вариаций выходной

величины путём изменения данных для обучения, следовательно, увеличивается точность. При самостоятельном обучении у системы отсутствуют эталонные данные, и обучение происходит непосредственно по тем результатам, которые существуют. Для этого обучения используются такие алгоритмы, как кластеризация методом k – средних, анализ основных и независимых компонентов и ассоциативные правила.

Глубокое обучение

Глубокое обучение – совокупность методов машинного обучения, основанных на имитации работы человеческого мозга в процессе обработки данных и создания паттернов, необходимых для принятия решений. Оно предназначено для работы с большим объемом данных и использует сложные алгоритмы для обучения модели. На рис. 1 отображён график зависимости производительности от объема данных для глубоких, средних, поверхностных и традиционных нейронных сетей.

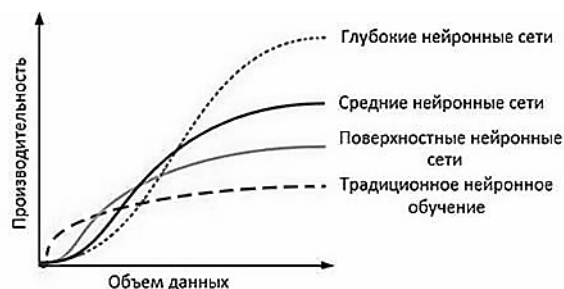


Рис. 1. График зависимости производительности от объема данных для глубоких, средних, поверхностных, традиционных нейронных сетей

На рис. 2 представлена структура нейронных сетей. Рассмотрим структуру глубокой нейронной сети.

Структура такой сети содержит три типа слоев:

- 1) входной слой;
- 2) скрытый слой;
- 3) выходной слой.

Входной слой принимает входные данные. Скрытые слои выполняют математические вычисления со входными данными. Глубина такой сети определяется количеством скрытых слоев. Выходной слой выдает выходные данные.

Глубокие сети часто используют в задачах распознавания голоса, изображения.

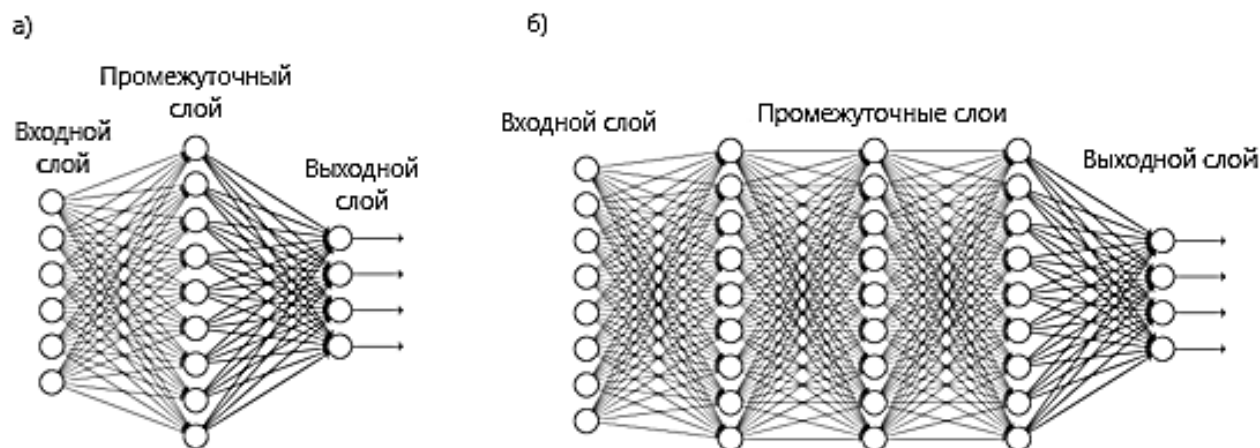


Рис. 2. Структура нейронных сетей:
а) неглубокие нейронные сети; б) глубокие нейронные сети

Байесовские сети

Байесовская сеть – это ориентированный ациклический граф, в котором каждой вершине соответствует случайная переменная. Его дуги кодируют отношения условной независимости между этими переменными.

Формула (1) позволяет определить необходимую величину вероятности в каждой вершине графа.

$$P(V_1, \dots, V_n) = \prod_{i=1}^n P(V_i | \text{parents}(V_i)), \quad (1)$$

где V_i – событие в вершине графа, $\text{parents}(V_i)$ – событие в вершине графа родителя.

Благодаря теореме Байеса возможно изменение значения вероятности, основанного на полученных или уже существующих данных. Общий смысл Байесовского подхода в следующем: пусть вначале реорганизации конкретного объекта есть n гипотез $Q_1, Q_2, \dots, Q_n$, характеризующих его различные возможные состояния. Основываясь на статистических данных, возможно обозначить им априорные вероятности $P(Q_1), P(Q_2), \dots, P(Q_n)$. Затем следуют экспериментальные действия, от результата которых зависит, наступит ли событие или нет некое событие F . Затем определяются условные вероятности возникновения события F при выборе i -й гипотезы $P_{Q_i}(F)$ как частоты наблюдения события F . Если событие F наступает, то происходит переоценка каждой гипотезы с помощью замены вероятностей $P(Q_i)$ на вероятности $P_F(Q_i)$.

Теория игр

Теория игр – раздел математики, которых изучает математические модели принятия решений в конфликтных ситуациях. Смысл теории в следующем: независимо от цели игры и её обстоятельств найдётся стратегия, которая позволит добиться успеха по определённым правилам. Теория игр используется в основном в задачах оптимизации при конфликтах участников игры, правила которой известны.

Сравнительная характеристика интеллектуальных систем поддержки принятия решений

В табл. 1 представлена сравнительная характеристика интеллектуальных систем поддержки принятия решений. Сравнение прошло по ключевым параметрам: базовая принадлежность, необходимость обучения, время на обучение, точность, производительность, главные задачи при использовании и структура.

В ходе сравнения можно сделать вывод, что Байесовская сеть больше подходит для решения поставленной цели, так как она не требует предварительного обучения и может обрабатывать любую информацию, которая влияет на событие. Кроме того, Байесовские сети из-за своей структуры удобнее в использовании в сочетании с решением задачи оптимального пути, так как используется одна и та же структура.

Таблица 1

Сравнительная характеристика интеллектуальных систем поддержки принятия решений

Признаки	Машинное обучение	Глубокие сети	Байесовские сети	Теория игр
Базовая принадлежность	Определение выходной величины путём обучения (контролируемого или неконтролируемого)	Определение выходной величины, путём обучения по слоям	Расчёт вероятностных связанных событий на основе новых и имеющихся статистических данных	Решение проблемы оптимизации в конфликте для достижения цели
Необходимость обучения	Да	Да	Нет	Нет
Время на обучение	Зависит от требуемой точности	Зависит от требуемой точности и количества данных	Не затрачивается	Не затрачивается
Точность	Зависит от правильного подбора эталонных данных	Зависит от количества данных для обучения	Зависит от актуальности входных данных	Зависит от достоверной информации правил игры
Производительность	Средняя	Зависит от количества данных	Зависит от количества взаимосвязанных событий	Низкая
Главные задачи при использовании	Для контролируемого обучения: подбор эталонных данных	Расчёт оптимального количества слоёв для минимизации времени на обучение и достижение желаемой точности	Перерасчёт вероятностей дочерних событий при изменении родительских	Определение правил игры, анализ поведения игроков, создание упрощённой модели конфликтной ситуации, определение стратегии
Структура	Входной и выходной слой	Входной, слой промежуточные слои и выходной слой	Ориентированный ациклический граф	Преимущественно матрица

Разработка структуры системы поддержки принятия решений на основе Байесовской сети

При использовании решения на базе Байесовской сети система способна обработать несколько источников данных: информацию о проложенном пути, информацию от второстепенных источников с координатами труднодоступной местности и информацию с распознанных изображений; и принять решение о дальнейшем движении.

На рис. 3 изображена схема, которая отражает процесс принятия решения на основе нескольких источников данных с использованием Байесовской сети [5-7].

Цель рассматриваемого алгоритма – определение безопасного и оптимального пути для полёта БПЛА с возможностью его корректировки.

На вход системы подаются входные координаты конечной точки. Далее через систему построения маршрута определяются возможные маршруты до конечной точки. Выбор кратчайшего пути необходим для оптимизации выполнения задачи по времени. В графе, где вершины представляют собой точки с координатами, рассчитывается начальная вероятность успешного прохождения маршрута. В этом случае вероятность прохождения текущей точки зависит от вероятности прохождения следующей точки. Далее вероятности корректируются в зависимости от данных, влияющих на благоприятный исход прохождения маршрута относительно точек маршрута. Источником данных являются второстепенные источники и информация от системы распознавания изображений. После этого по наиболее высокой вероятности в каждой точке определяется оптимальный маршрут, по которому БПЛА начинает своё движение. Если в процессе движения возникают какие-либо препятствия, зафикси-

рованные системой распознавания изображения, датчиками или другими изменяющимися параметрами, происходит уведомление систем второстепенных источников и направление данных с корректировкой перемещения в блок пересчёта вероятностей, где определяется следующая вершина графа. Таким образом, происходит процесс поиска оптимального пути для достижения конечной точки.

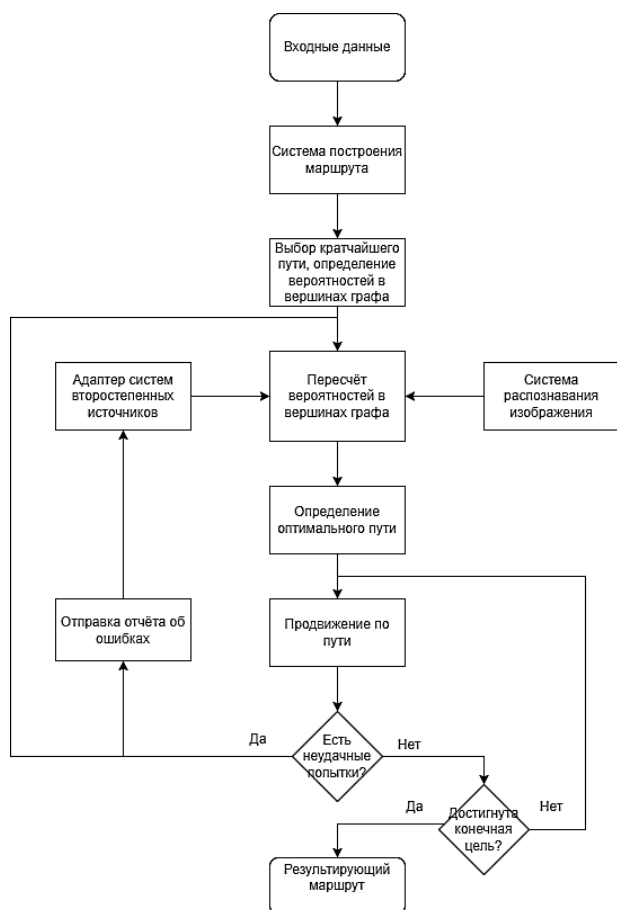


Рис. 3. Схема процесса принятия решения на основе нескольких источников данных с использованием Байесовской сети

Заключение

Был представлен обзор систем поддержки принятия решений и их сравнительная характеристика по следующим параметрам: базовая

принадлежность, необходимость обучения, время на обучение, точность, производительность, главные задачи при использовании и структура. В ходе сравнения был сделан вывод, что Байесовская сеть больше всего подходит для решения поставленной задачи, так как она не требует предварительного обучения, позволяет обрабатывать любую информацию, которая влияет на событие. Структура Байесовской сети удобнее в использовании для решения задачи нахождения оптимального пути.

Была представлена схема процесса принятия решения на основе информации от нескольких источников данных с использованием Байесовской сети, рассмотрен алгоритм принятия решения при построении маршрута до заданной точки.

В дальнейшем будет представлена реализация системы принятия решения вместе с второстепенными системами.

Литература

1. Моисеев В.С. Основы теории эффективного применения беспилотных летательных аппаратов: монография. Казань: «Школа», 2015. 444 с.
2. Особенности классификации БПЛА самолетного типа / Н.С. Сенюшкин, Р.Р. Ямалиев, Д.В. Усов, М. А. Мураева // Молодой ученый. 2010. Т. 1. № 11. 68с.
3. Коршунов Н.А., Котельников Р.В. Борьба с лесными пожарами: проблема информационного обеспечения авиасредствами и ее решение // Пожарная безопасность. 2008. № 1. 129 с.
4. Кузнецов Г.А. Беспилотные летательные аппараты с поршневыми двигателями: история создания, применение и перспективы развития // Научное обозрение. 2010. № 3. С. 40-45.
5. Чекинов Г.П., Куляница А.Л., Бондаренко В.В. Применение ситуационного управления в информационной поддержке принятия решений при проектировании организационно-технических систем // Информационные технологии в проектировании и производстве. 2003. № 2. С. 30-34.
6. Bonafede C.E., Giudici P. Bayesian networks for enterprise risk assessment // Physica A: Statistical Mechanics and its Applications. 2007. Vol. 382, issue 1. P. 22-28. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.physa.2007.02.065> (дата обращения: 26.10.2023).
7. Borsuk M. E., Stow C. A., Reckhow K. H. A Bayesian network of eutrophication models for synthesis, prediction, and uncertainty analysis // Ecological Modelling. 2004. Vol. 173. No 2. P. 219-239.

Поступила 30.10.2023; принята к публикации 12.12.2023

Информация об авторах

Малиновкин Владислав Алексеевич – аспирант, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: malinovkin@mail.ru

Валуйских Никита Владимирович – магистр, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: workvaluisish@mail.ru

Барabanов Владимир Фёдорович – д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: bvf@list.ru

Аралов Михаил Николаевич – канд. техн. наук, старший преподаватель, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: aralow@mail.ru

Барabanов Александр Владимирович – канд. техн. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: bav33@mail.ru

ANALYSIS OF THE MAIN FUNCTIONAL CAPABILITIES OF UNMANNED AERIAL VEHICLES

V.A. Malinovkin, N.V. Valuyskikh, V.F. Barabanov, M.N. Aralov, A.V. Barabanov

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract: the field of application for drones is expanding more and more. They are capable of performing such tasks as delivering supplies, searching for missing persons, monitoring and detecting illegal activities, measuring radiation levels and temperatures, and taking material samples for analysis. It should be mentioned separately that UAVs contribute to rescue operations, firefighting, field irrigation, and military operations. The main functionalities of unmanned aerial vehicles, such as high quality aerial photography, accurate geo-positioning, remote control of the device, are considered in the article. The following disadvantages of UAVs were identified: lack of functionality or availability of functionality with low accuracy on the route and its adjustment depending on external factors, loss of remote control in case of loss of communication with the drone or camera breakdown. The overview of intelligent decision support systems based on machine learning, deep learning networks, Bayesian networks and game theories was conducted. The comparative characteristic of key parameters is presented: basic affiliation, the need for training, training time, accuracy, performance, the main tasks when using and structure, explanation of the choice of Bayesian networks for solving the task. The article also proposed solutions to the previously mentioned disadvantages. The decision-making system based on the Bayesian network is able to process several data sources, such as: information about the route, information from secondary sources with the coordinates of the difficult terrain and information from the recognized images; and to decide on the further movement. Such an implementation can not only solve the above problems, but also increase the fault tolerance index in the UAV control system

Key words: drones, decision-making system, machine learning, deep networks, game theory, Bayesian networks

References

1. Moiseev V.S. "Fundamentals of the Theory of Effective Use of Unmanned Aerial Vehicles. Monograph" ("Osnovy teorii effektivnogo primeneniya bespilotnykh letatel'nykh apparatov. Monografiya"), Kazan, Shkola, 2015, 444 p.
2. Senyushkin N. S., Yamaliev R.R., Usov D.V., Muraeva M.A. "Features of the classification of aircraft-type UAVs", *Young scientist (Molodoy uchenyy)*, 2010, no. 11, vol.1, p. 68.
3. Korshunov N.A., Kotelnikov R.V. "Fighting forest fires: the problem of information support by aircraft and its solution", *Fire safety (Pozharnaya bezopasnost)*, 2008, no. 1, p. 129.
4. Kuznetsov G.A. "Unmanned Aerial Vehicles with Piston Engines: History of Creation, Application and Development Prospects", *Scientific Review (Nauchnoye obozreniye)*, 2010, no. 3, pp. 40-45.
5. Chekinov G.P., Kulyanitsa A.L., Bondarenko V.V. "Application of situational management in information support for decision-making in the design of organizational and technical systems", *Information technologies in design and production (Informatsionnyye tekhnologii v proyektirovanii i proizvodstve)*, 2003, no. 2, pp. 30-34.
6. Bonafede C.E., Giudici P. "Bayesian networks for enterprise risk assessment", *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 2007, vol. 382, iss. 1, pp. 22-28, available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.physa.2007.02.065> (accessed 26.02.2013).
7. Borsuk M.E., Stow C.A., Reckhow K.H. "A Bayesian network of eutrophication models for synthesis, prediction, and uncertainty analysis", *Ecological Modelling*, 2004, vol. 173, no 2, pp. 219-239.

Submitted 30.10.2023; revised 12.12.2023

Information about the authors

Vladislav A. Malinovkin - Postgraduate student, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: malinovkin@mail.ru

Nikita V. Valuyskikh – Master's student, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: workvaluyskikh@mail.ru

Vladimir F. Barabanov – Dr. Sc. (Technical), Professor, Head of Department, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: bvf@list.ru

Mikhail N. Aralov – Cand. Sc. (Technical), Senior Lecturer, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: aralow@mail.ru

Alexander V. Barabanov – Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: bvf@list.ru

ТЕСТОВЫЙ КОНТРОЛЬ КОНЕЧНЫХ АВТОМАТОВ

Г.В. Петрухнова, М.Г. Усачев, Е.В. Попова

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

Аннотация: объектом исследования являются особенности автоматизации процессов тестового контроля работы конечных автоматов. Конечный автомат используется в качестве модели цифрового устройства или программного модуля. Операция тестового контроля – это информационная операция, при которой на одни контакты конечного автомата подаётся совокупность входных сигналов, а с других контактов снимаются реакции на эти сигналы. Тест контроля представлен бинарной матрицей и формируется генератором псевдослучайных чисел. При этом используется технология тестирования взвешенными псевдослучайными наборами. Вес входа – это частота подачи единичного логического сигнала на вход конечного автомата. Тестовый контроль конечного автомата осуществляется на основе заданного весового вектора. Разработанный программный продукт позволяет определить вес входа путем решения задачи оптимизации распределения вероятностей входных сигналов на основе обобщенного энтропийного критерия. Программный продукт позволяет управлять объектами тестирования, задавать вес для каждого входа конечного автомата, выбирать критерий оптимизации весового вектора из числа заданных, указывать параметры процесса оптимизации, проводить тестовый контроль конечных автоматов на основе заданного весового вектора, сохранять информацию об объекте тестирования, сохранять информацию о ходе тестового контроля и оптимизации, просматривать результаты тестового контроля и хода оптимизации. Представлен интерфейс программного продукта. Программный продукт может быть использован для исследования процессов оптимизации тестов и тестового контроля различных автоматных моделей

Ключевые слова: конечный автомат, энтропия, бинарная матрица, цифровое устройство, программный модуль, тестовый контроль

Введение

Путь к новым знаниям всегда лежит через получение, переработку и хранение информации. Современное общество является информационным. Процессы цифровизации, протекающие во всем мире, направлены на обеспечение автоматизации процессов получения, переработки и хранения информации во всех сферах человеческой деятельности и являются неотъемлемой чертой прогресса.

Стремительное развитие информационных технологий предопределило выход сферы приложений теории автоматов за пределы моделирования электронных устройств. Абстракции и модели, развитые в рамках теории автоматов, используются в различных научных дисциплинах. Среди них можно выделить такие, как грамматика, математическая лингвистика, теория логических моделей, математическая логика и формальные аксиоматические системы, теория кодирования, теория вычислительной сложности, автоматное программирование и другие. Стоит отметить, что конечные автоматы тесно связаны с теорией алгоритмов и моделированием программных объектов. Модель объекта, представляемая в виде определенного

формального автомата, называется автоматной моделью.

Данная статья посвящена тестовому контролю конечных автоматов (КА) [1] – [3] и автоматизации процессов такого тестирования. Представлена структура программного обеспечения для решения задач, возникающих при тестировании объектов, представленных в виде конечных автоматов.

В статье рассматривается контроль КА по принципу «годен – не годен». Операция контроля предполагает подачу на входы конечного автомата совокупности входных данных, снятие с выходов этой модели реакции на входные воздействия и последующий анализ информации. Контроль КА по принципу «годен – не годен» важен для внутрисхемного тестирования цифровых устройств, контроля аналогов автоматной модели, модернизации алгоритмов и программного обеспечения и других операций.

Задача автоматизации тестирования КА распадается на несколько относительно независимых частей [1]: формирование и оптимизацию тестовой последовательности, генерацию тестовых воздействий, проверку результатов тестового воздействия. В статье рассматривается структура программного обеспечения процессов генерации тестов контроля автоматных моделей.

Постановка задачи

Тест контроля будет формироваться генератором псевдослучайных чисел. При этом на каждый вход конечного автомата будут подаваться логические единицы с разной вероятностью (технология взвешенного тестирования объектов). Вес входа $u = (u_1 \dots u_N)$, $0 < u_i < 1$, $i = 1, \dots, N$, будет определяться путем решения задачи оптимизации распределения вероятностей входных сигналов. Для решения задачи оптимизации использован метод покоординатного спуска.

Реакцию конечного автомата на входные воздействия представим в виде матрицы из K столбцов и N строк, каждый элемент которой равен нулю или единице:

$$\begin{matrix} Y_{11} & Y_{12} & \dots & Y_{1K} \\ Y_{21} & Y_{22} & \dots & Y_{2K} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ Y_{N1} & Y_{N2} & \dots & Y_{NK} \end{matrix} \quad (1)$$

Задача оптимизации весового вектора может быть поставлена следующим образом. Требуется найти вектор $u^* = (u_1^*, \dots, u_N^*)$, лежащий в области допустимых значений $u^* \in U^N = \{u = (u_1 \dots u_N), 0 < u_i < 1, i = 1, \dots, N\}$. При этом выбранная целевая функция H должна иметь минимальное значение.

Под целевой функцией H будем понимать один из критериев качества, которые можно получить на основе обобщенного энтропийного критерия качества (2):

$$\begin{aligned} H = & \alpha \cdot \left(\sum_{i=1}^M p_i \cdot \ln(p_i) + (1 - p_i) \cdot \ln(1 - p_i) \right) \\ & + \beta \cdot \left(\sum_{i=1}^K q_i \cdot \ln(q_i) + (1 - q_i) \cdot \ln(1 - q_i) \right) + \\ & \gamma \cdot \left(\sum_{i=1}^C w_i \cdot \ln(w_i) \right) \end{aligned} \quad (2)$$

где α, β, γ – коэффициенты;

M – длина теста;

K – число контрольных точек (входов, выходов, внутренних точек конечного автомата, к которым имеется доступ);

$C = 2^K$ возможных видов реакций (выходных наборов) конечного автомата на входные воздействия;

p_i – вероятность появления единичного сигнала в i -м выходном наборе;

q_i – вероятность появления единичного сигнала в i -ой контрольной точке;

w_i – вероятность появления i -го двоичного набора $(y_{i1}, y_{i2}, y_{i3}, \dots, y_{ik})$ как реакции конечного автомата на внешнее воздействие.

На основе обобщенного критерия (2) получают несколько частных энтропийных

критериев, коэффициенты которых представлены в табл. 1.

Таблица 1

Частный критерий	Частные критерии		
	Коэффициенты		
	α	β	γ
H_1	$1/N$	0	0
H_2	0	1	0
H_3	0	0	1
H_4	$1/N$	$1/K$	0
H_5	$1/N$	0	$1/K$
H_6	0	1	1
H_7	$1/N$	$1/K$	$1/K$

Результаты решения задачи оптимизации представлены в работах [4], [5].

На основе представленных выше энтропийных критериев разработано программное обеспечение для автоматической генерации тестов контроля конечных автоматов.

Структура программного обеспечения

Пользовательский интерфейс представлен следующими:

- выбор критерия оптимизации весового вектора согласно выражению (2) и табл. 1;
- выбор объекта оптимизации;
- выбор веса для каждого входа конечного автомата;
- выбор начального шага для изменения веса входа;
- задание количества экспериментов;
- выбор условия окончания оптимизации;
- просмотр результата тестирования и хода оптимизации;
- просмотр предыдущих результатов тестирования;
- добавление и изменение объекта тестирования.

В качестве объектов тестирования могут выступать программные модули и прототипы логических устройств. Разработанный программный продукт позволяет не только находить близкий к оптимальному весовой вектор КА, но и сохранять информацию об объекте тестового контроля, о ходе процесса оптимизации и о ходе тестирования. Данная информация, в зависимости от используемого объекта контроля, сохраняется в четырех разных типах файлов:

- файл с описанием тестируемого устройства;

- файл с описанием тестируемого программного модуля;
- файл с результатами оптимизации весового вектора;
- файл с результатами тестового контроля.

Данные файлы создаются в процессе сериализации информационных классов программы в формат xml.

Рассмотрим основные диалоговые окна пользовательского интерфейса.

Выбрав пункт меню «Главная», пользователь имеет возможность оперировать объектами тестирования: добавлять, изменять и удалять. Для перехода на окно добавления устройства в меню необходимо выбрать следующее: «Главная» → «Устройство» → «Добавить».

Имя объекта задается в поле «Название устройства». После нажатия на кнопку «Добавить» откроется проводник, в котором нужно выбрать путь для сохранения описания объекта.

Перед редактированием объекта устройства загружается ранее добавленный файл путем нажатия на кнопку загрузки «...». Далее откроется проводник, в котором необходимо выбрать файл с описанием устройства. Для сохранения внесенных изменений следует нажать на кнопку «Изменить».

Для изменения или удаления устройства в меню нужно перейти по следующему пути: «Главная» → «Устройство» → «Изменить/Удалить».

Манипуляции с программой как объектом тестирования проводятся по аналогии с устройством.

Для оптимизации весового вектора необходимо выбрать пункт «Оптимизация». На рис. 1 представлен интерфейс окна поиска близкого к оптимальному весового вектора для объекта, представляющего собой устройство.

Данные для оптимизации	
Условие остановки алгоритма	
Критерий	
Шаг изменения частоты	0.1
Погрешность	0.001
Количество экспериментов	1000

Рис. 1. Окно для запуска процесса оптимизации весового вектора для объекта устройства

Перед началом процесса оптимизации необходимо выбрать ранее сохраненный файл с описанием объекта устройства и путь для сохранения результата оптимизации. Стоит отметить, что процесс оптимизации весового вектора осуществляется только на эталонных объектах.

Используя диалоговое окно, представленное на рис. 3, пользователь имеет возможность настроить параметры процесса оптимизации весового вектора, другими словами, выбрать:

- условие окончания выполнения алгоритма;
- критерий оптимизации из числа представленных формулой (2);
- шаг изменения веса каждого из входов объекта тестирования или количество итераций;
- длину выборки, сформированной генератором псевдослучайных чисел, на основе которой вычисляется вес входа.

Алгоритм оптимизации весового вектора может быть остановлен либо заданному числу итераций, либо по заданной погрешности:

$$|H_{i-1} - H_i| < eps, \quad (3)$$

где H_{i-1} – значение выбранного критерия оптимизации, полученное на предыдущем шаге;

H_i – значение выбранного критерия оптимизации, полученное на текущем шаге;

eps ($eps < 0.03$) – заранее определенная погрешность.

Также алгоритм будет остановлен, если в процессе оптимизации шаг изменения веса уменьшится до нуля.

Для тестирования объекта необходимо соответственно выбрать либо путь «Тестирование» → «Устройство» либо путь «Тестирование» → «Программа». Для начала тестирования выбирают эталонный объект с близким к оптимальному весовым вектором и тестируемый объект. Для сохранения результатов тестирования требуется указать файл для записи результатов тестирования и путь к нему. На рис. 2 представлен примерный вид окна с результатами тестирования.

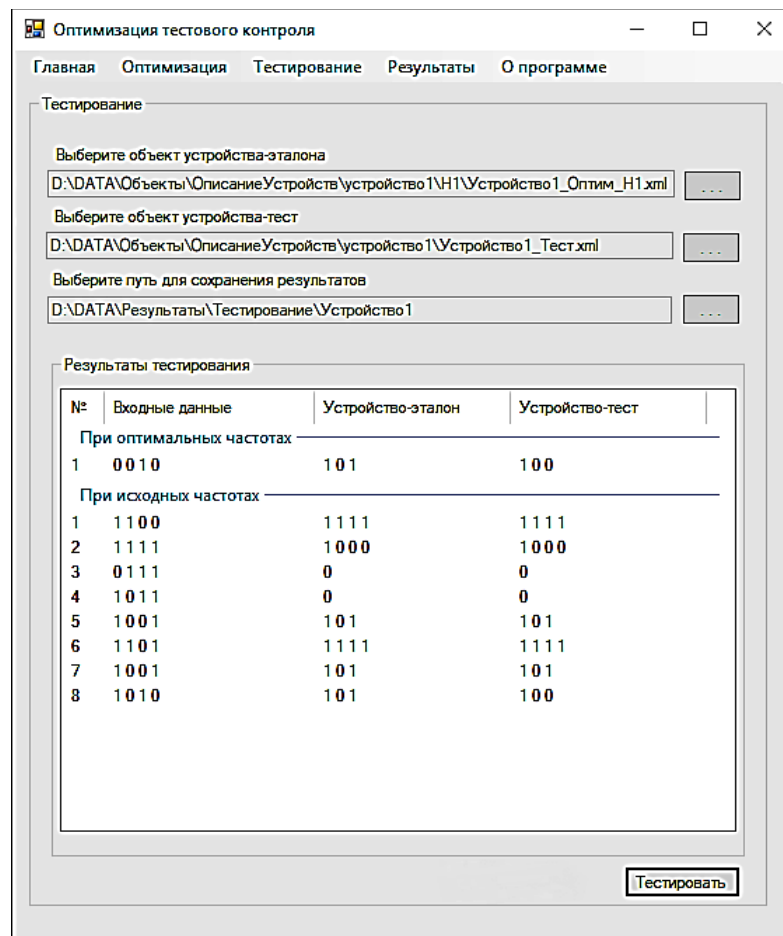


Рис. 2. Вид окна с результатами тестирования объекта

Из рисунка видно, что при использовании близкого к оптимальному весового вектора ошибка в работе автомата, названного «Устройство 1» находится уже при подачи первого тестового набора, при использовании входных частот логической единицы, равных 0.5, – на восьмом тестовом наборе.

В рассматриваемом программном продукте также имеется возможность просмотра результатов хода оптимизации и тестирования.

Разработанное программное обеспечение позволило исследовать методики оптимизации весового вектора и последующего тестирования конечных автоматов. Результаты проведенных исследований показали эффективность взвешенного тестирования конечных автоматов.

Заключение

В данной статье рассматриваются задачи, возникающие при тестировании объектов, которые могут быть представлены как конечные автоматы. Контроль конечного автомата по принципу «годен – не годен» важен для проведения внутрисхемного тестирования цифровых устройств, контроля аналогов автоматной модели, модернизации алгоритмов и программного обеспечения и других операций.

В статье представлена структура программного обеспечения для подготовки и проведению тестового контроля конечных автоматов по принципу «годен – не годен». Задача автоматизации тестирования конечного автомата распадается на несколько относительно независимых частей: управление объектами тестирования, формирование и оптимизация тестовой последовательности, генерация тестовых воздействий, проверка результатов тестового

воздействия. В статье представлен пользовательский интерфейс основных подсистем разработанного программного продукта.

Проведенные экспериментальные исследования позволяют сделать вывод о целесообразности использования методик взвешенного тестирования конечных автоматов. Разработанный программный продукт может быть использован в учебном процессе в рамках дисциплин, связанных с синтезом цифровых автоматов, тестированием программного обеспечения, тестированием цифровых схем, а также для научных исследований процессов оптимизации тестов и тестового контроля различных автоматных моделей.

Литература

1. Бурдонов И.Б., Косачев А.С., Кулямин В.В. Использование конечных автоматов для тестирования программ // Институт Системного Программирования РАН – URL: https://www.ispras.ru/publications/ispolzovanie_konechnykh_avtomatov_dlya_testirovaniya_programm.pdf
2. Верификация автоматных программ / С.Э. Вельдер, М.А. Лукин, А.А. Шалыто, Б.Р. Яминов. СПб.: Наука, 2011. 244 с.
3. Янкин Ю.Ю., Шалыто А.А. Метод создания программного обеспечения модулей, выполненных на основе программируемых логических интегральных схем // Системы управления и обработки информации. 2013. № 26. С. 128-135.
4. Петрухнова Г.В. Энтропийный критерий на основе меры симметричности бинарной матрицы // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2019. № 1. С. 66-72.
5. Петрухнова Г.В. Анализ свойств симметрии бинарной матрицы в задачах тестирования цифровых устройств // Актуальные проблемы прикладной математики, информатики и механики: труды Междунар. науч. конф. Воронеж: Научно-исследовательские публикации, 2019. С. 1595-1606.

Поступила 30.10.2023; принята к публикации 12.12.2023

Информация об авторах

Петрухнова Галина Викторовна – канд. техн. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: gvpetruhnova@mail.ru

Усачев Михаил Геннадьевич – магистр, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: mikhail.usachev.2000@mail.ru

Попова Екатерина Викторовна – бакалавр, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: katporova2000@mail.ru

TEST CONTROL PROCESSES OF FINITE STATE MACHINES

G.V. Petrukhnova, M.G. Usachev, E.V. Popova

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract: the object of research is the automation features of test control processes of finite state machines. A finite state machine is used as a model of a digital device or a software module. Test control operation is testing information operation [1], in which a set of in-circuit control input signals is being fed into inputs of finite state machines while output responses to these signals are being taken from other contacts. The control test is presented in the form of a binary matrix and is generated by a pseudo-random number generator. In this case, technology of weighted pseudo-random testing is used. Input weight is the frequency of supplying a single logical signal to the input of the finite state machines. Test control of the finite state machine is carried out on the basis of a given weight vector. The developed software product allows you to determine the input weight input by solving the problem of optimizing the probability distribution of input signals based on a generalized entropy criterion. The software product allows you to manage test objects, to set the weight for each input of the state machine, to select optimization criteria for the vector of weights from the specified set, to set parameters for the optimization process, to conduct test control of the finite state machines, to save information about the test object based on the set vector of weights, to save information about the testing management and the optimization process; to view test results and optimization process. The software product interface is presented. The software product can be used to research the processes of test optimization and test control of various automaton models.

Key words: finite state machine, entropy, binary matrix, digital device, software module, test control, automation of processes.

References

1. Burdonov I.B., Kosachev A.S., Kulyamin V.V. "The use of finite state machines for testing programs", Institute for System Programming RAS (Institut Sistemnogo Programirovaniya RAN), available at: https://www.ispras.ru/publications/ispolzovanie_konechnykh_avtomatov_dlya_testirovaniya_programm.pdf
2. Velder S.E., Lukin M.A., Shalyto A.A., Yaminov B.R. "Verification of automaton programs" ("Verifikatsiya avtomatnykh program"), St. Petersburg, Nauka), 2011, 244 p.
3. Yankin Yu.Yu., Shalyto A.A. "A method for creating software for modules based on programmable logic integrated circuits", *Management and information processing systems (Sistemy upravleniya i obrabotki informatsii)*, 2013, no. 26, pp.128-135.
4. Petrukhnova G.V. "Entropy criterion based on measure of a binary matrix symmetry", *The Bulletin of Ryazan State Radio Engineering University (Vestnik Ryazanskogo gosudarstvennogo radiotekhnicheskogo universiteta)*, 2019, no 1, pp. 66-72.
5. Petrukhnova G.V. "The analysis of of binary matrix symmetry properties in the tasks concerned with testing of digital devices", proc. of intern. conf. *Applied Mathematics, Computational Science and Mechanics: Current Problems (Aktualnyye problemy prikladnoy matematiki, informatiki i mekhaniki)*, Voronezh, Nauchno-issledovatel'skiye publikatsii, 2019, pp. 1595-1606.

Submitted 30.10.2023; revised 12.12.2023

Information on the authors

Galina V. Petrukhnova – Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 3940264, Russia), e-mail: gvpetruhnova@mail.ru

Mikhail G. Usachev – Master's Student, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 3940264, Russia), e-mail: mikhail.usachev.2000@mail.ru

Ekaterina V. Popova – Undergraduate Student, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 3940264, Russia), e-mail: katpopova2000@mail.ru

ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ ЗАДАЧИ ЛИНЕЙНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ НА БАЗЕ МУРАВЬИНОГО АЛГОРИТМА

Д.А. Баранов, М.А. Белых, В.Ф. Барабанов, Н.И. Гребенникова, В.Н. Черников

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

Аннотация: описывается программная реализация линейной оптимизации на базе муравьиного алгоритма. Актуальность использования природных алгоритмов связана с необходимостью параллельной обработки данных, с возможностью создания искусственных биологических систем для решения сложных задач. Алгоритм включает в себя создание колонии муравьев, формирование ими путей поиска, исходя из феромонов, оставленных другими муравьями, или случайным образом. Структура и функциональность алгоритма реализованы в виде отдельных объектов разрабатываемой системы (классов). Также предоставлено математическое описание различных аспектов алгоритма, таких как вероятностная функция выбора пути, обновление сил феромонов и пр. Приведена визуализация работы алгоритма, а в частности, движение муравьев между итерационными шагами работы алгоритма в процессе поиска оптимального решения. В заключении приведен сравнительный анализ с некоторыми имеющимися модулями, представляющими собой реализации других эвристических алгоритмов, подходящих для решения задачи линейной оптимизации. В качестве перспектив развития программных реализаций вычислений можно отметить направление, связанное с объединением различных видов природных вычислений в одной системе: муравьиный алгоритм во многом схож по характеристикам с пчелиным, что позволяет выбирать более сильные стороны одного из них

Ключевые слова: линейная оптимизация, муравьиный алгоритм, природные алгоритмы, эвристические алгоритмы, роевой интеллект

Введение

Линейная оптимизация находит применение в различных сферах, от экономики и инженерии до науки о данных и искусственного интеллекта. Однако, как и вся область вычислительной оптимизации, линейная оптимизация сталкивается с вызовами, связанными со сложностью задач, размером данных и ограничениями.

Одним из инновационных подходов, внесшим большой вклад в решение задачи оптимизации, является использование природных алгоритмов. Эти алгоритмы моделируют поведение природных систем, таких как муравьиные колонии, стаи птиц, и другие, чтобы находить решения сложных задач оптимизации [1, 2]. В данной статье внимание будет сосредоточено на одном из наиболее известных и эффективных природных алгоритмов – алгоритме муравьиной колонии. Общий принцип работы алгоритма приведен в источнике [3, 4].

Муравьиный алгоритм, принцип работы которого основан на естественном поведении муравьев при поиске кратчайшего пути к источнику пищи, является мощным инструментом для решения широкого спектра задач оптимизации.

В данной статье будет рассмотрена программная реализация муравьиного алгоритма с

использованием языка программирования Python 3.9. На вход система будет получать функцию, которая в свою очередь может иметь неограниченное число переменных и возвращает значение; верхний и нижний порог каждой переменной, а также некоторые параметры конфигурации (число итераций, размер колонии и пр.).

Математическое описание работы системы

В начале работы системы, помимо задания различных параметров конфигурации, формируется колония из определенного количества муравьев. Основную роль в системе играет цикл, ограниченный заданным числом итераций, в теле которого идет проход по всей колонии.

После каждого своего шага муравей формирует феромон, сила которого формируется в соответствии с формулой (1).

$$f_{\varphi} = \frac{v}{b} c, \quad (1)$$

где v – полученное муравьем значение целевой функции, b – последний лучший результат в системе на момент вычисления, c – коэффициент, полученный из конфигурации системы для стимуляции силы феромонов в случае получения слишком маленького значения функции.

В самом начале работы gnp вызывается вероятностная функция для определения вектора движения муравья, в соответствии с которым на протяжении нескольких итерационных цик-

лов он будет двигаться либо в сторону одного из феромонов, либо «своим ходом».

Принцип работы вероятностной функции реализован следующим образом: вероятности интенсивностей всех «чужих» феромонов в системе распределены в пределах от нуля до разницы между единицей и шансом муравья пойти своим ходом, как показано в формуле (2).

$$p(\varphi) = \frac{f_{\varphi}}{\sum_{i=0}^{\bar{n}_a} f_{\varphi_i}} (1 - \delta). \quad (2)$$

Здесь f_{φ} – сила феромона, полученного в качестве аргумента функции, δ – шанс муравья пойти своим ходом (статическое значение из конфигурации системы), $\bar{n}_a$ – количество «чужих» для муравья феромонов.

Вероятностная функция формируется следующим образом:

$$f = \begin{cases} \varphi_1 & i \in [0; p(\varphi_1)) \\ \varphi_2 & i \in [p(\varphi_1); p(\varphi_2)) \\ \dots & \dots \\ \varphi_n & i \in [\varphi_{n-1}; p(\varphi_2)) \\ \emptyset & i \in [1 - \delta; 1] \end{cases}, \quad (3)$$

где φ – экземпляр класса феромона, i – сгенерированное случайное вещественное значение в пределах $[0;1]$, $\emptyset$ – отсутствие феромона (муравей пойдет своим ходом).

Вероятностная функция (3) получает на вход случайное, равномерно распределенное значение, находящееся в пределах $[0;1]$ и на выходе возвращает либо феромон, либо пустое значение, что будет означать выбор в пользу «своего хода».

Муравей формирует вектор следующего шага самостоятельно в зависимости от своей целевой точки. В случае наличия феромона, принцип вычисления приведен в соответствии с формулой (4).

$$\overline{c_a} = |c_{\varphi} - c_a| \cdot \omega. \quad (4)$$

Здесь $\overline{c_a}$ – новые координаты местоположения муравья, c_{φ} – координаты местоположения феромона, c_a – прежние координаты местоположения муравья, ω – коэффициент передвижения (скорость муравья), генерируемый случайным образом и имеющий равномерное распределение.

После движения муравей получает новые значения своих координат, которые становятся новыми аргументами целевой функции, производится вычисление значения целевой функции. Если значение целевой функции является лучшим, то значения аргументов функции и само значение записываются в тело класса как «лучший результат».

Программная модель системы линейной оптимизации

Система состоит из трех основных классов: Ant, AntColonyAlgorithm и Pheromone. UML-диаграмма классов системы представлена на рис. 1.

Класс Ant представляет собой субъект муравья, который содержит в себе текущее местоположение в виде вектора значений, ограничивающих условия задачи, значение целевой функции на момент работы и функции для передвижения как «своим ходом», так и к определенному феромону. Кроме того, в теле класса муравья производится вычисление координат следующего шага при передвижении.

С точки зрения работы алгоритма, феромон представляет собой специальное химическое вещество, которое муравьи откладывают не своем пути [5]. Когда муравей выбирает направление движения, он учитывает не только свои собственные предпочтения в поиске кратчайшего пути, но и опыт других муравьев. Он получает этот опыт, а точнее, информацию о нем, непосредственно через уровень феромонов, оставленных на каждом пути.

Следовательно, концентрация феромона служит показателем желания муравья выбрать определенный путь. Это означает, что муравьи, следуя за следами других, могут принимать более информированные решения и находить оптимальные пути для общей пользы.

Таким образом, муравьиный алгоритм исследует комбинированное знание и опыт всей колонии в целом, что делает его мощным и эффективным инструментом для решения задач оптимизации в различных областях.

В системе за работу феромонов отвечает класс Pheromone, который в свою очередь хранит в себе информацию о своем «хозяине» и силу воздействия (intensity), которая с каждым шагом итерации декрементируется.

Основная работа системы производится в классе AntColonyAlgorithm. Он используется для непосредственного диалога с пользователем и содержит в себе множество конфигурационных переменных (количество итераций, размер колонии, шанс выбора муравьем собственного пути и лучший результат вычисления целевой функции в колонии), числовые ограничения задачи, целевую функцию и ряд следующих функций: построение и вычисление вероятностной функции выбора муравьем следующего шага пути, генерация колонии и основная функция запуска алгоритма (run).

Схема алгоритма функции `run` приведена на рис. 2. В теле функции инициализируется колония муравьев и входные значения такие,

как целевая функция, ограничения, численность колонии и пр.

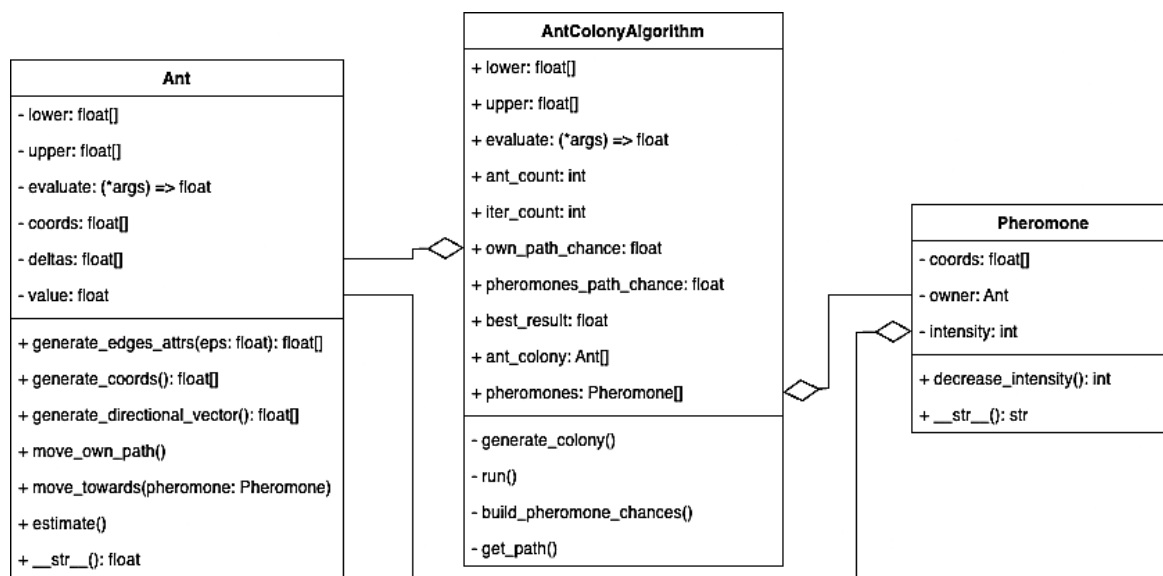


Рис. 1. Диаграмма классов

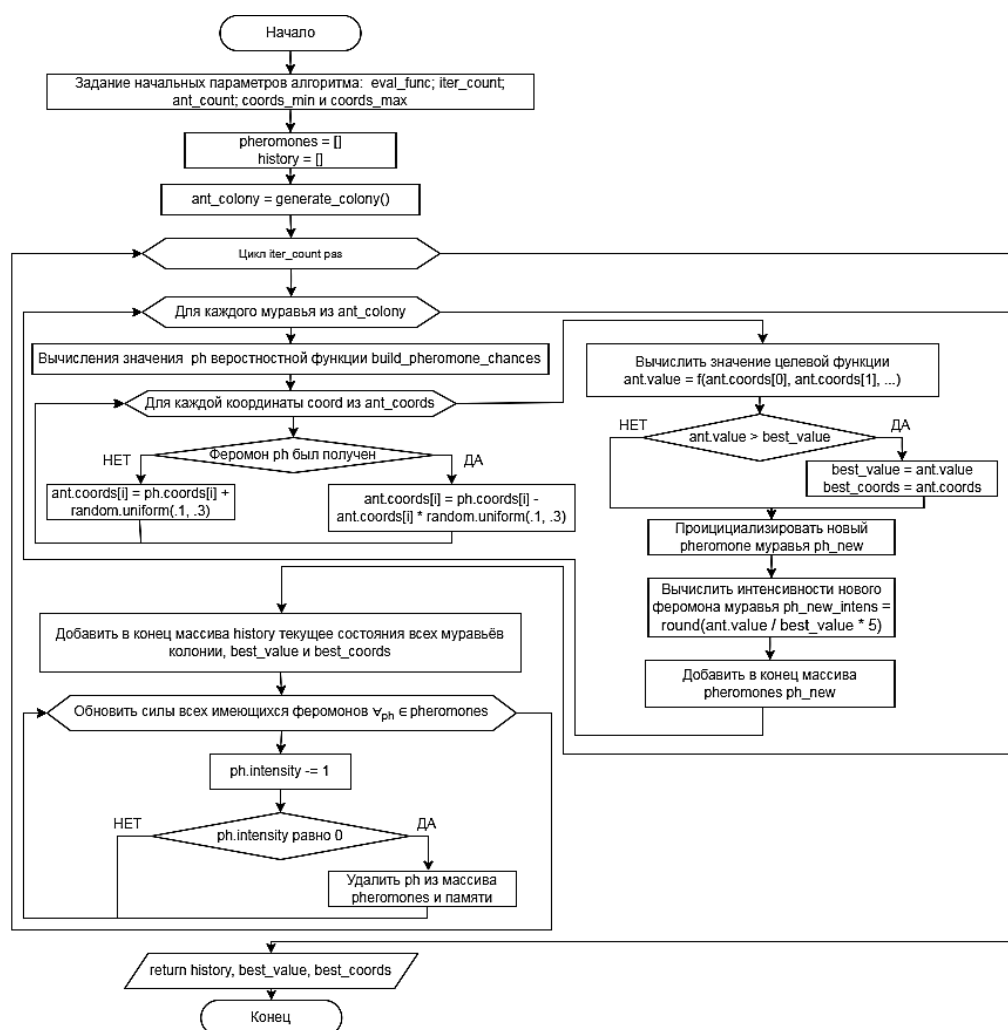


Рис. 2. Схема алгоритма функции `run`

В процессе итераций, производится проход по всем муравьям сформированной колонии, в процессе которого производится выбор пути между одним из имеющихся феромонов или «собственным». После произведения шага на случайную величину по одному из путей, вычисляется значение целевой функции из значений, присущих муравью. Далее, производится сравнение полученных результатов с лучшими, на момент вычисления, зафиксированными результатами в системе. В случае, если муравей превзошел лучший результат, в системе фиксируется новый.

Каждый муравей, в конце своего хода, инициализирует новый феромон, который получаем координаты муравья на момент инициализации и интенсивность, зависящую от соотношения полученного результата к лучшему.

За пределами прохода по муравьям, значения каждого феромона в системе обновляется путем декрементации значения интенсивности.

Апробация разработанной программной реализации алгоритма

Разработанный алгоритм разработан в виде модуля, работающего в среде Python. Он импортируется в проект и состоит из класса `AntColonyAlgorithm`. При инициализации, класс принимает на вход такие параметры, как кортеж нижнего порога значения, кортеж верхнего порога значений и целевую функцию. Размерность кортежей должна соответствовать количеству аргументов, которые принимает целевая функция.

Для взаимодействия с другими системами, помимо лучшего результата оптимизации, класс записывает состояние каждого муравья для каждого шага итерации, что позволяет провести отладку работы алгоритма и визуализировать его.

Для проведения апробации работы алгоритма, была поставлена следующая задача линейной оптимизации: необходимо вычислить максимальное значение функции и точки для функции (5) на промежутке от -5 до 5 включительно для каждой переменной

$$f(x, y) = \frac{3x^2 + 2xy + 4y^2}{x + y} \rightarrow \max. \quad (5)$$

Визуализация работы муравьиного алгоритма представлена на рис. 3.

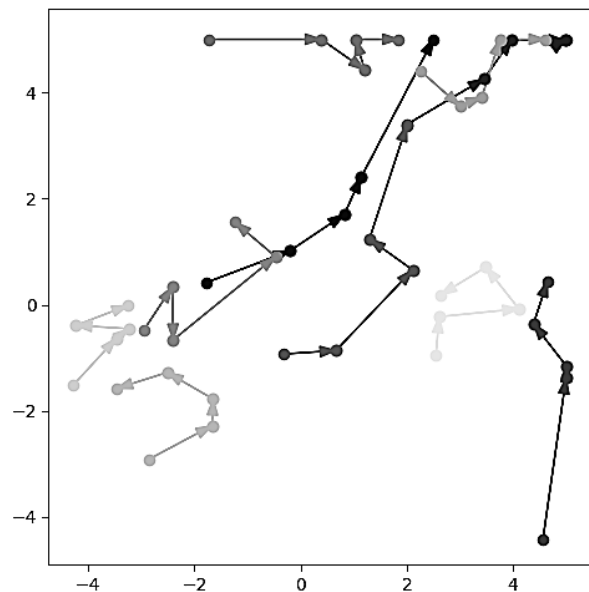


Рис. 3. Визуализация работы муравьиного алгоритма

Можно заметить, что некоторые особи двигаются в сторону других, создавших ранее феромоны. Кроме того, замечается стремление как можно большего числа муравьев прийти к некоторой точке, расположенной в правом верхнем углу графика, что обусловлено высокой силой феромона, который был выработан муравьем, нашедшим наибольшее значение функции, что в целом соответствует общим принципам работы алгоритма муравьиной колонии.

Был проведен сравнительный анализ других эвристических алгоритмов, подходящих для решения задачи линейной оптимизации:

1. генетический алгоритм, реализация которого получена из библиотеки `dear` [6, 7];
2. алгоритм пчелиной колонии, для применения которого был использован модуль, представленный в [8];
3. метод имитации отжига, запуск которого был осуществлен посредством запуска модуля `simanneal` [9, 10].

Апробация происходила на основе поставленной ранее задачи вычисления максимального значения функции (5) с ограничениями [-5; 5]. В качестве входных значений алгоритмов, было указано максимальное число итераций в количестве 100 и число субъектов (особей) в количестве 20, вероятностные характеристики были приведены к значению 0,2. В процессе апробации, проводились измерения по ряду критериев, медианные значения которых приведены в табл. 1.

Таблица 1

Сравнительный анализ алгоритмов оптимизации

Критерий	Алгоритм муравьиной колонии	Генетический алгоритм	Алгоритм пчелиной колонии	Имитация отжига
Число итераций до достижения максимума	65	73	68	80
Погрешность результата относительно истинного	0,21	0,34	0,24	0,4
Потребление памяти, КБ	3.1	5.5	4.3	3.3
Алгоритмическая сложность [11]: n – число итераций, k – объем задачи, p – размер популяции	$O(n^2 \times k)$	$O(k \times n \times p)$	$O(n \times k)$	$O(n)$

Исходя из полученных результатов, можно сделать вывод, что реализация муравьиного алгоритма позволяет получить решение задачи с меньшими памятьными затратами и числом итераций по сравнению с другими алгоритмами, однако алгоритмически он остается довольно сложным, сравнимо по сложности с генетическим. Также из результатов можно заметить, что муравьиный алгоритм во многом схож по характеристикам с пчелиным, что может говорить о некой степени взаимозаменяемости между ними. Из результатов были опущены такие характеристики, как «устойчивость» и «объем данных» т.к. приведенные алгоритмы показали приблизительно схожие друг между другом результаты.

Заключение

Рассмотрены основные моменты программной реализации муравьиного алгоритма: была представлена диаграмма классов разработанной системы, развернутое описание каждого из классов и его поведение, а также приведен математический аппарат решения отдельных подзадач, которые встали в процессе адаптации алгоритма под решение задач линейной оптимизации, такие как вероятностная функция выбора муравья в пользу того или иного феромона, его поведение как при выборе феромона, так и при выборе в пользу самостоятельного поиска.

Была произведена визуализация и апробация работы алгоритма. Кроме того, была составлена сравнительная характеристика между

реализациями других алгоритмов, подходящих для решения задачи линейной оптимизации.

Стоит отметить, что реализация представляет собой основу для дальнейших исследований, усовершенствования работы, а также практического применения муравьиного алгоритма в промышленности.

Литература

1. Yang X., Yang Xin-She Nature-Inspired Optimization Algorithms // Elsevier Inc, 2014. 263 с.
2. Mohamed A.W. Oliva D., Suganthan P.N. Handbook of Nature-Inspired Optimization Algorithms: The State of the Art Volume II: Solving Constrained Single Objective Real-Parameter Optimization Problems // Intelligent Technologies and Robotics, Intelligent Technologies and Robotics (R0), 2022. 264 с.
3. Штовба С.Д. Муравьиные алгоритмы // ExponentaPro. Математика в приложениях. 2003. № 4. С. 70-75.
4. Dorigo M. Optimization, Learning and Natural algorithms // Ph. D. Thesis, Politecnico di Milano. Italian, 1992.
5. Кажаров А.А., Курейчик В.М. Муравьиные алгоритмы для решений транспортных задач // Известия РАН. Теория и системы управления. 2010. № 1. С. 32-45.
6. Вирсански Э. Генетические алгоритмы на Python. Пер. с англ. А.А. Слинкина // ДМК Пресс, 2020. 286 с.
7. deap PyPI. URL: <https://pypi.org/project/deap/>.
8. rwoilbercq/Hive: Artificial Bee Colony Algorithm in Python. URL: <https://github.com/rwoilbercq/Hive>.
9. Землянский А.В., Штыков Г.А. Программная реализация метода имитации отжига и анализ его эффективности // Вестник Пензенского государственного университета. 2017. № 4 (20). С. 76-81.
10. simanneal PyPI. URL: <https://pypi.org/project/simanneal/>.
11. Владстон Ф.Ф., Мото П. Теоретический минимум по Computer Science. Сети, криптография и data science // СПб: Питер, 2022. 208 с.

Поступила 30.10.2023; принята к публикации 12.12.2023

Информация об авторах

Баранов Дмитрий Алексеевич – аспирант, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: obliviion333@gmail.com

Белых Михаил Алексеевич – аспирант, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: belykh.ma@yandex.ru

Барabanов Владимир Федорович – д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: bvf@list.ru

Гребенникова Наталия Ивановна – канд. техн. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: g-naty@yandex.ru

Черников Вячеслав Николаевич – канд. техн. наук, старший преподаватель, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: devious.code@gmail.com

SOFTWARE IMPLEMENTATION OF THE LINEAR OPTIMIZATION PROBLEM BASED ON THE ANT ALGORITHM

D.A. Baranov, M.A. Belykh, V.F. Barabanov, N.I. Grebennikova, V.N. Chernikov

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract: this article describes the software implementation of linear optimization based on the ant algorithm. The relevance of using natural algorithms is associated with the need for parallel data processing, with the possibility of creating artificial biological systems to solve complex problems. The algorithm involves creating a colony of ants, forming their search paths based on pheromones left by other ants, or randomly. The structure and functionality of the algorithm are implemented as separate objects of the system being developed (classes). The article also provides a mathematical description of various aspects of the algorithm, such as the probabilistic path selection function, pheromone forces update, etc. The visualization of the algorithm operation is given, and in particular, the movement of ants between iterative steps of the algorithm in the process of finding the optimal solution. In conclusion, a comparative analysis is given with some of the available modules, which are implementations of other heuristic algorithms suitable for solving the linear optimization problem. As prospects for the development of software implementations of computing, we can note the direction associated with the unification of various types of natural computing in one system: the ant algorithm is largely similar in characteristics to the bee, which allows you to choose the stronger sides of one of them

Key words: linear optimization, ant algorithm, natural algorithms, heuristic algorithms, swarm intelligence

References

1. Yang X. "Nature-Inspired Optimization Algorithms", Elsevier Inc, 2014, 263 p.
2. Mohamed A.W., Oliva D., Suganthan P.N. "Handbook of Nature-Inspired Optimization Algorithms: The State of the Art Volume II: Solving Constrained Single Objective Real-Parameter Optimization Problems", Technologies and Robotics (R0), 2022, 264 p.
3. Shtovba S.D. "Ant algorithms", *ExponentaPro. Mathematics in Applications*, 2003, no. 4, pp. 70-75.
4. Dorigo M. "Optimization, Learning and Natural algorithms", Ph. D. Thesis, Politecnico di Milano, Italian, 1992.
5. Kazharov A.A., Kureychik V.M. "Ant algorithms for solving transport problems", *News of the Russian Academy of Sciences. Theory and control systems (Izvestiya RAN. Teoriya i sistemy upravleniya)*, 2010, no. 1, pp. 32-45.
6. Virsanski E. "Genetic algorithms in Python" ("Geneticheskiye algoritmy na Python"), trans. from Eng. by A.A. Slinkin, Moscow, DMK Press, 2020, 286 p.
7. "deap PyPI", available at: <https://pypi.org/project/deap/>
8. "rwuilbercq/Hive: Artificial Bee Colony Algorithm in Python", available at: <https://github.com/rwuilbercq/Hive>
9. Zemlyansky A.V., Shtykov G.A. "Software implementation of the annealing simulation method and analysis of its effectiveness", *The Bulletin of Penza State University (Vestnik penzenskogo gosudarstvennogo universiteta)*, 2017, no. 4 (20), pp. 76-81.
10. "simanneal PyPI", available at: <https://pypi.org/project/simanneal/>
11. Vladstone F.F., Moto P. "Theoretical minimum in Computer Science. Networks, cryptography and data science" ("Teoreticheskiy minimum po Computer Science. Seti, kriptografiya i data science", St. Petersburg: Piter, 2022, 208 p.

Submitted 30.10.2023; revised 12.12.2023

Information about the authors

Dmitriy A. Baranov – Postgraduate Student, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: oblivvion333@gmail.com

Mikhail A. Belykh – Postgraduate Student, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: belykh.ma@yandex.ru

Vladimir F. Barabanov – Dr. Sc. (Technical), Professor, Department Chair, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: bvf@list.ru

Nataliya I. Grebennikova – Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: g-naty@yandex.ru

Vyacheslav N. Chernikov – Cand. Sc. (Technical), Senior Lecturer, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: devious.code@gmail.com

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ НА ТЕРМОЭЛЕМЕНТЕ ПРИ ОХЛАЖДЕНИИ ЛАМИНАРНЫМ ПОТОКОМ

О.А. Дорохова¹, И.Л. Батаронов^{1,2}, Т.А. Надеина¹, Н.А. Ююкин¹

¹Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

²Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия им. профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», г. Воронеж, Россия

Аннотация: в рамках модели усредненных физических параметров термоэлектрического материала исходя из уравнений термоэлектрического переноса получено граничное условие третьего рода для конечно-элементного моделирования теплопереноса в ламинарном потоке жидкости, нагреваемой термоэлектрическим элементом. Условие включает в себя температурно-зависимое слагаемое, обуславливающее эффект «саморазогрева» термоэлемента и характеризующее специфическим термоэлектрическим критериальным параметром, квадратично зависящим от плотности электрического тока в термоэлементе. На основе теории подобия установлен общий вид решения для температурного поля в жидкости, а также его предельный случай для тонкого теплового пристеночного слоя. Показано, что решение зависит только от двух критериальных параметров – числа Пекле и термоэлектрического критериального параметра. Методом численного конечно-элементного моделирования на сетке из 1,5 млн узлов получены температурные профили по поверхности термоэлемента в диапазоне изменения числа Пекле 250÷8000 и термоэлектрического параметра 0÷2,0. Полученные профили аппроксимировались линейной комбинацией кубической корневой и линейной функций с точностью не хуже 0,5%. Сформулировано условие применимости данной аппроксимации. Применением нелинейного преобразования системы координат и регрессионного анализа получены аналитические аппроксимации для коэффициентов линейной комбинации в зависимости от критериальных параметров, что определяет унифицированную функцию распределения температуры на термоэлементе. Обсуждается применение полученных результатов для оптимизации функционирования термоэлектрического охладителя

Ключевые слова: теплопередача, термоэлектрические охладители, температурное поле, метод конечных элементов, критериальные параметры.

Введение

В задачах расчета систем охлаждения теплонапряженных устройств (например, центральных процессоров) требуется определять не только интенсивность отвода тепла от нагретого элемента, являющегося тепловым источником, но и распределение температуры на нем, поскольку локальный перегрев отдельного участка устройства может приводить к его отказу или повреждению. Перспективным методом быстрого безынерционного охлаждения является применение термоэлектрических охладителей, осуществляющих локальное поглощение теплоты Пельтье сразу после включения электрического тока [1, 2].

К настоящему времени разработан ряд методик расчета термоэлектрических охладителей [3-16], в том числе и с использованием конечно-элементного моделирования [13, 16, 17]. Однако они или требуют значительных вычислительных ресурсов для своей реализации (как МКЭ-технологии), или оперируют с интегральными значениями температуры и не позволяют определить места локальных перегревов. Этот

недостаток может быть устранен комбинацией различных методик [16]. В настоящей работе производится конечно-элементное исследование распределения температуры на поверхности термоэлектрического охладителя, нагреваемого заданным тепловым потоком и охлаждаемого ламинарным потоком жидкости с целью определения универсального аналитического выражения для температурного профиля.

Формулировка математической модели

Будем исследовать схему теплопередачи, изображенную на рис. 1. Тепловой источник (ТИ) характеризуется плотностью теплового потока q_0 . Термоэлектрический элемент (ТЭ) трансформирует этот поток в поток тепла с плотностью q_1 , передаваемый в охлаждающую среду (ОС). Схема распределения температуры в направлении, перпендикулярном потоку ОС, также приведена на рис. 1. Требуется определить распределение температуры T_0 на поверхности ТЭ со стороны ТИ вдоль потока охлаждающей среды. Характерными особенностями данной задачи, отличающими ее от традиционных схем теплопередачи [18-20], являются «обратное» распределение темпера-

туры в ТЭ и наличие тепловых источников в объеме и на поверхностях ТЭ, приводящих к модификации уравнений теплового баланса, в частности, имеет место соотношение $q_1 > q_0$.

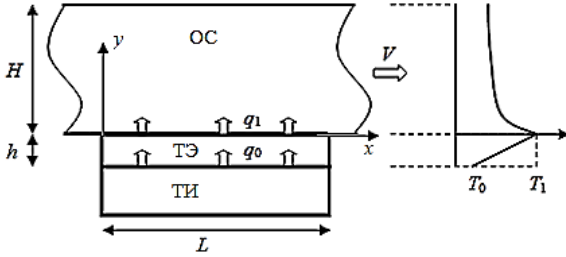


Рис. 1. Схема теплопередачи при термоэлектрическом охлаждении ТЭ

Время переходного теплового режима в термоэлементе порядка 7 с, поэтому можно считать процесс теплопередачи в ТЭ стационарным. Также теплопереносом в плоскости ТЭ пренебрегается в силу его конструктивных особенностей [16]. Тогда в приближении средних значений физических характеристик термоэлектрического материала [1, 2] будут иметь место следующие уравнения теплопереноса [2, 6]:

$$q_0 = \alpha j T_0 - \frac{j^2 h}{2\sigma} - \frac{\kappa}{h} (T_1 - T_0), \quad (1)$$

$$q_1 = \alpha j T_1 + \frac{j^2 h}{2\sigma} - \frac{\kappa}{h} (T_1 - T_0) \quad (2)$$

Здесь α , σ , κ – коэффициент Зеебека, удельная электропроводность и коэффициент теплопроводности термоэлектрического материала, соответственно;

j – плотность электрического тока в ТЭ;
 h – толщина ТЭ.

Выберем декартову систему координат с осью Ox в направлении потока ОС, осью Oy перпендикулярно плоскости ТЭ и началом координат в передней к потоку ОС точке ТЭ (рис. 1). Тогда уравнение стационарного теплопереноса в ламинарном потоке ОС будет иметь вид [17]:

$$CV\varphi(y)\frac{\partial T}{\partial x} = K\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2}\right), \quad (3)$$

где C , K – удельная теплоемкость и коэффициент теплопроводности ОС, соответственно;

$V\varphi(y)$ – пуазейлевское распределение скорости в ОС;

V – средняя скорость движения ОС;

$T(x, y)$ – распределение температуры ОС;

$\varphi(y) = 6 \cdot (1 - y/H) \cdot y/H$ – нормированная функция распределения скоростей ОС;
 H – толщина потока ОС.

Постановка задачи дополнительно к уравнениям (1-3) включает граничное условие на поверхности контакта ТЭ и ОС:

$$T(x, 0) = T_1(x), \quad (4)$$

$$-K \frac{\partial T}{\partial y}(x, 0) = q_1(x), \quad (5)$$

и краевые условия на остальных границах рассматриваемой области теплопереноса в ОС:

$$K \frac{\partial T}{\partial y}(x, H) = 0, \quad (6)$$

$$T(-\infty, y) = T_{in}, \quad (7)$$

$$q_0 = const, \quad (8)$$

$$K \frac{\partial T}{\partial x}(\infty, y) = 0 \quad (9)$$

Первое условие определяет теплонепроницаемость верхней и нижней границ потока ОС (за исключением поверхности ТЭ), второе – входную температуру ОС T_{in} , считающуюся заданной, третье – однородность заданного теплового потока ТИ, четвертое – отсутствие продольного кондуктивного потока тепла на выходе из зоны теплообмена.

В качестве базовых значений параметров будем использовать коэффициенты системы $Bi_2Te_3(80)+Sb_2Te_3(20)$ [2]: коэффициент Зеебека $\alpha = 1,6 \cdot 10^{-4}$ В/К, коэффициент теплопроводности $\kappa = 1,4$ Вт/(м·К), удельная электропроводность $\sigma = 1500$ См/см, удельная теплоемкость $2,4 \cdot 10^6$ Дж/(м³·К), толщина термоэлемента $h = 2$ мм. Параметры охлаждающей среды возьмем как у воды: коэффициент теплопроводности $K = 0,6$ Вт/(м·К), удельная теплоемкость $C = 4,19 \cdot 10^6$ Дж/(м³·К). Для входной температуры используется значение $T_{in} = 300$ К.

Аналитическое исследование модели

Перейдем в задаче (1-9) к безразмерным переменным в рамках теории подобия. Для этого введем следующие масштабы переменных величин [14, 15]:

$$j_m = \frac{\kappa}{\alpha h}, \quad q_m = \frac{KT_{in}}{H} \quad (10)$$

Здесь в качестве характеристической температуры использована входная температура ОС. В результате преобразование зависимых и независимых переменных будет иметь вид:

$$\begin{aligned} j &= j_m \zeta, & q &= q_m \tilde{q}, & T &= T_{in}(1 + \theta), \\ x &= H \xi, & y &= H \eta \end{aligned} \quad (11)$$

С использованием преобразования переменных (11) соотношения (1-2) переписываются в виде

$$\chi \tilde{q}_0 = \zeta(1 + \theta_0) - \frac{\zeta^2}{2z} - (\theta_1 - \theta_0), \quad (12)$$

$$\chi \tilde{q}_1 = \zeta(1 + \theta_1) + \frac{\zeta^2}{2z} - (\theta_1 - \theta_0), \quad (13)$$

где $z = \alpha^2 \sigma T_{in} / \kappa$ – термоэлектрическая добротность материала термоэлемента при температуре T_{in} ,

$$\chi = \frac{Kh}{\kappa H}, \quad (14)$$

– симплекс физических и геометрических параметров сред.

Для базовых значений параметров из соотношений (10) получаем $z = 0,93$, $j_m = 4,4$ А/мм², $\chi = 0,171$, $q_m / \chi = 21$ Вт/см². Как показано в [16], эти значения являются предельными для термоэлектрического охлаждения и определяют диапазон варьирования параметров при расчете.

Аналогично преобразованное уравнение (3) будет иметь вид:

$$\text{Re} \psi(\eta) \frac{\partial \theta}{\partial \xi} = \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial \xi^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial \eta^2} \right). \quad (15)$$

Здесь Re – число Пекле [18]

$$\text{Pe} = \frac{VCH}{K}, \quad (16)$$

а $\psi(\eta) = 6\eta(1 - \eta)$ – стандартизованный ламинарный профиль скорости ОС.

Соответственно граничные условия (4-9) принимают вид

$$\begin{aligned} \frac{\partial \theta}{\partial \eta}(\xi, 0) &= 0, & \xi &\notin (0, \xi_0), \\ \frac{\partial \theta}{\partial \eta}(\xi, 1) &= 0, & \frac{\partial \theta}{\partial \xi}(\infty, \eta) &= 0, \\ \theta(-\infty, \eta) &= 0, \end{aligned} \quad (17)$$

$$\begin{aligned} \theta(\xi, 0) &= \theta_1(\xi), & -\frac{\partial \theta}{\partial \eta}(\xi, 0) &= \tilde{q}_1(\xi), \\ 0 &< \xi < \xi_0. \end{aligned} \quad (18)$$

где $\xi_0 = L/H$ – нормированная длина ТЭ.

В результате преобразования (11) граничные условия (17) стали однородными, и неоднородность задачи, приводящая к ненулевому решению, представлена условиями (18). Последние связаны уравнениями термоэлемента (12-13) и сводятся к одному условию. Для его получения возьмем разность уравнений (12-13):

$$\chi(\tilde{q}_1 - \tilde{q}_0) = \zeta(\theta_1 - \theta_0) + \frac{\zeta^2}{z}.$$

Это соотношение показывает источники тепла, действующие в ТЭ при его работе: второе слагаемое в правой части соответствует Джоулеву теплу, а первое – дисбалансу теплот Пельтье, вызванному различием температур поверхностей ТЭ. Вообще говоря, имеется и третий источник (тепло Томпсона), связанный с температурной зависимостью коэффициента Зеебека. Этот эффект также пропорционален току и разности температур и в рассматриваемой модели учитывается в эффективном значении коэффициента термоэдс.

Выразим разность температур $\theta_1 - \theta_0$ и подставим ее в равенство (13), в результате получим искомое соотношение

$$\tilde{q}_1 = Q + \Upsilon \theta_1, \quad (19)$$

где введены обозначения

$$\begin{aligned} Q &= \frac{\tilde{q}_0}{1 + \zeta} + \Upsilon \left(1 + \frac{2 + \zeta}{2z} \right), \\ \Upsilon &= \frac{\zeta^2}{\chi(1 + \zeta)} = \frac{\zeta \zeta'}{1 + \zeta} \end{aligned} \quad (20)$$

для приведенной поверхностной плотности источников тепла Q и критериального параметра Υ , специфичного для задачи теплообмена с термоэлементом. Здесь $\zeta' = \zeta / \chi = \alpha jH / K$ – плотность тока, нормированная на параметры охлаждающей среды.

В итоге с использованием соотношения (19) граничное условие (18) записывается в стандартном виде:

$$-\frac{\partial \theta}{\partial \eta}(\xi, 0) = Q + \Upsilon \theta(\xi, 0), \quad 0 < \xi < \xi_0. \quad (21)$$

Математически это граничное условие третьего рода с однородной плотностью поверхностных источников, что позволяет осуществлять моделирование рассматриваемой задачи в конечно-элементных пакетах стандартными средствами.

Отметим, что второе слагаемое в правой части в уравнении (21) описывает эффект «саморазогрева», при котором повышение температуры поверхности приводит к увеличению тепловыделения. В рамках данной модели это должно привести к экспоненциальному росту температуры ТЭ вдоль его поверхности. В реальном материале этого не происходит, поскольку при значительном росте температуры коэффициент термоэдс быстро уменьшается. Кроме того, на рассматриваемом начальном участке теплообмена данный эффект не успевает заметно проявиться.

Как следует из полученной формулировки задачи (15), (17), (21), в силу однородности условий (17) и уравнения (15) и линейности условия (21) решение пропорционально плотности источников Q и зависит только от двух критериальных параметров Pe и Υ , то есть имеет вид:

$$T = T_{in} + T_{in} Q \Phi\left(\frac{x}{H}, \frac{y}{H}; Pe, \Upsilon\right), \quad (22)$$

где $\Phi(\xi, \eta; Pe, \Upsilon)$ – некоторая универсальная для данной задачи функция.

Затем, из уравнения (12) непосредственно находится распределение температуры на холодной стороне ТЭ:

$$\theta_0 = \frac{\theta_1 - \zeta + \chi \tilde{q}_0 + \frac{\zeta^2}{2\zeta}}{1 + \zeta}, \quad (23)$$

Как следует из решения (23), действие стороннего теплового потока и собственного джоулева разогрева приводит к аддитивному увеличению температуры холодной стороны ТЭ по отношению к горячей стороне, эффект же термоэлектрического охлаждения имеет двойной характер: обеспечивается вычитанием фиксированной температуры ζ и делением суммарной температуры на множитель $(1 + \zeta) > 1$. В результате формируется оптимизационная задача определения условий получения необходимого охлаждения и возможности его осуществления для заданного потока тепла.

Нетрудно также получить предельный вид решения для тонкого пограничного теплового слоя, имеющего место для больших чисел

Пекле. В этом случае в профиле скоростей $\psi(\eta)$ существенен только пристеночный участок, и уравнение (15) упрощается:

$$6Pe\eta \frac{\partial \theta}{\partial \xi} = \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial \xi^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial \eta^2} \right). \quad (24)$$

В таком уравнении заменой переменных $\xi = \xi' / \sqrt{Pe}$, $\eta = \eta' / \sqrt{Pe}$ можно исключить число Пекле. При этом граничное условие (21) преобразуется к виду:

$$-\frac{\partial \theta}{\partial \eta'}(\xi', 0) = \frac{Q}{\sqrt{Pe}} + \frac{\Upsilon}{\sqrt{Pe}} \theta(\xi'), \quad (25)$$

$$0 < \xi' < \xi_0 \sqrt{Pe}$$

Тогда аналогично (22) можно сделать вывод, что общее решение в этом пределе будет иметь вид

$$T = T_{in} + T_{in} \frac{Q}{\sqrt{Pe}} \Psi\left(\frac{x}{H} \sqrt{Pe}, \frac{y}{H} \sqrt{Pe}; \frac{\Upsilon}{\sqrt{Pe}}\right), \quad (26)$$

где теперь функция $\Psi(\xi', \eta'; \Upsilon / \sqrt{Pe})$ зависит только от одного параметра.

Число Нуссельта по отношению к температуре на входе [19] будет теперь определяться как

$$Nu_{in} = \frac{\tilde{q}_1}{\theta_1} = \frac{Q}{\theta_1} + \Upsilon,$$

Учитывая решение (22), отсюда получим:

$$Nu_{in} = \frac{1}{\Phi_0(\xi)} + \Upsilon, \quad (27)$$

где обозначено $\Phi_0(\xi) = \Phi(\xi, 0)$ – нормированное распределение температуры по поверхности ТЭ.

Для числа Нуссельта относительно среднерасходной температуры [19]

$$Nu_m = \frac{\tilde{q}_1}{\theta_1 - \theta_m},$$

необходимо решение усредненного уравнения переноса

$$Pe \frac{d\theta_m}{d\xi} = \tilde{q}_1,$$

которое с учетом (19) и (22) будет иметь вид:

$$\theta_m = \frac{Q}{Pe} \xi + \frac{\Upsilon}{Pe} Q \int_0^\xi \Phi_0(\xi') d\xi'.$$

В результате для числа Nu_m получим

$$Nu_m = \frac{1 + \Upsilon \Phi_0(\xi)}{\Phi_0(\xi) - \frac{\xi}{Pe} - \frac{\Upsilon}{Pe} \int_0^\xi \Phi_0 d\xi'}.$$

На начальном участке $\xi < Pe/18$ [20], тогда вторым и третьим слагаемыми в знаменателе написанного выражения можно пренебречь, и мы приходим к выражению, совпадающему с (27).

Аналитическое нахождение решений (22), (26) сопряжено со значительными математическими трудностями, поэтому используем для этой цели конечно-элементное моделирование.

Вычислительный эксперимент

Рассчитывается стационарное распределение температуры в плоскопараллельном ламинарном потоке с поверхностными источниками тепла, определяемыми граничным условием (21). Геометрические параметры модельной системы приняты следующими: толщина охлаждающего потока $H = 5$ мм, охлаждаемая длина ТЭ $L = 150$ мм, средняя скорость течения потока $V = 0,01 \div 0,2$ м/с (что для воды соответствует значениям чисел Рейнольдса для ламинарного течения). Тогда диапазон изменения критериальных параметров с учетом базисных значений коэффициентов составляет: $Pe = 250 \div 8000$, $\Upsilon = 0,0 \div 2,0$. Для моделирования граничных условий (7) и (9) были добавлены буферные зоны длиной $L/2$ до и после ТЭ. Вид расчетной сетки представлен на рис. 2.

Число узлов сетки составило около 1500 тыс., число степеней свободы – 750 тыс., время решения задачи на 12-ядерном процессоре с тактовой частотой 2,5 ГГц при использовании линейного решателя – $11 \div 15$ с. Численный расчет производился в конечно-элементном комплексе программ FEMPDESolver 2.2 [21, 22].

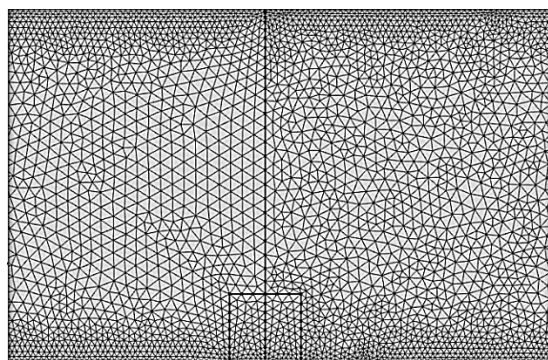


Рис. 2. Сетка узлов в расчетной области

Для расчета непосредственно функции Φ решалась задача в приведенном виде:

$$\begin{aligned} Pe \psi(\eta) \frac{\partial \Phi}{\partial \xi} &= \left(\frac{\partial^2 \Phi}{\partial \xi^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial \eta^2} \right) \\ -\frac{\partial \Phi}{\partial \eta}(\xi, 0) &= 1 + \Upsilon \Phi(\xi, 0), \quad 0 < \xi < \xi_0 \end{aligned} \quad (28)$$

Реализация этой задачи в стандартном пакете осуществлялась путем задания значений всех физических параметров равными единице (в системе СИ), значение скорости равным Pe [м/с], геометрические параметры соответственно $H = 1$ м, $L = \xi_0$ [м], граничное условие для потока тепла – в виде (28) (в Вт/м²). Получаемое в результате размерное решение численно совпадало с функцией $\Phi(\xi, \eta)$.

Тестирование численной модели осуществлялось на примере уравнения (24) при $\Upsilon = 0$. Контролировалось распределение температуры по поверхности ТЭ $\Phi_0(\xi)$, которое в приведенных координатах (26) $\xi' \div \Phi_0 \sqrt{Pe}$ не должно зависеть от числа Пекле, что и было установлено для численных решений в диапазоне $Pe = 250 \div 8000$ с точностью 0,001, соответствующей предустановленной точности численного решения. При этом полученные зависимости $\Phi_0(\xi)$ с той же точностью аппроксимировались формулой $\Phi_0(\xi) = 0,845 \cdot \sqrt[3]{\xi / Pe}$, совпадающей с известным распределением температуры на стенке ламинарного потока при действии однородного потока тепла [20].

При переходе к уравнению (28) распределение температуры сохраняет автомодельность только на начальном участке $\xi' < 100$ даже в отсутствии электрического тока (рис. 3), на большей длине при уменьшении числа Пекле тепловой слой распространяется на глубину, сопоставимую с толщиной потока ОС, и аппроксимационное уравнение для распределения температуры усложняется [20].

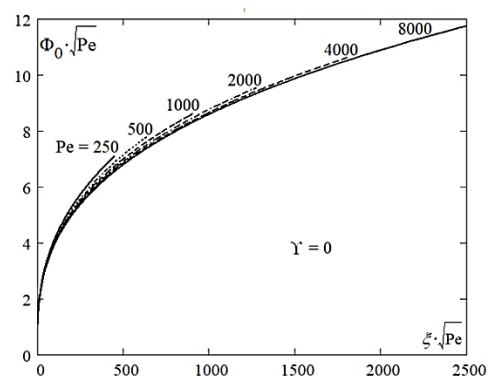


Рис. 3. Распределение температуры на ТЭ без тока

При включении электрического тока (рис. 4) в конце кривых обнаруживаются участки спрямления, обусловленные влиянием стационарного экспоненциального профиля.

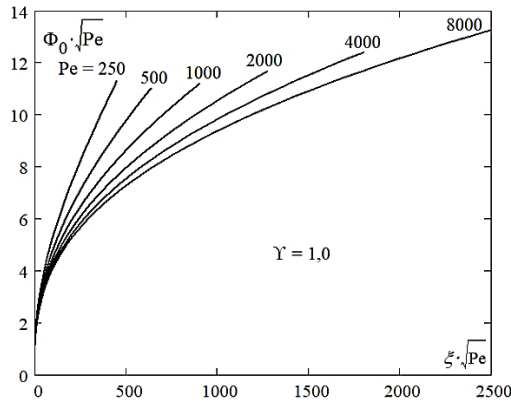


Рис. 4. Распределение температуры на ТЭ с током

Как показало численное исследование, явный экспоненциальный участок на кривых появляется при нарушении условия

$$\frac{(1 + \gamma^{2,75})\xi_0}{Pe} < \frac{1}{3} \quad (29)$$

Поскольку этот режим физически выходит за рамки используемой линейной модели, то в настоящем исследовании соответствующие случаи исключались из рассмотрения. Отметим, что при отсутствии электрического тока условие участка тепловой релаксации имеет вид [18-20]

$$\frac{\xi_0}{Pe} < \frac{1}{18}.$$

и является более слабым, чем (29), при $\gamma > 1,7$.

С учетом установленного асимптотического вида распределения температуры на начальном участке, аппроксимация полного профиля производилась модельной зависимостью вида

$$(\Phi_0 \sqrt{Pe}) = b_0 \sqrt[3]{(\xi \sqrt{Pe})} + b_1 (\xi \sqrt{Pe}), \quad (30)$$

где второй член в правой части соответствует стационарному распределению температуры при нагреве заданным потоком тепла. Коэффициенты регрессионной зависимости (30) находились по МНК (методу наименьших квадратов). В расчете одной зависимости (30) использовалось 2480 точек. Относительная ошибка регрессии во всех случаях не превышала 0,5%.

Полученные данные об изменении коэффициентов b_0 , b_1 в зависимости от значений критериальных параметров затем анализировались с целью установления функционального вида зависимости. Так, данные по коэффициенту b_0 спрямляются в координатах $b_0 \div \gamma / \sqrt[3]{Pe}$ (рис. 5).

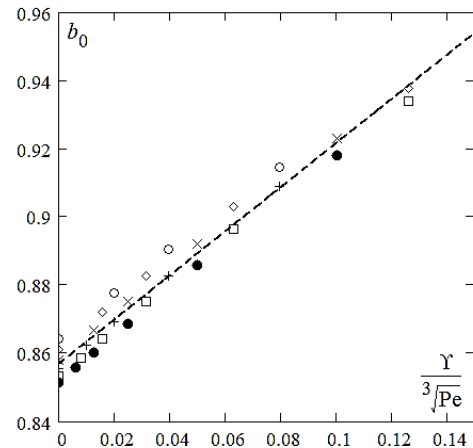


Рис. 5. Анализ зависимости коэффициента b_0 от критериальных параметров Pe и γ : $\circ$ – $Pe = 250$, $\diamond$ – $Pe = 500$, $\times$ – $Pe = 1000$, $+$ – $Pe = 2000$, $\square$ – $Pe = 4000$, $\bullet$ – $Pe = 8000$

МНК-обработка данных рис. 5 позволила установить регрессионную зависимость:

$$b_0 = 0,857 + 0,647 \frac{\gamma}{\sqrt[3]{Pe}}, \quad (31)$$

которая показана на рис. 5 штриховой линией.

Аналогично спрямление зависимостей для коэффициента b_1 имеет место в координатах $b_1 \cdot Pe \div \gamma^{1,5}$ (рис. 6).

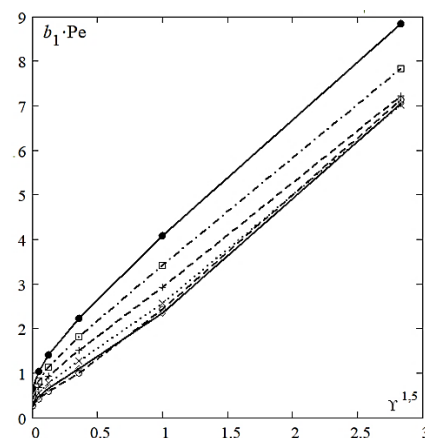


Рис. 6. Анализ зависимости коэффициента b_1 от критериальных параметров Pe и γ , обозначения как на рис. 5

В отличие от рис. 5, линейные зависимости на рис. 6 обнаруживают смещение при изменении числа Пекле, которое хорошо аппроксимируется логарифмической функцией вида

$$f(x) = A \ln \left(1 + \frac{Pe}{B} \right),$$

как показано на рис. 7.

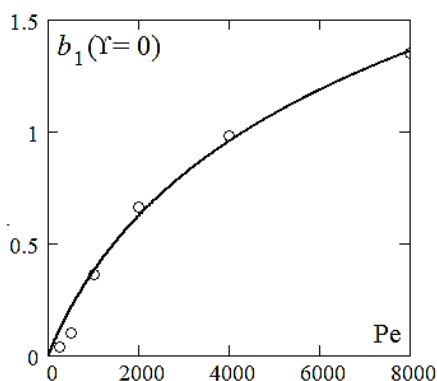


Рис. 7. Аппроксимация смещения зависимости коэффициента b_1 от критерия Пекле Pe

В результате была получена следующая формула для коэффициента b_1 :

$$b_1 = \frac{0,738 \ln \left(1 + \frac{Pe}{1500} \right) + 2,45 \gamma^{1,5}}{Pe}. \quad (32)$$

Подставляя выражения (31-32) в формулу (30), окончательно будем иметь:

$$\Phi_0(\xi) = \left(0,857 + 0,647 \frac{\gamma}{\sqrt[3]{Pe}} \right) \sqrt[3]{\frac{\xi}{Pe}} + \left(0,738 \ln \left(1 + \frac{Pe}{1500} \right) + 2,45 \gamma^{1,5} \right) \frac{\xi}{Pe}. \quad (33)$$

Затем с учетом выражения (22) для температуры поверхности ТЭ со стороны ОС имеем

$$\theta_1(\xi) = Q \Phi_0(\xi), \quad (34)$$

и уравнение (23) с использованием (34) определяет температуру охлаждаемой стороны ТЭ, что решает поставленную задачу.

Отметим, что полученные решения при $\gamma = 0$ переходят в решение стандартной задачи теплообмена ламинарного потока с постоянным тепловым потоком на стенке [18-20]. В частности, из формул (33) и (27) вытекает решение для числа Нуссельта, согласующееся с имеющимся известным решением для начального участка

теплообмена [20]. Это подтверждает достоверность полученных здесь решений.

Обсуждение результатов

Найденные температурные зависимости могут быть использованы, в частности, для оптимизации работы термоэлектрического охладителя и установления возможности его использования для конкретного ТИ.

Обычно контролируемым параметром для системы охлаждения является либо средняя температура холодной поверхности, либо ее максимальное значение (для устранения локальных перегревов). Так как выражение (23) с учетом (33-34) легко усредняется по поверхности ТЭ, то обе задачи имеют одинаковую математическую формулировку, поэтому рассмотрим для определенности второй случай.

Так как максимальное значение распределения (33) достигается при $\xi = \xi_0$, то максимальные температуры верхней и нижней поверхностей ТЭ согласно уравнениям (23, 33-34) составляют

$$\begin{aligned} \theta_{1\max} &= \frac{\Phi_0(\xi_0)}{1+\zeta} \tilde{q}_0 + \gamma \left(1 + \frac{2+\zeta}{2z} \right) \Phi_0(\xi_0) \\ \theta_{0\max} &= \frac{\left(\frac{\Phi_0(\xi_0)}{1+\zeta} + \chi \right) \tilde{q}_0}{1+\zeta} + \\ &+ \frac{\frac{\zeta^2}{2z} - \zeta + \gamma \left(1 + \frac{2+\zeta}{2z} \right) \Phi_0(\xi_0)}{1+\zeta} \end{aligned}, \quad (35)$$

Эти уравнения легко разрешаются относительно потока $\tilde{q}_0$ и позволяют выразить его в функции максимальных значений температуры и величины плотности электрического тока. В результате имеем следующую оптимизационную задачу:

$$\begin{aligned} \tilde{q}_0(\zeta) &\rightarrow \max \\ \theta_{1\max} &\leq \theta_{1m} \\ \theta_{0\max} &\leq \theta_{0m}, \\ \zeta &\leq z \\ Re &\leq 1000 \end{aligned} \quad (36)$$

Здесь θ_{0m}, θ_{1m} – максимально допустимые значения температур нижней и верхней поверхностей ТЭ, третье ограничение обусловлено областью оптимальных значений холодопроизводительности ТЭ, а четвертое – условием ламинарности потока.

Так как поток q_0 линейно зависит от температур θ_{0m}, θ_{1m} , то решение задачи (36) находится на границе допустимой области, то есть на одной из линий:

$$\theta_{1\max} = \theta_{1m}, \quad \theta_{0\max} = \theta_{0m}, \quad (36)$$

Пример решения приведен на рис. 8.

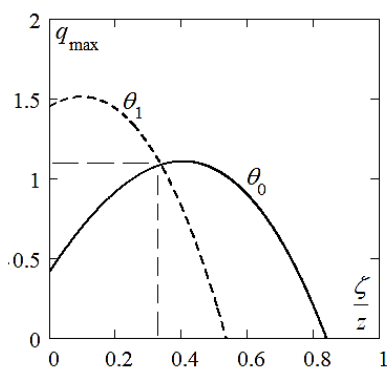


Рис. 8. Пример решения задачи (36)

Здесь сплошной линией изображен максимальный тепловой поток для предельного значения температуры холодной поверхности, принятой равной 70°C , а штриховой — для предельного значения температуры ОС, принятой равной температуре кипения 100°C . С увеличением плотности электрического тока допустимый тепловой поток от ТИ возрастает, но при некотором значении тока температура верхней поверхности достигает экстремального значения, и дальнейшее увеличение теплового потока невозможно. Оптимальное значение по электрическому току составляет $0,34z_{jm} = 1,5 \text{ А/мм}^2$ при этом максимально возможный отбираемый поток составляет $1,09q_m = 3,9 \text{ Вт/см}^2$. Отметим, что полученное значение тока составляет лишь 34% от тока максимальной холодопроизводительности, а тепловой поток — лишь 15% от максимально достижимого. Данное обстоятельство связано с низкой эффективностью охлаждения ламинарным потоком.

Более глубокая оптимизация, в том числе по физическим параметрам, допустима в рамках тех же соотношений (35), но требует использования специализированных средств решения оптимизационной задачи.

Заключение

Низкие показатели эффективности термоэлектрического охлаждения при ламинарном потоке обусловлены малым значением коэффициента теплоотдачи в этом случае. В работе ис-

пользована жидкая ОС, при переходе к газовой ОС ситуация значительно ухудшается, так как коэффициенты χ и Re значительно уменьшаются в газе, что приводит к нарушению условия (29) уже при малой длине ТЭ. Кроме того, распределение температуры вдоль ТЭ (рис. 4) характеризуется выраженной неоднородностью, достигающей нескольких десятков градусов, что может привести к ограничению на нижний допустимый уровень температуры охлаждения.

Указанные проблемы могут быть устранены использованием турбулентного режима течения ОС, расчет которого требует, в первую очередь, выбора адекватной модели турбулентности для описания теплообмена в ОС.

Литература

1. Мартыновский В.С. Циклы, схемы и характеристики термотрансформаторов. М.: Энергия, 1979. 288 с.
2. Анатычук Л.И. Термоэлементы и термоэлектрические устройства. Киев: Наукова Думка, 1979. 768 с.
3. Perspectives on thermoelectrics: from fundamentals to device applications / M. Zebajadi, K. Esfarjani, M. S. Dresselhaus, Z. F. Ren, G. Chen // Energy & Environmental Science. 2012. V.5. No 1. P. 5147–5162.
4. Аналитическая оценка влияния термоэлектрических эффектов на интенсификацию теплоотдачи от охлаждаемой оребренной поверхности / И.М. Илюхин, А.В. Кретинин, М.И. Кирпичев, В.Г. Стогней // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2014. Т. 10. № 1. С. 44–46.
5. Горобец Н.В., Охрем В.Г. Термоэлектрический охладитель Пельтье с дополнительным проводящим элементом // Прикладная физика. 2007. № 4. С. 124–127.
6. Моделирование режима $Q_{\max}$ термоэлектрического охладителя с учетом тепловых сопротивлений на холодной и горячей стороне / А.А. Мельников, А.М. Пири, И.В. Тарасова, Н.В. Батрамеяев // Физика и техника полупроводников. 2017. Т. 51. № 7. С. 896–899.
7. Zaykov V., Mescheryakov V., Zhuravlov Yu. Analysis of Relationship Between the Dynamics of a Thermoelectric Cooler and Its Design and Modes Of Operation // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2018. V. 1/8. No 91. Pp. 12–23.
8. Анализ режимов функционирования замкнутого циркуляционного контура охлаждения с промежуточным теплоносителем / В.И. Рязских, Ю.Ю. Громов, А.В. Рязских, А.А. Хвостов // Прикладная физика и математика. 2017. № 4. С. 20–26.
9. Lee H. Optimal design of thermoelectric devices with dimensional analysis // Applied Energy. 2013. V. 106. P. 79–88.
10. Zhu L., Tan H., Yu J. Analysis on optimal heat exchanger size of thermoelectric cooler for electronic cooling applications // Energy Conversion and Management. 2013. V. 76. P. 685–690.
11. Optimum design and experimental study of a thermoelectric ventilator / T. Han, G. Gong, Z. Liu, L. Zhang // Applied Thermal Engineering. 2014. V.67. P. 529–539.
12. Pearson M.R., Lents C.E. Dimensionless optimization of thermoelectric cooler performance when integrated within a thermal resistance network // Journal of Heat Transfer. 2016. V. 138. No 8. P. 081301–081301-11.
13. Mathematical modeling of hydrodynamics and heat exchange in liquid channels of the thermoelectric cooling module / A.V. Kretinin, S.L. Podvalny, D.P. Shmatov, E.E. Spitsyna //

Journal of Physics: Conference Series. 2019. Vol. 1203. P. 012049.

14. Модель теплопередачи в проточном теплообменнике с термоэлектрическим охлаждающим элементом / И.Л. Батаронов, А.В. Кретинин, В.Ф. Селиванов, Е.Е. Спицына, Т.А. Надеина // Альтернативная и интеллектуальная энергетика: материалы Междунар. науч.-практ. конф. Воронеж: ВГТУ, 2018. С. 119-120.

15. A model of heat transfer in counter-current heat exchanger with a thermoelectric cooling element / I.L. Bataronov, A.V. Kretinin, V.F. Selivanov, E.E. Spitsina, T.A. Nadeina // 2018 International Theoretical and Practical Conference on Alternative and Smart Energy (TPCASE 2018): Proc. Lancaster: DESTech Publication inc., 2019. P. 30-36.

16. Анализ методик расчета теплопередачи в системах термоэлектрического охлаждения теплонапряженных элементов / С.В. Бородин, А.В. Иванов, И.Л. Батаронов, А.В. Кретинин // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2021. Т. 17. № 1. С. 21-31.

17. Dezhina O.A., Bataronov I.L. Finite-element stationary model of heat transfer in systems with thermoelectric elements //

Антропоцентрические науки в образовании: материалы XVI Междунар. научно-практ. конф. Воронеж, 2022. С. 345-349.

18. Кутателадзе С.С. Основы теории теплообмена. М.: Атомиздат, 1979. 416 с.

19. Кутателадзе С.С. Теплопередача и гидродинамическое сопротивление. М.: Энергоатомиздат, 1990. 367 с.

20. Петухов Б.С. Теплообмен и сопротивление при ламинарном течении жидкости в трубах. М.: Энергия, 1967, 412 с.

21. Шунин Г.Е., Кудряш А.А. Системы мультифизического конечно-элементного анализа // Физико-математическое моделирование систем: материалы XVI Междунар. семинара. Воронеж: ВГТУ, 2016. С. 174-212.

22. Конечно-элементный комплекс программ FEMPDESolver 2.2 / М.И. Батаронова, С.А. Кострюков, В.В. Пешков, Г.Е. Шунин // Физико-математическое моделирование систем: материалы VIII Междунар. семинара. Воронеж: ВГТУ, 2012. С. 99-118.

Поступила 16.10.2023; принята к публикации 11.12.2023

Информация об авторах

Дорохова Оксана Андреевна – аспирант, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: dezhinaksu@mail.ru

Батаронов Игорь Леонидович – д-р физ.-мат. наук, профессор, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84); Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (394064, Россия, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54а), e-mail: i-bataronov@mail.ru

Надеина Татьяна Анатольевна – канд. физ.-мат. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: nadтана@rambler.ru

Ююкин Николай Алексеевич – канд. техн. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: yuyukin_n@mail.ru

SIMULATION OF TEMPERATURE DISTRIBUTION ON A THERMOELECTRIC ELEMENT DURING LAMINAR FLOW COOLING

O.A. Dorokhova¹, I.L. Bataronov^{1,2}, T.A. Nadeina¹, N.A. Yuyukin¹

¹Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

²Zhukovsky-Gagarin Military Air Academy, Voronezh, Russia Voronezh, Russia

Abstract: on the basis of the model of averaged physical parameters of a thermoelectric material and of the equations of thermoelectric transfer, a boundary condition of the third kind is obtained for finite element modeling of heat transfer in a laminar flow of a liquid heated by a thermoelectric element. The condition includes a temperature-dependent term that causes the effect of "self-heating" of the thermoelectric element and is characterized by a specific thermoelectric criterion parameter that depends quadratically on the electric current density in the thermoelectric element. Based on the similarity theory, the general form of the solution for the temperature field in a liquid is established, as well as its limiting case for a thin thermal wall layer. It is shown that the solution depends only on two criteria parameters – the Peclet number and the thermoelectric criterion parameter. By the method of numerical finite element modeling on a grid of 1.5 million nodes, temperature profiles were obtained over the surface of the thermoelectric element in the range of the Peclet number of 250÷8000, and the thermoelectric parameter of 0÷2.0. The obtained profiles were approximated by a linear combination of cubic root and linear functions with an accuracy of at least 0.5%. The condition of applicability of this approximation is formulated. Using nonlinear transformation of the coordinate system and regression analysis, analytical approximations were obtained for the coefficients of the linear combination depending on the criteria parameters, which determines the unified temperature distribution function on the thermoelectric element. The application of the obtained results to optimize the functioning of a thermoelectric cooler is discussed

Key words: heat transfer, thermoelectric coolers, temperature field, finite element method, correlations

References

1. Martinovsky V.S. "Cycles, schemes and characteristics of thermotransformers" ("Tsikly, shemy i harakteristiky termotransformatorov"), Moscow, Energiya, 1979, 288 p.

2. Anaticuk L.I. "Thermoelements and Thermoelectric Devices" ("Termoelementy i termoelektricheskie ustroictva"), Kiev, Naukova Dumka, 1979, 768 p.

3. Zebbarjadi M., Esfarjani K., Dresselhaus M.S., Ren Z.F., Chen G. "Perspectives on thermoelectrics: from fundamentals to device applications", *Energy & Environmental Science*, 2012, vol. 5, no 1, pp. 5147–5162.
4. Ilyukhin I.M., A.V. Kretinin M.I. Kirpichev, Stogney V.G. "Analytical assessment of effects on thermoelectric heat transfer enhancement from the cooling finned surfaces", *The Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2014, vol. 10, no 4, pp. 44–46.
5. Gorobez N.V., Okhrem V.G. "Peltier thermoelectric cooler with additional conducting element", *Applied Physics (Prikladnaya fizika)*, 2007, no 4, pp. 124–127.
6. Melnikov A.A., Phiri A.M., Tarasova I.V., Batrameev N.V. "Modeling of Qmax mode of a thermoelectric cooler taking into account thermal resistances on cool and hot side", *Physics and Technology of Semiconductors (Fizika i tekhnika poluprovodnikov)*, 2017, vol. 51, no 7, pp. 896–899.
7. Zaykov V., Mescheryakov V., Zhuravlov Yu. "Analysis of relationship between the dynamics of a thermoelectric cooler and its design and modes of operation", *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2018, vol. 1/8, no 91, pp. 12–23.
8. Ryazhskikh V.I., Gromov Yu.Yu., Ryazhskikh A.V., Khvostov A.A. "Analysis of operating modes of a closed circulation cooling circuit with an intermediate heat carrier", *Applied Physics and Mathematics (Prikladnyye fizika i matematika)*, 2017, no 4, pp. 20–26.
9. Lee H. "Optimal design of thermoelectric devices with dimensional analysis", *Applied Energy*, 2013, vol. 106, pp. 79–88.
10. Zhu L., Tan H., Yu. J. "Analysis on optimal heat exchanger size of thermoelectric cooler for electronic cooling applications", *Energy Conversion and Management*, 2013, vol. 76, pp. 685–690.
11. Han T., Gong G., Liu Z., Zhang L. "Optimum design and experimental study of a thermoelectric ventilator", *Applied Thermal Engineering*, 2014, vol. 67, pp. 529–539.
12. Pearson M.R., Lents C.E. "Dimensionless optimization of thermoelectric cooler performance when integrated within a thermal resistance network", *Journal of Heat Transfer*, 2016, vol. 138, no 8, pp. 081301–081301-11.
13. Kretinin A.V., Podvalny S.L., Shmatov D.P., Spitsyna E.E. "Mathematical modeling of hydrodynamics and heat exchange in liquid channels of the thermoelectric cooling module", *Journal of Physics: Conference Series*, 2019, vol. 1203, p. 012049.
14. Bataronov I.L., Kretinin A.V., Selivanov V.F., Spysina E.E., Nadeina T.A. "Model of heat transfer in a flow-through heat exchanger with a thermoelectric cooling element", *Alternative and Smart Energy (Alternativnaya i intellektualnaya energetika): sci. and pract. conf. (TPCASE 2018)*, Voronezh, Voronezh State Technical University, 2018, pp. 119–120.
15. Bataronov I.L., Kretinin A.V., Selivanov V.F., Spysina E.E., Nadeina T.A. "A model of heat transfer in counter-current heat exchanger with a thermoelectric cooling element", *2018 International Theoretical and Practical Conference on Alternative and Smart Energy (TPCASE 2018): Proc.*, Lancaster, DESTech Publication inc., 2019, pp. 30–36.
16. Borodkin S.V., Ivanov A.V., Bataronov I.L., Kretinin A.V. "Analysis of methods for calculating heat transfer in thermoelectric cooling systems for heat-stressed elements", *The Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2021, vol. 17, no 1, pp. 21–31.
17. Dezhina O.A., Bataronov I.L. "Finite-element stationary model of heat transfer in systems with thermoelectric elements", *Anthropocentric sciences in education (Antropotsentricheskiye nauki v obrazovanii): proc. of the XVI int. and pract. Conf.*, Voronezh, 2022. P. 345–349.
18. Kutateladze S.S. "Fundamentals of heat transfer theory" ("Osnovy teorii teploobmena"), Moscow, Atomizdat, 1979, 416 p.
19. Kutateladze S.S. "Heat transfer and hydrodynamic resistance" ("Teploperedacha i gidrodinamicheskoe soprotivlenie"), Moscow, Energoatomizdat, 1990, 367 p.
20. Petukhov B.S. "Heat transfer and resistance during laminar fluid flow in pipes" ("Teploobmen i soprotivlenie pri laminarnom techenii zhidkosti v trubakh"), Moscow, Energiya, 1967, 412 p.
21. Shunin G. E., Kudryash A. A. "Systems of multiphysical finite element analysis", *Physical and mathematical modeling of systems (Fiziko-matematicheskoye modelirovaniye system): proc. of the XVI int. sem.*, Voronezh, Voronezh State Technical University, 2016, pp. 174–212.
22. Bataronova M.I., Kostyukov S. A.I., Peshkov V. V., Shunin G. E. "Finite element software package FEMPDESolver 2.2", *Physical and mathematical modeling of systems (Fiziko-matematicheskoye modelirovaniye system): proc. of the VIII int. sem.*, Voronezh, Voronezh State Technical University, 2012, pp. 99–118.

Submitted 16.10.2023; revised 11.12.2023.

Information about the authors

Oksana A. Dorokhova - Postgraduate Student, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Ochyabrya str., Voronezh 394026, Russia), e-mail: dezhinaksu@mail.ru

Igor L. Bataronov – Dr. Sc. (Physical and Mathematical), Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Ochyabrya str., Voronezh 394026, Russia), Associate Professor at of the Department of radio Engineering, Zhukovsky-Gagarin Air Force Academy (54a Staryh Bolshevikov str., Voronezh 394064, Russia), e-mail: i-bataronov@mail.ru

Tatyana A. Nadeina – Cand. Sc. (Physical and Mathematical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Ochyabrya str., Voronezh 394026, Russia), e-mail: nadтана@rambler.ru

Nikolay A. Yuyukin – Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Ochyabrya str., Voronezh 394026, Russia), e-mail: yuyukin_n@mail.ru

ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ И ПОДГОТОВКА НАБОРА ДАННЫХ ДЛЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ НА ОСНОВЕ ДЕТЕКЦИИ ОБЪЕКТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МАШИННОГО ЗРЕНИЯ

П.Ю. Гусев, В.В. Сокольников, В.В. Ветохин, А.А. Агеев

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

Аннотация: дано понимание термину машинного зрения как специфичной части машинного обучения. Рассмотрены предпосылки и направления развития архитектур нейронных сетей. Описаны задача детекции и особенности подготовки набора данных для различных задач детекции. В качестве примера прикладного применения машинного зрения рассматривается система управления беспилотным аппаратом. Целью выступает повышение точности системы управления беспилотным аппаратом на основе машинного зрения путем совершенствования методов обработки исходной информации и разработки методики подготовки набора данных для обучения нейронной сети. Решаются задачи выбора архитектуры нейронной сети, выбора метрик оценки качества обучения, выбора гиперпараметров настройки модели, экспериментальное исследование наборов данных для обучения модели. Описана методика формирования набора данных для обучения модели и описаны основные этапы сбора информации. Представлены метрики, используемые в экспериментальном исследовании наборов данных для обучения модели машинного зрения. Выбрана архитектура нейронной сети, обеспечивающая решение прикладной задачи управления беспилотным аппаратом. В результате проведения экспериментов получены данные, позволяющие сделать выводы о правилах формирования наборов данных для подобного типа прикладных задач

Ключевые слова: машинное обучение, детекция объектов, машинное зрение, набор данных, классификация, нейросеть

Благодарности: работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания (проект № FZGM-2023-0011)

Введение

Современное развитие технологий машинного обучения обеспечивает возможности их применения практически во всех сферах деятельности человека. Такая ситуация стала возможной благодаря двум основным факторам: развитию вычислительной техники и совершенствованию методов машинного обучения. Именно развитие вычислительной техники стало главной предпосылкой к использованию глубоких нейронных сетей на практике. Совершенствование ускорителей вычислений обеспечило как значительное снижение затрат времени на обучение моделей, так и снижение затрат времени на формирование результата работы обученной модели. Параллельно с ростом вычислительных мощностей активно развивались и развиваются архитектуры нейронных сетей – выделяются глубокие нейронные сети, адаптированные для специфичных задач. Помимо развития архитектур нейронных сетей формируются и совершенствуются методы решения сложных задач машинного обучения – например, задачи детекции. Применительно к методам машинного обучения, которые используются в задачах по работе с изображениями, может быть использо-

ван термин «машинное зрение», подчеркивающий специфичность задач [1].

Задача детекции может быть поставлена по-разному, в зависимости от конечной цели применения машинного зрения. Выделяется 3 основных вида задач детекции: задача построения рамки вокруг объекта, задача сегментации и задача поиска ключевых точек объекта [2]. Задача построения рамки вокруг обнаруженного объекта – одна из классических задач детектирования применительно к методам машинного зрения. Разработаны и применяются различные типы задания координат рамки вокруг объекта. Каждый тип применяется для определенной архитектуры нейронной сети, но может быть конвертирован в другой тип. Задача сегментации предполагает выделение контура объекта и требует точной разметки обучающей выборки. Разметка ключевыми точками чаще всего используется для оценки поз тела, распознавания жестов рук или мимики лица [3]. В этом случае в обучающей выборке требуется указание ключевых точек, которые определяют объект.

Совершенствование архитектур нейронных сетей и методов их обучения является важной работой, обеспечивающей постоянное увеличение точности детекции в соответствии с выбранными метриками оценки качества обучения. Но эти задачи, как правило, решают-

ся на объемных общеизвестных наборах данных и, в результате, архитектуры нейронных сетей и методы обучения становятся максимально универсальными. В случае, если в решаемой прикладной задаче требуется детекция таких объектов как, например, человек или автомобиль – универсальность является преимуществом и позволяет получить максимальную точность. Но если в прикладной задаче требуется детекция специфичного объекта, отличного от включенного в набор данных, на котором происходило совершенствование архитектуры нейронной сети и метода обучения, точность детекции в соответствии с выбранными метриками может не соответствовать требуемой. В таком случае требуется выработка специфичных методов предобработки изображений и настройка гиперпараметров обучения для достижения требуемой точности в соответствии с выбранной метрикой обучения.

Одной из таких задач выступает задача создания системы управления беспилотным аппаратом на основе результатов детекции окружающих объектов. В таком случае общий принцип управления сводится к детекции объекта и выработке управляющего сигнала в зависимости от требуемых в данный момент действий. Управляющий сигнал формируется в зависимости от поставленной в данный момент задачи и не является предметом изучения в данной работе. Можно привести примеры применения подобной системы для понимания необходимости детекции объектов: поиск и перемещение к площадке приземления в случае беспилотного летательного аппарата, поиск определенных видов насекомых или пораженных растений в случае применения беспилотных аппаратов в сельском хозяйстве, обнаружение объекта на пути перемещения для предотвращения столкновения и т.д. В данной работе под задачей детекции понимается построение прямоугольной выделенной области вокруг обнаруженного объекта [4].

Целью данной работы выступает повышение точности системы управления беспилотным аппаратом на основе машинного зрения путем совершенствования методов обработки исходной информации и разработки методики подготовки набора данных для обучения нейронной сети.

Для достижения поставленной цели требуется решение следующих задач:

1. Определение методики формирования набора исходных данных.
2. Определение видов предварительной обработки изображений для детекции.

3. Выбор метрики оценки точности детекции.

4. Выбор архитектуры нейронной сети.

5. Проведение экспериментов по определению лучшего метода формирования набора исходных данных и оптимальных гиперпараметров нейронной сети.

Выбор нейронной сети и методика формирования набора данных

Набор данных для обучения нейронной сети для задачи детекции представляет собой набор изображений и меток к каждому изображению. Набор изображений в работе формировался с использованием мобильного телефона. Такой подход объясняется следующими заключениями:

- возможность дальнейшего масштабирования системы обучения - мобильный телефон является широко распространенным устройством;
- отсутствием привязки к специфичному дорожному съемочному оборудованию;
- возможностью быстрого сбора информации с разных мобильных телефонов разными людьми.

Для создания обучающего набора данных и тестирования использовались телефоны Xiaomi, POCO X3 Pro. Были установлены следующие параметры фотографий: разрешение 4000x3000px, f/1.79, 1/33s, ISO: 588, без использования вспышки.

Набор меток, как отмечено выше, определяется исходя из выбранной архитектуры нейронной сети и метода обучения нейронной сети. Для достижения поставленной в работе цели требуется выбор архитектуры нейронной сети, которая обеспечит возможность детекции объектов в потоковом видео. При этом, учитывая специфику технического объекта управления – беспилотного аппарата, детекция должна обеспечивать своевременное реагирование на изменение внешней ситуации. Поэтому скорость работы обученной нейронной сети должна быть не менее 15-20 детектируемых кадров в секунду.

Среди известных архитектур нейронных сетей можно выделить YOLO, представленную в 2016 году [5]. Среди преимуществ YOLO можно отметить:

- ввод сразу всего изображения, что положительно влияет на скорость работы обученной нейронной сети;
- обнаружение нескольких объектов, что применимо в задаче управления беспилотными аппаратами;

- возможность работы с изображениями любого размера, что обеспечивает низкие требования к формированию набора данных для обучения;

- возможность использовать код без ограничений в коммерческих проектах, изменять и дополнять код, а также использовать в патентах [6].

Таким образом, в качестве используемой модели выбрана YOLOv8. Помимо указанных преимуществ YOLOv8 поставляется предобученной в разных вариантах, в зависимости от количества используемых параметров: nano, small, medium, large, extra large. В данной работы выбрана модель nano с 3,2 миллионов параметров. Выбор объясняется дальнейшим применением модели – на беспилотных аппаратах затруднительно использовать мощные ускорители вычислений.

Для разметки исходного набора изображений используется 5 параметров:

1. n — номер класса объекта
2. x — относительная координата bounding box'a объекта по оси Ox
3. y — относительная координата bounding box'a объекта по оси Oy
4. w — относительная ширина bounding box'a объекта
5. h — относительная высота bounding box'a объекта

Разметка исходного набора информации является ручной технической задачей и не является предметом исследования в настоящей работе.

Для формирования набора данных требовалось собрать изображения целевого детектируемого объекта с разного расстояния и разных позиций объекта на изображении. При проведении экспериментов применялось обучение с разным количеством изображений с разного расстояния и определялась точность обучения модели в соответствии с выбранными метриками обучения. Целевой детектируемый объект выбран исходя из соображений выбора объекта максимально не соответствующего набору изображений COCO val2017 (80 классов изображений), который используется для предобучения YOLO. [7]

Для проведения экспериментов по определению состава набора данных для обучения собраны следующие изображения:

- фотографии сделанные с расстояния 5 метров, содержащие ключевой объект – 100 шт;
- фотографии сделанные с расстояния 10 метров, содержащие ключевой объект – 100 шт;
- фотографии сделанные с расстояния 15 метров, содержащие ключевой объект – 100 шт;

- фотографии сделанные с расстояния 20 метров, содержащие ключевой объект – 100 шт;
- фотографии, не содержащие объект – 100 шт.

Все фотографии делились на обучающую и тестовую выборки в соотношении 80/20.

Выбор метрики оценки качества обучения и гиперпараметров модели

Оценка точности обучения нейронной сети – один из важнейших вопросов при разработке систем, использующих машинное зрение. Это объясняется тем, что в зависимости от выбранной метрики оценки точности зависит целевой результат не только непосредственно детекции объекта, но и результат работы всей системы в целом. Ошибочный выбор метрики точности обучения может привести к невозможности использования разработанной системы.

Для оценки точности детекции используется метрика Intersection over Union (IOU) или коэффициент Жаккара [8]. Расчет метрики осуществляется согласно формуле

$$J(A, B) = \frac{|A \cap B|}{|A \cup B|}$$

где A – прямоугольник, определяющий границы объекта, обнаруженного обученной моделью;

B – прямоугольник, определяющий размеченные границы объекта.

Визуально расчет метрики можно изобразить, как показано на рис. 1.

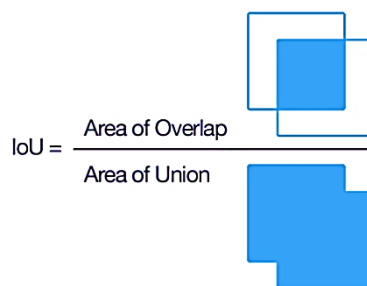


Рис. 1. Расчет метрики Intersection over Union

Метрика IoU выражается числом от 0 до 1 и отражает степень совпадения внутреннего «объема» двух объектов – эталонного (ground true) и текущего.

Метрика IoU применима к одному изображению, но в наборе данных для оценки точности обученной модели используется набор изображений. Поэтому применяется средняя точность. Для средней точности модели делаются прогнозы по всем изображениям и рас-

считывается средняя точность по формуле, представленной на рис. 2.

$$\text{mean}((\text{mIoU} * \text{image}) * \text{images})$$

Среднее значение IoU для одного изображения

Среднее значение IoU для всех изображений

Рис. 2. Расчет средней точности

Дополнительно к метрике IoU в экспериментальном исследовании использована метрика mean average precision. Метрика mAP (mean average precision) используется для оценки качества обученной модели обнаружения объектов и показывает, насколько безошибочно нейронная сеть смогла обнаружить объекты на изображениях из валидационной выборки [9].

Для увеличения устойчивости модели детекции к новым данным, а также для организации возможных искажений исходных данных применяется метод аугментации. Для всех изображений в исходном наборе данных применена аугментация (поворот на 90 градусов, случайный поворот от -20 до +20 градусов), итоговое количество изображений увеличено в 3 раза.

Для унификации исходных изображений применяется изменение разрешения. Дополнительно изменение разрешения в сторону сжатия позволяет сократить время обучения модели и время выполнения детекции на обученной модели. Исходные изображения были уменьшены до разрешения 640x640 с помощью билинейной интерполяции [10].

Учитывая, что модель YOLO является предобученной, эксперименты по изменению архитектуры нейронной сети не производились. В качестве изменяемых гиперпараметров модели использованы:

- количество эпох обучения;
- размер пакета (batch);
- изменялся оптимизатор обучения;
- скорость обучения;
- импульс обучения (momentum).

Экспериментальное исследование метода формирования набора данных для обучения модели

Одной из наиболее важных задач, решаемых в ходе проведения экспериментов по определению оптимального метода формирования набора данных для обучения, выступила задача определения количества изображений, сделан-

ных с определенного расстояния, для получения наилучшей точности обученной модели.

Для примера визуализации результатов обучения модели – проведено тестовое обучение на наборе данных, содержащем изображения, сделанные с расстояния 5 метров. Обучение модели здесь и далее производилось с помощью CUDA ядер на видеокарте Nvidia GeForce RTX 3060 Ti.

Для оценки метрик точности обучения в тестовую выборку добавлены следующие фотографии с указанием расстояния до фотографируемого объекта:

- 5 метров – 40 шт;
- 10 метров – 40 шт;
- 15 метров – 40 шт;
- 20 метров – 40 шт.

Время обучения составило 23 минуты. Обученная модель показала следующие значения метрик оценки точности обучения:

- mIoU: 0.67;
- mAP50: 0.73.

Безотносительно к другим экспериментам эти значения не показательны. Поэтому проведен эксперимент по определению набора данных для достижения максимального значения указанных метрик точности обучения. В табл. 1 представлены результаты эксперимента, где указаны: исходный набор данных в виде количества изображений и расстояния до детектируемого объекта и показатели метрик.

Таблица 1

Эксперимент по обучению модели

Набор данных	Время обучения	mIoU	mAP50
5 метров – 300 шт	23 минуты	0.67	0.73
5 метров – 300 шт 10 метров – 300 шт	40 минут	0.82	0.752
5 метров – 300 шт 10 метров – 300 шт 15 метров – 300 шт	1 час 10 минут	0.78	0.858
5 метров – 300 шт 10 метров – 300 шт 15 метров – 300 шт 20 метров – 300 шт	2 часа	0.816	0.83
10 метров – 300 шт	24 минуты	0.62	0.557
15 метров – 300 шт	15 минут	0.37	0.414
20 метров – 300 шт	18 минут	0.31	0.097
10 метров – 300 шт 15 метров – 300 шт	40 минут	0.62	0.593
10 метров – 300 шт 15 метров – 300 шт 20 метров – 300 шт	44 минуты	0.56	0.453
5 метров – 300 шт 15 метров – 300 шт	40	0.81	0.862
5 метров – 300 шт 20 метров – 300 шт	24 минуты	0.64	0.73

Для визуализации представленной информации построен график изменения параметров эксперимента, представленный на

рис. 3. Значения графика отсортированы по значению метрики mAP50.

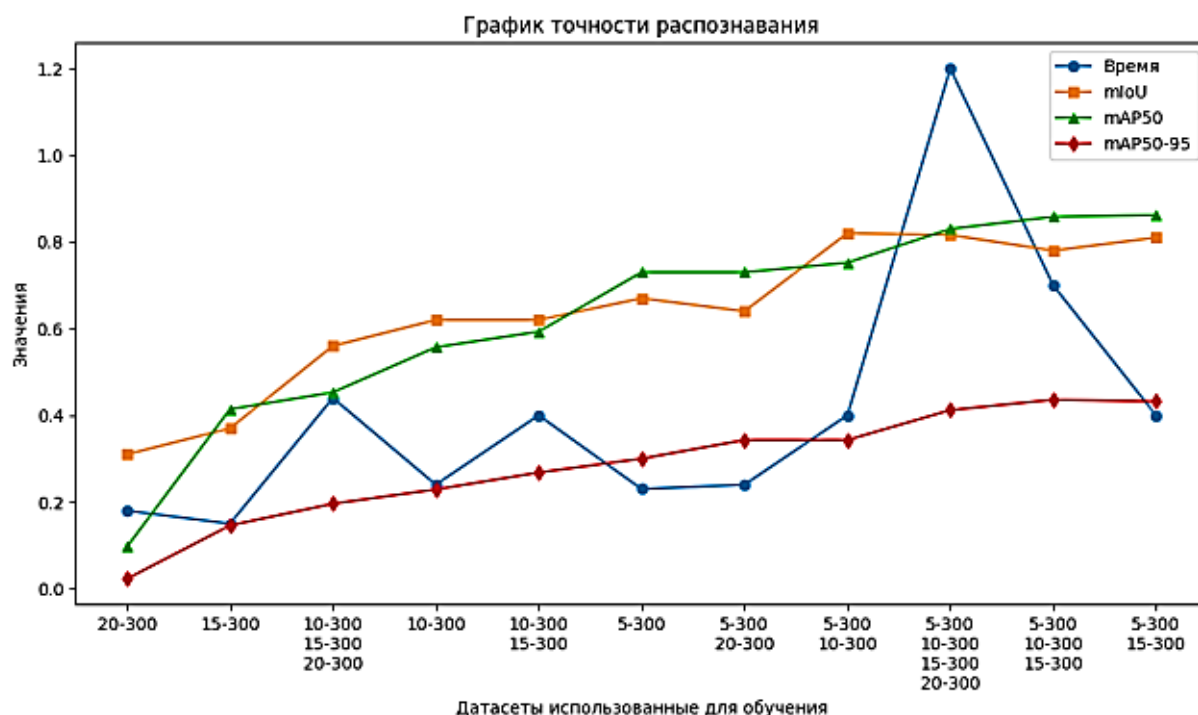


Рис. 3. Графическое представление результатов эксперимента

Исходя из полученной информации можно сделать вывод о том, что оптимальным набором данных с точки зрения получения максимального значения метрик точности обучения является набор данных, содержащий 300 фотографий с расстояния 5 метров и 300 фотографий с расстояния 15 метров. Также следует обратить внимание, что наборы данных, содержащие фотографии с расстояния 5 метров, показали лучшие значения метрик точности модели в сравнении с наборами данных, не содержащих подобных фотографий.

Помимо определения оптимального набора данных для обучения установлены лучшие гиперпараметры обучения модели для данной прикладной задачи:

- 200 эпох обучения;
- размер пакета – 16;
- оптимизатор AdamW;
- скорость обучения – 0,002;
- импульс – 0,937.

Заключение

В результате проведения экспериментальной работы по определению набора данных для обучения модели машинного зрения, используемой в системе управления беспилотным аппаратом, предпочтительным является

использование максимального количества фотографий с близкого расстояния. Это объясняется тем, что объект на фотографиях, выполненных близко, виден целиком и модель машинного зрения запоминает все возможные позиции объекта. Использование изображений удаленного объекта в наборе данных также необходимо, но, в большей степени, при обучении играет дополнительную роль в качестве повышения точности отделения целевого объекта от окружающей его сцены.

Адаптация алгоритмов машинного зрения к прикладным задачам обеспечит возможности применения глубоких нейронных сетей во всех сферах деятельности. Исследование специфичных наборов данных и специфичных задач позволит адаптировать параметры нейронных сетей и повысить точность метрик обучения.

Литература

1. Иванов П.В., Бойков А.В. Области применения систем машинного зрения // Записки Горного института. 2011. Т. 192. С. 191-192.
2. Павлов М.П. Сравнение моделей yolov5 для задачи детекции радужной форели в видеопотоке // StudArctic Forum. Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Петрозаводский государственный университет», 2022. Т. 7. № 4. С. 35-40.

3. Детекция ключевых точек лица с помощью капсульных нейронных сетей / А.А. Бойцев [и др.] // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2023. Т. 23. № 3. С. 506-518.
4. Vehicle wheel weld detection based on improved YOLO v4 algorithm / L.T. Jiao et al. // Компьютерная оптика. 2022. Т. 46. № 2. С. 271-279.
5. A Review of Yolo algorithm developments / P. Jiang et al. // Procedia Computer Science. 2022. Т. 199. С. 1066-1073.
6. Боков П.А., Кравченя П.Д. Экспериментальный анализ точности и производительности разновидностей архитектур YOLO для задач компьютерного зрения // Программные продукты и системы. 2020. Т. 33. №. 4. С. 635-640.
7. Kim D.H. Evaluation of COCO validation 2017 dataset with YOLOv3 // Evaluation. 2019. Vol. 6. №. 7. Pp. 10356-10360.
8. Rahman M.A., Wang Y. Optimizing intersection-over-union in deep neural networks for image segmentation // International symposium on visual computing. Springer, Cham, 2016. С. 234-244.
9. Henderson P., Ferrari V. End-to-end training of object class detectors for mean average precision // Computer Vision-ACCV 2016: 13th Asian Conference on Computer Vision, Taipei, Taiwan, November 20-24, 2016, Revised Selected Papers, Part V 13. Springer International Publishing, 2017. С. 198-213.
10. Тимофеева Н.Е., Гераськин А.С. Исследование возможности улучшения алгоритма билинейной интерполяции для корректировки цифровых изображений применением теории полей ориентации // Вестник ВГУ. Серия: Системный анализ и информационные технологии. 2018. № 1. С. 119-125.

Поступила 27.10.2023; принята к публикации 11.12.2023

Информация об авторах

Гусев Павел Юрьевич - канд. техн. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), тел. +7(952)551-16-40, e-mail: pgusev@cchgeu.ru
Сокольников Виктор Владимирович – старший преподаватель, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), тел. +7(904)213-13-44, e-mail: vsokolnikov@cchgeu.ru
Ветохин Валерий Викторович - канд. техн. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), тел. +7(906)588-60-02, e-mail: daiolix@yandex.ru
Агеев Андрей Александрович – техник, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), тел. +7(920)409-41-88, e-mail: ageevaa@yandex.ru

INFORMATION PROCESSING AND DATA SET PREPARATION FOR A CONTROL SYSTEM BASED ON OBJECT DETECTION USING MACHINE VISION

P.Yu. Gusev, V.V. Sokolnikov, V.V. Vetokhin, A.A. Ageev

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract: an understanding of the term machine vision as a specific part of machine learning is presented. The prerequisites and directions for the development of neural network architectures are considered. The detection task and the features of their data set preparation for various detection tasks are described. As an example of the applied application of machine vision, a control system for unmanned vehicles is considered. The purpose of this work is to increase the accuracy of the control system for an unmanned vehicle based on machine vision by improving methods for processing initial information and developing a methodology for preparing a data set for training a neural network. The work solves the problems of choosing a neural network architecture, evaluation metrics, quality of training, hyperparameters for setting up the model. Experimental study of data sets for training the model was also carried out. The paper describes the methodology for generating a data set for training the model and describes the main stages of collecting information. The metrics used in the experimental study of data sets for training a computer vision model are presented. A neural network architecture has been selected that provides a solution to the applied problem of controlling an unmanned vehicle. As a result of the experiments, data was obtained that allows us to draw conclusions about the rules for generating data sets for this type of applied problems

Key words: machine learning, machine vision, neural network, control system

Acknowledgments: the research was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation as a part of the state assignment (project no. FZGM-2023-0011)

References

1. Ivanov P.V., Boykov A.V. "Areas of application of machine vision systems", *Journal of Mining Institute (Zapiski Gornogo instituta)*, 2011, vol. 192, pp. 191-192.
2. Pavlov M.P. "Comparison of yolov5 models for the task of detecting rainbow trout in a video stream", *StudArctic Forum*, Petrozavodsk State University, 2022, vol. 7, no. 4, pp. 35-40.
3. Boytsev A.A. et al. "Detection of key points of the face using capsule neural networks", *Scientific and technical bulletin of information technologies, mechanics and optics (Nauchno-tehnicheskiy vest-nik informatsionnykh tekhnologiy, mekhaniki i optiki)*, 2023, vol. 23, no. 3, pp. 506-518.

4. Jiao L.T. et al. "Vehicle wheel weld detection based on improved YOLO v4 algorithm", *Computer optics (Kompyuternaya optika)*, 2022, vol. 46, no. 2, pp. 271-279.
5. Jiang P. et al. "A Review of Yolo algorithm developments", *Procedia Computer Science*, 2022, vol. 199, pp. 1066-1073.
6. Bokov P.A., Kravchenya P.D. "Experimental analysis of the accuracy and performance of varieties of YO-LO architectures for computer vision tasks", *Software Products and Systems (Programmnyye produkty i sistemy)*, 2020, vol. 33, no. 4, pp. 635-640.
7. Kim D H. "Evaluation of COCO validation 2017 dataset with YOLOv3", *Evaluation*, 2019, vol. 6, no. 7, pp. 10356-10360.
8. Rahman M.A., Wang Y. "Optimizing intersection-over-union in deep neural networks for image segmentation", *International symposium on visual computing*, Springer, Cham, 2016, pp. 234-244.
9. Henderson P., Ferrari V. "End-to-end training of object class detectors for mean average precision", *Computer Vision-ACCV 2016: 13th Asian Conference on Computer Vision*, Taipei, Taiwan, November 20-24, 2016, Revised Selected Papers, Part V 13, Springer International Publishing, 2017, pp. 198-213.
10. Timofeeva N.E., Geraskin A.S. "Study of the possibility of improving the bilinear interpolation algorithm for correcting digital images using the theory of orientation fields", *The Bulletin of Voronezh State University. Series: System analysis and information technologies (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Sistemnyy analiz i informatsionnyye tekhnologii)*, 2018, no. 1, pp. 119-125.

Submitted 27.10.2023; revised 11.12.2023

Information about the authors

Pavel Yu. Gusev – Cand. Cs. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), tel. +7(952)551-16-40, e-mail: pgusev@cchgeu.ru

Viktor V. Sokolnikov - Senior Lecturer, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), tel. +7(904)213-13-44, e-mail: vsokolnikov@cchgeu.ru

Valery V. Vetokhin - Cand. Cs. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), tel. +7(906)588-60-02, e-mail: daiolix@yandex.ru

Andrey A. Ageev - Technician, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), tel. +7(920)409-41-88, e-mail: ageevaa@yandex.ru

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СОВРЕМЕННЫХ АЛГОРИТМОВ СЖАТИЯ ДАННЫХ БЕЗ ПОТЕРЬ В СОСТАВЕ ПРОГРАММНЫХ РЕШЕНИЙ

М.С. Войтенко, А.С. Войтенко, В.В. Сафронов, В.Н. Черников, М.Н. Аралов

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

Аннотация: представлено исследование современных алгоритмов сжатия данных без потерь в составе программных решений. Современные программные решения предлагают не только традиционные методы сжатия информации путём математических вычислений, но и сжатие посредством использования нейронных сетей. Актуальность проведённого исследования обусловлена потребностью в эффективном снижении объёма данных, что способствует экономии ресурсов, пропускной способности, а также повышению производительности систем. Приведено краткое описание современных и актуальных программных решений для сжатия данных без потерь, приведены результаты тестирования различных программных решений для сжатия текстовой информации на основе набора данных enwik8 с указанием времени компрессии и декомпрессии данных, конечного объёма, коэффициента сжатия и применяемых в ходе тестирования входных аргументов. Также приведена таблица со сравнительными характеристиками функциональных возможностей программных решений и алгоритмов сжатия, которые используются по умолчанию в данных решениях. Отдельно выделены программные решения, которые имеют возможность многопоточной обработки, шифрования, архивации. Перечислены программные решения, имеющие аппаратную поддержку GPU, и в основе которых используются нейросетевые модели

Ключевые слова: современные алгоритмы сжатия данных, сжатие данных без потерь, программы для сжатия данных без потерь, нейронные сети, машинное обучение

Введение

В современном мире, где данные стали жизненно важным ресурсом, а информационные потоки постоянно растут, роль возможности сжатия данных становится все более критичной.

Современные алгоритмы сжатия данных без потерь представляют собой сложные математические и программные конструкции, разработанные с целью минимизации размера данных при сохранении их целостности. Они обеспечивают сбалансированный подход к оптимизации использования ресурсов, экономии пропускной способности сетей, улучшению производительности и сокращению объёма хранимых данных.

В данной статье приведён сравнительный анализ основных современных алгоритмов сжатия данных без потерь, исследованы их преимущества и ограничения. Важно отметить, что все рассмотренные программные решения (NNCP, ZPAQ, BSC, ZSTD, XZ, ZIP, BZIP2, LSTM, CMIX) обладают открытым исходным кодом.

Обзор функциональных возможностей современных алгоритмов сжатия данных без потерь

NNCP v2

NNCP – это программное решение для сжатия данных без потерь, основанное на нейросетевой модели Transformer XL [1].

Transformer работает следующим образом: входной текст разбивается на n-граммы, которые затем кодируются как лексемы, и каждая лексема преобразуется в вектор с использованием таблицы вложений слов. На каждом уровне лексемы контекстуализируются с другими лексемами в рамках контекстного окна, используя параллельный многоголовый механизм внимания. Этот механизм позволяет увеличивать сигнал ключевых лексем и ослаблять влияние менее значимых.

ZPAQ

ZPAQ – архиватор, использующий алгоритм ZPAQ на основе алгоритмов сжатия LZ77, BWT и контекстного смешивания в самоописываемом формате в зависимости от уровня сжатия и типов файлов.

ZPAQ создаёт сжатые архивы и зашифрованные инкрементные резервные копии с журналированием [2].

Сначала проверяются даты последнего изменения файлов и архивированные даты, а неизменённые файлы пропускаются. Затем груп-

пируются оставшиеся похожие файлы с округлением их размера, что обеспечивает увеличение скорости группировки внутри каталогов. Далее файлы группируются по убыванию, разделяются на фрагменты, ориентируясь на их содержимое, и проверяются с использованием хэшей. Несовпадающие фрагменты сжимаются параллельно.

BSC

BSC – это компрессор, использующий алгоритм блочно-сортiroвочного сжатия данных libbsc.

BSC разбивает большие файлы на блоки, которые могут обрабатываться параллельно на многоядерных процессорах и графических ускорителях. При распаковке размер используемого блока считывается из заголовка сжатого файла. Размер блока и количество одновременно обрабатываемых блоков влияют как на уровень сжатия, так и на объем требуемой памяти для процессов сжатия и распаковки [3].

ZSTD

ZSTD – это программная реализация архиватора с возможностью сжатия данных без потерь на основе алгоритма Zstandard [4].

Алгоритм объединяет в себе как метод сжатия данных, который использует словарь типа LZ77, так и эффективное энтропийное кодирование типа ANS. Данный алгоритм кодирования, по аналогии с кодом Хаффмана, позволяет использовать нецелое количество битов для представления единиц информации.

XZ

XZ – это компрессор, использующий по умолчанию алгоритм сжатия LZMA2. Данный алгоритм поддерживает произвольно масштабируемое сжатие и распаковку в несколько потоков одновременно, а также эффективное сжатие данных, которые частично несжимаемы. LZMA2 – это улучшенный алгоритм сжатия LZ77 за счет специальных процедур обработки двоичных файлов и алгоритма интервального кодирования. В основе алгоритма лежит поиск по словарю [5].

ZIP

ZIP – это компрессор с возможностью архивации данных. Для сжатия данных по умолчанию используется алгоритм DEFLATE. Алгоритм находит дубликаты строк во входных данных и заменяет их указателями на предыдущие строки (с ограничением расстояния и длины). Если строка не имеет дубликатов в предыдущих

32K байтах, она сжимается как литерал. Сжатие литералов и длин совпадений осуществляется с использованием двух деревьев Хаффмана, хранящихся в начале каждого блока. Поиск дублирующихся строк выполняется с использованием хэш-таблицы, и выбирается наиболее длинное совпадение. Хэш-цепочки имеют единичные ссылки, и очень длинные цепочки обрезаются на определенной длине [6].

BZIP2

BZIP2 – это программное решение на основе алгоритма Барроуза-Уилера. Сначала создается таблица, содержащая все возможные циклические сдвиги исходной строки. Затем строки в таблице сортируются в лексикографическом порядке. Результатом преобразования является последний столбец в отсортированной таблице, а также номер строки, который соответствует исходной строке [7].

LSTM

LSTM – это программное решение, в основе которого лежит модель рекуррентной нейронной сети. LSTM использует ячейку памяти (контейнер) с тремя затворами: входным, забывающим и выходным. Входные ворота управляют добавлением информации, затвор забывания – удалением, а выходные ворота – выводом информации. Это позволяет LSTM-сетям выборочно обрабатывать информацию и учиться на долгосрочных зависимостях [8].

CMIX

CMIX – это программа сжатия данных без потерь на основе нейронной сети [9], которая достигает высокой степени сжатия за счет интенсивной загрузки графического процессора и памяти. Исходная задача преобразуется в многоцелевую задачу с ограничениями, которую можно решить через равнозначную задачу оптимизации на максимум-минимум [10].

Представление экспериментальных данных

В табл. 1 представлены результаты тестов сжатия 100 Мб (enwik8) текстовой информации различными алгоритмами. На рис. 1 представлен график сравнительных значений по показателю коэффициента сжатия в результате теста.

Сравнительные характеристики функциональных возможностей современных алгоритмов сжатия данных без потерь можно увидеть в табл. 2.

Все вычисления проводились на процессоре AMD Ryzen 5 3600X.

Таблица 1

Результаты тестов сжатия 100 Мб текстовой информации различными алгоритмами

Реализация	Время сжатия, сек	Объем, байт	Коэффициент сжатия	Время распаковки, сек	Дополнительные параметры
ZPAQ	162,248	19625017	0,19625017	221,838	-m5 -t12
BSC	2,499	20790744	0,20790744	6,475	-e2
ZSTD	58,164	25333695	0,25333695	0,187	--ultra -22 -T12 --long=31 --memory=4095MB
NNCP	25656,037	20852654	0,20852654	40047,589	-T 12
XZ	84,12	24778796	0,24778796	1,206	-T 1 -k -z -9 -e -v --lzma2=dict=1610612736,depth=4294967295
ZIP	6,045	36445385	0,36445385	0,774	-9
BZIP2	7,526	29008758	0,29008758	3,108	-z -k -9
LSTM	26529,814	23178621	0,23178621	28088,944	

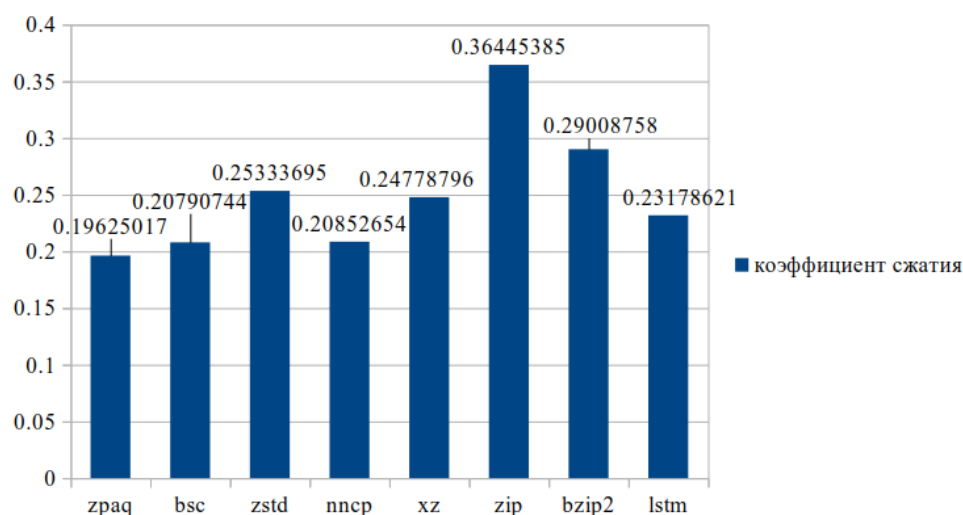


Рис. 1. График сравнительных значений по показателю коэффициента сжатия текстовой информации размером в 100 Мб

Таблица 2

Сравнительные характеристики функциональных возможностей современных алгоритмов сжатия данных без потерь

Реализация	Алгоритм	Многопоточность	Поддержка GPU	Поддержка шифрования	Возможность архивации	На основе нейронных сетей
ZPAQ	ZPAQ	да	нет	да	да	нет
BSC	libbsc	да	да	нет	нет	да
ZSTD	Zstandard	да	нет	нет	да	нет
NNCP	NNCP	да, до 4 потоков	да	нет	нет	да
XZ	LZMA2	Да	нет	нет	нет	нет
ZIP	DEFLATE	нет	нет	да	да	нет
BZIP2	Алгоритм Барроуза-Уилера	нет	нет	нет	нет	нет
LSTM	LSTM	нет	да	нет	нет	да
CMIX	CMIX	нет	да	нет	нет	да

Заключение

Были подробно проанализированы программные решения, применяющие современные методы сжатия данных без потерь. Выделены ключевые функциональные особенности, а также проведено тестирование этих программ на текстовых данных объёмом 100 Мб (enwik8).

Минимальным объёмом информации и максимальным коэффициентом сжатия обладает ZPAQ, однако лидирующую позицию по временному интервалу сжатия занимает программное решение BSC. Вместе с тем, минимальный временной интервал распаковки текстовой информации имеет ZSTD. Если же определяющим фактором будет являться инновационный подход к сжатию информации, то следует отдать предпочтение следующим программным решениям: BSC, NNCP, LSTM и CMIX.

Таким образом, выделение единственного однозначно оптимального решения не представляется возможным, так как контекст использования того или иного современного алгоритма сжатия данных без потерь чрезвычайно важен. Тем не менее, приведённый в статье сравнительный анализ значительно облегчит выбор конечного пользователя в пользу определённого программного решения с соответствующим алгоритмом сжатия данных без потерь для текстовой информации.

Литература

1. Bellard F. NNCP: Lossless Data Compression with Neural Networks. URL: https://bellard.org/nncp/nncp_v2.1.pdf (дата обращения: 15.10.2023).
2. Mahoney M. ZPAQ: Incremental Journaling Backup Utility and Archiver. URL: <https://matmahoney.net/dc/zpaq.html> (дата обращения: 22.10.2023).
3. GitHub – IlyaGrebnev/libbse. URL: <https://github.com/IlyaGrebnev/libbse> (дата обращения: 23.10.2023).
4. GitHub – facebook/zstd. URL: <https://github.com/facebook/zstd> (дата обращения: 20.10.2023).
5. GitHub – conor42/fast-lzma2. URL: <https://github.com/conor42/fast-lzma2> (дата обращения: 10.10.2023).
6. Oswal S., Singh A., Kumari K. DEFLATE compression algorithm // International Journal of Engineering Research and General Science. 2016. Vol. 4. №1. PP. 430-436.
7. Nelson M. Data Compression with the Burrows-Wheeler Transform // Lecture Notes in Computer Science. 1999. Vol. 1672. PP. 34-47.
8. Convolutional LSTM Network: A Machine Learning Approach for Precipitation Nowcasting / Xingjian Shi, Zhourong Chen, Hao Wang [et al.] // 2015 International Conference on Neural Information Processing Systems. 2017. PP. 802–810.
9. GitHub – byronknoll/cmix. URL: <https://github.com/byronknoll/cmix> (дата обращения: 21.10.2023).
10. CMIX: Deep Multi-agent Reinforcement Learning with Peak and Average Constraints / Chenyi Liu, Nan Geng, V. Aggarwal [et al.] // Lecture Notes in Computer Science. 2021. Vol. 12975. PP. 157-173.

Поступила 30.10.2023; принята к публикации 12.12.2023

Информация об авторах

Войтенко Максим Сергеевич – аспирант, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: voytenkom@yandex.ru

Войтенко Анастасия Сергеевна – студент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: zabavonka@mail.ru

Сафронов Виталий Владимирович – канд. техн. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: vitolik@bk.ru

Черников Вячеслав Николаевич – канд. техн. наук, ассистент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: devious.code@gmail.com

Аралов Михаил Николаевич – канд. техн. наук, ассистент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84); e-mail: aralow@mail.ru

COMPARATIVE ANALYSIS OF MODERN LOSSLESS DATA COMPRESSION ALGORITHMS AS PART OF SOFTWARE SOLUTIONS

M.S. Voitenko, A.S. Voitenko, V.V. Safronov, V.N. Chernikov, M.N. Aralov

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Annotation: this paper presents an extensive study of modern lossless data compression algorithms as part of software solutions. Modern software solutions offer not only traditional methods of information compression by mathematical calculations, but also compression through the use of neural networks. The relevance of this research is due to the need for effective data reduction, which helps to save resources, bandwidth, as well as to improve the performance of systems. The article contains a brief description of modern and actual software solutions for lossless data compression, test results of various software solutions for text information compression based on the enwik8 dataset with indication of data compression and decompression time, final volume, compression ratio and input arguments used during testing. A table with comparative characteristics of the functionality of software solutions and compression algorithms used by default in these solutions is also given. Software solutions that have the ability of multithreaded processing, encryption, archiving are highlighted separately. Software solutions with GPU hardware support and based on neural network models are listed

Key words: state-of-the-art data compression algorithms, lossless data compression, lossless data compression software, neural networks, machine learning

References

1. Bellard F. "NNCP: Lossless Data Compression with Neural Networks", available at: https://bellard.org/nncp/nncp_v2.1.pdf (accessed 15.10.2023).
2. Mahoney M. "ZPAQ: Incremental Journaling Backup Utility and Archiver", available at: <https://mattmahoney.net/dc/zpaq.html> (accessed 22.10.2023).
3. "GitHub – IlyaGrebnev/libbse", available at: <https://github.com/IlyaGrebnev/libbse> (accessed 23.10.2023).
4. "GitHub – facebook/zstd", available at: <https://github.com/facebook/zstd> (accessed 20.10.2023).
5. "GitHub – conor42/fast-lzma2", available at: <https://github.com/conor42/fast-lzma2> (accessed 10.10.2023).
6. Oswal S., Singh A., Kumari K. "DEFLATE compression algorithm", *International Journal of Engineering Research and General Science*, 2016, vol. 4, no. 1, pp. 430-436.
7. Nelson M. "Data Compression with the Burrows-Wheeler Transform", *Lecture Notes in Computer Science*, 1999, vol. 1672, pp 34-47.
8. Xingjian Shi, Zhourong Chen, Hao Wang [et al.] "Convolutional LSTM Network: A Machine Learning Approach for Precipitation Nowcasting", *2015 International Conference on Neural Information Processing Systems*, 2017, pp. 802–810.
9. "GitHub – byronknoll/cmix", available at: <https://github.com/byronknoll/cmix> (accessed 21.10.2023).
10. Chenyi Liu, Nan Geng, Aggarwal V. [et al.] "CMIX: Deep Multi-agent Reinforcement Learning with Peak and Average Constraints" *Lecture Notes in Computer Science*, 2021, vol. 12975, pp. 157-173.

Submitted 30.10.2023; revised 12.12.2023

Information about the authors

Maxim S. Voytenko – Graduate student, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: voytenkom@yandex.ru

Anastasiya S. Voytenko – Bachelor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: zabavonka@mail.ru

Vitaliy V. Safronov – Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: vitolik@bk.ru

Vyacheslav N. Chernikov – Cand. Sc. (Technical), Senior Lecturer, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: devious.code@gmail.com

Mikhail N. Aralov – Cand. Sc. (Technical), Senior Lecturer, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia); e-mail: aralow@mail.ru

**МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЗАДАЧИ ОБТЕКАНИЯ СФЕРЫ
НЕНЬЮТОНОВСКИМ ПОТОКОМ НЕСЖИМАЕМОЙ
ЖИДКОСТИ ПРИ МАЛЫХ ЧИСЛАХ РЕЙНОЛЬДСА****В.С. Купцов, А.А. Катрахова****Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия**

Аннотация: построена математическая модель, в которой рассматривается обтекание неподвижной сферы неньютоновским стационарным потоком несжимаемой жидкости. Для построения этой модели были использованы ранее полученные результаты решения задачи об обтекании сферы потоком вязкой несжимаемой жидкости при малых числах Рейнольдса. Для решения этой задачи использовалась сферическая система координат для уравнений в частных производных (в напряжениях) и уравнение неразрывности данного течения. В качестве неньютоновской жидкости рассматривалась жидкость с нелинейными компонентами скоростей деформаций (дилатантная жидкость и псевдопластики). С учетом нелинейности поля деформаций данного течения жидкости вычислены компоненты поля напряжений. Рассмотрен частный вариант решения данной задачи, который совпадает с классическим вариантом (обтекание сферы ньютоновским стационарным потоком вязкой несжимаемой жидкости). Также получены аналитические формулы для компоненты силового воздействия неньютоновской жидкости на неподвижную сферу. Формулы реализуются для конкретных неньютоновских жидкостей аналитически или численно, в зависимости от вида жидкости. Частный случай данного результата совпадает с формулой для силового воздействия ньютоновской жидкости на сферу, совпадает с классической формулой Стокса

Ключевые слова: математическая модель, уравнения в частных производных, сфера, сферические координаты, стационарный поток, неньютоновская несжимаемая жидкость

Введение

В работе рассматривается так называемая неньютоновская жидкость, которая обтекает неподвижную сферу. Как известно в число неньютоновских жидкостей входят нефть, пластмассы, полимеры и другие синтетические материалы. При течении и обтекании тел этими жидкостями проявляются аномальное их поведение. Кроме этого математическая модель таких течений мало изучена и представляет не только теоретический интерес, но и имеет большое практическое значение. В работе были найдены гидродинамические параметры обтекания неподвижной сферы неньютоновской жидкостью (рассматривалась дилатантная жидкость и псевдопластики).

**Математическая модель течения
неньютоновской жидкости**

Поместим сферу радиуса $r = a$ в поток неньютоновской несжимаемой жидкости. Тогда получим систему уравнений в напряжениях и уравнение неразрывности данного течения (в сферических координатах) [1]:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial p_{rr}}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial p_{r\theta}}{\partial \theta} + \frac{1}{r \sin \theta} \frac{\partial p_{r\varphi}}{\partial \varphi} + \\ & \frac{1}{r} [2p_{rr} - (p_{\theta\theta} + p_{\varphi\varphi}) + p_{r\theta} \cot \theta] = 0 \\ & \frac{\partial p_{r\theta}}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial p_{\theta\theta}}{\partial \theta} + \frac{1}{r \sin \theta} \frac{\partial p_{\theta\varphi}}{\partial \varphi} + \\ & \frac{1}{r} [2p_{\theta r} + (p_{\theta\theta} - p_{\varphi\varphi}) \cot \theta] = 0 \\ & \frac{\partial p_{r\varphi}}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial p_{\theta\varphi}}{\partial \theta} + \frac{1}{r \sin \theta} \frac{\partial p_{\varphi\varphi}}{\partial \varphi} + \\ & \frac{1}{r} [3p_{\varphi r} + 2p_{\varphi\theta} \cot \theta] = 0 \end{aligned}$$

$$\frac{1}{r^2} \frac{\partial(\rho v_r r^2)}{\partial r} + \frac{1}{r \sin \theta} \frac{\partial(\rho v_\theta \sin \theta)}{\partial \theta} + \frac{1}{r \sin \theta} \frac{\partial(\rho v_\varphi)}{\partial \varphi} = 0, \quad (1)$$

где r, θ, φ – сферические координаты ($x = r \sin \theta \cos \varphi, y = r \sin \theta \sin \varphi, z = r \cos \theta$), $p_{rr}, p_{r\theta}, p_{r\varphi}, p_{\theta\theta}, p_{\theta\varphi}, p_{\varphi\varphi}$ – напряжения, v_r, v_θ, v_φ – компоненты вектора скорости (в сферических координатах), ρ – плотность жидкости ($\rho = \text{const}$).

Для обтекания сферы вязкой несжимаемой жидкости будет выполнено:

$$\frac{\partial(v_r r^2 \sin \theta)}{\partial r} + \frac{\partial(r v_\theta \sin \theta)}{\partial \theta} = 0$$

В силу симметричности течения $v_\varphi = 0$ и частные производные скоростей и напряжений по φ равны нулю.

Предположим, что скорости обтекания сферы нашей задачи (как в случае вязкой несжимаемой жидкости [1]) будут:

$$\begin{aligned} v_r &= v_\infty \left[1 - 1,5 \frac{a}{r} + 0,5 \left(\frac{a}{r} \right)^3 \right] \cos \theta; \\ v_\theta &= -v_\infty \left[1 - 0,75 \frac{a}{r} - 0,25 \left(\frac{a}{r} \right)^3 \right] \sin \theta. \end{aligned} \quad (2)$$

Уравнения для скоростей деформаций в общем случае сферической системе координат будет:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{rr} &= \frac{\partial v_r}{\partial r}; \quad \varepsilon_{r\theta} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v_\theta}{\partial r} - \frac{v_\theta}{r} + \frac{1}{r} \frac{\partial v_r}{\partial \theta} \right); \\ \varepsilon_{r\varphi} &= \frac{1}{2} \left(\frac{1}{r \sin \theta} \frac{\partial v_r}{\partial \varphi} - \frac{v_\varphi}{r} + \frac{\partial v_\varphi}{\partial r} \right); \quad \varepsilon_{\theta\theta} = \frac{1}{r} \frac{\partial v_\theta}{\partial \theta} + \frac{v_r}{r}; \\ \varepsilon_{\varphi\varphi} &= \frac{1}{r \sin \theta} \frac{\partial v_\varphi}{\partial \varphi} + \frac{v_r}{r} + \frac{v_\theta \operatorname{ctg} \theta}{r}; \\ \varepsilon_{\theta\varphi} &= \frac{1}{2} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial v_\varphi}{\partial \theta} - \frac{v_\varphi \operatorname{ctg} \theta}{r} + \frac{1}{r \sin \theta} \frac{\partial v_\theta}{\partial \varphi} \right). \end{aligned} \quad (3)$$

В сферической системе координат второй инвариант скоростей деформации

$$\begin{aligned} J_2 &= \frac{1}{2} \left[(\varepsilon_{rr})^2 + (\varepsilon_{\varphi\varphi})^2 + (\varepsilon_{\theta\theta})^2 \right] + \\ &+ \left[(\varepsilon_{r\theta})^2 + (\varepsilon_{\theta\varphi})^2 + (\varepsilon_{r\varphi})^2 \right] = \\ &= \left[\left(\frac{\partial v_r}{\partial r} \right)^2 + \left(\frac{v_r}{r} + \frac{v_\theta \operatorname{ctg} \theta}{r} \right)^2 + \left(\frac{1}{r} \frac{\partial v_\theta}{\partial \theta} + \frac{v_r}{r} \right)^2 \right] + \\ &+ \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v_\theta}{\partial r} - \frac{v_\theta}{r} + \frac{1}{r} \frac{\partial v_r}{\partial \theta} \right)^2 = \\ &= \frac{9}{8} \frac{a^2}{r^4} v_\infty^2 \left[3 \cos^2 \theta \left[1 - \frac{a^2}{r^2} \right]^2 + \left(\frac{a}{r} \right)^4 \sin^2 \theta \right]. \end{aligned} \quad (4)$$

Так как в нашей задаче, в силу рии $v_\varphi = 0$ и производные по φ равны 0, то

$$\begin{aligned} v_r &= v_\infty \left[1 - 1,5 \frac{a}{r} + 0,5 \left(\frac{a}{r} \right)^3 \right] \cos \theta; \\ v_\theta &= -v_\infty \left[1 - 0,75 \frac{a}{r} - 0,25 \left(\frac{a}{r} \right)^3 \right] \sin \theta, \end{aligned}$$

где v_∞ – скорость жидкости на бесконечности.

Обозначим $T(r, \theta) = k I_2^{(n-1)/2}$, где k – начальная вязкость. J_2 – второй инвариант, для псевдопластиков $n < 1$, для дилатантных жидкостей $n > 1$, для вязкой жидкости $n = 1$. Тогда для неньютоновской жидкости имеем [2]:

$$\begin{aligned} p_{rr} &= -p + 2T \varepsilon_{rr} = -p + 2T \frac{\partial v_r}{\partial r} = \\ &= -p + 2T v_\infty \cos \theta \left[1,5 \frac{a}{r^2} - 1,5 \frac{a^3}{r^4} \right]; \\ p_{\varphi\varphi} &= -p + 2T \varepsilon_{\varphi\varphi} = \\ &= -p + 2T \left(\frac{1}{r \sin \theta} \frac{\partial v_\varphi}{\partial \varphi} + \frac{v_r}{r} + \frac{v_\theta \operatorname{ctg} \theta}{r} \right) = \end{aligned}$$

$$-p + 2T v_\infty \cos \theta \frac{1}{r} \left[-0,75 \frac{a}{r} + 0,75 \left(\frac{a}{r} \right)^3 \right];$$

$$\begin{aligned} p_{r\theta} &= T \varepsilon_{r\theta} = T \left(\frac{\partial v_\theta}{\partial r} - \frac{v_\theta}{r} + \frac{1}{r} \frac{\partial v_r}{\partial \theta} \right) = \\ &= T v_\infty \sin \theta \left[-0,75 \frac{a}{r^2} - 0,75 \frac{a^3}{r^4} \right] + \\ &+ \frac{1}{r} \left[1 - 0,75 \frac{a}{r} - 0,25 \left(\frac{a}{r} \right)^3 \right] - \\ &- \frac{1}{r} \left[1 - 1,5 \frac{a}{r} + 0,5 \left(\frac{a}{r} \right)^3 \right] = T v_\infty \\ &\sin \theta \left[-1,5 \frac{a^3}{r^4} \right]; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} p_{\theta\theta} &= -p + 2T \varepsilon_{\theta\theta} = -p + 2T \left(\frac{1}{r} \frac{\partial v_\theta}{\partial \theta} + \frac{v_r}{r} \right) = \\ &= -p + 2T v_\infty \cos \theta \frac{1}{r} \left[-1 + 0,75 \frac{a}{r} + 0,25 \left(\frac{a}{r} \right)^3 \right] + \\ &+ 1 - 1,5 \frac{a}{r} + 0,5 \left(\frac{a}{r} \right)^3 = -p + 2T v_\infty \frac{1}{r} \cos \theta \left[\right. \\ &\left. - 0,75 \frac{a}{r} + 0,75 \left(\frac{a}{r} \right)^3 \right] = \\ &= -p + T v_\infty \cos \theta \left[-1,5 \frac{a}{r^2} + 1,5 \frac{a^3}{r^4} \right]; \end{aligned}$$

$$p_{\theta\varphi} = T \varepsilon_{\theta\varphi} = T \left(\frac{1}{r} \frac{\partial v_\varphi}{\partial \theta} - \frac{v_\varphi \operatorname{ctg} \theta}{r} + \frac{1}{r \sin \theta} \frac{\partial v_\theta}{\partial \varphi} \right) = 0;$$

$$p_{r\varphi} = T \varepsilon_{r\varphi} = T \left(\frac{1}{r \sin \theta} \frac{\partial v_r}{\partial \varphi} - \frac{v_\varphi}{r} + \frac{\partial v_\varphi}{\partial r} \right) = 0.$$

И эти выражения подставим в систему уравнений (1). То есть имеем:

$$\begin{aligned} \frac{\partial p_{rr}}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial p_{r\theta}}{\partial \theta} + \frac{1}{r} [2p_{rr} - (p_{\theta\theta} + p_{\varphi\varphi}) \\ + p_{r\theta} \operatorname{ctg} \theta] &= 0; \\ \frac{\partial p_{r\theta}}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial p_{\theta\theta}}{\partial \theta} + \frac{1}{r} [3p_{r\theta} + (p_{\theta\theta} - p_{\varphi\varphi}) \operatorname{ctg} \theta] &= 0. \end{aligned}$$

Остальные два уравнения будут выполнены тождественно. Получим систему:

$$\begin{aligned} -\frac{\partial p}{\partial r} + \frac{\partial T}{\partial r} v_\infty \cos \theta \left[1,5 \frac{a}{r^2} - 1,5 \frac{a^3}{r^4} \right] + \\ T v_\infty \cos \theta \left[3 \frac{a}{r^3} \right] &= 0; \\ -\frac{\partial p}{\partial \theta} + \frac{\partial T}{\partial \theta} v_\infty \cos \theta \left[-1,5 \frac{a}{r^2} + 1,5 \frac{a^3}{r^4} \right] + \\ T v_\infty \sin \theta \left[1,5 \frac{a}{r^2} \right] &= 0 \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \text{Сделаем замену } P^* &= p - T v_\infty \cos \theta \left[-1,5 \frac{a}{r^2} + 1,5 \frac{a^3}{r^4} \right], \text{ то} \\ -\frac{\partial P^*}{\partial r} &= -T v_\infty \cos \theta \left[6 \frac{a^3}{r^5} \right] \\ \left(-\frac{\partial p}{\partial \theta} + T v_\infty \cos \theta \left[3 \frac{a}{r^2} - 6 \frac{a^3}{r^5} \right] + T v_\infty \cos \theta \left[6 \frac{a^3}{r^5} \right] \right) &= 0, \text{ если } T = \text{const} \end{aligned}$$

$$-\frac{\partial P^*}{\partial \theta} = -T v_{\infty} \sin \theta \left[1,5 \frac{a^3}{r^4} \right], \left(-\frac{\partial p}{\partial \theta} - T v_{\infty} \sin \theta \left[-1,5 \frac{a}{r^2} + 1,5 \frac{a^3}{r^4} \right] + T v_{\infty} \sin \theta \left[1,5 \frac{a^3}{r^4} \right] = 0, \text{ если } T = \text{const} \right).$$

Отметим, что при $n = 1$ и $k = \mu$, имеем формулы, полученные при решении задачи обтекания сферы вязкой несжимаемой жидкостью. Решение (5) будет:

$$P^* = -T v_{\infty} \cos \theta \left[1,5 \frac{a^3}{r^4} \right], \quad \text{и} \quad p = T v_{\infty} \cos \theta \left[-1,5 \frac{a}{r^2} + 1,5 \frac{a^3}{r^4} \right] - T v_{\infty} \cos \theta \left[1,5 \frac{a^3}{r^4} \right] = -T v_{\infty} \cos \theta \left[1,5 \frac{a}{r^2} \right] = -1,5 \frac{a}{r^2} k I_2^{\frac{n-1}{2}} v_{\infty} \cos \theta + p_{\infty}.$$

Вычислим силовое воздействие на сферу. Касательная составляющая напряжения трения на поверхности сферы. Так как

$$p_{r\theta} = T \varepsilon_{r\theta} = T \left(\frac{\partial v_{\theta}}{\partial r} - \frac{v_{\theta}}{r} + \frac{1}{r} \frac{\partial v_r}{\partial \theta} \right) = -T v_{\infty} \sin \theta \left[1,5 \frac{a^3}{r^4} \right] = -1,5 v_{\infty} \frac{a^3}{r^4} k I_2^{\frac{n-1}{2}} \sin \theta, \text{ и}$$

при $r=a$ $p_{r\theta} = -1,5 \frac{1}{a} v_{\infty} k I_2^{\frac{n-1}{2}} \sin \theta = -1,5 v_{\infty} \frac{1}{a} k \left[\frac{9}{8a^2} v_{\infty}^2 \sin^2 \theta \right]^{\frac{n-1}{2}} \sin \theta.$

Взяв на поверхности поясик с площадью $2\pi a \sin \theta ad\theta = 2\pi a^2 \sin \theta d\theta$, умножив эту площадь на $p_{r\theta}$ и p , полученные таким образом силы спроектируем на ось Ox и просуммируем по поверхности сферы, при от $\theta = 0$ до π . В этом случае получим проекцию на направлении скорости набегающего потока силы сопротивления движению тела в данной жидкости [3], [4]:

$$F_x = \int_0^{\pi} (-p_{r\theta} \sin \theta - p \cos \theta) 2\pi a^2 \sin \theta d\theta = \int_0^{\pi} \left(1,5 v_{\infty} \frac{1}{a} k \left[\frac{9}{8a^2} v_{\infty}^2 \sin^2 \theta \right]^{\frac{n-1}{2}} \sin^2 \theta + \left[1,5 \frac{a}{r^2} k \left[\frac{9}{8a^2} v_{\infty}^2 \sin^2 \theta \right]^{\frac{n-1}{2}} v_{\infty} \cos^2 \theta + p_{\infty} \right) \cos \theta \right) 2\pi a^2 \sin \theta d\theta = 3\pi a^{2-n} v_{\infty}^n k \left[\frac{9}{8} \right]^{\frac{n-1}{2}} \int_0^{\pi} \sin^n \theta d\theta = 3^n 2^{1,5(n-1)} \pi a^{2-n} v_{\infty}^n k \int_0^{\pi} \sin^n \theta d\theta.$$

Для псевдопластиков $n < 1$ и дилатантных жидкостей $n > 1$.

Для вязкой жидкости $n=1$ $k = \mu$ и сила

$$F_x = 3\pi a v_{\infty} k \int_0^{\pi} \sin \theta [\cos^2 \theta + \sin^2 \theta] d\theta = -3\pi a v_{\infty} k \int_0^{\pi} d\cos \theta = 6\pi \mu a v_{\infty}, \text{ т.е.}$$

имеем формулу Стокса.

Закключение

Были получены гидродинамические параметры задачи обтекания неньютоновской жидкостью неподвижной сферы. Математическая модель, в которой рассматривается данная задача, справедлива для дилатантных жидкостей и псевдопластиков.

Задача решена для течений, которые рассматриваются при малых числах Рейнольдса. Частный вариант решения данной задачи совпадает с классическим вариантом (обтекание сферы ньютоновским стационарным потоком вязкой несжимаемой жидкостью). Получены также аналитические формулы для компоненты силового воздействия неньютоновской жидкости на неподвижную сферу. Данные формулы для конкретных течений неньютоновских жидкостей можно применять в зависимости от вида жидкости аналитически или численно.

Литература

1. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. Учебник для вузов. 7-е изд., испр. М.: Дрофа, 2003. 840 с.
2. Уилкинсон У.Л. Неньютоновские жидкости. М.: Издательство: Мир, 1964. 216 с.
3. Купцов В.С., Катрахова А.А. Решение уравнений эллиптического типа в задаче об обтекании малой жидкой сферы неоднородным потоком вязкой несжимаемой жидкости // Современные методы прикладной математики, теории управления компьютерных технологий: сб. тр. X междунар. конф. Воронеж: Научная книга, 2019. С. 196-197.
4. Купцов В.С., Катрахова А.А. Решение системы уравнений в частных производных в приложении к задаче об обтекании малого сферического пузырька газа неоднородным потоком вязкой несжимаемой жидкости // Современные методы прикладной математики, теории управления компьютерных технологий: сб. тр. Всерос. конф. Воронеж: «Научная книга, 2021. С. 79-81.

Поступила 15.10.2023; принята к публикации 11.12.2023

Информация об авторах

Купцов Валерий Семенович – канд. физ.-мат. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), тел. +7(473)277-95-43

Катрахова Алла Анатольевна – канд. физ.-мат. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), тел. +7(473)277-95-43

MATHEMATICAL MODEL OF THE PROBLEM OF A NON-NEWTONIAN INCOMPRESSIBLE FLOW AROUND SPHERE LIQUIDS AT LOW REYNOLDS NUMBERS

V.S. Kuptsov, A.A. Katrakhova

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract: a mathematical model that considers the flow of a non-Newtonian stationary flow of incompressible fluid around a stationary sphere has been constructed. To construct this model, we used previously obtained results of solving the problem of a viscous incompressible fluid flowing around a sphere at low Reynolds numbers. To solve this problem, a spherical coordinate system was used for partial differential equations (in stresses) and the continuity equation for a given flow. A liquid with nonlinear components of strain rates (dilatant liquid and pseudoplastics) was considered as a non-Newtonian fluid. Taking into account this nonlinearity of the deformation field of a given fluid flow, the components of the stress field are calculated. A particular version of the solution to this problem is considered, which coincides with the classical version (flow of a Newtonian stationary flow of a viscous incompressible fluid around a sphere). Analytical formulas were also obtained for the components of the force action of a non-Newtonian fluid on a stationary sphere. Formulas are implemented for specific non-Newtonian fluids analytically or numerically, depending on the type of fluid. A special case of this result coincides with the formula for the force action of a Newtonian fluid on a sphere and coincides with the classical Stokes formula

Key words: mathematical model, partial differential equations, sphere, spherical coordinates, stationary flow, non-Newtonian incompressible fluid

References

1. Loytsyansky L.G. "Mechanics of liquid and gas. Textbook for universities" ("Mekhanika zhidkosti i gaza. Uchebnik dlya vuzov"), 7th ed., rev., Moscow, Drofa, 2003, 840 p.
2. Wilkinson W.L. "Non-Newtonian fluids" ("Nenyutonovskiye zhidkosti"), Moscow, Mir, 1964, 216 p.
3. Kuptsov V.S., Katrakhova A.A. "Solution of elliptic type equations in the problem of the flow of a non-uniform viscous incompressible fluid around a small liquid sphere", *Modern methods of applied mathematics, control theory of computer technologies (Sovremennyye metody prikladnoy matematiki, teorii upravleniya kompyuternykh tekhnologiy)*, proc. of the X international conference, Voronezh: Nauchnaya kniga, 2019, pp. 196-197.
4. Kuptsov V.S., Katrakhova A.A. "Solution of a system of partial differential equations as applied to the problem of the flow of a non-uniform viscous incompressible fluid past a small spherical gas bubble", *Modern methods of applied mathematics, control theory of computer technologies (Sovremennyye metody prikladnoy matematiki, teorii upravleniya kompyuternykh tekhnologiy)*, proc. of the all-Russian conference, Voronezh: Nauchnaya kniga, 2021, pp. 79-81.

Submitted 15.10.2023; revised 11.12.2023

Information about the authors

Valery S. Kuptsov – Cand. Sc. (Physics and Mathematics), Associate Professor, Voronezh State Technical University, (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), tel.: +7(473)277-95-43
Alla A. Katrakhova - Cand. Sc. (Physics and Mathematics), Associate Professor, Voronezh State Technical University, (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), tel.: +7(473)277-95-43

АЛГОРИТМ ВЫБОРА ПОДЛЕЖАЩИХ ИДЕНТИФИКАЦИИ РАДИОКАНАЛОВ НА ОСНОВЕ ИСТОРИИ КОНТРОЛЯ

А.Г. Студеникин^{1,2}, А.Б. Токарев^{1,2,3}, И.С. Фаустов^{1,2}

¹АО «ИРКОС», г. Воронеж, Россия

²Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

³Международный институт компьютерных технологий, г. Воронеж, Россия

Аннотация: контроль радиообстановки в нелицензируемом диапазоне частот 2,4 ГГц осложняется его совместным использованием источниками радиоизлучений (ИРИ) различных стандартов. Основой распознавания ИРИ могут служить идентификационные признаки, содержащиеся в радиосигналах, однако их извлечение требует выполнения сравнительно трудоёмкой демодуляции сигналов. Кроме того, большинство стандартов предполагает параллельное использование нескольких радиоканалов, а потому полный контроль радиообстановки требует параллельной работы совокупности демодуляторов для каждого из интересующих стандартов, что сопряжено с высокими затратами аппаратных ресурсов при реализации обработки на программируемой логической интегральной схеме (ПЛИС). Для повышения эффективности радиоконтроля необходимо предложить для каждого из стандартов алгоритм выбора подключаемого к демодулятору радиоканала, обеспечивающий идентификацию максимально широкого набора ИРИ при реализации в аппаратуре лишь единственного демодулятора для каждого из стандартов. Предложена методика выбора каналов, подключаемых к демодуляторам, основанная на создании и актуализации истории контроля. Базирующийся на этой методике алгоритм, предназначенный для реализации на ПЛИС, позволяет повысить эффективность сбора данных о радиообстановке при проведении радиоконтроля. Внедрение разработанного алгоритма в аппаратуру радиоконтроля позволяет уменьшить время сбора данных о радиообстановке на 29...56 % в сравнении с более простыми алгоритмами

Ключевые слова: радиоконтроль, обнаружение сигналов, идентификация сигналов, ПЛИС

Введение

Многие современные радиотехнические системы используют один и тот же диапазон частот в режиме разделения времени [1]. В частности, в нелицензируемом диапазоне 2,4 ГГц действуют сигналы стандартов Wi-Fi, Bluetooth, ZigBee, а также сигналы автосигнализаций, беспроводных наушников и т.д. Возможность сосуществования в эфире как сигналов разных стандартов, так и однотипных сигналов, использующих параллельно несколько радиоканалов, существенно усложняет радиоконтроль активности ИРИ, в частности – процесс их идентификации, включающий как определение стандарта связи, так и более специфических признаков [1]. Параллельный анализ всех частотных каналов всех стандартов в столь насыщенном диапазоне требует высокой вычислительной производительности средств радиоконтроля (СРК): использования многоядерных процессоров общего применения, графических процессоров или ПЛИС старшего

семейства, что повышает стоимость и энергопотребление подобных решений. Вместе с тем, если задачей контроля является не идентификация всех появляющихся в эфире пакетов данных, а составление базы данных (БД) всех радиодоступных ИРИ, то можно отказаться от попыток перехвата всех появляющихся в эфире сигналов [1]. Достаточно обеспечить высокую вероятность перехвата и идентификации сигналов «новых» ИРИ, ещё не внесённых в БД радиоконтроля. При этом идентификация может выполняться не только на этапе обработки (демодуляции) каждого сигнала в отдельности (вторичная идентификация), но и на этапе анализа совокупности каналов в широкой полосе частот (первичная идентификация) [1-3]. И если совокупность ИРИ, окружающих СРК, меняется не слишком динамично, то для актуализации БД ИРИ достаточно реализации на базе СРК модуля обнаружения и первичной идентификации излучений, действующих в частотных каналах искомых стандартов, и единственного обработчика (демодулятора) для каждого из этих стандартов. При этом процедуры идентификации могут быть реали-

зованы как программно, так и аппаратно (на ПЛИС). В первом случае по записанному в DRAM-память длительному фрагменту выборки возможен анализ сигналов на всех частотных каналах в отложенном режиме. В случае же ПЛИС-реализации объём доступной SRAM-памяти оказывается на порядки меньше, поэтому непосредственно после обнаружения и первичной идентификации излучений в каналах искомым стандартов выполняется выбор канала для дальнейшей идентификации, выполняемой, как правило, в режиме реального времени. В этом случае, при существенной загрузке радиодиапазона однотипными сигналами, использующими разные каналы, оперативность заполнения (обновления) БД ИРИ будет зависеть от алгоритма выбора канала, подключаемого к демодулятору. Таким образом, для повышения эффективности радиоконтроля, реализованного на базе ПЛИС, становится актуальной задача разработки правил отбора для демодуляции наиболее релевантного канала из

совокупности задействованных в контролируемой полосе частот. В настоящей работе рассмотрен алгоритм, решающий упрощённый вариант этой задачи, когда выполняется контроль частотных каналов одного стандарта, а первичная идентификация является, фактически, обнаружением сигналов.

Концепция отбора релевантного канала

Современные СРК обладают сравнительно широкополосными радиоприёмными трактами, так что в полосе одновременного обзора (ПОО) приёмника умещаются совместно несколько каналов систем передачи данных. К примеру, для актуального поколения СРК производства компании «ИРКОС», обладающего ПОО шириной 24 МГц, возможное размещение частотных каналов стандартов Bluetooth, ZigBee, и спектральных отсчётов («бинов») быстрого преобразования Фурье (БПФ), показано на рис. 1.

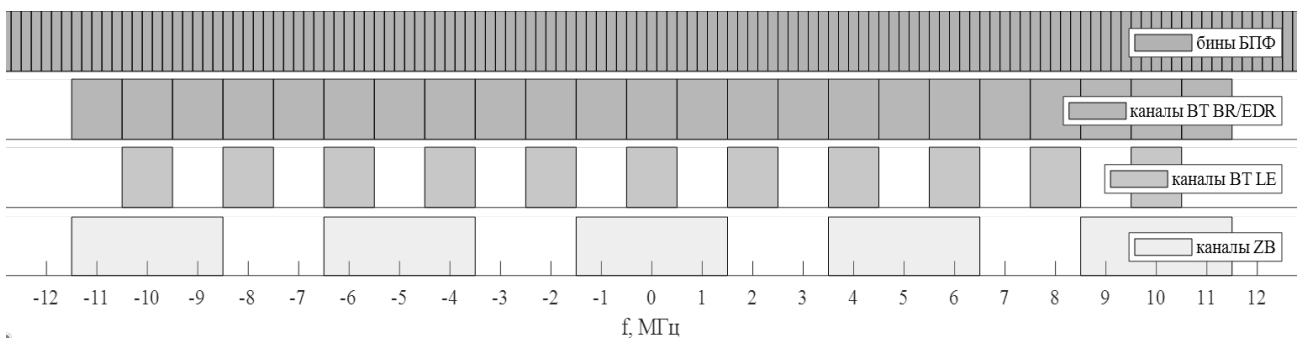


Рис. 1. Возможное размещение радиоканалов стандартов Bluetooth (BT) и ZigBee (ZB) относительно центра полосы частот шириной 24 МГц на некоторой частоте диапазона 2,4 ГГц

Для минимизации объема используемых ресурсов ПЛИС применительно к каждому из стандартов обработчик может находиться в режиме демодуляции задействованного для передачи канала, либо поиска и обнаружения активных каналов. При этом в режиме поиска анализируются лишь частоты, принадлежащие заданной стандарту сетке частот (т.к. объём ресурсов, необходимых для «тотального» поиска и последующей высокоточной частотной подстройки, оказывается значительным и заметно осложняет реализацию совокупности обработчиков в ПЛИС). При успешном обнаружении (первичной идентификации) радиоизлучения в одном или нескольких каналах один

из них подключается к демодулятору, и если анализ «тонкой структуры» сигнала подтверждает его принадлежность стандарту, то выполняется демодуляция и декодирование пакета данных с извлечением идентификационных признаков ИРИ, а если успешно распознать пакет данных не удаётся, то обработчик переключается снова в режим поиска занятых радиоканалов.

Структурная схема блока обнаружения и обработки сигналов, реализующего выбор канала для демодуляции, показана на рис. 2.

Конкретизируем методику отбора отправляемых на демодуляцию радиоканалов.

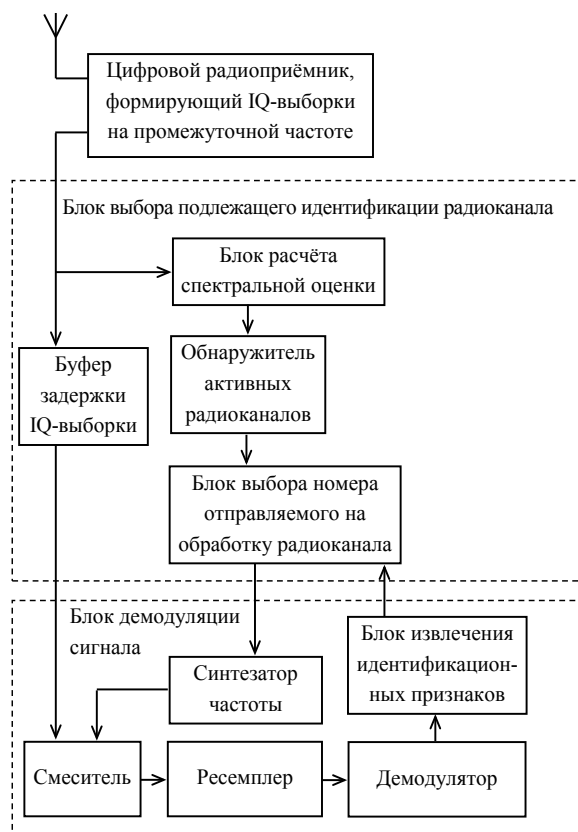


Рис. 2. Структурная схема блока обнаружения и обработки сигналов

Алгоритм отбора каналов на основе истории контроля

Условием надёжной демодуляции сигналов является высокое отношение сигнал-шум, однако отбор канала по максимуму наблюдаемого в нём уровня сигнала является неэффективным, т.к. при наличии в окрестности приёмника СРК ИРИ со стабильно высоким уровнем излучения результатом отбора будет, как правило, оказываться один и тот же радиоканал; эта стратегия существенно осложнит выявление ИРИ, излучающих сигналы меньшего уровня.

Определённого улучшения стратегии можно добиться учётом предыдущего выданного на обработку канала: после анализа радиоканала с наибольшим среди прочих активных каналов уровнем приоритет отдаётся другому из них со следующим по величине уровнем. Однако и такой способ отбора может оказаться «зацикленным» на преимущественном анализе лишь двух из всех действующих ИРИ.

Следовательно, при N одновременно действующих ИРИ для равномерного в течение длительного времени контроля их каналов достаточно учёта $N-1$ предыдущих случаев кон-

троля. При одновременной же активности ИРИ целесообразно учитывать и больше таких случаев. При этом отбор по максимальному уровню уже не требуется, т.к. влияет лишь на порядок контроля каналов при старте обнаружителя. Соответственно, предлагаемый алгоритм отбора каналов можно описать кратко: среди активных каналов для обработки выбирается тот, для которого число предыдущих случаев контроля минимально.

Для конкретизации логики работы предложенного алгоритма введём переменные:

- 1) N – количество частотных каналов искомого стандарта;
- 2) n – показатель, хранящий номер канала-кандидата на контроль;
- 3) D – глубина истории контроля (число учитываемых случаев контроля);
- 4) h – показатель истории контроля для канала-кандидата на контроль, исходно инициализируемый числом D ;

- 5) $\mathbf{H}$ – массив истории контроля объёмом N , хранящий число попыток контроля каждого канала и исходно инициализируемый нулями.

Разработанный алгоритм состоит из следующих циклически выполняемых этапов, показанных также в виде блок-схемы на рис. 3.

- 1) по отсчётам временной выборки посредством БПФ рассчитывается оценка спектральной плотности мощности (СПМ) для совокупности сигналов, принимаемых в ПОО.

- 2) по отсчётам оценки СПМ выполняется последовательный анализ частотных каналов. При регистрации сигнала в i -ом канале выполняется сравнение значения h с числом предыдущих случаев контроля канала $\mathbf{H}(i)$, и выбор номера k канала-кандидата на идентификацию, обладающего наименьшим числом предыдущих попыток контроля:

$$k = \begin{cases} i, & h \geq \mathbf{H}(i), \\ n, & h < \mathbf{H}(i). \end{cases} \quad (1)$$

При $h \geq \mathbf{H}(i)$ также происходит обновление номера подлежащего контролю канала, и показателей: $n = i$, $h = \mathbf{H}(i)$. Таким образом, после завершения анализа всех N каналов показатель k будет означать номер канала, выданного на обработку наименьшее число раз.

- 3) канал с номером k передается на обработку, а поиск новых каналов останавливается на время, необходимое для подтверждения обработчиком принадлежности обнаруженного сигнала искомому стандарту (например, обна-

ружения в нём синхропоследовательности). В случае получения такого подтверждения остановка поиска продлевается на время, необходимое для полной обработки пакета.

4) пока поиск остановлен, история контроля обновляется по следующим правилам.

4.1) если показатель истории контроля выбранного канала достиг глубины истории D , история контроля всех каналов сдвигается:

$$\mathbf{H}(i) = \begin{cases} \mathbf{H}(i) - 1, & \mathbf{H}(k) = D, \\ \mathbf{H}(i), & \mathbf{H}(k) < D. \end{cases} \quad (2)$$

4.2) те показатели, которые при сдвиге стали отрицательными (вышли за границу ок-

на истории контроля), обнуляются:

$$\mathbf{H}(i) = \begin{cases} \mathbf{H}(i), & \mathbf{H}(i) > 0, \\ 0, & \mathbf{H}(i) \leq 0. \end{cases} \quad (3)$$

4.3) факт контроля канала с номером k фиксируется в массиве истории контроля: $\mathbf{H}(k) = \mathbf{H}(k) + 1$.

4.4) показатель истории контроля h инициализируется числом D , что при следующей итерации поиска обеспечивает контроль канала с любым показателем истории, если этот канал – единственный обнаруженный по отсчётам текущей оценки СПМ.

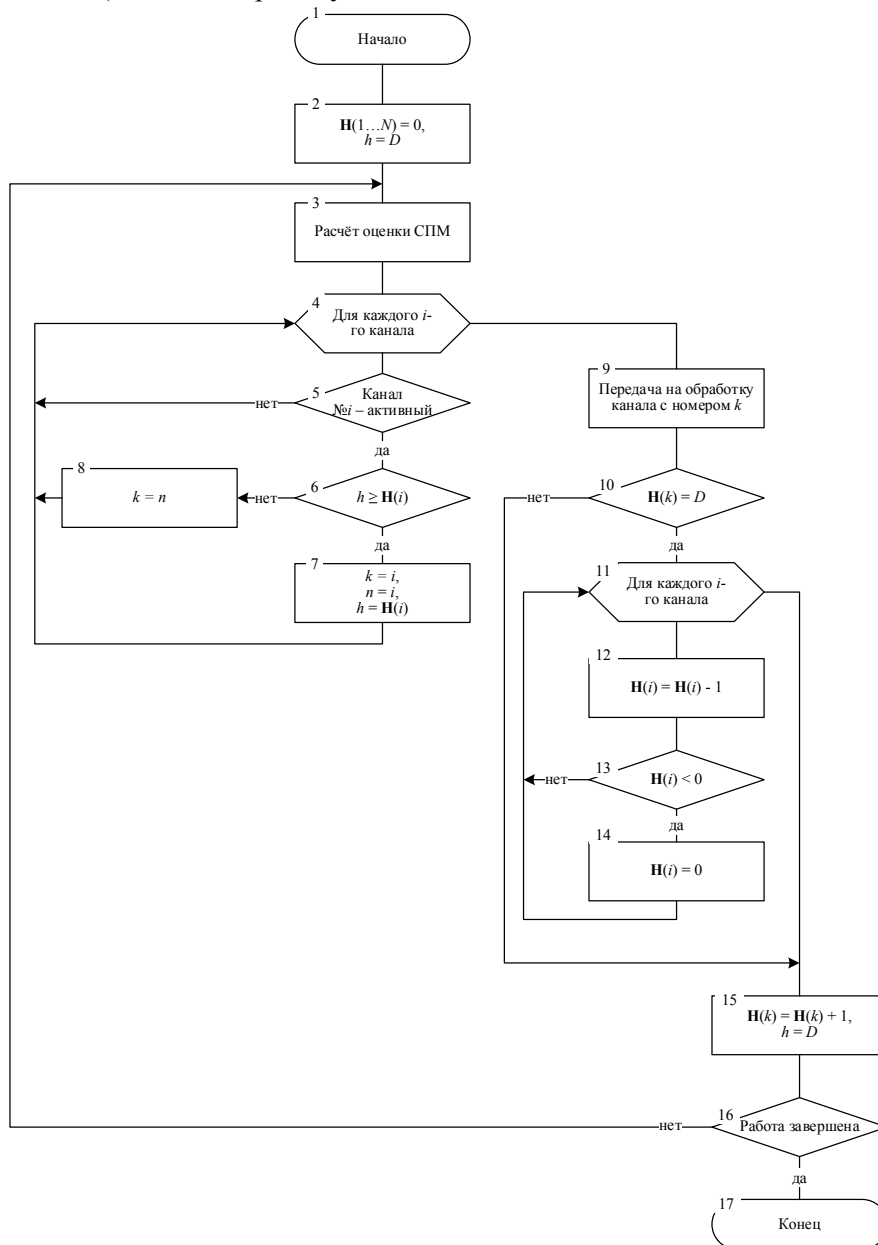


Рис. 3. Блок-схема предложенного алгоритма отбора каналов для идентификации

Результаты тестирования предложенного алгоритма

Описанный выше алгоритм был реализован на ПЛИС и прошёл апробацию в составе СРК производства компании АО «ИРКОС».

Для тестирования данного алгоритма был организован тестовый стенд, включающий генератор сигналов, СРК «АРГАМАК-ИС» [4], а также ПО приёма и обработки результатов идентификации. Глубина истории контроля была задана равной $D = 16$.

Для проверки равномерности передачи на обработку частотных каналов был сформирован тестовый сигнал, содержащий пакеты стандарта ZigBee, излучаемые в $N = 4$ каналах с центральными частотами $\pm 2,5$ МГц и $\pm 7,5$ МГц с амплитудой, которая для каждого следующего в порядке увеличения частоты канала составляет половину от амплитуды предыдущего. Отметим, что этот сигнал имеет синтетический характер и, строго говоря, не соответствует стандарту ZigBee, однако упрощает проведение экспериментов. Спектрограмма фрагмента этого сигнала показана на рис. 4.

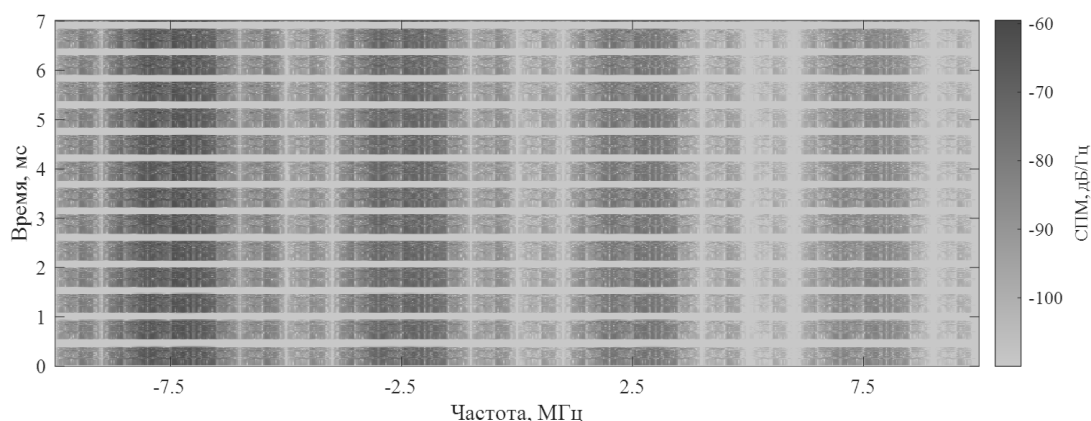


Рис. 4. Тестовый сигнал для проверки зависимости номера контролируемого частотного канала от амплитуды излучения

В результате работы тестового стенда с данным сигналом из излучённых 9852 пакетов для каждого частотного канала было идентифицировано по 2463 пакета, или $\frac{1}{4}$ от числа излучённых в одном канале. Таким образом, данный алгоритм обеспечивает равномерный контроль частотных каналов без учёта различий амплитуд излучаемых в них сигналов.

Второй тестовый сигнал предназначен для проверки того, что реализованный алгоритм обеспечивает равномерность контроля частот-

ных каналов при различии не только в амплитуде излучений в них, но и в том, как часто в данном канале излучаются пакеты, то есть в скважности излучения. Для этого сигнала, в отличие от первого, амплитуда излучения в каждом частотном канале одинакова, а число излучаемых в единицу времени пакетов различно. Спектрограмма фрагмента этого сигнала показана на рис. 5. Результаты работы тестового стенда с данным сигналом в течение 10 с приведены в табл. 1.

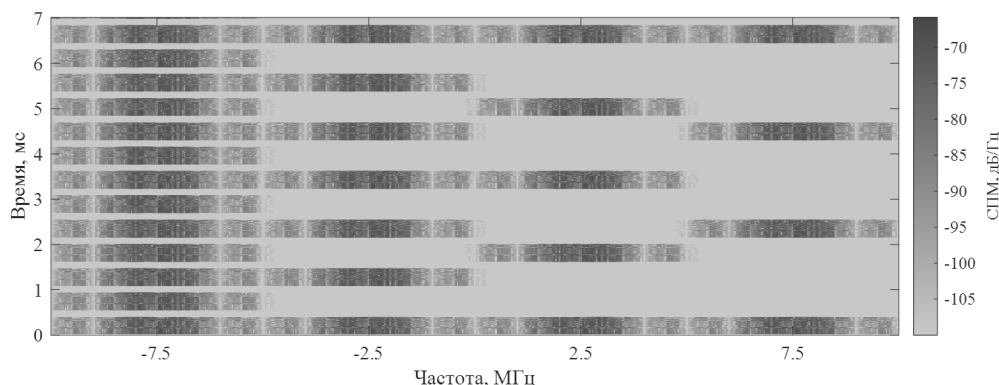


Рис. 5. Тестовый сигнал для проверки зависимости номера контролируемого частотного канала от скважности излучения

Таблица 1

Результаты работы тестового стенда
с сигналом на рис. 5

Канал №	Скорость излучения, пак/с	Излучено пакетов	Идентифицировано пакетов	Доля идентифицированных пакетов, %
1	1900	19000	7225	38
2	1000	10000	4786	48
3	700	7000	4628	66
4	500	5000	3826	77

По табл. 1 можно заметить, что предложенный алгоритм стремится выровнять число идентифицированных пакетов в каждом частотном канале в единицу времени: чем реже излучаются пакеты в канале, тем больший приоритет ему назначается при выборе каналов для идентификации, что, в свою очередь, выражается в повышении доли идентифицированных пакетов.

Моделирование работы предложенного алгоритма

Оценим эффективность предложенного алгоритма путём моделирования. В сравнении с тестированием ПЛИС-версии алгоритма используем усложнённый тестовый сигнал, где в каждом из $N = 5$ частотных каналов действуют отдельные ИРИ, излучая пакеты длительностью 0,1 мс с интервалом между ними, представленным равномерно распределённой случайной величиной в пределах минимального и максимального интервалов для данного канала, указанных в табл. 2. Частотно-временная диаграмма подобного сигнала показана на рис. 6.

Таблица 2

Интервалы между пакетами тестового сигнала

Номер канала	1	2	3	4	5
Минимальный интервал, мс	0,1	0,325	0,55	0,775	1
Максимальный интервал, мс	10,1	32,825	55,55	78,275	101



Рис. 6. Частотно-временная диаграмма реализации тестового сигнала

Зададим параметры блока обнаружения и обработки сигналов, используемые при моделировании. Для обеспечения возможности выбора одного из нескольких активных каналов необходимо наличие временного окна обнаружения, поэтому для выявления разницы между алгоритмами при моделировании используем окно увеличенной длительности в 256 спектров (в сравнении с тестированием ПЛИС-версии алгоритма, где использовалось окно в 1 спектр). Моделирование проведём при следующих параметрах:

- 1) размерность БПФ (спектра): 128;
- 2) длительность временного окна обнаружения: 1,28 мс (256 спектров);
- 3) время обработки пакета выбранного канала: 1,1 мс;
- 4) глубина истории контроля $D = 20$.

Рассмотрим следующие алгоритмы отбора каналов:

- 1) выбор канала на основе истории контроля;
- 2) выбор первого канала по списку;
- 3) выбор канала, где пакет был обнаружен первым за интервал окна обнаружения;
- 4) выбор случайного канала.

Пример работы алгоритма № 1 для сигнала на рис. 6 показан на рис. 7. Точками отмечены позиции сигналов. Кругами обведены те из них, которые попали в интервал обнаружения. Среди них тёмным цветом отмечены выбранные для обработки, светлым — пропущенные сигналы. Тёмным цветом показаны интервалы обнаружения, светлым — интервалы обработки пакета выбранного канала.

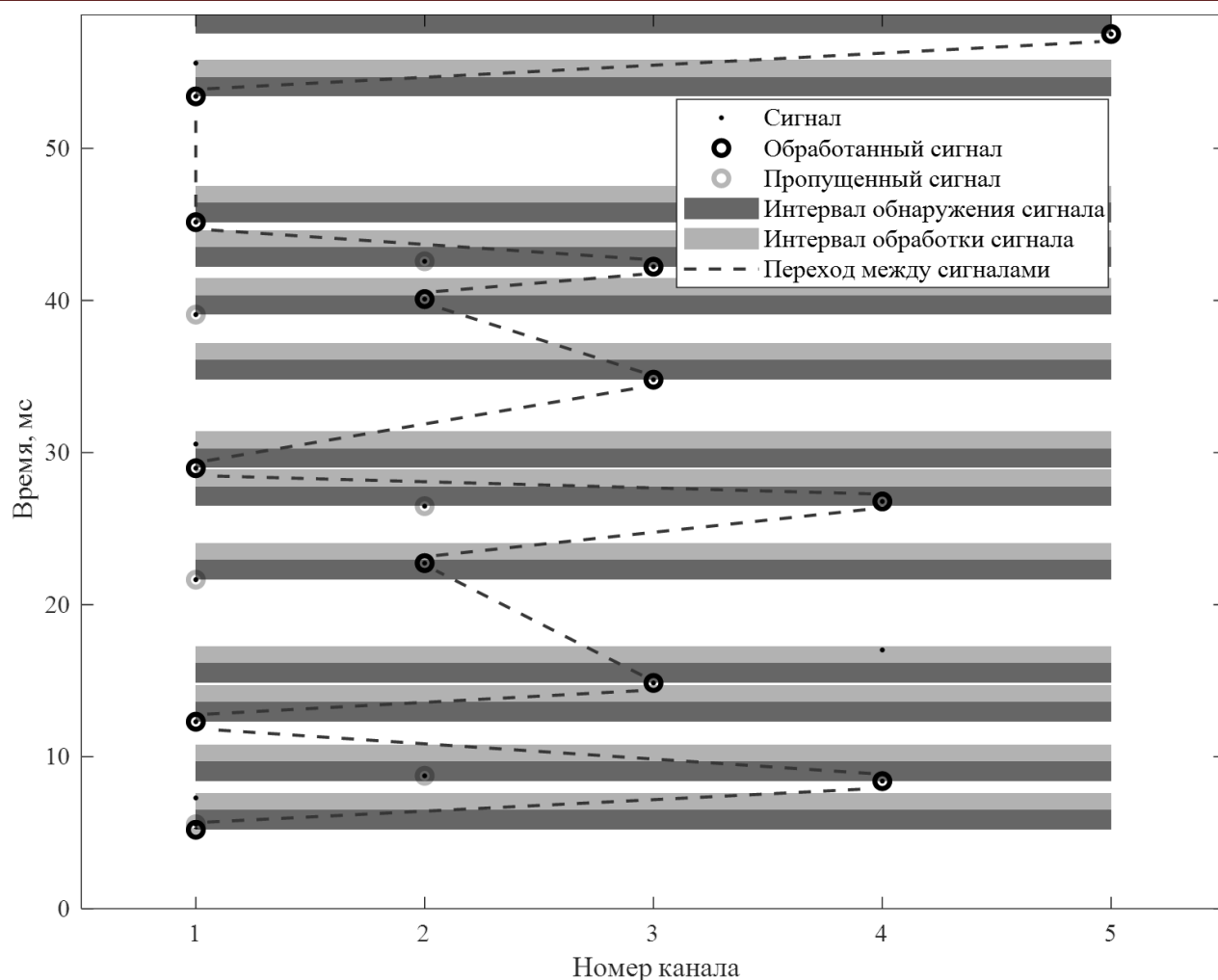


Рис. 7. Иллюстрация работы алгоритма отбора каналов № 1

Для выявления наиболее статистически оптимального алгоритма проведём серию экспериментов, в ходе которых зафиксируем время, затраченное на анализ всех частотных каналов (приём хотя бы одного пакета в каждом канале).

Отметим, что соответствие порядка нумерации каналов и скважности излучений в них приведёт к определённому выигрышу, либо проигрышу алгоритмов № 1, 2 во времени анализа. Алгоритм № 2 будет отдавать предпочтение каналам с низкой скважностью, а алгоритм №1 – с высокой, т.к. он при равенстве истории контроля для нескольких каналов предполагает выбор последнего из них. Поэтому помимо прямого порядка нумерации (ПП), протестируем эти алгоритмы также и при обратном её порядке (ОП).

Усреднённые результаты 10^4 экспериментов, а также показатели различия времени анализа для каждого из рассмотренных выше ал-

горитмов с алгоритмом № 1 (ОП) приведены в табл. 3.

Таблица 3

Результаты экспериментов
по отбору каналов для обработки

Алгоритм	Порядок нумерации каналов	Время анализа, мс	Различие с алгоритмом №1 (ОП)	
			мс	%
1	ПП	86	-4	-5
	ОП	90	0	0
2	ПП	205	115	56
	ОП	88	-2	-2
3	ПП	127	37	29
4	ПП	126	36	29

По табл. 3 видно, что наиболее быстрый сбор данных об активности ИРИ в контролируемом диапазоне частот обеспечивают алгоритмы № 1 и 2 (ОП). Так как скважность излучений в каналах возрастает вместе с их порядковым номером в списке, в случае использования алгоритма № 2 (ОП) фактически произво-

дится выбор канала с наибольшей скважностью. Такие каналы будут отличаться меньшим числом случаев контроля в сравнении с теми, которые находятся в начале списка, поэтому эффект от применения алгоритма № 2 (ОП) сопоставим с алгоритмом № 1, где для обработки выбираются каналы с наименьшим числом случаев контроля. Однако при этом эффективность алгоритма № 2 (ОП) обусловлена априорными сведениями о соответствии номера канала и скважности излучения в нём, а алгоритм № 4 таких сведений не требует, демонстрируя сопоставимые результаты для «ПП» и «ОП» вариантов. При отсутствии же априорных сведений алгоритм № 2 может, наоборот, выбирать самый «неудачный» канал для обработки, что видно по результату работы алгоритма № 2 (ПП).

По результатам экспериментов из табл. 3 также можно отметить близость результатов работы алгоритмов № 3, 4. Она обусловлена тем, что окно обнаружения случайным образом накладывается на поток пакетов, тем самым первый попавший в него пакет принадлежит случайному каналу так же, как и при выборе случайного канала из попавших в окно обнаружения пакетов.

Итак, по результатам проведённых экспериментов наиболее эффективным оказался алгоритм № 1 (выбор канала для идентификации на основе истории контроля), при отсутствии априорных сведений о скважности излучений в каналах обеспечив выигрыш от 29 % до 56 % во времени сбора данных о радиообстановке в сравнении с прочими алгоритмами.

Заключение

Предложенный алгоритм отбора каналов для идентификации позволяет оперативно осуществлять сбор данных о радиообстановке с использованием сравнительно маломощных СРК и обеспечивает успешную идентификацию сигналов с различной амплитудой и частотой появления в эфире.

По результатам проведённых экспериментов было подтверждено свойство предложенного алгоритма отбора каналов максимизировать число идентифицированных пакетов наиболее редко выходящих в эфир ИРИ, а также сокращение времени сбора данных о радиообстановке на величину от 29 % до 56 % в сравнении с прочими алгоритмами.

Предложенный алгоритм отбора каналов для идентификации предназначен для аппаратной реализации на ПЛИС в составе оборудования радиоконтроля.

Литература

1. Справочник по контролю за использованием спектра. Женева, 2011. URL: <https://www.itu.int/pub/R-HDB-23-2011> (Дата обращения: 04.10.2023).
2. Техническая идентификация цифровых сигналов. Рекомендация МСЭ-R SM.1600-3. Женева, 2018. URL: <https://www.itu.int/rec/R-REC-SM.1600> (Дата обращения: 04.10.2023).
3. Алгоритм предварительной идентификации радиосигналов по спектральным маскам / А. Г. Студеникин, И. Б. Крыжко, А. Б. Токарев, А. В. Ашихмин, А. А. Фатеев // Системы управления, связи и безопасности. 2021. № 4. С. 10–39. URL: <https://scs.intelgr.com/archive/2021-04/02-Studenikin.pdf> (дата обращения: 04.10.2023).
4. АРГАМАК-ИС – измеритель напряженности поля панорамный. URL: https://www.ircos.ru/ru/tsv_argamak-is.html (дата обращения: 04.10.2023).

Поступила 11.10.2023; принята к публикации 07.12.2023

Информация об авторах

Студеникин Алексей Геннадьевич – инженер-программист, АО «ИРКОС» (394049, Россия, г. Воронеж, Рабочий проспект, 101Б); аспирант, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: studenikinag@ircos.vrn.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2980-1859>

Токарев Антон Борисович – д-р техн. наук, доцент, старший научный сотрудник, АО «ИРКОС» (394049, Россия, г. Воронеж, Рабочий проспект, 101Б); профессор кафедры радиотехники, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84); профессор кафедры информационной безопасности и систем связи, Международный институт компьютерных технологий (394026, Россия, г. Воронеж, ул. Солнечная, д. 29Б), e-mail: TokarevAB@ircos.vrn.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2621-4336>

Фаустов Иван Сергеевич – инженер-программист, АО «ИРКОС» (394049, Россия, г. Воронеж, Рабочий проспект, 101Б); аспирант, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: faustovis@ircos.vrn.ru

ALGORITHM FOR SELECTING IDENTIFIABLE RADIO CHANNELS BASED ON THE MONITORING HISTORY

A.G. Studenikin^{1,2}, A.B. Tokarev^{1,2,3}, I.S. Faustov^{1,2}

¹ JSC «IRCOS», Voronezh, Russia

² Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

³ International Institute of Computer Technology, Voronezh, Russia

Abstract: monitoring of the radio environment in the unlicensed 2,4 GHz frequency range is complicated by its joint use by radio emission sources (RES) of different standards. The identification features contained in radio signals can serve as the basis for the RES recognition, but their extraction requires relatively labor-intensive demodulation of the signals. In addition, most standards involve the parallel use of several radio channels, and therefore full control of the radio environment requires parallel operation of a set of demodulators for each of the standards of interest, which is associated with high costs of hardware resources when implemented on an FPGA. Purpose: to increase the efficiency of radio monitoring, it is necessary to propose for each of the standards an algorithm for selecting a radio channel connected to the demodulator, which ensures identification of the widest possible set of RES when implementing only a single demodulator for each of the standards in the equipment. Result: a technique for selecting channels connected to demodulators is proposed, based on creating and updating the monitoring history. The algorithm based on this technique, designed for implementation on the FPGA, makes it possible to increase the efficiency of collecting data on the radio environment during radio monitoring. Practical importance: the introduction of the developed algorithm into the radio monitoring equipment makes it possible to reduce the time for collecting data on the radio environment by 29...56 % in comparison with simpler algorithms

Key words: radio monitoring, signal detection, signal identification, FPGA

References

1. "Spectrum Monitoring Handbook", Geneva, 2011, available at: <https://www.itu.int/pub/R-HDB-23-2011> (accessed 04.10.2023).
2. "Technical Identification of digital signals. ITU-R Recommendation SM.1600-3", Geneva, 2018, available at: <https://www.itu.int/rec/R-REC-SM.1600> (accessed 04.10.2023).
3. Studenikin, A.G., Kryzhko, I.B., Tokarev, A.B., Ashihmin, A.V., Fateev, A.A. "Algorithm for preliminary identification of radio signals with spectral masks", *Systems of Control, Communication and Security (Sistemy kontrolya, svyazi i bezopasnosti)*, 2021, no. 4, pp. 10-39, available at: <https://secs.intelgr.com/archive/2021-04/02-Studenikin.pdf> (accessed 04.10.2023).
4. "ARGAMAK-IS – Panoramic Field Strength Meter", available at: https://www.ircos.ru/ru/rsv_argamak-is.html (accessed 04.10.2023).

Submitted 11.10.2023; revised 07.12.2023

Information about the authors

Aleksey G. Studenikin – Software Engineer, JSC "IRCOS" (101B Rabochiy prospekt, Voronezh 394049, Russia); Postgraduate Student, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: studenikinag@ircoc.vrn.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2980-1859>

Anton B. Tokarev – Dr. Sc. (Technical), Associate Professor, Senior Staff Scientist, JSC "IRCOS" (101B Rabochiy prospekt, Voronezh 394049, Russia), Professor, Department of Radio Engineering, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia); Professor, Department of Information Security and Communication Systems, International Institute of Computer Technology (29B Solnechnaya str., Voronezh 394026, Russia); e-mail: TokarevAB@ircoc.vrn.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2621-4336>

Ivan S. Faustov – Software Engineer, JSC «IRCOS» (101B Rabochiy prospekt, Voronezh 394049, Russia); Postgraduate Student, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: faustovis@ircoc.vrn.ru

ПРИМЕНЕНИЕ ФОРМИРОВАТЕЛЕЙ СПЕКТРАЛЬНО-ЭФФЕКТИВНЫХ РАДИОСИГНАЛОВ ДЛЯ ОСУЩЕСТВЛЕНИЯ ФАЗОВОГО РАЗДЕЛЕНИЯ КАНАЛОВ

С.С. Печников

Воронежский институт МВД России, г. Воронеж, Россия

Аннотация: известно множество методов разделения каналов (сигналов), однако на практике наибольшее распространение получили методы с линейным разделением. Для увеличения эффективности работы цифровых средств связи стоит рассмотреть возможности использования систем, реализующих принципы частотного и временного разделения сигналов одновременно с фазовым разделением. В статье рассмотрен способ повышения энергетической эффективности сигналов, формируемых при осуществлении фазового разделения каналов. Проведен анализ метода фазового разделения каналов, применение которого ограничено в силу того, что ортогональность переносчиков обеспечивается за счет фазового сдвига на $\pi/2$ между ними. Этот способ обеспечивает практически устойчивую работу только при двухканальной передаче. Кроме того, сигналы фазовой модуляции с увеличением позиций сигнального созвездия увеличивают количество скачков амплитуды, что ведет к существенному изменению формы огибающей и делает невозможным осуществление высокоэффективного нелинейного усиления. Исследована возможность применения формирователей спектрально-эффективных радиосигналов для генерирования канальных сигналов с целью осуществления их линейного усиления в нелинейных усилителях мощности. В качестве канальных сигналов использованы два сигнала квадратурной амплитудной модуляции на одной несущей частоте. Проведен анализ формирования группового сигнала с фазового разделения каналов, а также осуществлено моделирование в системе автоматизированного проектирования. Получены сигнальные созвездия результирующих групповых сигналов с фазовым разделением каналов. Установлено, что наиболее эффективным является использование канальных сигналов с различными индексами фазовой модуляции. Используя различные значения индексов фазовой модуляции, количество канальных сигналов, входящих в групповой сигнал, можно увеличить до четырех.

Ключевые слова: многоканальные системы связи; фазовое разделение каналов, нелинейный усилитель; сигнальное созвездие; фазовый дисбаланс; огибающая сигнала. сигнальное созвездие

Введение

Обеспечение независимой передачи и приема нескольких радиосигналов на одной несущей частоте, при котором данные сигналы сохраняют свои свойства и не искажают друг друга, является одной из задач современной системы связи.

Многоканальные системы связи (МКС) отличаются друг от друга методом разделения каналов (сигналов). Известно большое разнообразие этих методов, однако на практике наибольшее распространение получили МКС с линейным разделением сигналов, в которых реализуются принципы частотного и временного разделения сигналов [1]. При этом групповой сигнал формируется путем суммирования канальных сигналов, представляющих собой произведения первичных (информационных) сигналов $a_n(t)$ и несущих сигналов $c_n(t)$:

$$S(t) = \sum_{n=1}^N a_n(t) c_n(t). \quad (1)$$

Применение систем с фазовым разделением каналов ограничено в силу того, что ортогональность переносчиков обеспечивается за счет фазового сдвига на $\pi/2$ между ними. Этот способ обеспечивает практически устойчивую работу только при двухканальной передаче. В принципе, можно построить системы с линейно независимыми, но не ортогональными переносчиками, однако линейными методами можно разделить только два сигнала, переносчики которых отличаются по фазе. Кроме того, сигналы фазовой модуляции с увеличением позиций сигнального созвездия увеличивают количество скачков амплитуды, что ведет к существенному изменению формы огибающей и делает невозможным осуществление высокоэффективного нелинейного усиления.

При фазовом разделении каналов на каждой несущей $n\omega_0$ обеспечивается передача двух независимых первичных (информационных) сигналов $a_1(t)$, $a_2(t)$ в полосе частот $2\Delta\omega$. Следовательно, при одинаковом числе каналов МКС с фазовым разделением требует в 2 раза меньшую полосу частот, в сравнении МКС с частотным разделением, т.е. $\Delta f_{ФРК} = N f_{max}$ [2]. Это обеспечивается тем, что при одной и той

же частоте $n\omega_0$ сигналы $a_1(t)$, $a_2(t)$ передаются с помощью ортогональных переносчиков, которые формируют групповой сигнал

$$S(t) = \sqrt{2} [a_1(t) \cos n\omega_0 t + a_2(t) \sin n\omega_0 t]. \quad (2)$$

Фазовое разделение каналов может быть осуществлено с помощью квадратурного модулятора (КВМ), как это показано на рис. 1. В простейшем случае $a_1(t)$, $a_2(t)$ являются гармоническими колебаниями, которые перемножаются в балансных модуляторах (БМ) с квадратурными сигналами несущей $c(t)$, $c'(t)$, формируемыми с помощью генератора несущей частоты (ГНЧ) и фазовращателя (ФВ). В результате модуляции этих колебаний первичными сигналами образуются каналные сигналы $S_1(t)$, $S_2(t)$, после сложения которых в линейном сумматоре (ЛС) формируется групповой сигнал $S(t)$.

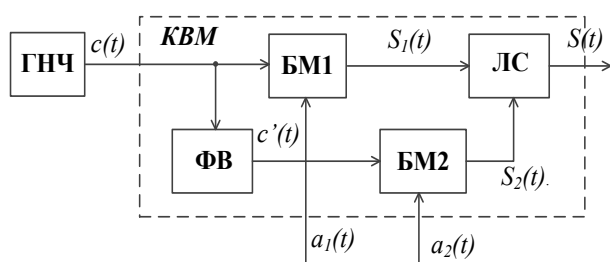


Рис. 1. Схема передающего устройства с фазовым разделением каналов

Если в качестве первичных сигналов рассматривать цифровой поток данных, принимающий дискретные значения

$$\bar{a}[a_1, a_2] = [(-1, -1) \quad (-1, 1) \quad (1, -1) \quad (1, 1)], \quad (3)$$

то множеству значений информационного сигнала a_1 соответствует множество изменений фазы $\{0, \pi\}$, а при изменении значения информационного сигнала a_2 осуществляются изменения фазы радиосигнала $\{\pi/2, 3\pi/2\}$ [3], как это показано на рис. 2 (а). Таким образом, формируются два каналных радиосигнала двоичной фазовой манипуляции (BPSK), являющихся составными частями группового сигнала квадратурной фазовой манипуляции (QPSK):

$$S(t) = \begin{cases} S_1(t) = \begin{cases} A \cos n\omega_0 t, & a_1 = 0 \\ A \cos(n\omega_0 t + \pi), & a_1 = 1 \end{cases} \\ S_2(t) = \begin{cases} A \cos(n\omega_0 t + \pi/2), & a_2 = 0 \\ A \cos(n\omega_0 t + 3\pi/2), & a_2 = 1 \end{cases} \end{cases} \quad (4)$$

Очевидно, что при этом в каждом из каналов максимально возможная скорость передачи информации при одном приращении фазы составит один бит. При использовании той же структурной схемы для формирования дибитов в каждом из каналов возможно увеличение значений амплитуд первичных сигналов:

$$\bar{a}[a_1, a_2] = \begin{bmatrix} (-1, -1) & (-0.5, -1) & (0.5, -1) & (1, -1) \\ (-1, -0.5) & (-0.5, -0.5) & (0.5, -0.5) & (1, -0.5) \\ (-1, 0.5) & (-0.5, 0.5) & (0.5, 0.5) & (1, 0.5) \\ (-1, 1) & (-0.5, 1) & (0.5, 1) & (1, 1) \end{bmatrix}. \quad (5)$$

Таким образом, вместо формирования двух сигналов BPSK формируются два сигнала четырех уровневой амплитудной манипуляции (4-ASK), но как уже было сказано ранее, формирование группового радиосигнала обусловлено возникновением существенных изменений уровня огибающей, а увеличение скорости передачи за счет увеличения количества позиций квадратурных сигналов влечет за собой ещё большее изменение огибающей группового сигнала (рис. 2 (б)).

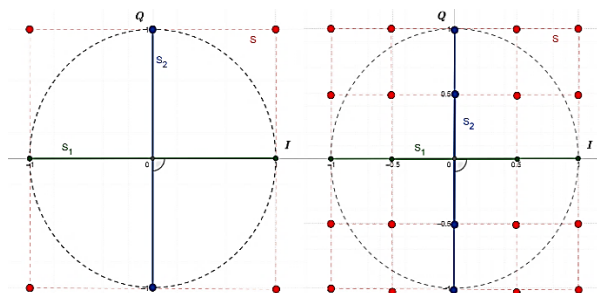


Рис. 2. Сигнальные созвездия групповых сигналов с фазовым разделением каналов: (а) – BPSK; (б) – 4-ASK

Способ формирования спектрально-эффективных радиосигналов

Данный способ позволяет осуществлять линейное усиление радиосигналов с векторной модуляцией в нелинейных усилителях мощности [4]. Он основан на осуществлении предварительных функциональных преобразований первичного сигнала $\bar{a}[a_i(t), a_q(t)]$ для последующего квадратурного перемножения с сигналом несущей $c(t)$ в квадратурных модуляторах и сложения формирующихся сигналов с фазовой модуляцией

$$\begin{aligned} S_{\text{exch}}(t) &= S_i(t) + S_q(t) = \\ &= A_i \cos(\omega t + a_i(t)) - \\ &- A_q \sin(\omega t + a_q(t)) = \quad . \quad (6) \\ &= A_i \cos(\omega t + a_i(t)) + \\ &+ A_q \cos(\omega t + a_q(t) + \pi/2) \end{aligned}$$

где $A_{i,q}$ – постоянная амплитуда,

 ω – несущая частота,

a_i – бит синфазного канала,

a_q – бит квадратурного канала.

Постоянная огибающая фазомодулированных сигналов $S_i(t)$, $S_q(t)$ позволяет осуществить их усиление в нелинейных усилителях мощности. Формируемые сигналы $S_i(t)$, $S_q(t)$ и результирующий сигнал $S_{\text{вых}}(t)$ представлены на рис. 3, где $\{\varphi_{00}, \varphi_{01}, \varphi_{10}, \varphi_{11}\}$ выходное сигнальное созвездие, формируемое в первой координатной четверти синфазно-квадратурной плоскости.

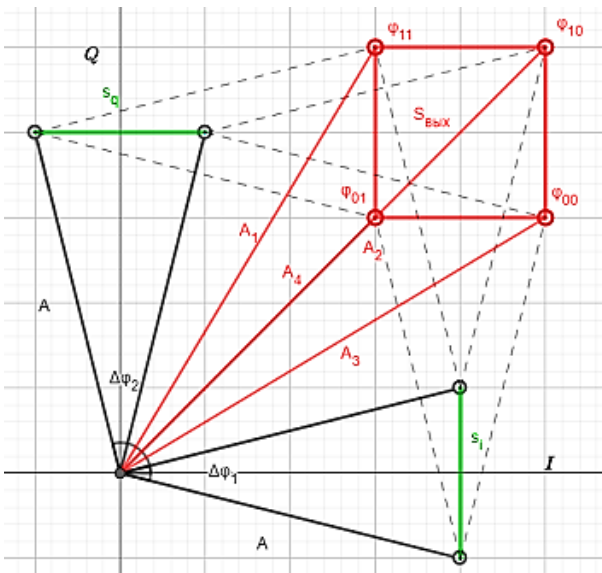


Рис. 3. Формирование канального сигнала $S_I(t)$

Применение способа формирования спектрально эффективных радиосигналов для осуществления фазового разделения каналов

Рассмотрим применение способа формирования спектрально-эффективных радиосигналов для осуществления фазового разделения каналов, если первичные сигналы формируют два канальных сигнала QPSK на одной несущей частоте. При отсутствии влияния помех и искажений в процессе передачи группового сигнала $S(t)$ на приеме наблюдается точное значение $S(t)$

$$\begin{aligned} S(t) &= S_1(t) + S_2(t) = \\ &= a_1(t)c(t) + a_2(t)c(t). \end{aligned} \quad (7)$$

Таким образом, при единичных значениях амплитуд модулированных радиосигналов $A=1$, если $a_1(t)$, $a_2(t)$ принимают дискретные значения с равной вероятностью возникновения:

$$\bar{a}_1(a_{1i}, a_{1q}) = \begin{bmatrix} (-1, -1) \\ (-1, 1) \\ (1, -1) \\ (1, 1) \end{bmatrix}, \quad \bar{a}_2(a_{2i}, a_{2q}) = \begin{bmatrix} (-1, -1) \\ (-1, 1) \\ (1, -1) \\ (1, 1) \end{bmatrix}, \quad (8)$$

где a_i – бит синфазного канала, a_q – бит квадратурного канала, то последовательности дибитов можно аппроксимировать приращениями фазы радиосигналов $S_I(t)$ и $S_2(t)$:

$$S_1 = c(t) \begin{bmatrix} \varphi_{11} \\ \varphi_{12} \\ \varphi_{13} \\ \varphi_{14} \end{bmatrix}, \quad S_2 = c(t) \begin{bmatrix} \varphi_{21} \\ \varphi_{22} \\ \varphi_{23} \\ \varphi_{24} \end{bmatrix}, \quad (9)$$

Радиосигнал QPSK $S_1(t)$ формируется с помощью формирователей функциональных составляющих и квадратурных модуляторов [5] и находится в первой координатной четверти синфазно-квадратурной плоскости. Радиосигнал QPSK $S_2(t)$ формируется аналогично с внесением дополнительного фазового сдвига несущей 180° и располагается в третьей координатной четверти синфазно-квадратурной плоскости. При этом стоит отметить, что формирование сигналов также может быть осуществлено во второй и четвертой координатной четверти. Сигнальные созвездия формируемых радиосигналов представлены на рис. 4 (а).

Результирующий групповой сигнал $S(t)$, который будет получен после объединения $S_1(t)$ и $S_2(t)$, можно записать как:

$$S(t) = c(t)[(shift(S_1, 0) + S_2) (shift(S_1, 1) + S_2) \times \\ \times (shift(S_1, 2) + S_2) (shift(S_1, 3) + S_2)]$$

где $shift(S_l, k)$ – циклический сдвиг S_l на k позиций ($shift(S_l, 0) = S_l$).

Тогда:

$$S(t) = c(t) \begin{bmatrix} \varphi_{11} + \varphi_{21} & \varphi_{12} + \varphi_{21} & \varphi_{13} + \varphi_{21} & \varphi_{14} + \varphi_{21} \\ \varphi_{11} + \varphi_{22} & \varphi_{12} + \varphi_{22} & \varphi_{13} + \varphi_{22} & \varphi_{14} + \varphi_{22} \\ \varphi_{11} + \varphi_{23} & \varphi_{12} + \varphi_{23} & \varphi_{13} + \varphi_{23} & \varphi_{14} + \varphi_{23} \\ \varphi_{11} + \varphi_{24} & \varphi_{12} + \varphi_{24} & \varphi_{13} + \varphi_{24} & \varphi_{14} + \varphi_{24} \end{bmatrix} =$$

$$= c(t) \begin{bmatrix} \varphi_{1121} & \varphi_{1221} & \varphi_{1321} & \varphi_{1421} \\ \varphi_{1122} & \varphi_{1222} & \varphi_{1322} & \varphi_{1422} \\ \varphi_{1123} & \varphi_{1223} & \varphi_{1323} & \varphi_{1423} \\ \varphi_{1124} & \varphi_{1224} & \varphi_{1324} & \varphi_{1424} \end{bmatrix}, \quad (10)$$

На рис. 4 (б) изображен результирующий сигнал $S(t)$. Очевидно, ряд значений фазы выходного сигнала частично или полностью совпадают, что делает невозможным точное определение значений первичных сигналов $a_1(t)$, $a_2(t)$. Так, $\varphi_{1121} = \varphi_{1424} = \varphi_{1222} = \varphi_{1323} = 0$ для φ_{1423} , φ_{1122} , φ_{1221} ,

φ_{1324} синфазная составляющая $I=0$, а для φ_{1124} , φ_{1223} , φ_{1421} , φ_{1322} квадратурная составляющая $Q=0$.

$$S(t) = c(t) \begin{bmatrix} (0,0)_{1121} & (I,0)_{1221} & (I,Q)_{1321} & (0,Q)_{1421} \\ (I,0)_{1122} & (0,0)_{1222} & (0,Q)_{1322} & (I,Q)_{1422} \\ (I,Q)_{1123} & (0,Q)_{1223} & (0,0)_{1323} & (I,0)_{1423} \\ (0,Q)_{1124} & (I,Q)_{1224} & (I,0)_{1324} & (0,0)_{1424} \end{bmatrix}, \quad (11)$$

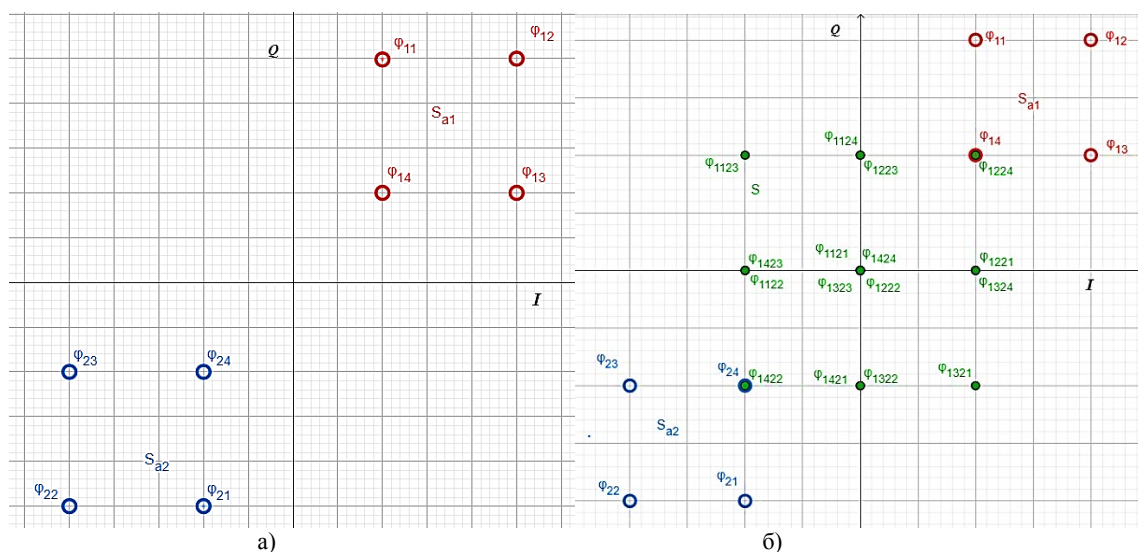


Рис. 4. Сигнальные созвездия: (а) – каналные сигналы; (б) – групповой сигнала с фазовым разделением каналов

Таким образом, в данном случае однозначное восстановление информации первичных сигналов $a_1(t)$, $a_2(t)$ невозможно. В то же время применение способа формирования спектрально-эффективных радиосигналов позволяет довольно просто осуществлять фазовые преобразования. Фазовое вращение сигналов производится за счет внесения дополнительного фазового сдвига несущей, а изменение размеров сигнального созвездия, т.е. изменение индексов фазовой модуляции формируемых сигналов $S_{1i}(t)$, $S_{1q}(t)$, $S_{2i}(t)$, $S_{2q}(t)$ – за счет изменения уровня амплитуды первичного сигнала.

На рис. 5 (б) представлен результирующий сигнал $S(t)$, формируемый после объединения сигналов $S_1(t)$ и $S_2(t)$, при этом осуществлено вращение $S_1(t)$ на $\pi/4$, а на рис. 5 (а) – изменение индекса фазовой модуляции $S_1(t)$. Как и предполагалось, каждой возможной комбинации входных значений (8) соответствуют 16 фазовых состояний результирующего сигнала $S(t)$ (10), что позволяет выделить информацию каналных

сигналов из группового сигнала при условии, что в формируемых квадрибитах выходного сигнала первые два бита содержат информацию канала $S_1(t)$, а вторая пара содержит информацию канала $S_2(t)$: $S(S_1[a_{1i}a_{1q}], S_2[a_{2i}a_{2q}])$.

Результирующий сигнал может быть представлен как:

$$\begin{aligned} U_{\text{вых}}(t) &= S_1(t) + S_2(t) = \\ &= \left[S_{1i}(t) + \left(S_{1q}(t) + \frac{\pi}{2} \right) \right] + \\ &+ \left[\left\{ S_{2i}(t) + \left(S_{2q}(t) + \frac{\pi}{2} \right) \right\} + \pi \right] =, \quad (12) \\ &= 2A_1 e^{j\omega t} \left[e^{ja_{1i}(t)} + e^{ja_{1q}(t)} e^{j(\pi/2)} \right] + \\ &+ 2A_2 e^{j\omega t} e^{j\pi} \left[e^{ja_{2i}(t)} + e^{ja_{2q}(t)} e^{j(\pi/2)} \right] \end{aligned}$$

где $A_{1,2}$ – постоянная амплитуда,

ω – несущая частота,

a_i – бит синфазного канала,

a_q – бит квадратурного канала.

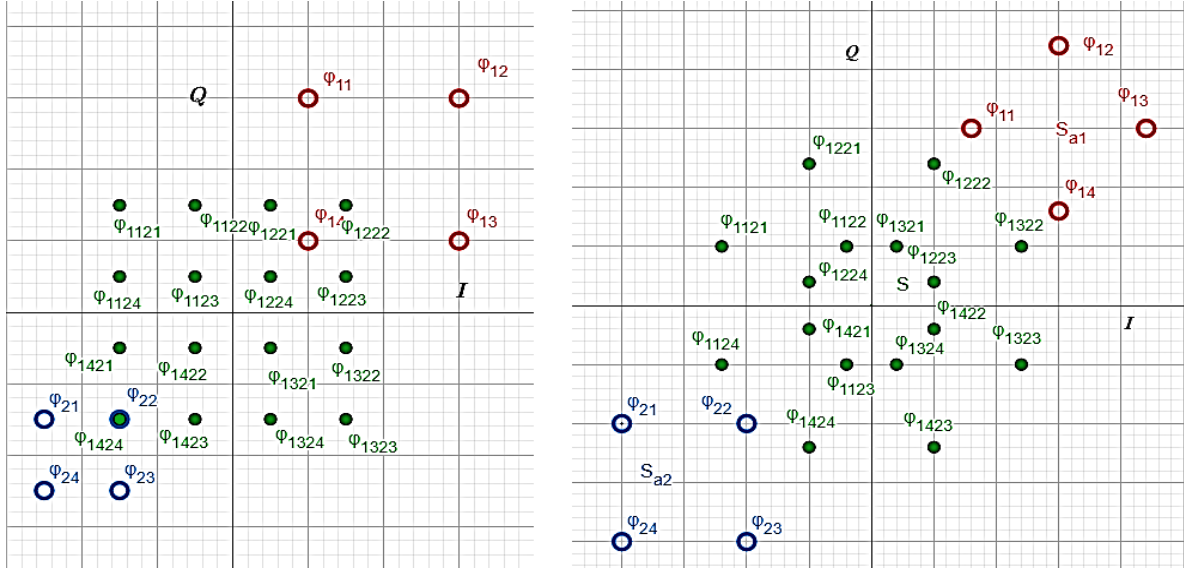


Рис. 5. Групповой сигнал $S(t)$: (а) – при изменении индекса фазовой модуляции $S_I(t)$; (б) – при вращении $S_I(t)$ на $\pi/4$

Постоянная огибающая фазомодулированных сигналов $S_{Ii}(t)$, $S_{2i}(t)$, $S_{Iq}(t)$, $S_{2q}(t)$ позволяет осуществить их усиление в нелинейных усилителях мощности.

Рассмотрим их формирование более подробно.

Анализ формирования группового сигнала

Формирование группового сигнала $S(t)$, согласно рис. 5 (б), возможно при внесении дополнительного фазового сдвига $\pi/4$ в тракт несущей частоты сигнала $S_I(t)$.

Исходя из анализа параметрической чувствительности формирователей спектрально-эффективных радиосигналов [6, 7] дисбаланс фазы при осуществлении фазового сдвига $\pi/2$ в тракте несущей частоты приводит к изменению формы формируемого сигнального созвездия, а именно осуществляется вращение сигнала $S_I(t)$. Тогда выражение (6), примет вид

$$S_{Ii}(t) = A_{Ii}[(\cos \omega t \cos(a_{Ii}(t)) - \sin(\omega t + \theta) \sin(a_{Ii}(t)))] \quad (13)$$

$$S_{Iq}(t) = A_{Iq}[(\cos \omega t \cos(a_{Iq}(t)) - \sin(\omega t + \theta) \sin(a_{Iq}(t)))] \quad (14)$$

где θ – дисбаланс фазы фазовращателя в тракте несущей частоты.

Представив выражения (13, 14) в виде $S(t) = A(t) \cos[\omega t + \varphi(t)]$, получим

$$A_{Ii}(t) = A_{Ii} \sqrt{\cos^2 a_{Ii}(t) + \sin^2 a_{Ii}(t) + 2 \cos a_{Ii}(t) \sin a_{Ii}(t) \cos[\pi/2 + \theta]} = A_{Ii} \sqrt{1 - 2 \cos a_{Ii}(t) \sin a_{Ii}(t) \sin \theta} \quad (15)$$

$$\varphi_{Ii}(t) = \arctg \left(\frac{\sin a_{Ii}(t) \sin[\pi/2 + \theta]}{\cos a_{Ii}(t) + \sin a_{Ii}(t) \cos[\pi/2 + \theta]} \right) = \arctg \left(\frac{\sin a_{Ii}(t) \cos[\theta]}{\cos a_{Ii}(t) + \sin a_{Ii}(t) \sin[\theta]} \right) \quad (16)$$

$$A_{Iq}(t) = A_{Iq} \sqrt{\cos^2 a_{Iq}(t) + \sin^2 a_{Iq}(t) + 2 \cos a_{Iq}(t) \sin a_{Iq}(t) \cos[\pi/2 + \theta]} = A_{Iq} \sqrt{1 - 2 \cos a_{Iq}(t) \sin a_{Iq}(t) \sin \theta} \quad (17)$$

$$\varphi_{Iq}(t) = \arctg \left(\frac{\sin a_{Iq}(t) \sin[\pi/2 + \theta]}{\cos a_{Iq}(t) + \sin a_{Iq}(t) \cos[\pi/2 + \theta]} \right) = \arctg \left(\frac{\sin a_{Iq}(t) \cos[\theta]}{\cos a_{Iq}(t) + \sin a_{Iq}(t) \sin[\theta]} \right) \quad (18)$$

Из выражений (15, 16, 17, 18) можно сделать вывод, что при формировании квадратурных составляющих высокочастотного колебания, когда $\theta=0$, амплитуды фазомодулированных составляющих $A_{Ii}(t)=A_{Ii}$, $A_{Iq}(t)=A_{Iq}$ постоянны, а фазы $\varphi_{Ii}(t)=a_{Ii}(t)$, $\varphi_{Iq}(t)=a_{Iq}(t)$. При этом формирование фазомодулированных составляющих происходит без амплитудно-фазовых искажений.

На рис. 6 представлено изменение выходного сигнального созвездия при дисбалансе фазы фазовращателя $\theta > 45^\circ$ в тракте несущей частоты. Наблюдается вращение фазовых точек вокруг центра выходного сигнального созвездия и проявление паразитной амплитудной модуляции в составляющих (векторах) с фазовой модуляцией [6, 7] $S_{Ii}(t)$ и $S_{Iq}(t)$, что ведет к

существенному изменению уровня огибающей.

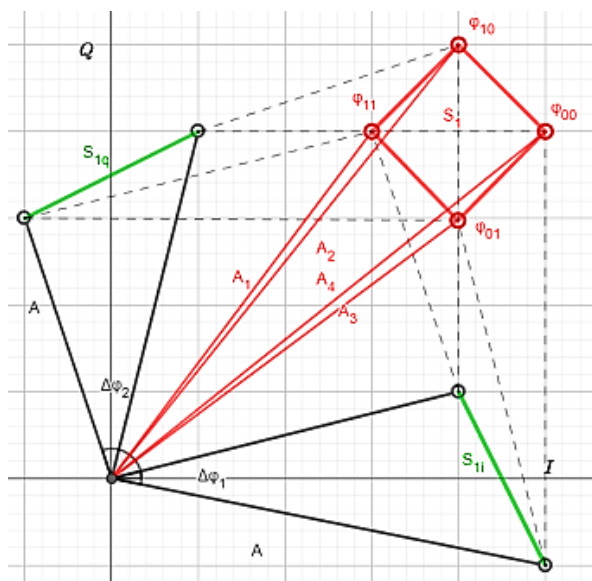


Рис. 6. Влияние дисбаланса фазы в тракте несущей частоты на формирование выходного сигнала

Применение способа формирования спектрально-эффективных радиосигналов позволяет осуществить генерирование неискаженных ФМ сигналов с произвольным индексом модуляции m_φ [8], при этом индекс фазовой модуляции будет определяться мгновенными значениями амплитуды входного сигнала [9]. При осуществлении предварительной фильтрации первичные сигналы $a_1(t)$, $a_2(t)$ примут вид

$$a_1(t) = m_1(t)\cos 2\pi f_b t, \quad a_2(t) = m_2(t)\cos 2\pi f_b t, \quad (19)$$

где $m_1(t)$, $m_2(t)$ – изменения амплитуды первичных канальных сигналов,

f_b – скорость входного информационного потока битов, а дибиты

$$\begin{aligned} a_{1i,q}(t) &= m_{1i,q}(t)\cos 2\pi f_s t, \\ a_{2i,q}(t) &= m_{2i,q}(t)\cos 2\pi f_s t, \end{aligned} \quad (20)$$

где $m_{1i,q}(t)$, $m_{2i,q}(t)$ – изменения амплитуды дибитов канальных сигналов,

$f_s = f_b/2$ – скорость входного информационного потока дибитов.

Тогда формируемые канальные сигналы $S_1(t)$ и $S_2(t)$:

$$S_1(t) = A_{1i}\cos(\omega t + m_{1i}(t)\cos 2\pi f_s t) - A_{1q}\sin(\omega t + m_{1q}(t)\cos 2\pi f_s t), \quad (21)$$

$$S_2(t) = A_{2i}\cos(\omega t + m_{2i}(t)\cos 2\pi f_s t) - A_{2q}\sin(\omega t + m_{2q}(t)\cos 2\pi f_s t). \quad (22)$$

Таким образом, изменяя значения $m_1(t)$, $m_2(t)$, можно осуществить изменение размеров сигнальных созвездий групповых сигналов, а также положение и форму группового сигнала на фазовой плоскости.

Сигнальные созвездия группового сигнала, представленные на рис. 5, обладают существенным изменением формы огибающей, но при усилении сигнала, изображенного на рис. 5 (а), возможно применение нелинейных усилителей, поскольку его составляющие $S_{1i}(t)$, $S_{2i}(t)$, $S_{1q}(t)$, $S_{2q}(t)$ имеют постоянную огибающую.

Моделирование

В системе автоматизированного проектирования «Advanced Design System» было осуществлено моделирование [10]. В качестве первичных сигналов $a_1(t)$, $a_2(t)$ использовались входные псевдослучайные последовательности, каждая со скоростью $R_b = 16$ кБит/с без предварительной фильтрации, частота несущей 1 ГГц. Для улучшения визуального отображения рассмотрен канал связи с минимальным воздействием аддитивного белого гауссовского шума.

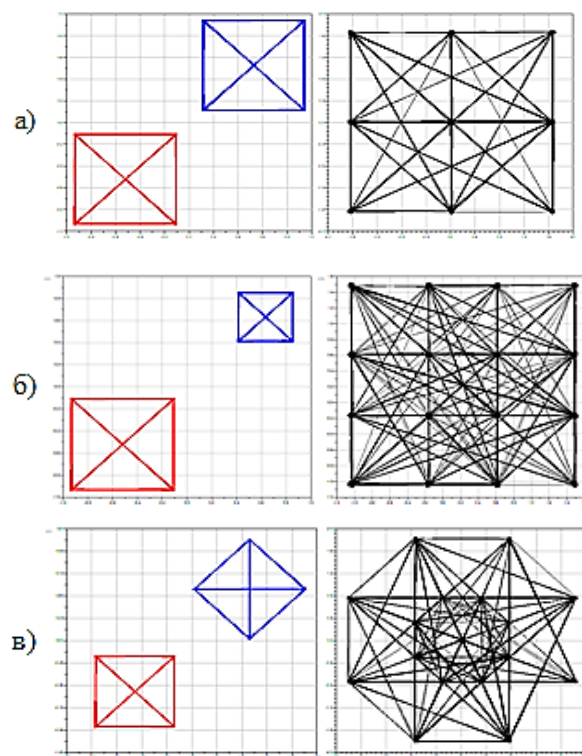


Рис. 7. Сигнальные созвездия двух канальных сигналов и результирующий групповой сигнал: (а) канальные сигналы с индексом фазовой модуляции $m_1(t) = m_2(t)$; (б) канальные сигналы с индексом фазовой модуляции $m_1(t) = 2m_2(t)$; (в) канальные сигналы с вращением $S_1(t)$ на $\pi/4$

На рис. 7 (а) представлены сигнальные созвездия двух канальных сигналов и результирующий групповой сигнал, полученный при объединении канальных сигналов с индексом фазовой модуляции $m_1(t) = m_2(t)$, на рис. 7 (б) при значении индексов фазовой модуляции $m_1(t) = 2m_2(t)$, а на рис. 7 (в) канальные сигналы с вращением $S_1(t)$ на $\pi/4$. Полученные сигнальные созвездия совпадают с рассчитанными значениями.

Также были исследованы изменения формы огибающей сигналов, являющихся составляющими групповых сигналов $S_1(t)$, $S_2(t)$.

На рис. 8 цифрой 1 обозначена постоянная огибающая неискаженного сигнала фазовой модуляции, формируемая при применении способа формирования спектрально-эффективных радиосигналов, то есть в случаях формирования сигнальных созвездий (рис. 7 (а, б)). Цифрой 2 обозначена огибающая сигналов $S_{1i}(t)$ и $S_{1q}(t)$ после внесения смещения фазы 45° в тракте несущей частоты при формировании сигнала $S_1(t)$. Наблюдается существенная паразитная амплитудная модуляция, которая не позволяет осуществить нелинейное усиление мощности.

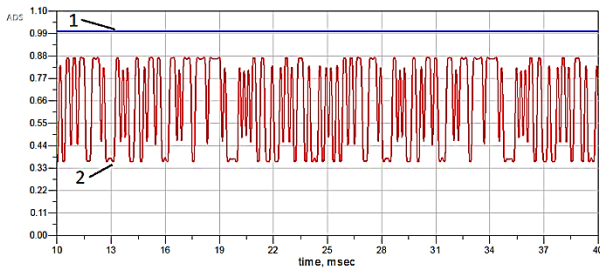


Рис. 8. Огибающая сигналов фазовой модуляции $S_{1i}(t)$, $S_{1q}(t)$.

Заключение

В работе предложено применение способа формирования спектрально эффективных радиосигналов для осуществления фазового разделения каналов. Если в стандартном методе фазового разделения каналов ортогональность переносчиков обеспечивается за счет фазового сдвига на 90° между ними, то в предложенном способе между канальными сигналами вносится фазовый сдвиг 180° . В отличие от стандартного метода фазового разделения каналов, появляется возможность увеличения скорости

передачи за счет увеличения количества позиций сигнального созвездия при сохранении высокой энергетической эффективности усилительного элемента. Наиболее эффективным является использование групповых сигналов и с различными индексами фазовой модуляции. Используя различные значения индексов фазовой модуляции, количество канальных сигналов, входящих в групповой сигнал можно, увеличить до четырех.

Литература

1. Системы связи: учебное пособие для студентов (курсантов) вузов / С.И. Макаренко, В.И. Сапожников, Г.И. Захаренко, В.Е. Федосеев; под общ. ред. С.И. Макаренко. Воронеж, издание ВАИУ, 2011. 285 с.
2. Матюхин А.Ю. Многоканальные системы передачи : учебное пособие / А.Ю. Матюхин, С.А. Курицын; СПб.: СПбГУТ, 2013. 400 с.
3. Голиков А.М. Кодирование в телекоммуникационных системах: курс лекций, компьютерный практикум, задание на самостоятельную работу: учебное пособие. Томск: ТУСУР, 2016. 338 с.
4. Печников С.С. Способ и устройство преобразования структуры спектрально-эффективных радиосигналов для усиления в нелинейных усилителях мощности // Заявление о выдаче патента Российской Федерации на изобретение от 18.12.2020 № 2020142008.
5. Шерстюков С.А., Печников С.С., Шаталов Е.В. Аппаратная реализация на базе ПЛИС компенсатора амплитудно-фазовых искажений, входящего в состав формирователя спектрально-эффективных радиосигналов // Вестник Воронежского института ФСИИ России. 2020. № 2. С. 16–24.
6. Печников С.С. Формирователи спектрально-эффективных радиосигналов с компенсацией амплитудно-фазовых искажений: дис. ... канд. техн. наук: 05.12.04 / Печников Сергей Сергеевич. Владимир, 2021. 157 с.
7. Pechnikov S.S., Sherstukov S.A. Analysis of the parametric sensitivity of the method for optimizing the structure of spectrally effective radio signals // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2021. № 3. С. 50–58.
8. Шерстюков С.А., Печников С.С. Алгоритмы формирования узкополосных спектрально-эффективных радиосигналов вне кольца импульсно-фазовой автоматической подстройки частоты синтезатора частот // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2021. № 4. С. 111–117.
9. Шерстюков С.А., Печников С.С. Оптимизация структуры спектрально-эффективных радиосигналов на базе функциональных преобразователей и векторных модуляторов в составе тракта предискажения // Системы синхронизации, формирования и обработки сигналов. 2020. № 2. С. 4–10.
10. Курушин А.А. Моделирование цифровых потоков радиосвязи в среде ADS / Ptolemy. Москва: СОЛОН-Пресс, 2016. 183 с.

Поступила 25.09.2023; принята к публикации 10.12.2023

Информация об авторах

Печников Сергей Сергеевич – канд. техн. наук, старший преподаватель кафедры физики и радиоэлектроники Воронежский институт МВД России (394065, Россия, г. Воронеж, проспект Патриотов, 53), тел. +7 920-801-49-39, e-mail: orl_os@mail.ru

THE USE OF GENERATORS OF SPECTRALLY EFFICIENT RADIO SIGNALS FOR THE IMPLEMENTATION OF PHASE SEPARATION OF CHANNELS

S.S. Pechnikov

Voronezh Institute of the Ministry of Internal Affairs of the Russian Federation, Voronezh, Russia

Abstract: Many methods of channel (signal) separation are known, but in practice, methods with linear separation have become the most widespread. To increase the efficiency of digital communications, it is worth considering the possibility of using systems that implement the principles of frequency and time separation of signals, simultaneously with phase separation. The purpose of this work is to increase the energy efficiency of the signals generated during the phase separation of channels. The article analyzes the method of phase separation of channels, the use of which is limited due to the fact that the orthogonality of the carriers is provided by a phase shift of $\pi/2$ between them. This method provides almost stable operation only with two-channel transmission. In addition, phase modulation signals with increasing positions of the signal constellation increase the number of amplitude jumps, which leads to a significant change in the shape of the envelope and makes it impossible to implement highly efficient nonlinear amplification. The paper investigates the possibility of using spectral-efficient radio signal generators to generate channel signals in order to implement their linear amplification in nonlinear power amplifiers. Two signals of quadrature amplitude modulation at the same carrier frequency are used as channel signals. The analysis of the formation of a group signal from the phase separation of channels is carried out, as well as modeling in the computer-aided design system is carried out. Signal constellations of the resulting group signals with phase separation of channels are obtained. It is established that the most effective is the use of channel signals with different phase modulation indices. Using different values of the phase modulation indices, the number of channel signals included in the group signal can be increased to four

Key words: multichannel communication systems; phase division multiple access; nonlinear amplifier; signal constellation; phase imbalance; signal envelope

References

1. Makarenko S.I., Sapozhnikov V.I., Zakharenko G.I., Fedoseev V.E. "Communication systems: a textbook for university students" ("Sistemy svyazi: uchebnoye posobiye dlya studentov (kursantov) vuzov"), ed. by S.I. Makarenko, Voronezh, Izdanie VAIU, 2011, 285 p.
2. Matyukhin A.Yu., Kuritsyn S.A. "Multichannel transmission systems: student's book" ("Mnogokanalnyye sistemy peredachi: uchebnoye posobiye"), St. Petersburg SPbGUT, 2013, 400 p.
3. Golikov A.M. "Coding in telecommunication systems: course of lectures, computer workshop, assignment for independent work: textbook" ("Kodirovaniye v telekommunikatsionnykh sistemakh: kurs lektsiy, kompyuternyy praktikum, zadaniye na samostoyatel'nuyu rabotu: uchebnoye posobiye"), Tomsk: TUSUR, 2016, 338 p.
4. Pechnikov S.S. "Method and device for transforming the structure of spectral-efficient radio signals for amplification in nonlinear power amplifiers" ("Sposob i ustroystvo preobrazovaniya struktury spektral'no-effektivnykh radiosignalov dlya usileniya v nelineynykh usilitelyakh moshchnosti"), Application for a patent of RF for an invention, December 18, 2020, no. 2020142008.
5. Sherstyukov S.A., Pechnikov S.S., Shatalov E.V. "Hardware implementation based on FPGA of an amplitude-phase distortion compensator, which is part of a spectral-efficient radio signal shaper", *The Bulletin of Voronezh Institute of the Federal Penitentiary Service of Russia (Vestnik Voronezhskogo instituta FSIN Rossii)*, 2020, no. 2, pp. 16–24.
6. Pechnikov S.S. "Shapers of spectral-efficient radio signals with compensation of amplitude-phase distortions", diss... Cand. Sc. (Technical), Vladimir, 2021, 57 p.
7. Pechnikov S.S., Sherstyukov S.A. "Analysis of the parametric sensitivity of the method for optimizing the structure of spectrally effective radio signals" *T-Comm: Telecommunications and Transport (T-Comm: Telekommunikatsii i transport)*, 2021, no. 3, pp. 50–58.
8. Sherstyukov S.A., Pechnikov S.S. "Algorithms for the formation of narrow-band spectral-efficient radio signals outside the ring of pulse-phase automatic frequency adjustment of a frequency synthesizer", *The Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2021, no. 4, pp. 111–117.
9. Sherstyukov S.A., Pechnikov S.S. "Optimization of the structure of spectral-efficient radio signals based on functional converters and vector modulators as part of the pre-emphasis path", *Systems of synchronization, signal generation and processing (Sistemy sinkhronizatsii, formirovaniya i obrabotki signalov)*, 2020, no. 2, pp. 4–10.
10. Kurushin A.A. "Modeling of digital radio communication streams in the ADS/Ptolemy environment" ("Modelirovaniye tsifrovyykh potokov radiosvyazi v srede ADS/Ptolemy"), Moscow, SOLON-Press, 2016, 183 p.

Submitted 25.09.2023; revised 10.12.2023

Information about the authors

Sergey S. Pechnikov – Cand. Sc. (Technical), Senior Lecturer, the Department of Physics and Radio Electronics, Voronezh Institute of the Ministry of Internal Affairs of the Russian Federation (53 Prospect Patriotov, Voronezh 394065, Russia), tel. +79208014939, e-mail: orl_os@mail.ru

РЕКОНФИГУРИРУЕМАЯ ПАТЧ-АНТЕННА НА ОСНОВЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВОЙ ПЛАЗМЫ

И.А. Баранников¹, С.М. Фёдоров^{1,2}¹Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия²Международный институт компьютерных технологий, г. Воронеж, Россия

Аннотация: в статье рассматривается конструкция реконфигурируемой патч-антенны, способной динамически менять свои рабочие частоты. Изменение рабочих частот антенны осуществляется посредством изменения размеров ее проводящей поверхности с помощью полупроводниковой плазмы, формируемой поверхностными PIN-диодами. Рассматривается конструкция PIN-диода, применяемого в антенне, который способен формировать плазму. Производится математическое моделирование его параметров. По полученной концентрации электронов $5 \cdot 10^{18} \text{ 1/см}^3$ рассчитана плазменная частота, определяющая взаимодействие плазмы с электромагнитными волнами различных частот. Полученные PIN-диоды предлагается объединять в массивы для увеличения площади создаваемой проводящей поверхности и уменьшения влияния цепей питания на характеристики излучения антенны. Характеристики антенны получены посредством электродинамического компьютерного моделирования для двух режимов работы: когда на диоды не подается напряжение и плазма отсутствует; и когда на диоды подано положительное напряжение и сформированная плазма образует дополнительные проводящие поверхности. Рабочие частоты антенны расположены в диапазоне СВЧ (сверхвысоких частот) и составляют 18.46 ГГц и 20.02 ГГц, также получены графики возвратных потерь антенны, ее КПД (коэффициент полезного действия) и диаграммы направленности для обоих случаев работы. Результаты показали незначительное ухудшение характеристик антенны при включенной плазме, но полученная возможность динамически менять рабочий диапазон частот является значительным преимуществом

Ключевые слова: патч-антенна, реконфигурируемая антенна, полупроводниковая плазма, плазменная антенна

Введение

В современных системах связи все чаще возникает необходимость использования адаптивных антенн для решения различных задач. Один из способов реализации таких систем основан на использовании плазмы в конструкциях антенн. Особые свойства плазмы позволяют формировать антенны с изменяемой геометрией. В таких конструкциях плазма заменяет проводящие поверхности и, за счет своей способности быстро индуцироваться и рассеиваться, динамически формирует структуру антенны.

Один из наиболее простых в реализации и применении типов плазмы – ионизированный газ, в котором основными носителями заряда выступают ионы. Антенны и другие структуры, построенные на основе данного типа плазмы, рассмотрены в [1]. К минусам таких конструкций можно отнести необходимость решения проблемы хрупкости сосудов с газом и создание емкостей для газа, которые будут прозрачны для электромагнитных волн СВЧ диапазона и выше. Наиболее важным параметром плазмы является ее частота, которая определяет ее взаимодействие с электромагнитными волнами различных частот:

$$\omega_p = \sqrt{\frac{4\pi n q^2}{m_i}}, \quad (1)$$

где n – концентрация заряженных частиц или мера ионизации плазмы,

q – заряд частицы,

m_i – масса ионов.

Другой подход к формированию плазмы состоит в использовании полупроводниковых структур. В этом случае носителями заряда будут являться электрон-дырочные облака, такая плазма называется твердотельной или полупроводниковой. К плюсам конструкций, основанных на данном типе плазмы, можно отнести простоту интеграции плазмы в антенну и изготовления, т.к. полупроводниковые структуры могут изготавливаться на основе уже имеющихся технологий и располагаться на печатных платах. Сложность использования твердотельной плазмы заключается в снижении влияния линий питания полупроводниковых структур на излучение антенны, а также трудности с созданием достаточной плотности зарядов для формирования плазмы.

Тем не менее, возможные конструкции антенн с использованием полупроводниковой плазмы рассматривались авторами работы [2]. Они предложили различные типы реконфигурируемых антенн и провели исследование вли-

яния размеров различных зон полупроводникового диода на эффективность формирования плазмы. Также они провели сравнение простого металлического диполя и диполя, построенного из PIN диодов, формирующих плазму.

В работе [3] приводится подробное исследование параметров поверхностного PIN диода, предназначенного для формирования реконфигурируемых антенн. В частности, приводятся результаты экспериментов и компьютерного моделирования для ВАХ (вольтамперной характеристики) диода и концентраций зарядов при различных напряжениях смещения. Предлагается также объединение диодов в последовательности (массивы) для упрощения производства и снижения влияния линий питания.

Авторы работы [4] предлагают конструкцию антенны Яги-Уда с рефлектором, построенным из последовательности поверхностных PIN диодов, посредством включения и выключения которого возможно менять КНД (коэффициент направленного действия) антенны. В работе приведены результаты экспериментальных измерений для случаев включенных и выключенных PIN диодов. Они подтверждают практическую возможность построения реконфигурируемых антенн на основе твердотельной плазмы.

Статья [5] посвящена исследованию конструкции диполя на печатной плате с изменяемой длиной. Длина диполя меняется за счет включения различных групп поверхностных PIN диодов, формирующих плазму. Авторы приводят результаты моделирования и экспериментальных измерений, которые имеют высокую схожесть между собой, что показывает эффективность использования компьютерного моделирования при проектировании антенн с использованием полупроводниковой плазмы.

В работе [6] авторы предлагают конструкцию многолучевой антенны с использованием массивов поверхностных диодов, ориентированных вертикально, для управления направлением излучения. В данной антенне плазма используется в качестве отражающей поверхности, а массивы диодов позволяют менять ее положение в пространстве. Авторы приводят результаты компьютерного моделирования параметров диодов и антенны, а также экспериментальные измерения параметров антенны.

Целью данной статьи является рассмотрение конструкции патч антенны, использующей массивы поверхностных PIN диодов для изменения геометрических размеров проводящей поверхности антенны, и, соответственно изменения ее рабочего диапазона частот.

Конструкция диода

Для генерации плазмы в конструкции антенны используются поверхностные PIN диоды. Рассмотрим конструкцию PIN диода, который будет использоваться для формирования плазмы. Его схема приведена на рис. 1.

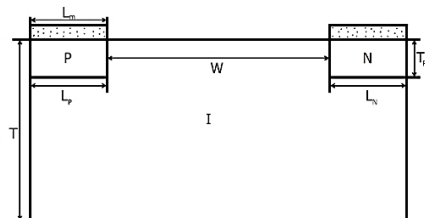


Рис. 1. Схема диода

На рис. 1 $T = 14$ мкм, $W = 100$ мкм, $L_P = L_N = L_m = 20$ мкм, $T_{PN} = 4$ мкм. Ширина диода составляет 100 мкм. В качестве материала PIN диода используется кремний, концентрация донорной и акцепторной примесей - $2 \cdot 10^{18}$ 1/см³. Для получения характеристик диода использовалось компьютерное моделирование. В результате были получены график зависимости концентрации электронов в центре диода от напряжения и ветвь ВАХ для положительных напряжений смещения (предполагается использование диода в таком режиме). Они представлены на рис. 2 и рис. 3.

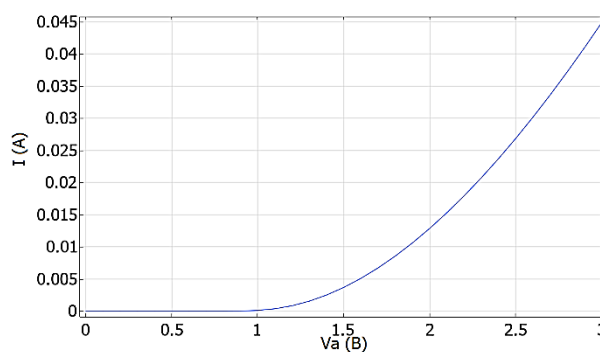


Рис. 2. ВАХ диода

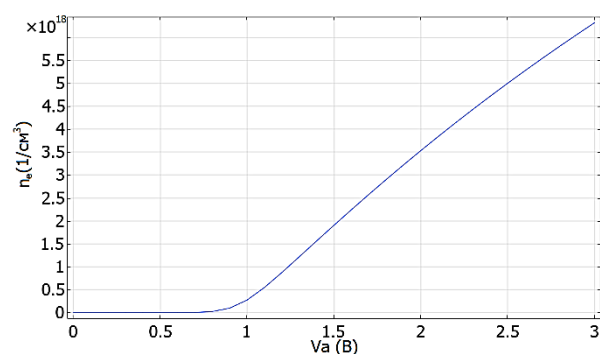


Рис. 3. Зависимость концентрации электронов n_e от напряжения V_a

Полученная концентрация электронов при напряжении смещения 2.5 В составляет $n_e = 5 \cdot 10^{18} \text{ 1/см}^3$. Тогда в соответствии с формулой (1) плазменная частота будет составлять $\omega_p = 1.26 \cdot 10^{14} \text{ рад/с}$. На рис. 4 представлен график концентрации электронов в структуре PIN диода при напряжении 2.5В.

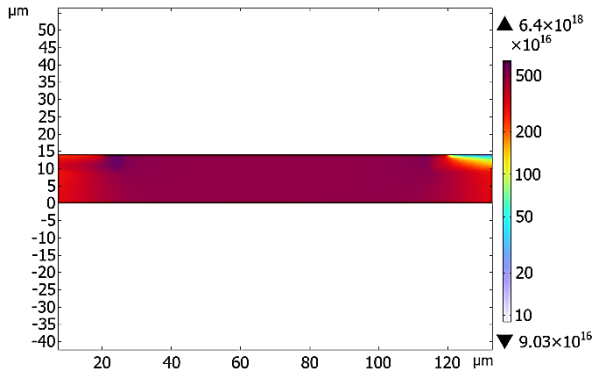


Рис. 4. Концентрация электронов при $V_a = 2.5 \text{ В}$

Для увеличения площади формирования проводящих поверхностей диоды будут последовательно соединены в группы по 3 и 5. Для изоляции диодов от подложки и металлических частей конструкции антенны используется слой SiO_2 . Его толщина составляет 5 мкм в случае изоляции между диодами и металлическими частями антенны и 1 мкм в случае изоляции между подложкой и диодами.

Конструкция антенны

Конструкция антенны представляет собой патч антенну, габаритные размеры которой могут динамически изменяться при включении и выключении групп PIN диодов, расположенных на краях ее металлической части. Ее размеры и внешний вид представлены на рис. 5.

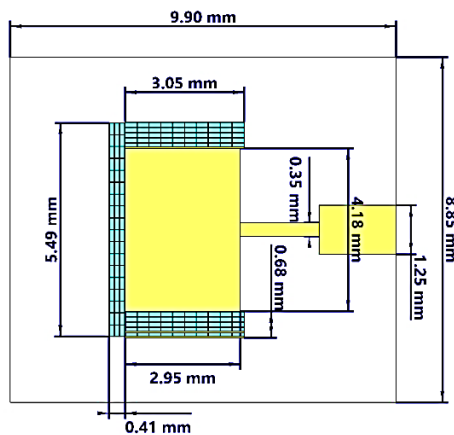


Рис. 5. Внешний вид антенны

В качестве материала подложки был выбран диэлектрик Rogers AD 430. Толщина подложки 0.64 мм. Для металлической части антенны используется медь, толщина которой составляет $15 \cdot 10^{-3} \text{ мм}$. Антенна может работать в 2-х режимах: когда PIN диоды выключены и дополнительная проводящая поверхность отсутствует; когда PIN диоды включены и сформированная плазма, образуя новые проводящие поверхности, увеличивает размеры антенны, и, соответственно, уменьшает ее рабочую частоту. Далее на рис. 6 и рис. 7 приведены графики возвратных потерь и КПД антенны для двух режимов работы.

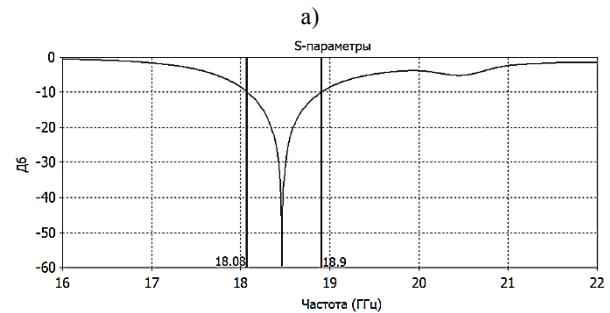
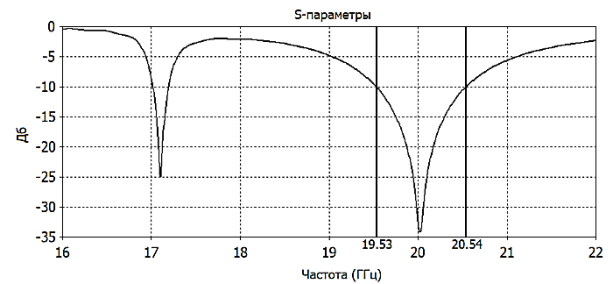


Рис. 6. S-параметры антенны: а) при включенной плазме; б) при выключенной

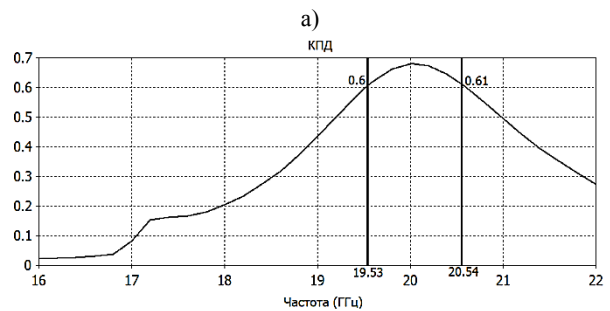
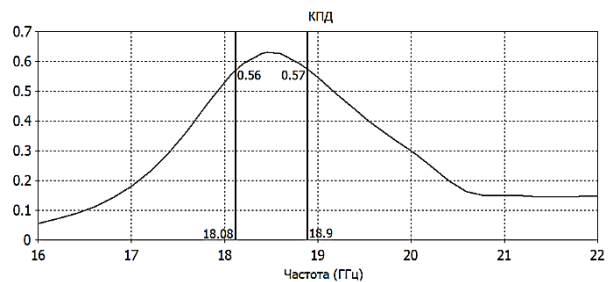


Рис. 7. КПД антенны: а) при включенной плазме; б) при выключенной

Как видно из рис. 6 и рис. 7, диапазон рабочих частот антенны при выключенной плазме расположен от 19.53 до 20.54 ГГц, и центральная рабочая частота составляет 20.02 ГГц. При включении плазмы его частоты уменьшаются, и он располагается от 18.08 ГГц до 18.9 ГГц, а центральная частота уменьшается до 18.46 ГГц. Минимальное значение КПД антенны в рабочем диапазоне составляет 60 % и 56 % при выключенной и включенной плазме, соответственно. Далее на рис. 8 и рис. 9 приведены диаграммы направленности антенны для двух режимов работы на центральных частотах.

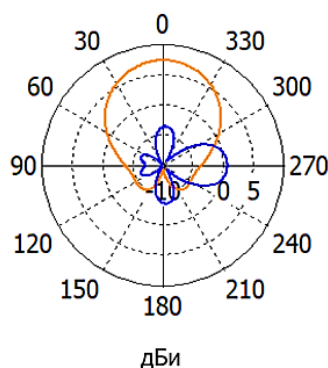


Рис. 8. Вертикальная (синий) и горизонтальная (оранжевый) диаграммы направленности антенны при выключенной плазме

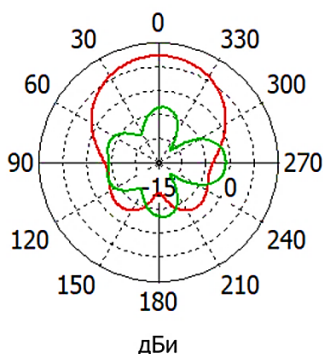


Рис. 9. Вертикальная (зеленый) и горизонтальная (красный) диаграммы направленности антенны при включенной плазме

В случае работы антенны при выключенной плазме ее КНД составляет 7.31 дБи, уровень боковых лепестков – -12 дБи, ширина основного лепестка диаграммы направленности по уровню 3 дБ составляет 77.8°. Для работы антенны при включенной плазме значение КНД составляет 7.17 дБи, уровень боковых лепестков – -9.9 дБи, а ширина основного лепестка диаграммы направленности по уровню 3 дБ – 83.4°. Все полученные результаты для обоих режимов работы антенны сведены в табл. 1.

Таблица 1

Параметры антенны

Параметр	Выключенная плазма	Включенная плазма
Центральная частота	20.02 ГГц	18.46 ГГц
КНД	7.31 дБи	7.17
Диапазон рабочих частот	19.53 – 20.54 ГГц (1.01 ГГц)	18.08 – 18.9 ГГц (0.81 ГГц)
Минимальное значение КПД в рабочем диапазоне	60%	56%
Ширина основного лепестка ДН по уровню 3 дБ	77.8°	83.4°
Уровень боковых лепестков	-12 дБ	-9.9 дБ

Заключение

Таким образом, по полученным результатам можно сделать вывод о достаточной эффективности использования полупроводниковой плазмы для формирования конструкций реконфигурируемых антенн. Применение плазмы дает возможность динамически изменять ее рабочую частоту, но при этом, лишь незначительно ухудшает параметры излучения антенны. Полученные результаты исследования показывают перспективность использования полупроводниковой плазмы, формируемой поверхностными PIN диодами в антеннах СВЧ диапазона и выше.

Литература

1. Experimental and theoretical results with plasma antennas / I. Alexeff, T. Anderson, S. Parameswaran, E.P. Pradeep, J. Hulloli and P. Hulloli // IEEE Transactions on Plasma Science. April, 2006. Vol. 3. No. 2. Pp. 166-172.
2. Fathy A. E. *et al.*, Silicon-based reconfigurable antennas-concepts, analysis, implementation, and feasibility // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. June 2003. Vol. 51. No. 6. Pp. 1650-1661.
3. Investigation of surface PiN diodes for a novel reconfigurable antenn / Han Su, Huiyong Hu, Heming Zhang, Bin Wang, Haiyan Kang, Yu Wang, Minru Hao //Solid-State Electronics. 2018. Vol. 139. Pp 48-53.
4. Kim DJ., Park JS., Kim C.H. *et al.*, Reconfigurable Yagi-Uda antenna based on a silicon reflector with a solid-state plasma // *Sci Rep* 7, 17232 (2017).
5. Kim DJ., Jo ES., Cho YK. *et al.*, A frequency reconfigurable dipole antenna with solid-state plasma in silicon // *Sci Rep* 8, 14996 (2018).
6. Reconfigurable Beamforming Silicon Plasma Antenna with Vertical PIN Diode Array / J. Hur, I.-J. Nam, Y.-K. Cho, D.-J. Kim, E.-S. Jo, S. Lee, C.-K. Kim, G.-B. Lee, C. H. Kim, S. B. Hyun, D. Kim, Y.-K. Choi //Adv. Electron. Mater. 2020, 6, 2000257.

Информация об авторах

Баранников Илья Андреевич – студент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), тел. +7(473)243-77-29, e-mail: 8thbar@gmail.com

Фёдоров Сергей Михайлович – канд. техн. наук, доцент кафедры радиоэлектронных устройств и систем, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84); доцент кафедры информационной безопасности и систем связи, Международный институт компьютерных технологий (394026, Россия, г. Воронеж, ул. Солнечная, д. 29б), тел. +7(473)243-77-29, e-mail: fedorov_sm@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9027-6163>

RECONFIGURABLE SEMICONDUCTOR PLASMA-BASED PATCH ANTENNA

I.A. Barannikov¹, S.M. Fedorov^{1,2}

¹Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

²International Institute of Computer Technologies, Voronezh, Russia

Abstract: The paper deals with the design of a reconfigurable patch antenna capable of dynamically changing its operating frequencies. Changing the operating frequencies of the antenna is accomplished by changing the dimensions of its conducting surface using semiconductor plasma formed by surface PIN diodes. The design of a PIN diode used in the antenna, which is capable of forming plasma, is considered. Mathematical modeling of its parameters is performed. According to the obtained electron concentration of $5 \cdot 10^{18} \text{ 1/cm}^3$ the plasma frequency, which determines the interaction of plasma with electromagnetic waves of different frequencies, is calculated. The obtained PIN diodes are proposed to be combined in arrays to increase the area of the generated conducting surface and to reduce the influence of the feeding circuits on the antenna radiation characteristics. The antenna characteristics are obtained through electrodynamic computer modeling for two modes of operation: when no voltage is applied to the diodes and there is no plasma; and when a positive voltage is applied to the diodes and the generated plasma forms additional conducting surfaces. The operating frequencies of the antenna are located in the SHF range and are 18.46 GHz and 20.02 GHz, and plots of antenna return loss, efficiency and radiation patterns for both cases of operation are also obtained. The results showed a slight degradation of the antenna performance when the plasma is on, but the resulting ability to dynamically change the operating frequency range is a significant advantage

Key words: patch antenna, reconfigurable antenna, semiconductor plasma, plasma antenna

References

1. I. Alexeff T. Anderson S. Parameswaran E.P. Pradeep, J. Hulloli and P. Hulloli, "Experimental and theoretical results with plasma antennas," in *IEEE Transactions on Plasma Science*, vol. 34, no. 2, pp. 166-172, April 2006, doi: 10.1109/TPS.2006.872180.
2. A.E. Fathy *et al.*, "Silicon-based reconfigurable antennas-concepts, analysis, implementation, and feasibility," in *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 51, no. 6, pp. 1650-1661, June 2003, doi: 10.1109/TMTT.2003.812559.
3. Han Su, Huiyong Hu, Heming Zhang, Bin Wang, Haiyan Kang, Yu Wang, Minru Hao. "Investigation of surface PiN diodes for a novel reconfigurable antenna," *Solid-State Electronics*, vol. 139, pp 48-53, 2018, ISSN 0038-1101, doi: 10.1016/j.sse.2017.09.017.
4. Kim D.-J., Park J.-S., Kim C.-H. *et al.*, "Reconfigurable Yagi-Uda antenna based on a silicon reflector with a solid-state plasma", *Sci Rep* 7, 17232 (2017), doi: 10.1038/s41598-017-17425-8.
5. Kim, D.-J., Jo E.-S., Cho, Y.-K. *et al.*, "A frequency reconfigurable dipole antenna with solid-state plasma in silicon," *Sci Rep* 8, 14996 (2018), doi: 10.1038/s41598-018-33278-1.
6. Hur J., Nam I.-J., Cho Y.-K., Kim D.-J., Jo E.-S., Lee S., Kim C.-K., Lee G.-B., Kim C.H., Hyun S. B., Kim D., Choi Y.-K., "Reconfigurable Beamforming Silicon Plasma Antenna with Vertical PIN Diode Array," *Adv. Electron. Mater*, 2020, 6, 2000257. doi: 10.1002/aeml.202000257.

Submitted 20.10.2023; revised 13.12.2023

Information about authors

Ilya A. Barannikov – Student, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), tel.: +7 (473)243-77-29, e-mail: 8thbar@gmail.com

Sergei M. Fedorov – Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Department of Radioelectronic Devices and Systems, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), International Institute of Computer Technologies (29 b Solnechnaya str., Voronezh 39026, Russia), tel.: +7 (473)243-77-29, e-mail: fedorov_sm@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9027-6163>

АНАЛИЗ ОБРАЗОВАНИЯ ДЕФЕКТОВ В КОНСТРУКЦИИ ПЛАНАРНОГО ТРАНСФОРМАТОРА В МОДУЛЕ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ

А.В. Башкиров, И.С. Бобылкин, А.А. Кузёмкин

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

Аннотация: применение планарных изделий в современных модулях электропитания – тенденция мировых лидеров в области силовой электроники. Причины перехода с традиционных моточных изделий заключаются в конструктивных и технологических решениях, принимаемых при разработке и проектировании планарных устройств. Так, например, правильно выполненный трансформатор определяет эффективность и высокий коэффициент полезного действия (КПД) любого импульсного источника питания (ИИП). Трансформатор в планарном исполнении, на первый взгляд, исключает возникновение проблем на операции сборки в связи с простотой конструкции. Однако проблемы могут возникнуть на других этапах производства: тестирование модуля, испытания при разных температурных режимах и других операциях, где определяют электрические параметры изделия. В данной статье выявлены причины проблем несоответствия электрических характеристик, проведен анализ вероятности нежелательных потерь при неблагоприятных результатах сборки модуля. С помощью моделирования сложных объектов, подобных трансформатору, можно определить потенциальные риски при эксплуатации изделия, а также предугадать поведение всей функциональной части модуля электропитания. Поэтому с целью подтверждения изменяющихся характеристик планарного трансформатора проведены моделирования в современной системе автоматизированного проектирования (САПР) ANSYS и программной среде FEMM. В статье также обнаружены закономерности изменения магнитных характеристик трансформатора в зависимости от расположения сердечников относительно друг друга

Ключевые слова: планарный трансформатор, модуль электропитания, импульсный режим, магнитопровод, магнитная индукция, магнитный поток, коэффициент связи

Актуальность работы

Планарный трансформатор, как правило, состоит из нескольких частей: обмотка, выполненная в виде проводящего рисунка на подложке печатной платы, и комплект сердечников. Слои проводящего рисунка могут быть целиком интегрированы в печатную плату изделия, а могут располагаться на отдельной многослойной печатной плате (МПП), называемой планарной вставкой [1]. Сборка трансформатора в обоих случаях будет одинакова: плотная фиксация сердечников друг с другом при соблюдении симметричности с применением разных видов клеев, лент или металлических скоб. Иногда, чтобы повысить качество и надежность сборочной единицы, применяют все способы вместе. Это обусловлено режимом работы трансформатора, условиями эксплуатации модуля.

В настоящее время в отечественной научной литературе мало освещены вопросы использования планарных трансформаторов в модулях электропитания. Таким образом, применив трансформатор в таком исполнении, разработчик рискует столкнуться с проблемами некорректных показателей электрических величин готового изделия. Поэтому в данной статье бу-

дут рассмотрены частые и наиболее встречающиеся дефекты в конструкции планарного трансформатора.

Причины образования дефектов в конструкции планарного трансформатора

В данной части статьи рассмотрены особенности возникновения немагнитного зазора – пространства, образовавшегося между боковыми ярмами или центральным керном в сердечнике трансформатора. Как правило, это слой адгезива или компаунда, располагающегося между частями сердечника. В случае если сердечники соединены между собой металлическими скобами, то роль в качестве зазора выступает воздушная прослойка.

Рассмотрим причины образования немагнитного зазора.

1. Конструктивные факторы. Это неучтенные погрешности в габаритных размерах планарной вставки или печатной платы, а также сердечников. Это наиболее редкая причина из-за которой образуется немагнитный зазор.

2. Температура. Трансформаторы любого типа исполнения в ходе своей работы сильно греются. Магнитопровод может расширяться и сжиматься в зависимости от температуры. Это связано с потерями в трансформаторе P_{loss} ,

которые преобразуются в тепло. Общая мощность потерь P_{loss} определяется по формуле

$$P_{\text{loss}} = P_{\text{core}} + P_{\text{cond}}, \quad (1)$$

где P_{core} – потери в магнитопроводе, возникают в ходе перемагничивания материала (потери на гистерезис и на вихревые токи), Вт;

P_{cond} – потери в проводниках, которые зависят от величины электрического тока, Вт.

Другими словами, мощность потерь в трансформаторе – это разница между входной мощностью P_{in} и выходной P_{out} .

На локальное увеличение температуры может также повлиять некорректная работа полупроводниковых ключей, работающих на высоких частотах.

3. Компаунды. Как упоминалось ранее, фиксация сердечников друг с другом осуществляется нанесением адгезива на склеиваемые поверхности. Как правило, клей или компаунд наносится на боковые ядра и на центральный kern сердечников, затем с помощью струбцин-прищепок обе части сердечников прижимают друг другу и выдерживают определенное время, чтобы произошла полимеризация и клей затвердел.

Необходимо обратить внимание на рабочий диапазон температур адгезива. Так, клей, неспособный долго выдерживать высокую температуру, расплавится и плавно перейдет в жидкое состояние, тем самым образовав смещение сердечников относительно друг друга.

Также важную роль играет температурный коэффициент расширения α_{ct} (ТКР) адгезива. С увеличением температуры окружающей среды произойдет и увеличение толщины клеевого шва. Величина ТКР измеряется в единице 1/град и зависит от свойств компаунда.

Компаунд участвует не только в процессе склейки сердечников друг с другом. Он также применяется при заливке модулей электропитания. После полимеризации компаунд меняет свои габаритные размеры в объеме. Степень изменения объема компаунда после полимеризации характеризуется его усадкой. Поэтому при проектировании печатного узла трансформатор рекомендуется размещать в центральной части печатной платы, так как усадка компаунда устремлена к центру своего объема, а значит, смещение сердечников будет минимальным.

Разобравшись с причинами образования немагнитного зазора рассмотрим, как изменя-

ются магнитные величины системы от величины зазора между сердечниками.

Магнитный поток, пронизывающий обмотки трансформатора, проходит по всей площади поверхности магнитопровода. В случае возникновения зазора в магнитопроводе, прохождение магнитного потока затрудняется в связи с увеличением магнитного сопротивления R_{gap} . Расчет магнитного сопротивления зазора – есть дополненная формула магнитного сопротивления материала [2, стр. 35] (2).

$$R_{\text{gap}} = \frac{l_{\text{gap}}}{\mu_{\text{gap}} \cdot \mu_0 \cdot S}, \quad (2)$$

где l_{gap} – величина зазора, м;

μ_{gap} – относительная магнитная проницаемость материала зазора (компаунда);

μ_0 – магнитная проницаемость вакуума, $4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м;

S – площадь поперечного сечения сердечника, м^2 .

Другими словами, магнитное сопротивление зазора R_{gap} – сопротивление магнитного участка цепи с материалом, отличающимся от материала сердечника. В рассматриваемом случае в качестве материала – компаунд.

В случае появления зазора в магнитопроводе, полное магнитное R_f сопротивление определяется как сумма магнитных сопротивлений магнитопровода R_{core} и зазора R_{gap} (3).

$$R_f = \sum_{i=1}^n R_{\text{gap}} + R_{\text{core}}. \quad (3)$$

Таким образом, изменение величины магнитного сопротивления влечет к изменениям магнитного потока Φ [3, стр. 46] (4):

$$\Phi = \frac{F}{R_f}, \quad (4)$$

где F – магнитодвижущая сила (МДС), А.

С целью подтверждения влияния немагнитного зазора в трансформаторе на его магнитные параметры, проведен ряд моделирований в современных САПР, рассмотрены частые проблемы, возникающие в производственной среде.

Смещение сердечников в вертикальной плоскости

Рассмотрим несколько случаев, когда в конструкции планарного трансформатора имеются дефекты.

Начальные параметры системы: комплект сердечников ELP18/4/10 [4], материал обмоток – медь. Пространство моделирования – вакуум.

Первоначальные результаты моделирования представлены на рис. 1, 2.

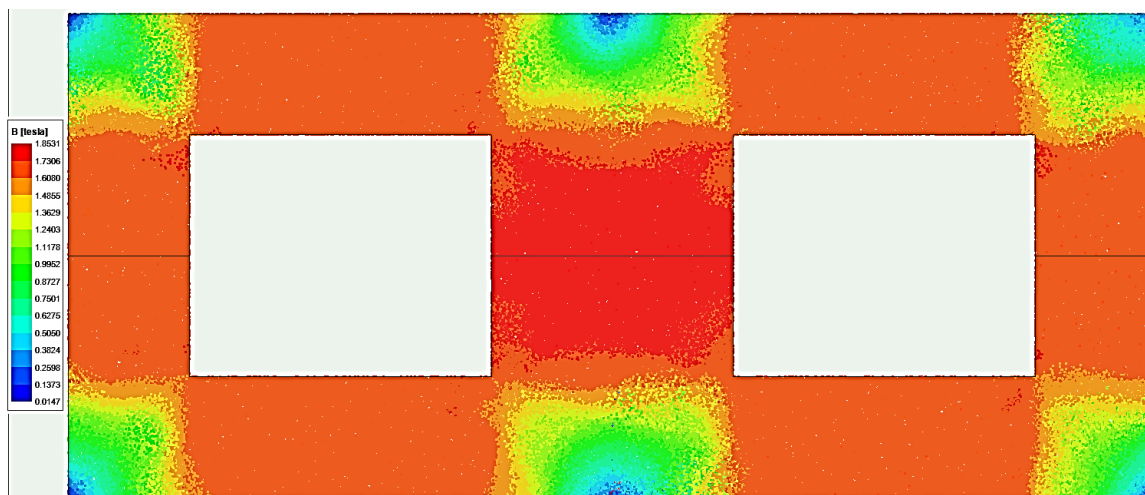


Рис. 1. Плотность вектора магнитной индукции в магнитопроводе трансформатора без зазора в ANSYS Maxwell 3D

Основная концентрация магнитного потока находится в центральной части сердечника [5]. Максимальная величина магнитной индукции составляет $B_{\max 1} = 1,8531$ Тл, минимальная $B_{\min 1} = 0,0147$ Тл. Исходя из рис. 1 можно также заметить, что во внешних углах

обеих частей сердечника магнитный поток минимален. В данном случае проиллюстрирована стандартная работа импульсного трансформатора в модуле электропитания.

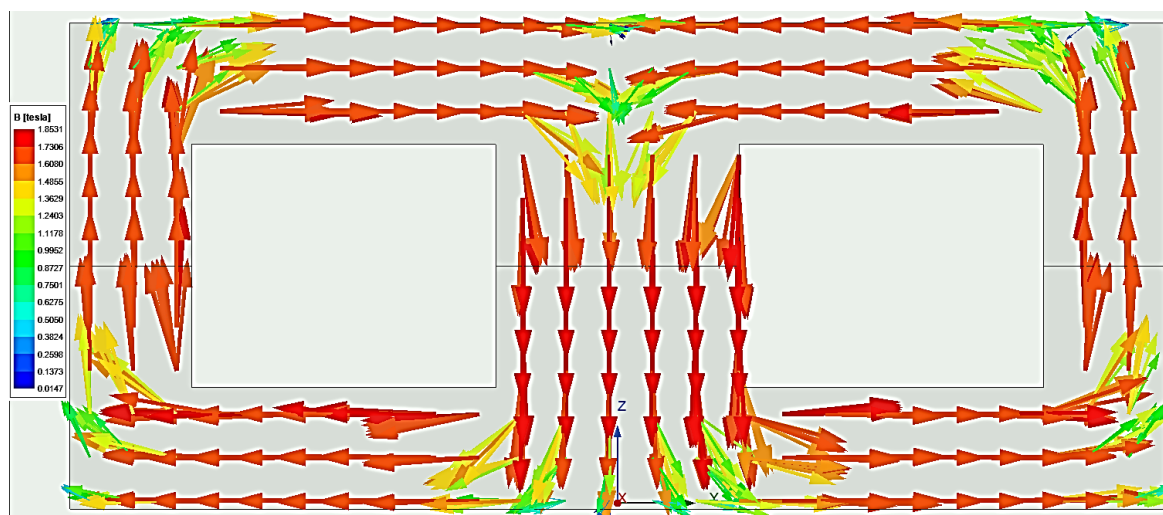


Рис. 2. Направление вектора магнитной индукции в магнитопроводе трансформатора без зазора

Чтобы убедиться в корректности данных, рассмотрим аналогичный эксперимент с такими же начальными условиями в программном комплексе FEMM (см. рис 3).

Плотность магнитного потока по магнитопроводу распределена так же, как и на рис. 1.

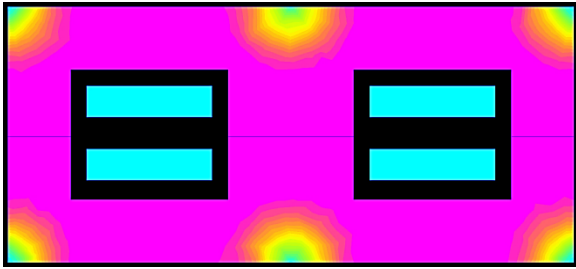


Рис. 3. Плотность вектора магнитной индукции в магнитопроводе трансформатора без зазора в FEMM

Области с наименьшей плотностью магнитного потока образованы в связи с тем, что магнитный поток, как и другие физические величины, идет по наикратчайшему пути [5]. Так, на рис. 4 представлена одна из частей сердечника с магнитным потоком в крайних точках.

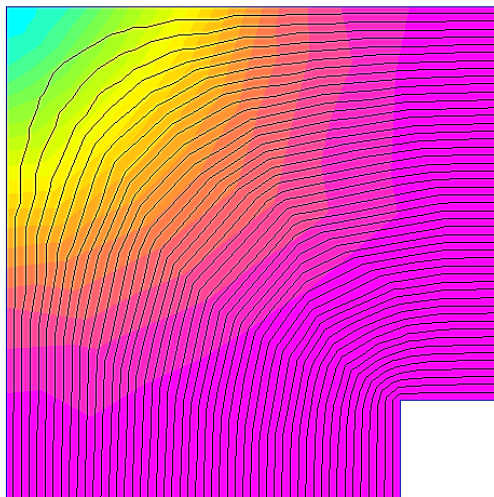


Рис. 4. Плотность магнитного потока в крайних точках сердечника

Чтобы провести в дальнейшем сравнительный анализ результатов, получим график вектора магнитной индукции от расстояния между двумя крайними точками в вертикальной плоскости (рис. 5).

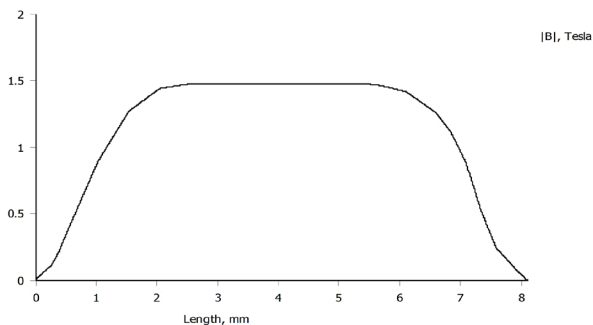


Рис. 5. График зависимости вектора магнитной индукции от расстояния между двумя крайними точками в вертикальной плоскости

Рассмотрим несколько частных случаев.

А) Смещение в вертикальной плоскости – смещение, при котором обе части сердечника расположены на определенном расстоянии друг от друга по центральному керну и боковым ярам. Немагнитный зазор 0,05 мм.

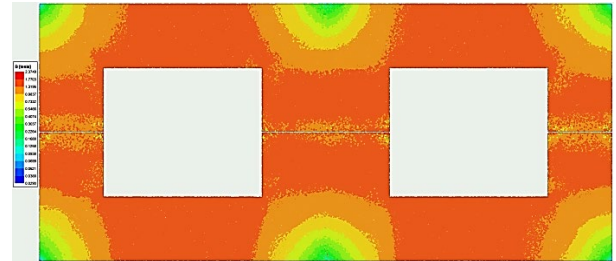


Рис. 6. Плотность вектора магнитной индукции в магнитопроводе трансформатора с зазором 0,05 мм в Ansys Maxwell 3D

Исходя из изображения на рис. 6 сразу заметны изменения в концентрации магнитной индукции. Максимальная величина магнитной индукции $B_{\max 1} = 1,7703$ Тл. Необходимо обратить на границу перехода (рис. 7).

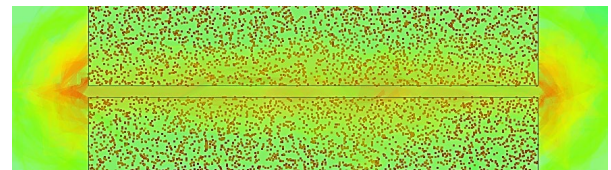


Рис. 7. Область перехода магнитного потока через две поверхности боковых ям сердечников

Главную роль на образование «выпуклостей» сыграло магнитное сопротивление, о котором говорилось в п. 1 статьи. Эти «пучки» - краевые потоки, полученные в связи с высокой величиной магнитного сопротивления. Подобно электрическому току, магнитный поток стремится замкнуться по наикратчайшему пути. В данной области происходит локальный нагрев и возникают вихревые токи или токи Фуко [3].

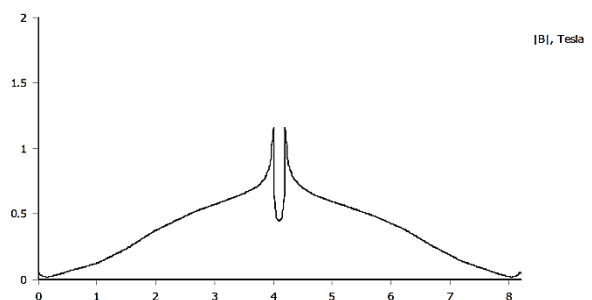


Рис. 8. График зависимости вектора магнитной индукции от расстояния между двумя крайними точками в вертикальной плоскости

Сравним графики зависимости магнитной индукции от расстояния между двумя крайними точками в вертикальной плоскости, в случае, когда немагнитный зазор отсутствует (рис. 5) и когда он есть (рис. 8). Можно наблюдать как изменяется картина при небольших величинах немагнитного зазора: происходит уменьшение максимальной величины магнитной индукции, а в месте зазора происходит ее резкий спад за счет сопротивления в зазоре. Таким образом, контур магнитной индукции становится разомкнутым, плотность магнитного потока снижается.

Появление немагнитного зазора размыкает магнитную цепь, а значит изменяется и коэффициент связи C_f первичной и вторичной обмотки. Снижение величины коэффициента связи C_f влечет за собой снижение КПД трансформатора [6].

ANSYS Maxwell 3D позволяет автоматически построить график зависимости коэффициента связи от расстояния между сердечниками с сохранением позиций первичной и вторичной обмоток друг с другом (рис. 9).

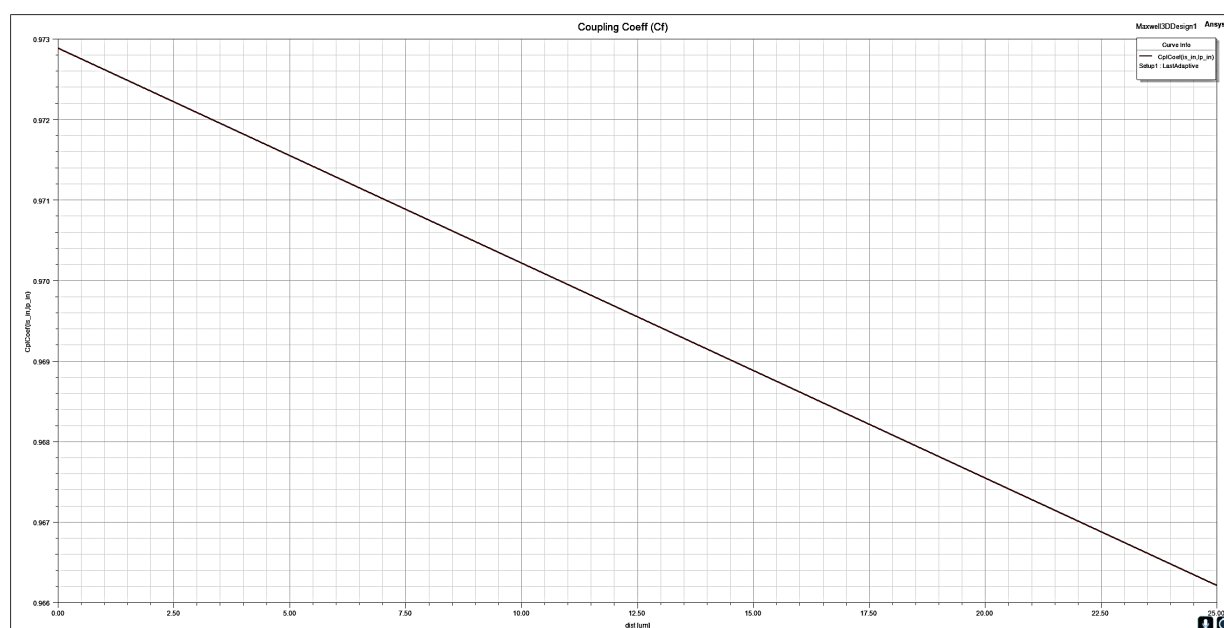


Рис. 9. График зависимости коэффициента связи от расстояния между сердечниками

Зависимость имеет линейный характер – величина C_f уменьшается с увеличением расстояния. Так, на графике при нулевом немагнитном зазоре $C_f = 0,973$, а на расстоянии 0,025 мм $C_f = 0,966$. На первый взгляд, график имеет линейный характер, однако при больших величинах расстояния график зависимости будет выглядеть иначе.

Как говорилось в пункте 2: при увеличении расстояния между сердечниками произойдет увеличение немагнитного зазора, увеличение сопротивления зазора, а значит уменьшение плотности магнитного поля.

Рассмотрим, как изменится величина магнитной индукции с появлением немагнитного зазора (рис. 10, 11). Между боковыми ярмами помещена область-пробник, на которой выводится плотность магнитного потока. На рис. 9 расстояние между боковыми ярмами составляет $l_g = 0,3$ мм. Максимальная

величина магнитной индукции $B_{\max} = 0,2285$ Тл.

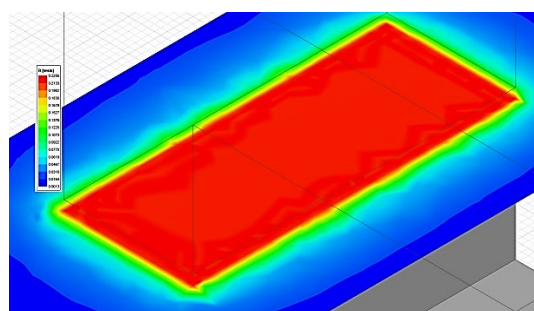


Рис. 10. Плотность магнитного потока между боковыми ярмами при $l_g = 0,3$ мм

Увеличим расстояние до $l_g = 0,5$ мм. Результат представлен на рис. 10. Максимальная величина магнитной индукции $B_{\max} = 0,1366$ Тл.

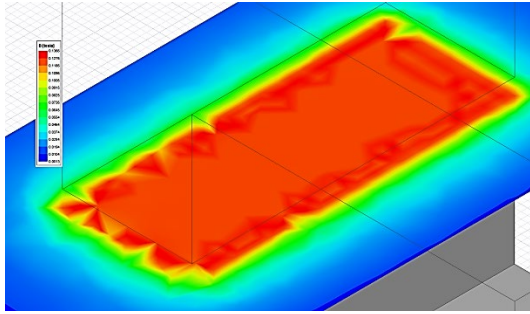


Рис. 11. Плотность магнитного потока между боковыми ярами при $l_g = 0,5$ мм

Можно заметить, увеличение длины зазора l_g приводит к уменьшению величины магнитной индукции B_{max} , а значит, уменьшается КПД трансформатора.

Выполнив ряд моделирований, можно сделать небольшой вывод: немагнитный зазор приводит к изменениям магнитных характеристик трансформатора, что сказывается на его суммарной эффективности в модуле электропитания. Таким образом, дефекты в конструкции трансформатора – одна из причин некорректных результатов при тестах и испытаниях модуля.

Смещение сердечников в горизонтальной плоскости

Как правило, симметрия сердечников относительно друг друга отображается в технических требованиях чертежа к сборочной единице. Иногда вместе с этим требованием представляется запись о допустимых отклонениях на несколько миллиметров. В данном пункте будет проанализирован случай, когда происходит сдвиг частей магнитопровода по горизонтальной оси, другими словами, когда нарушена симметрия в результате некорректной сборки трансформатора.

На рис. 12 можно наблюдать картину распространения магнитного потока по площади поверхности магнитопровода при смещении в горизонтальной плоскости. Наиболее «пустые» участки – края и углы сердечника: плотность магнитного потока в этих областях минимальна. Концентрация магнитной индукции максимальна в сопряженных между собой областях магнитопровода (рис. 13).

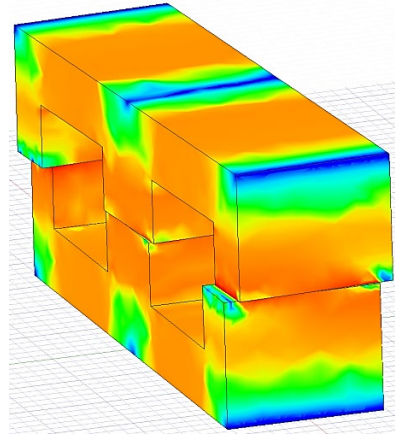


Рис. 12. Смещение частей сердечников относительно друг друга на величину 3 градуса по горизонтальной оси

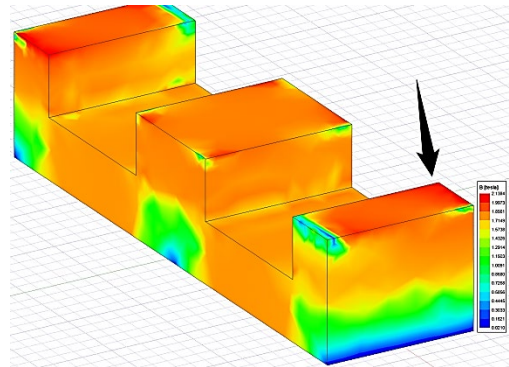


Рис. 13. Плотность магнитного потока в сердечнике при смещении в горизонтальной плоскости

При таком смещении изменения в величине магнитной индукции незначительные. Максимальное значение B_{max} варьируется в диапазоне 1,65...1,85 Тл. Коэффициент связи первичной и вторичной обмоток не изменяется, в связи с тем, что магнитная цепь имеет замкнутый контур. Однако, в связи с изменением площади сечения S_c трансформатора, изменяется коэффициент габаритной мощности трансформатора P_{Smax} [7]. Общая формула расчета габаритной мощности трансформатора (5):

$$P_{Smax} = 20k_\Phi \cdot f \cdot B \cdot S_c \cdot k_c \cdot S_0 \cdot k_0 \cdot i, \quad (5)$$

где k_Φ – коэффициент формы переменного напряжения, безразмерная величина;

f – частота, Гц;

B – максимальная магнитная индукция, Тл;

S_c – сечение сердечника, m^2 ;

k_c – коэффициент заполнения ферромагнетика, безразмерная величина;

S_0 – площадь окна трансформатора, m^2 ;

k_0 – коэффициент заполнения окна магнитопровода, безразмерная величина;

i – электрический ток, А.

Исходя из формулы (5) помимо изменяющейся площади сечения сердечника S_c (рис. 14), изменяется также коэффициент заполнения окна магнитопровода k_0 , так как трансформаторная вставка, содержащая проводящий рисунок обмоток трансформатора, неподвижна, относительно частей сердечников.

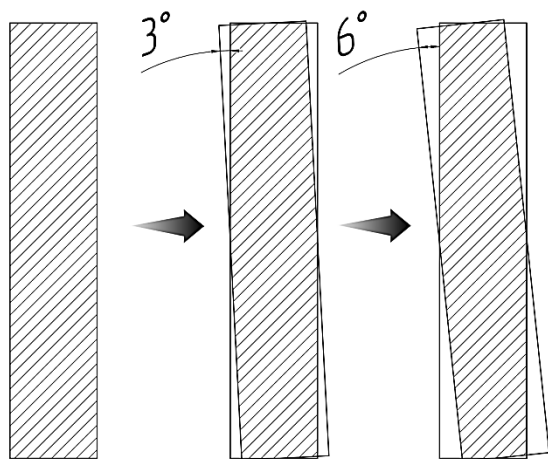


Рис. 14. Площадь сечения боковых ярм в случае смещения сердечников в горизонтальной плоскости

На рис. 14 отчетливо видны границы пересечений при увеличении угла сдвига. С увеличением величины сдвига уменьшается эффективная площадь соприкосновения сердечников друг с другом, теряется симметрия, магнитный поток меняет свою траекторию в связи с перемещением средней линии магнитопровода (рис. 15).

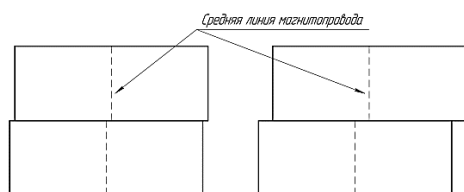


Рис. 15. Средняя линия магнитопровода

Таким образом, характеристики трансформатора, заложенные разработчиком на этапе расчетов и макетирования модуля электропитания, могут быть не выдержаны по причине некачественной сборки или неправильно подобранных материалов, например, заливочного компаунда. Также такая ситуация может приве-

сти к местному перегреву, а значит и неравномерному распределению температуры в модуле.

Заключение

Высокоэффективный источник питания есть результат примененных современных решений, позволяющих спрогнозировать и оценить любые негативные воздействия на готовое изделие. Так, в данной статье рассмотрены возможные дефекты в конструкции планарного трансформатора, которые нарушают работоспособность модуля электропитания. Дефекты оценены с помощью современных программных средств ANSYS и FEMM, а изменения магнитных или электрических параметров описаны известными формулами. Анализ возможных рисков в конструкции главного компонента – трансформатора на раннем этапе разработки позволяет разработчику оптимизировать расчеты. Правильно выполненная конструкторская документация к сборке трансформатора и грамотно подобранные материалы компаундов позволяют минимизировать такие дефекты.

Литература

1. Grishin A. D., Egorov D. U. Using a planar transformer in dc/dc-converters // Лучшая студенческая статья 2020 : сборник статей XXXII Международного научно-исследовательского конкурса, Пенза, 25 октября 2020 года. Пенза: «Наука и Просвещение» (ИП Гуляев Г. Ю.), 2020. С. 57-60.
2. Проектирование трансформаторов и дросселей. Справочник. 3-е издание, пересм. и доп. / Перевод с англ. Попов В. В. Москва: ДМК Пресс, 2016. 476 с.
3. Семенов Б. Ю. Силовая электроника: от простого к сложному. Москва: СОЛОН-Пресс, 2005. 416 с.
4. Ferrites and accessories / ELP 18/4/10 with I 18 /2/10/. TDK Electronics AG 2022. [Электронный ресурс] URL: https://www.tdk-electronics.tdk.com/inf/80/db/fer/elp_18_4_10.pdf (Дата обращения: 20.09.2023).
5. Qiang Li, Chair Dong Dong Steve Southward. Design Optimizations of LLC Resonant Converters with Planar Matrix Transformers. Blacksburg, Virginia. 2021, Pranav Raj Prakash. [Электронный ресурс] URL: https://www.researchgate.net/publication/364956842_Optimal_Design_of_a_Matrix_Planar_Transformer_in_an_LLC_Resonant_Converter_for_Data_Center_Applications. (Дата обращения: 18.09.2023).
6. Савин М., Абрамов С. Расчет и конструирование планарного трансформатора для обратноходового преобразователя // Электроника: Наука, технология, бизнес. 2019. № 8(189). 40-44 с.
7. Найфельт Г. С., Мазель К. Б., Хусаинов Ч. И. / Источники электропитания радиоэлектронной аппаратуры. Справочник. Москва: «Радио и связь», 1986. 576 с.

Информация об авторах

Башкиров Алексей Викторович – д-р техн. наук, проректор по науке и инновациям, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: fabi7@mail.ru

Бобылкин Игорь Сергеевич – канд. техн. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: bobylnin@bk.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7489-2249>

Кузёмкин Андрей Александрович – магистрант, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: andreyhillsa@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2013-8862>

ANALYSIS OF THE FORMATION OF DEFECTS IN THE DESIGN OF A PLANAR TRANSFORMER IN A POWER SUPPLY MODULE

A.V. Bashkirov, I.S. Bobylkin, A.A. Kuzyomkin

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract: the use of planar products in modern power supply modules is a trend of world leaders in the field of power electronics. The reasons for the transition from traditional winding products are in the structural and technological decisions taken during the development and design of planar devices. For example, a properly executed transformer determines the efficiency and high efficiency of any switching power supply. A transformer in a planar design, at first glance, eliminates the occurrence of problems during the assembly operation, due to the simplicity of the design. However, problems may arise at other stages of production: module testing, testing at different temperature modes and other operations where the electrical parameters of the product are determined. In this article, the causes of the problems of mismatch of electrical characteristics are identified, the analysis of the probability of undesirable losses with unfavorable results of module assembly is carried out. By modeling complex objects like a transformer, it is possible to determine potential risks during the operation of the product, as well as to predict the behavior of the entire functional part of the power supply module. Therefore, in order to confirm the changing characteristics of the planar transformer, simulations were carried out in the modern ANSYS automated design system (CAD) and FEMM software environment. The article also reveals patterns of changes in the magnetic characteristics of the transformer depending on the location of the cores relative to each other

Key words: planar transformer, power supply module, pulse mode, magnetic circuit, magnetic induction, magnetic flux, coupling coefficient

References

1. Grishin A.D., Egorov D.U. "Using a planar trans-former in dc/dc-converters», The best student article 2020 (*Luchshaya studentcheskaya statya 2020*), coll. of the XXXII International Research Competition, Penza, October 25, 2020, Penza, Nauka i Prosveshcheniye, 2020, pp. 57-60.
2. "Design of transformers and chokes, reference book" ("Proyektirovaniye transformatorov i drossley. Spravochnik", trans. from Eng. by Popov V.V., Moscow: DMK Press, 2016, 476 p.
3. Semenov B.Yu. "Power electronics: from simple to complex" ("Silovaya elektronika: ot prostogo k slozhnomu"), Moscow, SOLON-Press, 2005, 416 p.
4. "Ferrites and accessories", ELP 18/4/10 with I 18 /2/10/, TDK Electronics AG 2022, available at: https://www.tdk-electronics.tdk.com/inf/80/db/fer/elp_18_4_10.pdf (accessed 09.20.2023).
5. Qiang Li, Chair Dong, Steve Southward "Design Optimizations of LLC Resonant Converters with Planar Matrix Transformers", Blacksburg, Virginia, 2021, Pranav Raj Prakash, available at: https://www.researchgate.net/publication/364956842_Optimal_Design_of_a_Matrix_Planar_Transformer_in_an_LLC_Resonant_Converter_for_Data_Center_Applications (accessed 18.09.2023).
6. Savin M., Abramov S. "Calculation and design of a planar transformer for a reverse-flow converter", *Electronics: Science, Technology, Business (Elektronika: Nauka, tekhnologiya, biznes)*, 2019, no. 8 (189), pp. 40-44.
7. Naivelt G.S., Mazel K.B., Khusainov Ch.I. "Sources of power supply of electronic equipment, reference book" ("Istochniki elektropitaniya radioelektronnoy apparatury. Spravochnik"), Moscow, Radio I svyaz, 1986, 576 p.

Submitted 16.10.2023; revised 14.12.2023

Information about the authors

Alexey V. Bashkirov – Dr. Sc. (Technical), Vice-Rector for Science and Innovation, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: fabi7@mail.ru

Igor S. Bobylkin – Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: bobylnin@bk.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7489-2249>

Andrey A. Kuzyomkin – Master's Student, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: andreyhillsa@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2013-8862>

К ВОПРОСУ О МАКЕТИРОВАНИИ МИКРОПОЛОСКОВЫХ ПОЛОСОВЫХ ФИЛЬТРОВ В ЛАБОРАТОРНЫХ УСЛОВИЯХ

А.Е. Рудь^{1,2}, Л.Э. Черноиванов^{1,2}, И.А. Арзамасцев², А.В. Гречишкин²

¹Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

²АО «Концерн «Созвездие», г. Воронеж, Россия

Аннотация: при проектировании устройств диапазонов ультравысоких (УВЧ) и сверхвысоких частот (СВЧ) зачастую необходимо иметь возможность оперативно уточнять результаты расчетов. Такую возможность может предоставить макетирование в лабораторных условиях. Важным вопросом при этом является степень соответствия расчетных параметров параметрам полученного макета, что определяет применимость того или иного способа лабораторного макетирования. В рамках данной работы дается качественная оценка применимости одного из способов макетирования. Рассматриваемый способ заключается в том, что топология микрополоскового фильтра наносится на фольгированный диэлектрический материал по технологии фотолитографии в лабораторных условиях с сопутствующими погрешностями, а удаление лишней меди с заготовки производится с помощью химического травления. Для качественной оценки применимости указанного способа в рамках данной работы с его применением в лабораторных условиях был изготовлен макет микрополоскового полосового фильтра 5-го порядка топологии *Hairpin*. Были проведены измерения параметров изготовленного макета: геометрические размеры и амплитудно-частотная характеристика фильтра (АЧХ). Приведены рисунки, демонстрирующие расчетный фильтр, макет и увеличенные под микроскопом микрополосковые резонаторы. На основе сравнения расчетных геометрических параметров и расчетной АЧХ с соответствующими параметрами полученного микрополоскового полосового фильтра сделана качественная оценка применимости данного способа макетирования

Ключевые слова: микрополосковый фильтр, полосовой фильтр, макетирование

Введение

В радиоприемных устройствах для частотной селекции высокочастотных входных сигналов требуются полосовые (полосно-пропускающие) фильтры [1]. В УВЧ и СВЧ диапазоне в виду своей высокой повторяемости и низкой стоимости широкое распространение получили микрополосковые фильтры [2]. В процессе проектирования микрополосковых фильтров [3] для уточнения результатов расчета зачастую требуется несколько этапов макетирования. Изготовление макетов на специализированных предприятиях требует относительно высоких затрат времени и средств. Для сокращения сроков проектирования предпочтительно использование более оперативных способов макетирования в лабораторных условиях. Одним из таких способов является нанесение топологии проектируемого микрополоскового фильтра на фольгированную диэлектрическую основу с помощью фотолитографии с последующим химическим травлением. Одним из недостатков применения данного способа в лабораторных условиях является отклонения итоговых геометрических размеров топологии филь-

тра вследствие подтравливания [4]. Данный недостаток может отражаться на параметрах макетируемого фильтра и не гарантирует точных результатов при макетировании в лабораторных условиях устройств УВЧ и СВЧ диапазона.

Целью данной статьи является качественная оценка применимости рассматриваемого способа макетирования при проектировании микрополосковых фильтров. Для этого необходимо:

- рассчитать параметры микрополоскового полосового фильтра 5-го порядка топологии *Hairpin* с полосой пропускания 1600-2000 МГц;
- изготовить в лабораторных условиях макет по технологии фотолитографии с последующим химическим травлением;
- провести измерения параметров изготовленного макета;
- сравнить расчетные параметры с параметрами изготовленного макета и сделать вывод о возможности применения указанного способа.

Расчет параметров фильтра

На рис. 1 приведена *Hairpin* топология микрополоскового полосового фильтра, которая характеризуется относительно небольшими

размерами, коэффициентом прямоугольности $K_n < 2.5$ по уровню минус 35 дБ и малыми потерями в полосе пропускания (менее 2 дБ). Выбор *Hairpin* топологии осуществлялся в соответствии с достоинствами и недостатками, изложенными в [5-6].

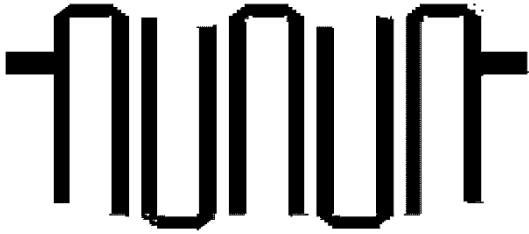


Рис. 1

Первым этапом при проектировании фильтра является выбор аппроксимации исходя из заданных технических требований. В данной работе применялась аппроксимация Чебышева (1)-(2):

$$L_A(\omega') = 10 \lg \left\{ 1 + \varepsilon \cos^2 \left[n \arccos \left(\frac{\omega'}{\omega_c} \right) \right] \right\}, \omega' \leq \omega_c; \quad (1)$$

$$L_A(\omega') = 10 \lg \left\{ 1 + \varepsilon \operatorname{ch}^2 \left[\operatorname{arch} \left(\frac{\omega'}{\omega_c} \right) \right] \right\}, \omega' \geq \omega_c; \quad (2)$$

$$\varepsilon = 10^{\frac{L_{Ar}}{10}} - 1; \quad (3)$$

где ω_c – частота среза рад/с;

ω' – частота ослабления рад/с;

n – порядок фильтра;

L_{Ar} – колебания в полосе пропускания.

Следующим этапом проводится расчет параметров прототипа микрополоскового фильтра в зависимости от типа аппроксимации. Для аппроксимации Чебышева параметры могут быть получены с помощью выражений (4)-(9):

$$\beta = \ln \left[\operatorname{cth} \left(\frac{L_{Ar}}{17.37} \right) \right]; \quad (4)$$

$$\gamma = \operatorname{sh} \left(\frac{\beta}{2n} \right); \quad (5)$$

$$a_k = \sin \left[\frac{(2k-1)\pi}{2n} \right], k = 1, 2, 3 \dots n; \quad (6)$$

$$b_k = \gamma^2 + \sin^2 \left(\frac{k\pi}{n} \right), k = 1, 2, 3 \dots n; \quad (7)$$

$$g_1 = \frac{2a_1}{\gamma}; \quad (8)$$

$$g_k = \frac{4a_{k-1}a_k}{b_{k-1}g_{k-1}}, k = 2, 3 \dots n. \quad (9)$$

После чего производится масштабирование импеданса и частоты в соответствии с техническими требованиями.

Более подробно математические соотношения и методика расчета фильтра представлены в [7].

На рис. 2 приведены полученные в результате расчета основные геометрические размеры микрополоскового полосового фильтра 5-го порядка.

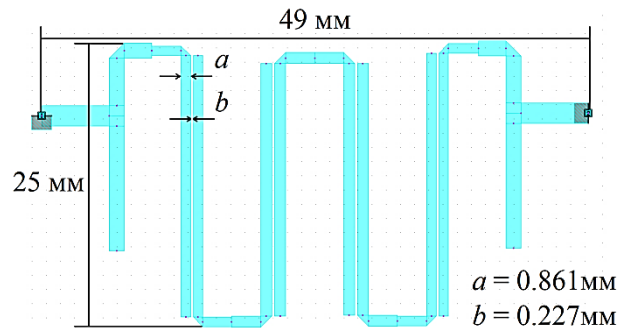


Рис. 2

Изготовление макета

При изготовлении макета в качестве базового материала печатной платы был использован фольгированный диэлектрический материал RO4003 фирмы Rogers [8] с толщиной диэлектрика 0.813 мм и толщиной проводящего слоя 35 мкм. На рис. 3 приведено изображение макета, изготовленного с применением технологии фотолитографии с последующим химическим травлением. На рис. 4 приведено увеличенное под микроскопом изображение части микрополоскового резонатора полученного макета.

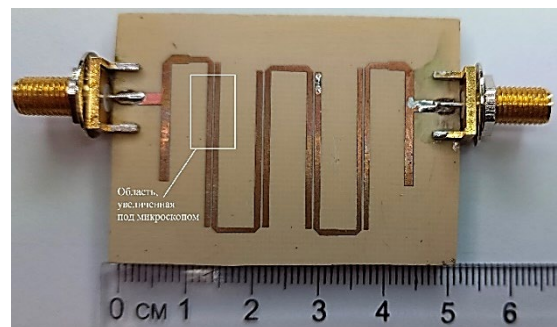


Рис. 3

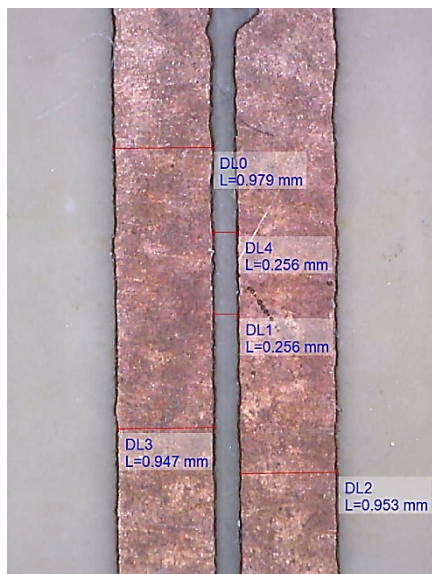


Рис. 4

Измерение параметров изготовленного макета

На рис. 5 приведены расчетная АЧХ фильтра и измеренная АЧХ изготовленного макета, а также контрольные точки (КТ).

Сравнение расчетных параметров с измеренными параметрами макета

В табл. 1 приведено сравнение некоторых расчетных геометрических параметров с реальными. В табл. 2 приведено сравнение расчетной АЧХ с измеренной АЧХ макета микрополоскового полосового фильтра 5-го порядка.

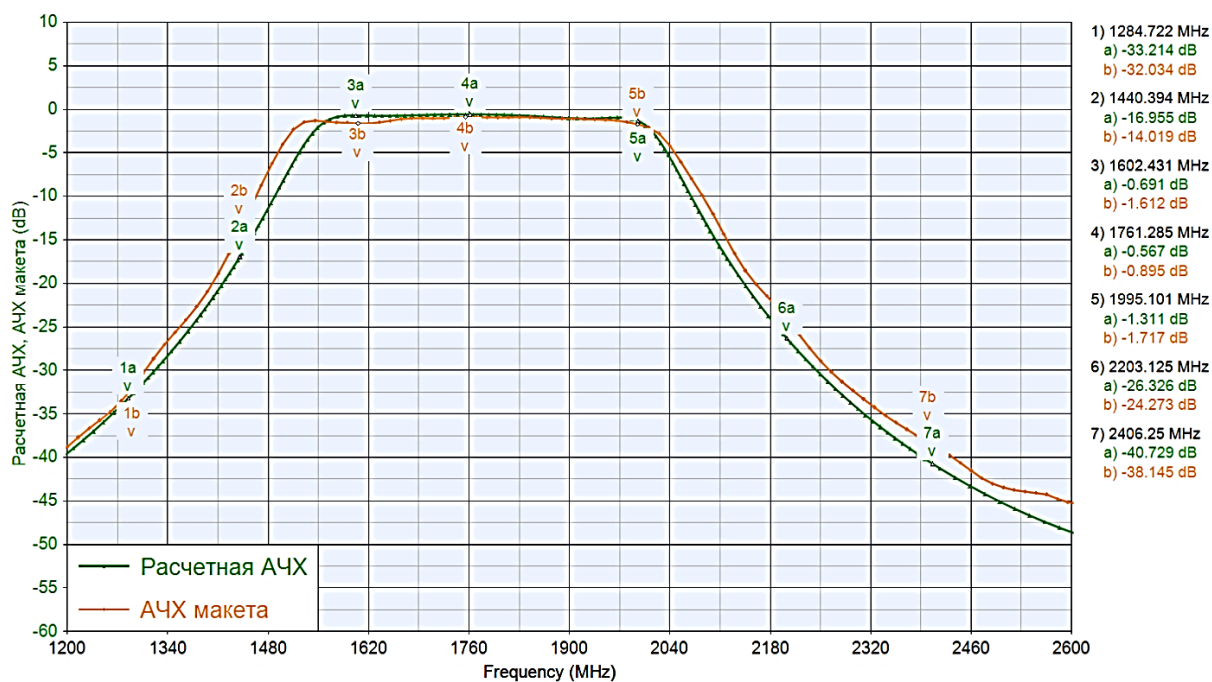


Рис. 5

Таблица 1

Параметр	Расчет	Макет	Абсолютное отклонение	Относительное отклонение
Ширина резонатора:				
DL0	0.861 мм	0.979 мм	0.118 мм	13.7%
DL2	0.861 мм	0.953 мм	0.092 мм	10.7%
DL3	0.861 мм	0.947 мм	0.086 мм	9.9%
Расстояние между резонаторами:				
DL1	0.227 мм	0.256 мм	0.029 мм	11.3%
DL4	0.227 мм	0.256 мм	0.029 мм	11.3%

Таблица 2

Параметр	Расчет	Макет
Полоса пропускания фильтра по уровню -1.5 дБ, МГц	444	465
Потери в полосе пропускания, дБ	1.5	1.7
Неравномерность в полосе пропускания	0.5	0.8
Подавление на 10% отстройки от нижней/верхней полосы пропускания, дБ	-20/-26	-21/-33
Подавление на 20% отстройки от нижней/верхней полосы пропускания, дБ	-32/-40	-23/-38

Расчетные параметры и параметры макета микрополоскового полосового фильтра имеют незначительные различия (табл. 1 и 2). Как видно по рис. 4 вследствие подтравливания расстояние между микрополосковыми резонаторами увеличилось относительно расчетного (рис. 4) что вызвало изменение параметров фильтра (рис. 5). Также необходимо обратить внимание на то, что ширина микрополосковых резонаторов получилась неравномерной и больше расчетной. Такое отклонение невозможно связать с подтравливанием. Возможно, оно вызвано неизбежными погрешностями процесса фотолитографии в лабораторных условиях. Подобные дефекты следует учитывать при подготовке к макетированию и в последующих расчетах.

Заключение

По приведенным результатам можно сделать вывод о применимости данного способа макетирования для проверки расчетных соотношений на начальных этапах проектирования, т.к. несмотря на подтравливание он с достаточной для инженерной практики точностью обеспечивает сходимость параметров. Для повышения точности на последующих этапах проектирования рекомендуется заказывать макеты на специализированных предприятиях. В качестве

направления для дальнейших исследований можно предложить сравнение точности различных способов макетирования в лабораторных условиях.

Литература

1. Сиверс А. П. Радиолокационные приемники. 3-е изд. М.: Советское радио, 1959. 536 с.
2. Peter Matthews. An In-Depth Look at Bandwidth [Электронный ресурс] // knowlescapacitors.com: [сайт]. URL: <https://blog.knowlescapacitors.com/blog/filter-basics-8-an-in-depth-look-at-bandwidth> [Дата обращения: 17 августа 2022].
3. Zverev Anatol I. Handbook of Filter Synthesis. New York: John Wiley & Sons, 1967. 576 p.
4. Смертина Т. Высокоточное травление. От теории к практике // Технологии в электронной промышленности. 2008. № 3 С. 12-19.
5. Таланов А. Микрополосковые фильтры // Электронные компоненты. 2019. № 5. С. 15-17.
6. Шевляков М., Кондратенко А. Полосно-пропускающие СВЧ-фильтры // Компоненты и технологии. 2008. № 11. С. 16-18.
7. Маттей Д. Л., Янг Л., Джонс Е. М. Т. Фильтры СВЧ, согласующие цепи и цепи связи, т. I. Пер. с англ. Под ред. Л. В. Алексеева и Ф. В. Кушнера. М.: Издательство «Связь», 1971. 440 с.
8. Reference manual. RO4000 Laminates RO4003C and RO4350B – Data Sheet [Электронный ресурс] // rogerscorp.com: [сайт]. URL: <https://www.rogerscorp.com/-/media/project/rogerscorp/documents/advanced-electronics-solutions/english/data-sheets/ro4000-laminates-ro4003c-and-ro4350b---data-sheet.pdf> [Дата обращения: 17 августа 2022].

Поступила 06.10.2023; принята к публикации 15.12.2023

Информация об авторах

Рудь Анастасия Евгеньевна – аспирант, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84); старший конструктор, АО «Концерн «Созвездие» (394018, Россия, г. Воронеж, ул. Плехановская, 14), e-mail: anastas.rud2012@yandex.ru

Черноиванов Леонид Эдуардович – магистрант, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84); конструктор, АО «Концерн «Созвездие» (394018, Россия, г. Воронеж, ул. Плехановская, 14), e-mail: leonidfya@vk.com

Арзамасцев Илья Алексеевич – старший конструктор, АО «Концерн «Созвездие» (394018, Россия, г. Воронеж, ул. Плехановская, 14), e-mail: ilya.arz.al.@ya.ru

Гречишкин Александр Владимирович – канд. техн. наук, начальник сектора, АО «Концерн «Созвездие» (394018, Россия, г. Воронеж, ул. Плехановская, 14), e-mail: grechishkin.av@mail.ru

MICROSTRIP BANDPASS FILTERS PROTOTYPING IN THE LABORATORY CONDITIONS

A.E. Rud^{1,2}, L.E. Chernoiyanov^{1,2}, I.A. Arzamascev², A.V. Grechishkin²

¹Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

²JSC “Concern “Sozvezdie”, Voronezh, Russia

Abstract: when designing UHF and microwave band devices, it is often necessary to be able to quickly refine the results of calculations. Such an opportunity can be provided by mock-up in laboratory conditions. An important issue in this case is the degree of compliance of the calculated parameters with the parameters of the resulting layout, which determines the applicability of a particular method of laboratory layout. Within the framework of this work, a qualitative assessment of the applicability of one of the layout methods is given. The method under consideration consists in the fact that the topology of the microstrip filter is applied to a foil dielectric material using photolithography technology in laboratory conditions with concomitant errors, and the removal of excess copper from the workpiece is carried out by chemical etching. For a qualitative assessment of the applicability of this method, within the framework of this work with its application in laboratory conditions, a mock-up of a microstrip bandpass filter of the 5th order of the Hairpin topology was made. Measurements of the parameters of the manufactured layout were carried out: geometric dimensions and frequency response of the filter. The figures showing the calculated filter, the layout and microstrip resonators magnified under a microscope are given. Based on the comparison of the calculated geometric parameters and the calculated frequency response with the corresponding parameters of the resulting microstrip bandpass filter, a qualitative assessment of the applicability of this layout method is made

Key words: microstrip filter, bandpass filter, prototyping

References

1. Sievers A.P. “Radar receivers” (“Radiolokatsionnyye priyemniki”), Moscow: Sovetskoe radio, 1959, 536 p.
2. Matthews Peter “An In-Depth Look at Bandwidth”, knowlescapacitors.com, available at: <https://blog.knowlescapacitors.com/blog/filter-basics-8-an-in-depth-look-at-bandwidth> (accessed 17.08.2023).
3. Zverev Anatol I. “Handbook of Filter Synthesis”, New York, John Wiley & Sons, 1967, 576 p.
4. Smerina T. “High precision etching. From theory to practice”, *Technologies in the electronics industry (Tekhnologii v elektronnoy promyshlennosti)*, 2008, no. 3, pp. 12-19.
5. Talanov A. “Microstrip filters”, *Electronic components (Elektronnyye komponenty)*, 2019, no. 5, pp. 15-17.
6. Shevlyakov M., Kondratenko A. “Band-pass microwave filters”, *Components and technologies (Komponenty i tekhnologii)*, 2008, no. 11, pp. 16-18.
7. Matthaei George L., Young Leo, Jones E.M.T. “Microwave filters, impedance-matching networks, and coupling structures” (“Filtry SVCH, soglasuyushchiye tsepi i tsepi svyazi”), trans. from Eng., vol. 1, Moscow, Sviaz, 1971, 440 p.
8. “Reference manual. RO4000 Laminates RO4003C and RO4350B – Data Sheet”, rogerscorp.com, available at: <https://www.rogerscorp.com/-/media/project/rogerscorp/documents/advanced-electronics-solutions/english/data-sheets/ro4000-laminates-ro4003c-and-ro4350b---data-sheet.pdf> (accessed 17.08.2023).

Submitted 06.10.2023; revised 15.12.2023

Information about the authors

Anastasia E. Rud – Postgraduate, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), Senior Constructor, JSC “Concern “Sozvezdie” (14 Plekhanovskaya str., Voronezh 394018, Russia), e-mail: anastas.rud2012@yandex.ru

Leonid E. Chernoiyanov – Masters Student, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), Constructor, JSC “Concern “Sozvezdie” (14 Plekhanovskaya str., Voronezh 394018, Russia), e-mail: leonidfya@vk.com

Ilya A. Arzamascev – Senior Constructor, JSC “Concern “Sozvezdie” (14 Plekhanovskaya str., Voronezh 394018, Russia), e-mail: ilya.arz.al.@ya.ru

Aleksandr V. Grechishkin – Cand. Sc. (Technical), Head of Sector, JSC “Concern “Sozvezdie” (14 Plekhanovskaya str., Voronezh 394018, Russia), e-mail: grechishkin.av@mail.ru

ДВУХДИАПАЗОННАЯ АНТЕННА-ПЛАВНИК ДЛЯ БПЛА САМОЛЕТНОГО ТИПА

И.С. Бобылкин¹, Е.А. Ищенко¹, С.М. Фёдоров^{1,2}, М.В. Паринов¹, В.И. Николаев³¹Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия²Международный институт компьютерных технологий, г. Воронеж, Россия³АО «Концерн «Созвездие», г. Воронеж, Россия

Аннотация: рассматривается конструкция двухдиапазонной антенны-плавник для реализации системы связи с беспилотными летательными аппаратами (БПЛА) самолетного типа. Предлагаемая антенна имеет форму плавника с двумя «крыльями», которые выступают в роли излучателей. Благодаря использованию двух излучателей разной формы удалось реализовать систему связи двух диапазонов 840-876 МГц и 1280-1378 МГц. Благодаря тому, что антенна построена на основе планарной технологии, удалось значительно упростить конструкцию, минимизировать профиль, как аэродинамический, так и геометрический, а также сохранить высокую эффективность антенны. Полученная антенна имеет широкий главный лепесток диаграммы направленности, при этом обладает высоким уровнем коэффициента направленного действия, так как корпус БПЛА используется в роли рефлектора антенны. Полученная антенна обладает коэффициентом направленного действия (КНД) в 7.67 дБ в нижнем диапазоне рабочих частот и 5.99 на верхних частотах рабочего диапазона. Все основные характеристики антенны были получены на основании моделирования, а также был исследован аэродинамический профиль антенны. Полученные результаты подтверждают высокую эффективность предлагаемой конструкции, а также перспективность применения антенн-плавников на БПЛА самолетного типа

Ключевые слова: антенна-плавник, антенна для БПЛА, двухдиапазонная антенна, системы связи с БПЛА

Благодарности: работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания (проект № FZGM-2023-0011)

Введение

Антенны устанавливаются на множестве типов летательных аппаратов. Все антенные системы авиационного базирования должны обладать множеством свойств и конструктивных особенностей – обладать малым аэродинамическим профилем или быть помещенными в аэродинамические обтекатели, а также иметь малые размеры и вес. Наиболее распространенными конструкциями таких антенн являются излучатели, которые изготавливаются по планарной технологии или выполняются в виде плавников. Антенны-плавники часто можно увидеть на корпусах авиалайнеров, беспилотных летательных аппаратов самолетного типа, автомобилях, так как благодаря малому аэродинамическому профилю удается сохранить аэродинамическую эффективность, а также реализовать систему передачи данных.

Типовые антенны-плавники выполняются на основе металлических проводящих пластин, которые устанавливаются на носитель в областях наименее подверженных аэродинамическим искажениям. В работе [1] авторы предлагают конструкцию антенны-плавника, которая полностью изготавливается из металлического излучателя,

который помещается на БПЛА вблизи композитного крыла. Полученная антенна обеспечивает связь в верхней области над БПЛА. Недостатком же предложенной конструкции является то, что при моделировании использовался идеальный проводник, который не может быть получен в реальной жизни, а также высокие потери в антенне, так возвратные потери приведенной антенны не превышали 5 дБ.

Другой пример антенны-плавника приводится в работе [2]. Авторы рассматривают антенну-плавник, которая разработана для работы на частоте 920 МГц. Полученная антенна предназначена для установки на самолет с целью реализации канала связи и передачи данных. Недостатком же используемой конструкции является реализация цельнометаллического плавника с вырезами, что затруднено в производстве (нет возможности реализации любой формы, а также затруднено масштабирование из-за зависимости металлообработки), также для работы антенны требуется дополнительный отражательный элемент, который помещается перед плавником, что значительно усложняет процедуру крепления антенны к носителю, который, как правило, перемещается с высокими скоростями.

Особенностью всех антенн-плавников является то, что они работают в узкой полосе, что приводит к необходимости размещения большого числа излучателей на корпусе-носителе. В

работе [3] авторы предлагают решение данной проблемы путем реализации двухдиапазонной антенны-плавника на основе коммутаций рп-диодами дополнительной плоскости излучения. Недостатком такой конструкции является то, что для реализации коммутатора потребуется дополнительная реализация преобразователей напряжения, а также то, что схема управления будет расходовать электрический заряд батарей, что приведет к увеличению расхода топлива и снижению дальности работы носителя.

В работах [4, 5] авторы предлагают реализацию металлических излучателей, которые размещаются на БПЛА для обеспечения всенаправленной связи, однако все приведенные конструкции антенн обладают большими размерами, что негативно сказывается на аэродинамической эффективности носителя, при этом для работы антенны [4] требуется реализация активной цепи согласования, что также увеличивает нагрузку на бортовую сеть.

В работе [6] авторы рассматривают конструкцию многоручевой антенны, которая изготавливается по планарной технологии. Полученная антенна обладает малыми размерами, массой, проста в изготовлении, однако из-за того, что форма антенны представляет из себя восьмиугольник, перед набегающим потоком воздуха возникает перпендикулярная плоскость, которая приведет к значительным потерям без установки обтекателя. Полученная антенна без обтекателя может быть расположена только на квадрокоптерах, так как они обладают малой скоростью максимального полета, а также не требуют высокой аэродинамической эффективности.

В данной работе рассматривается конструкция двухдиапазонной антенны-плавника, которая выполнена на основе планарной технологии и может быть установлена как на квадрокоптерах, так и на крупных БПЛА самолетного типа. Для определения характеристик антенны производилось электродинамическое и аэродинамическое моделирование, что позволяет сформировать двухдиапазонную антенну-плавник, обладающую как высокой эффективностью с точки зрения излучения волн, так и снизить аэродинамическое влияние на протекающие потоки воздуха, что является важной и актуальной задачей в реализации систем связи на БПЛА.

Конструкция антенны и ее характеристики

Предлагаемая конструкция антенны-плавника состоит из линии передачи и двух антенн Y-wing, которые настроены на работу в двух диапазонах. Все элементы конструкции антен-

ны выполняются на основе печатной технологии на диэлектрике F4-4 толщиной 1.5 мм, $\epsilon_r = 4.3$. На рис. 1 приводится вид двухдиапазонной антенны, предназначенной для БПЛА самолетного типа.

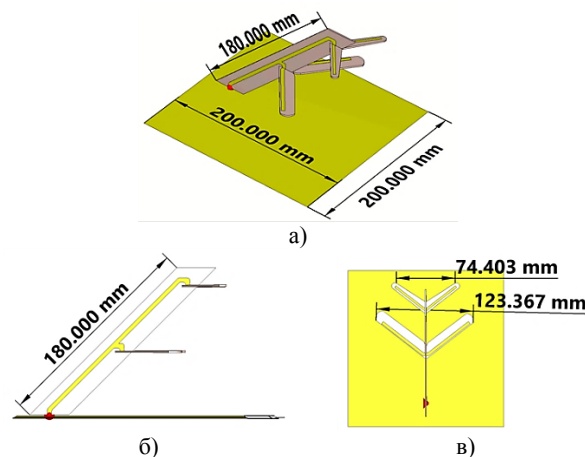


Рис. 1. Конструкция антенны-плавник на основе печатной технологии

Механизм излучения предлагаемой конструкции антенны построен на следующем принципе:

1) наклонная штанга-держатель используется для передачи электромагнитных волн к антенным элементам Y-wing, разработанным для работы на определенной частоте;

2) в случае соответствия частоты излучения с диапазоном рабочих частот происходит излучение волн соответствующим антенным элементом – нижний для более низких частот, верхний – высокочастотный;

3) излученные электромагнитные волны отражаются от корпуса-носителя и излучаются, что формирует диаграмму направленности (в данном случае в роли корпуса выступает проводящая пластина).

Благодаря такой конструкции появляется возможность формирования двухдиапазонной антенны. На рис. 2 приводится график S_{11} параметров для разработанной антенны-плавник.

Как показывают полученные результаты, разработанная антенна эффективно работает в двух диапазонах частот: 840-876 МГц и 1280-1378 МГц. Полученные диапазоны рабочих частот соответствуют характеристикам антенн Y-wing, которые установлены на линии передачи, которая выступает для передачи волн к излучателям. Также особенностью предлагаемой конструкции антенны является то, что коэффициент полезного действия (КПД) во всем диапазоне рабочих частот превышает 70 %, а если учесть участок от 1168 до 1280 МГц, где S_{11} -

параметры незначительно увеличиваются, то КПД более 60 %.

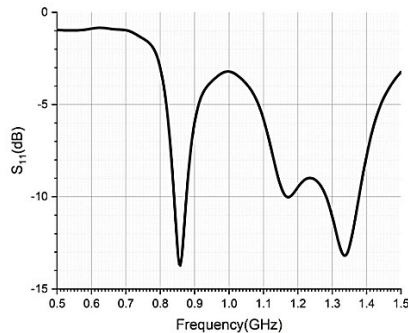


Рис. 2. График S_{11} -параметров полученной антенны

Рассмотрим диаграммы направленности антенны в обоих диапазонах рабочих частот – на частотах 850 и 1300 МГц – рис. 3.

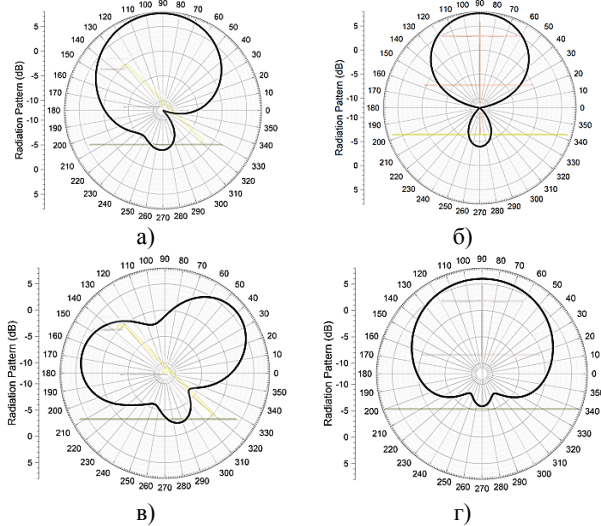


Рис. 3. Диаграммы направленности антенны-плавник для БПЛА самолетного типа: а), б) частота 850 МГц; в), г) частота 1300 МГц

Полученные диаграммы направленности показывают, что антенна имеет широкий лепесток, что позволяет использовать полученную антенну для всенаправленного приема и передачи данных. В табл. 1 приводятся характеристики диаграмм направленности полученной антенны.

Таблица 1

Характеристики диаграмм направленности антенны

Частота, МГц	850	1300
КНД	7.67	5.99
Ширина главного лепестка (вертикальный срез), °	92.2	58.8
УБЛ, дБ	-11.6	-5.5
КПД, %	75	66

Ширина главного лепестка антенны, полученная в результате моделирования, подтвер-

ждает возможность всенаправленного приема, при этом благодаря высокому уровню КНД обеспечивается высокое усиление при передаче данных. Так как полученная антенна предназначена для БПЛА самолетного типа, важно оценить ее аэродинамические характеристики, а также влияние на ламинарные воздушные потоки, которые огибают антенну.

Аэродинамическое влияние антенны на протекающие ламинарные потоки

Для прогнозирования аэродинамического влияния антенны на протекающие воздушные потоки, в данном случае ламинарные потоки, удобно использовать моделирование. Благодаря современным методам моделирования возможно с высокой точностью определить влияние объекта на характеристики протекающих воздушных потоков как в ламинарном, так и в турбулентном режимах. Так как большинство БПЛА самолетного типа имеют малые максимальные скорости полета, то учить турбулентных потоков, а также потоков с высоким числом чисел Маха не требуется. В данном случае проводилось CFD-моделирование (вычисление гидроаэродинамических потоков (computational fluid dynamics)) для ламинарного потока воздуха, который падает на антенну со скоростью 150 км/ч или 42 м/с. Благодаря тому, что антенна выполнена по планарной технологии, ее аэродинамический профиль будет минимальным, а так как форма антенны на верхнем слое и на нижнем одинакова, то подъемная или прижимная сила возникать не будут, так как скорости протекания потоков будут одинаковы. На рис. 4 приводится картина воздушных потоков при протекании вблизи антенны с изначальной скоростью 42 м/с.

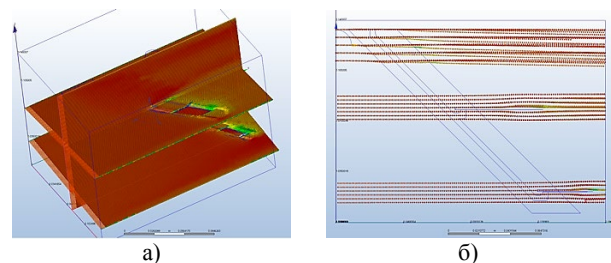


Рис. 4. Характеристики воздушных потоков при протекании вблизи антенны: а) ламинарные потоки на плоскости; б) пути потоков воздуха вблизи антенны

Как видно по полученным результатам моделирования, воздушные потоки огибают антенну с минимальными искажениями, а пиковая скорость воздушного потока составляет 46 м/с, что соответствует максимально плавно-

му обтеканию препятствия с минимальными изменениями ламинарного течения. Таким образом, можно отметить, что разработанная антенна имеет малый аэродинамический профиль, а следовательно, может устанавливаться на БПЛА самолетного типа. Рассмотрим также влияние места установки антенны на БПЛА на характеристики диаграммы направленности.

Влияние корпуса БПЛА на характеристики антенны

Рассмотрим случай установки разработанной антенны на БПЛА самолетного типа в нижней полусфере пространства, как это показано на рис. 5.

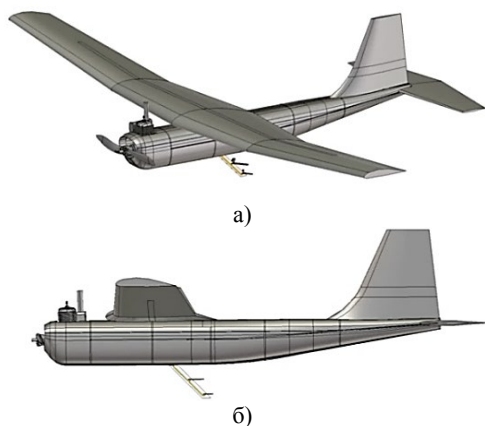


Рис. 5. Вид антенны установленной на БПЛА

Выбранное место установки антенны позволяет использовать ее для передачи и приема данных при управлении БПЛА с земли. Также важно учитывать, что корпус БПЛА оказывает влияние на электромагнитные волны, так как возникают отражения, которые способны исказить диаграмму направленности антенны. На рис. 6 приводятся диаграммы направленности антенны с учетом влияния корпуса БПЛА.

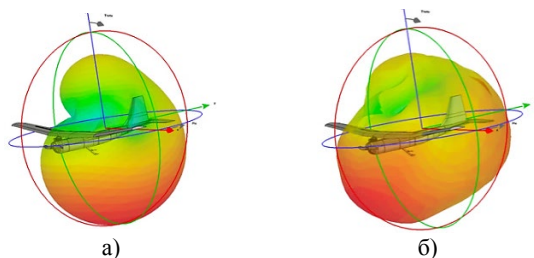


Рис. 6. Диаграммы направленности антенны с учетом влияния корпуса:

- а) диаграмма направленности на частоте 850 МГц;
б) диаграмма направленности на частоте 1300 МГц

Полученные результаты показывают, что корпус БПЛА оказывает минимальное влияние на характеристики электромагнитных волн, на основе этого можно сделать вывод, что предлагаемая конструкция антенны-плавник позволяет реализовать передачу данных в двух диапазонах, при этом благодаря грамотному расположению антенны на БПЛА удастся достичь минимальных искажений диаграммы направленности антенны.

Заключение

Предложенная в данной работе двухдиапазонная антенна-плавник позволяет реализовать систему передачи данных с высокой эффективностью, при этом сохранить малое аэродинамическое влияние на протекающие воздушные потоки. Таким образом, можно сделать вывод, что полученная антенна может быть использована с высокой эффективностью на БПЛА самолетного типа, при этом благодаря тому, что антенна выполнена на основе планарной технологии, она также может быть установлена на малых БПЛА, так как обладает минимальным весом. Также важно отметить, что благодаря разработанной конструкции антенна может быть помещена в компактный обтекатель, который также улучшит аэродинамические свойства антенны при ее установке на БПЛА.

Литература

1. Radiation characteristics of small antennas on small UAV platforms / E.C. Ngai, A.J. Fenn, A.K. Eapen, E.F. Newman // IEEE Antennas and Propagation Society Symposium. 2004. Pp. 173-176.
2. Design and development of a wide band monopole blade antenna for aircraft navigation and communication / N. Saaquib, T. Sarker, N. Rahman, L.E. Khan, P.K. Saha // 6th International Conference on Informatics, Electronics and Vision & 7th International Symposium in Computational Medical and Health Technology (ICIEV-ISCMT). 2017. Pp. 1-5.
3. Frequency-Reconfigurable Antenna for Broadband Airborne Applications / C.Y. Rhee, J.H. Kim, W.J. Jung, T. Park, B. Lee, C.W. Jung // IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters. 2014. Vol. 13. Pp. 189-192.
4. Nosrati M., Jafarholi A., Tavassolian N. A broadband blade dipole antenna for UAV applications // 2016 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation (AP-SURSI). 2016. Pp. 1777-1778.
5. Thite V., Kazi A.Y. Wideband VHF/UHF antennas for UAV platform with RCS approach // 1st International Conference on Emerging Technology Trends in Electronics, Communication & Networking. 2012. Pp. 1-5.
6. Lee H., Kim Y.-B., Lee H.L. Reconfigurable Antenna for UAV-Assisted Wide Coverage Air-to-Ground Communications // IEEE Access. Vol. 10. Pp. 88034-88042. 2022.

Информация об авторах

Бобылкин Игорь Сергеевич – канд. техн. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: bobylikin@bk.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7489-2249>

Ищенко Евгений Алексеевич – аспирант, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), тел. +7(473)243-77-29, e-mail: kursk1998@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5270-0792>

Фёдоров Сергей Михайлович – канд. техн. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84); доцент, Международный институт компьютерных технологий (394026, Россия, г. Воронеж, ул. Солнечная, д. 296), тел. +7(473)243-77-29, e-mail: fedorov_sm@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9027-6163>

Паринов Максим Викторович – канд. техн. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), тел. +7(473)243-77-29, e-mail: parmax@mail.ru

Николаев Валерий Иванович – д-р техн. наук, профессор, научный референт акционерного общества «Концерн «Созвездие» (394006, Россия, г. Воронеж, ул. Плехановская, 14), тел. +7(473) 252-12-13, e-mail: oflce@sozvezdie.su

DUAL BAND BLADE ANTENNA FOR AIRCRAFT UAVs

I.S. Bobylkin¹, E.A. Ishchenko¹, S.M. Fedorov^{1,2}, M.V. Parinov¹, V.I. Nikolaev³

¹Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

²International Institute of Computer Technologies, Voronezh, Russia

³JSC Concern “Sozvezdie”

Abstract: the article discusses the design of a dual-band fin antenna for implementing a communication system with aircraft-type unmanned aerial vehicles. The proposed antenna has the shape of a fin with two “wings” that act as emitters. Thanks to the use of two emitters of different shapes, it was possible to implement a communication system of two bands 840-876 MHz and 1280-1378 MHz. Due to the fact that the antenna is built on the basis of planar technology, it was possible to significantly simplify the design, minimize the profile, both aerodynamic and geometric, and also maintain the high efficiency of the antenna. The resulting antenna has a wide main lobe of the radiation pattern, and at the same time has a high level of directional coefficient, since the UAV body is used as an antenna reflector. The resulting antenna has a efficiency of 7.67 dB in the lower operating frequency range and 5.99 at the upper operating frequencies. All the main characteristics of the antenna were obtained based on simulation, and the aerodynamic profile of the antenna was also studied. The results obtained confirm the high efficiency of the proposed design, as well as the prospects for using fin antennas on aircraft-type UAVs

Key words: fin antenna, UAV antenna, dual-band antenna, UAV communication systems

Acknowledgments: this research was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation as a part of the state assignment (project no. FZGM-2023-0011)

References

1. Ngai E.C., Fenn A.J., Eapen A.K., Newman E.F. “Radiation characteristics of small antennas on small UAV platforms”, *IEEE Antennas and Propagation Society Symposium*, 2004, pp. 173-176.
2. Saaquib N., Sarker T., Rahman N., Khan L.E., Saha P.K. “Design and development of a wide band monopole blade antenna for aircraft navigation and communication”, *2017 6th International Conference on Informatics, Electronics and Vision & 2017 7th International Symposium in Computational Medical and Health Technology (ICIEV-ISCMT)*, 2017, pp. 1-5.
3. Rhee C.Y., Kim J.H., Jung W.J., Park T., Lee B., Jung C.W. “Frequency-Reconfigurable Antenna for Broadband Airborne Applications”, *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 13, 2014, pp. 189-192.
4. Nosrati M., Jafargholi A., Tavassolian N. “A broadband blade dipole antenna for UAV applications”, *2016 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation (AP-SURS)*, 2016, pp. 1777-1778.
5. Thite V., Kazi A.Y. “Wideband VHF/UHF antennas for UAV platform with RCS approach”, *2012 1st International Conference on Emerging Technology Trends in Electronics, Communication & Networking*, 2012, pp. 1-5.
6. Lee H., Kim Y.-B., Lee H.L. “Reconfigurable Antenna for UAV-Assisted Wide Coverage Air-to-Ground Communications”, *IEEE Access*, 2022, vol. 10, pp. 88034-88042.

Submitted 20.10.2023; revised 12.12.2023

Information about the authors

Igor S. Bobylkin – Cand. Sc. (Technical), Associate Professor Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: bobylikin@bk.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7489-2249>

Evgeny A. Ishchenko - Postgraduate student, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), tel.: +7 (473)243-77-29, e-mail: kursk1998@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5270-0792>

Sergei M. Fedorov – Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Department of Radioelectronic Devices and Systems, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), International Institute of Computer Technologies (29 b Solnechnaya str., Voronezh 39026, Russia), tel.: +7 (473)243-77-29, e-mail: fedorov_sm@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9027-6163>

Maxim V. Parinov – Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), tel.: +7 (473)243-77-29, e-mail: parmax@mail.ru

Valeriy I. Nikolaev – Dr. Sc. (Technical), Professor, Scientific Adviser, JSC Concern “Sozvezdie” (14 Plekhanovskaya str., Voronezh 394018, Russia), tel.: +7(473) 252-12-13, e-mail: oflce@sozvezdie.su

КОНСТРУКЦИЯ ЛИНЗЫ РОТМАНА С ОСНОВНОЙ ВОЛНОЙ МАГНИТНОГО ТИПА ДЛЯ МНОГОЛУЧЕВОЙ АНТЕННОЙ СИСТЕМЫ МОБИЛЬНОГО ТЕРМИНАЛА СПУТНИКОВОЙ СВЯЗИ КУ-ДИАПАЗОНА

Ю.Г. Пастернак¹, В.А. Пендюрин², Д.К. Проскурин¹, К.С. Сафонов¹

¹Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

²АО Научно-производственное предприятие «Автоматизированные системы связи»,
г. Воронеж, Россия

Аннотация: в последние годы фазированные антенные решетки становятся ключом решения задачи создания высокоскоростных наземных терминалов глобальной спутниковой связи. Для того, чтобы удовлетворить требованию высокой пропускной способности, наземный терминал должен передавать/принимать спутниковый сигнал с высокой направленностью и электронно-управляемым главным лепестком, способным отслеживать спутники, расположенные вблизи линии горизонта. Для этого необходимо использование фазированных антенных решеток с несколькими тысячами элементов, что создает большие проблемы, с точки зрения проектирования антенной системы, ее серийного производства и высоких материальных затрат. В данной статье представлена волноводная линза Ротмана с основной магнитной волной волноводного типа H_{10} , где использование волноводной волны основного магнитного типа в теле линзы Ротмана и в линиях задержки позволяет существенно уменьшить потери мощности (по сравнению с коаксиальными кабелями), что дает возможность существенно повысить коэффициент полезного действия пассивных фазированных антенных решеток с линзой Ротмана, кроме того, запитка тела линзы прямоугольными волноводами с соседними широкими стенками дает возможность увеличить число входов и выходов линзы Ротмана

Ключевые слова: линза Ротмана, волноводная линза Ротмана

Благодарности: работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания (проект № FZGM-2023-0011)

Введение

В последние годы фазированные антенные решетки становятся ключом решения задачи создания высокоскоростных наземных терминалов глобальной спутниковой связи (satcom). Для того, чтобы удовлетворить требованию высокой пропускной способности, наземный терминал должен передавать/принимать спутниковый сигнал с высокой направленностью и электронно-управляемым главным лепестком, способным отслеживать спутники, расположенные вблизи линии горизонта [1]. Для этого необходимо использование фазированных антенных решеток с несколькими тысячами элементов, что создает большие проблемы, с точки зрения проектирования антенной системы, ее серийного производства и высоких материальных затрат.

Антенные решетки, сканирование главным лепестком диаграммы направленности которой осуществляется с помощью волноводной линзы Ротмана, могут быть использованы для построения антенной системы с двухкоординатным

коммутационным сканированием в полосе частот с коэффициентом перекрытия более 2.

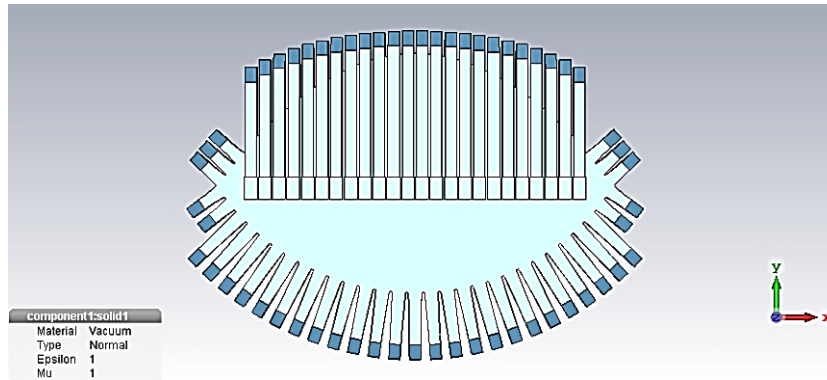
Использование волноводной волны основного магнитного типа в теле линзы Ротмана и в линиях задержки позволяет существенно уменьшить потери мощности (по сравнению с коаксиальными кабелями), что дает возможность существенно повысить коэффициент полезного действия пассивных фазированных антенных решеток (ФАР) с линзой Ротмана. кроме того, запитка тела линзы прямоугольными волноводами с соседними широкими стенками, дает возможность увеличить число входов и выходов линзы Ротмана; однако, недостатком данного подхода является сильная дисперсия волн волноводного типа, что существенно сужает полосу частот функционирования ФАР, питаемое подобной линзой Ротмана.

Описание конструкции линзы Ротмана с основной волной магнитного типа

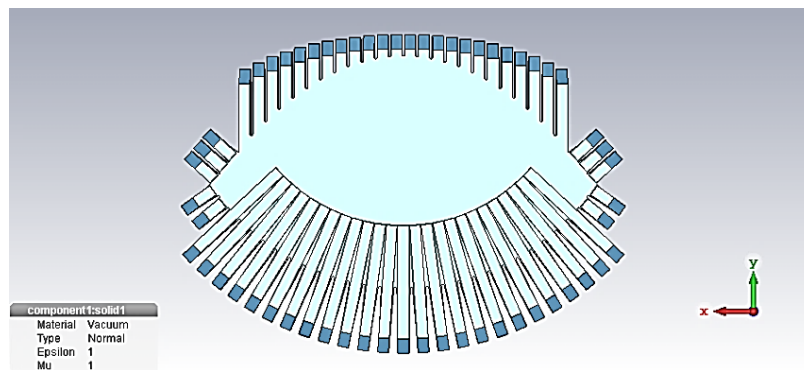
В статье представлены результаты построения основных узлов волноводной линзы Ротмана с волной магнитного типа с двадцатью пятью положениями луча для запитки ФАР, функционирующей в узкой полосе частот Ку-диапазона, состоящей из 24 элементов, распо-

ложенных с периодом 12 мм. Габаритные размеры линзы: $400 \times 290 \times 70$ мм³. Предполагается, что линза Ротмана будет изготавливаться путем фрезерования на станке с частотным программным управлением из алюмелевого сплава. Расчетная масса линзы Ротмана будет равна 6.7 кг.

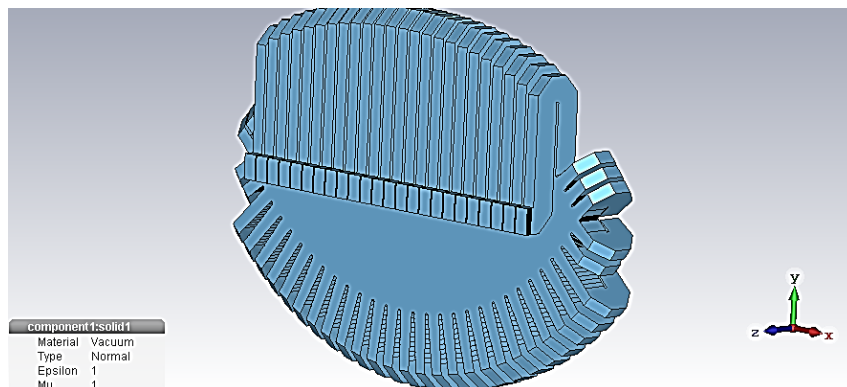
Далее на рис. 1-2 показаны полости и модели основных узлов волноводной линзы Ротмана с различных сторон для более детального понимания конфигурации линзы.



а) полости волноводной линзы Ротмана с основной волной магнитного типа, вид со стороны антенных выходов

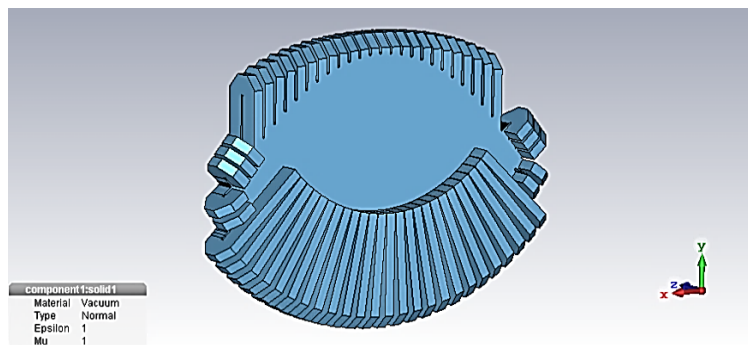


б) полости волноводной линзы Ротмана с основной волной магнитного типа, вид со стороны диаграммообразующих входов

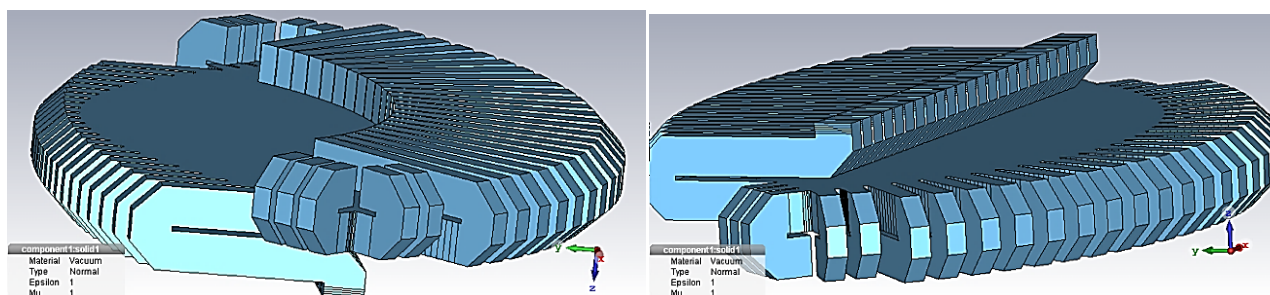


в) полости волноводной линзы Ротмана с основной волной магнитного типа, вид со стороны антенных выходов

Рис. 1. Полости волноводной линзы Ротмана с основной волной магнитного типа с 25 положениями луча для запитки ФАР, функционирующей в узкой полосе частот Кв- диапазона, состоящей из 24 элементов, расположенных с периодом 12 мм

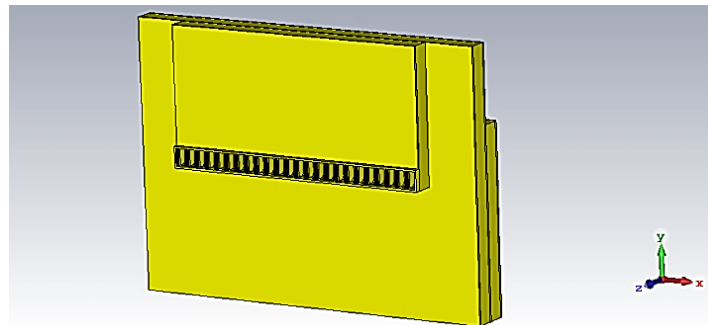


г) полости волноводной линзы Ротмана с основной волной магнитного типа, вид со стороны диаграммообразующих входов

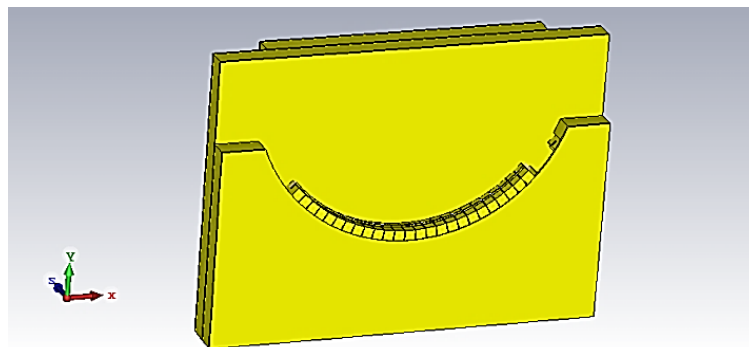


д) виды сбоку полостей волноводной линзы Ротмана с основной волной магнитного типа

Рис. 1. Полости волноводной линзы Ротмана с основной волной магнитного типа с 25 положениями луча для запитки ФАР, функционирующей в узкой полосе частот Ку- диапазона, состоящей из 24 элементов, расположенных с периодом 12 мм (окончание)

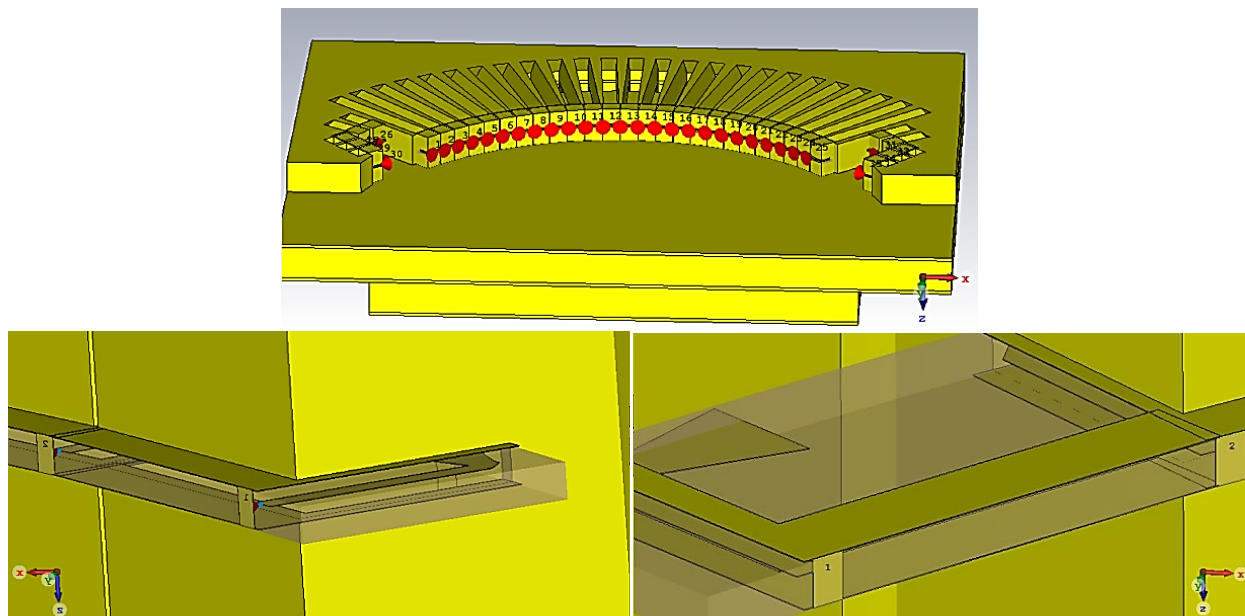


а) модель линзы Ротмана с основной волной магнитного типа, вид со стороны антенных выходов

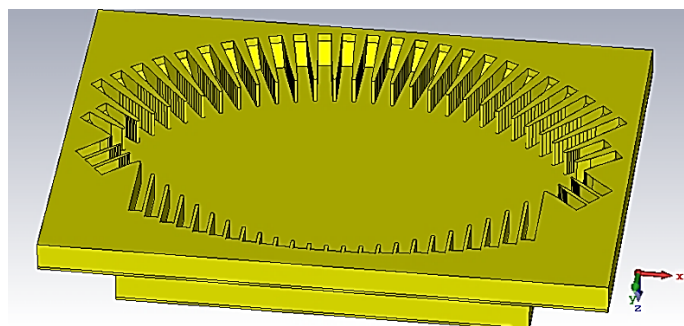


б) модель линзы Ротмана с основной волной магнитного типа, вид со стороны диаграммообразующих входов

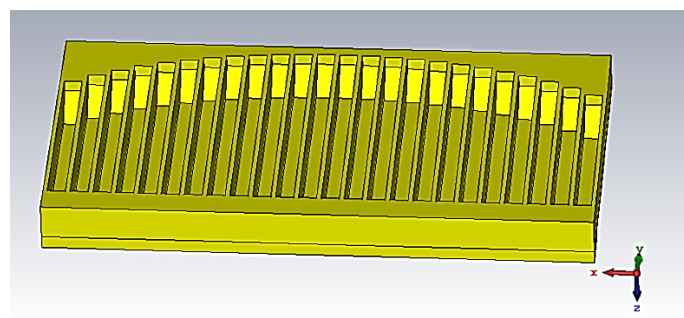
Рис. 2. Модели основных узлов волноводной линзы Ротмана с волной магнитного типа с 25 положениями луча для запитки ФАР, функционирующей в узкой полосе частот Ку- диапазона, состоящей из 24 элементов, расположенных с периодом 12 мм. Габаритные размеры линзы: $400 \times 290 \times 70$ мм³; расчетная масса линзы Ротмана при фрезеровании ее деталей из алюминиевого сплава – 6.7 кг



в) модель линзы Ротмана с основной волной магнитного типа, запитка диаграммообразующих входов с помощью полосково-волноводных переходов и дискретных портов



г) модель линзы Ротмана с основной волной магнитного типа, полости, занимаемые телом линзы Ротмана и волноводами



д) модель линзы Ротмана с основной волной магнитного типа, полости, занимаемые волноводами линий задержки

Рис. 2. Модели основных узлов волноводной линзы Ротмана с волной магнитного типа с 25 положениями луча для запитки ФАР, функционирующей в узкой полосе частот Ку- диапазона, состоящей из 24 элементов, расположенных с периодом 12 мм. Габаритные размеры линзы: $400 \times 290 \times 70$ мм³; расчетная масса линзы Ротмана при фрезеровании ее деталей из алюминиевого сплава – 6.7 кг (окончание)

Заключение

В результате анализа данной линзы Ротмана было выявлено, запитка тела линзы прямоугольными волноводами с соседними широкими стенками, дает возможность увеличить

число входов и выходов линзы Ротмана. Однако недостатком данного подхода является сильная дисперсия волн волноводного типа, что существенно сужает полосу частот функционирования ФАР, питаемое подобной линзой Ротмана.

Литература

1. Sheriff R. E. and Hu Y. F., Mobile Satellite Communication Networks // John Wiley & Sons, Ltd, New York, NY, USA, 2001.

Поступила 06.10.2023; принята к публикации 01.12.2023

Информация об авторах

Пастернак Юрий Геннадьевич – д-р техн. наук, профессор, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: pasternakyg@mail.ru

Пендюрин Владимир Андреевич – генеральный директор, АО НПП «Автоматизированные системы связи» (394062, Россия, г. Воронеж, ул. Пеше-Стрелецкая, д. 108, офис 415), e-mail: pva777777@yandex.ru

Проскурин Дмитрий Константинович – канд. физ.-мат. наук, доцент, ректор, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: pdk@vgasu.vrn.ru

Сафонов Кирилл Сергеевич – младший научный сотрудник, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: Safonov-kirik@mail.ru

DESIGN OF A ROTHMAN LENS WITH A FUNDAMENTAL WAVE OF MAGNETIC TYPE FOR A MULTI-BEAM ANTENNA SYSTEM OF A KU-BAND MOBILE SATELLITE COMMUNICATION TERMINAL

Yu.G. Pasternak¹, V.A. Pendyurin², D.K. Proskurin¹, K. S. Safonov¹

¹**Voronezh state technical University, Voronezh, Russia**

²**Joint stock company research and production enterprise «Automated communication systems», Voronezh, Russia**

Abstract: In recent years, phased array antennas have become the key to solving the problem of creating high-speed ground terminals for global satellite communications. In order to meet the high throughput requirement, the ground terminal must transmit/receive a satellite signal with high directivity and an electronically controlled main beam capable of tracking satellites located near the horizon. This requires the use of phased array antennas with several thousand elements, which creates great problems in terms of designing the antenna system, its mass production and high material costs. This article presents a Rothman waveguide lens with a main magnetic wave of the waveguide type H₁₀, where the use of a waveguide wave of the main magnetic type in the body of the Rothman lens and in the delay lines can significantly reduce power losses (compared to coaxial cables), which makes it possible to significantly increase the efficiency the action of passive phased array antennas with a Rothman lens, in addition, powering the lens body with rectangular waveguides with adjacent wide walls makes it possible to increase the number of inputs and outputs of the Rothman lens

Key words: Rotman lens, Rotman waveguide lens

Acknowledgments: the research was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation as a part of the state assignment (project no. FZGM-2023-0011)

References

1. Sheriff R.E., Hu Y.F. "Mobile Satellite Communication Networks", New York, John Wiley & Sons, Ltd, 2001.

Submitted 06.10.2023; revised 01.12.2023

Information about the authors

Yuriy G. Pasternak – Dr. Sc. (Technical), Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: pasternakyg@mail.ru

Vladimir A. Pendyurin - General Manager, JSC "Automated Communication Systems" (office 415 108 Peshe-Streletskaya str., Voronezh 394062 Russia), e-mail: pva777777@yandex.ru

Dmitry K. Proskurin – Cand. Sc. (Physical and Mathematical), Associate Professor, Rector of Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: pdk@vgasu.vrn.ru

Kirill S. Safonov – Junior Researcher, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: Safonov-kirik@mail.ru

РАЗРАБОТКА АРХИТЕКТУРЫ СЛЕПОГО РАСПОЗНАВАНИЯ ЛИНЕЙНОГО БЛОЧНОГО КОДИРОВАНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КАСКАДНОЙ СЕТИ

А.В. Башкиров, М.В. Хорошайлова, А.С. Демихова

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

Аннотация: большая часть алгоритма кодирования для слепого распознавания кодов с низкой плотностью проверки четности (LDPC) сложна в применении, и проблема высокой временной сложности и высокой пространственной сложности не может быть решена. Предложенная здесь архитектура объединяет сеть на основе трансформатора со сверточной нейронной сетью (CNN). CNN используется для подавления шума в режиме реального времени, за которым следует нейронная сеть на основе трансформатора, предназначенная для определения скорости и длины LDPC кодов. Предполагается использование данной архитектуры в схеме кодирования для каналов связи между беспилотными летательными аппаратами (БПЛА) и пользователями. Чтобы обучать сети с шумоподавлением и сети распознавания с высокой производительностью, создаем наборы данных и определяем функции потерь для сетей с шумоподавлением. Результаты моделирования показывают, что эта архитектура способна обеспечить лучшую производительность, чем стандартный метод, при более низком соотношении сигнал/шум (SNR). По сравнению с существующими методами этот подход является более гибким и, следовательно, может быть быстро применен в канале связи между БПЛА и пользователем

Ключевые слова: кодирование с распознаванием вслепую, низкоплотностный код, сверточная нейронная сеть, уменьшение шума, канал связи

Благодарности: работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания (проект № FZGM-2023-0011)

Введение

В течение последних нескольких десятилетий были предложены различные схемы кодирования, и соответствующие схемы декодирования, чтобы сбалансировать качество и скорость передачи данных. В традиционной системе связи только декодер знает параметры кодирования, которые он может точно определить. Чтобы решить проблему высокой временной сложности и высокой вычислительной сложности, большинство существующих методов распознавания LDPC-кодирования вслепую, предложенных в последние годы, используют идентификацию по замкнутому набору. Методы идентификации, основанные на замкнутом наборе данных, используют набор, содержащий все вероятные параметры [1-3]. Логарифмический коэффициент правдоподобия (LLR), используемый для кодирования распознавания вслепую, хорошо работает при низком отношении сигнал/шум (SNR). В [2] LDPC код идентифицируется по разнице среднего правдоподобия (LD) проверок на четность.

В последние годы различные комбинации нейронных сетей и кодирования для распозна-

вания вслепую быстро прогрессировали. Схемы кодирования и параметр кодирования могут быть идентифицированы с помощью нейронных сетей. 2-мерная нейронная сеть свертки используется для идентификации матрицы проверки четности LDPC кодов с помощью набора возможных вариантов [4].

Состояние канала является ключевым фактором при кодировании распознавания вслепую. Почти все обычные методы распознавания кодирования вслепую LDPC кодов адекватно используют состояние канала. Напротив, большинство существующих методов распознавания, основанных на глубоком обучении, уделяют мало внимания состоянию канала, что привело к тому, что эти методы глубокого обучения точно идентифицируют при высоком SNR, но плохо работают, когда состояние канала недостаточно хорошее.

Таким образом, необходимо разработать архитектуру, основанную на глубоком обучении, для кодирования слепого распознавания LDPC кодов в канале с аддитивным белым гауссовым шумом с различными SNR. Кодовые слова обрабатываются как последовательность слов, которая отправляется в предлагаемую нейронную сеть на основе трансформатора для кодирования слепого распознавания.

Структурная схема цифровой системы связи с распознаванием вслепую

При совместной связи модуль декодирования знает условия канала и параметры кодирования, используемые для связи в режиме реаль-

ного времени. Напротив, параметры кодирования должны быть идентифицированы при несогласованной передаче данных перед декодированием. Структурная схема типичной системы связи без взаимодействия показана на рис. 1.

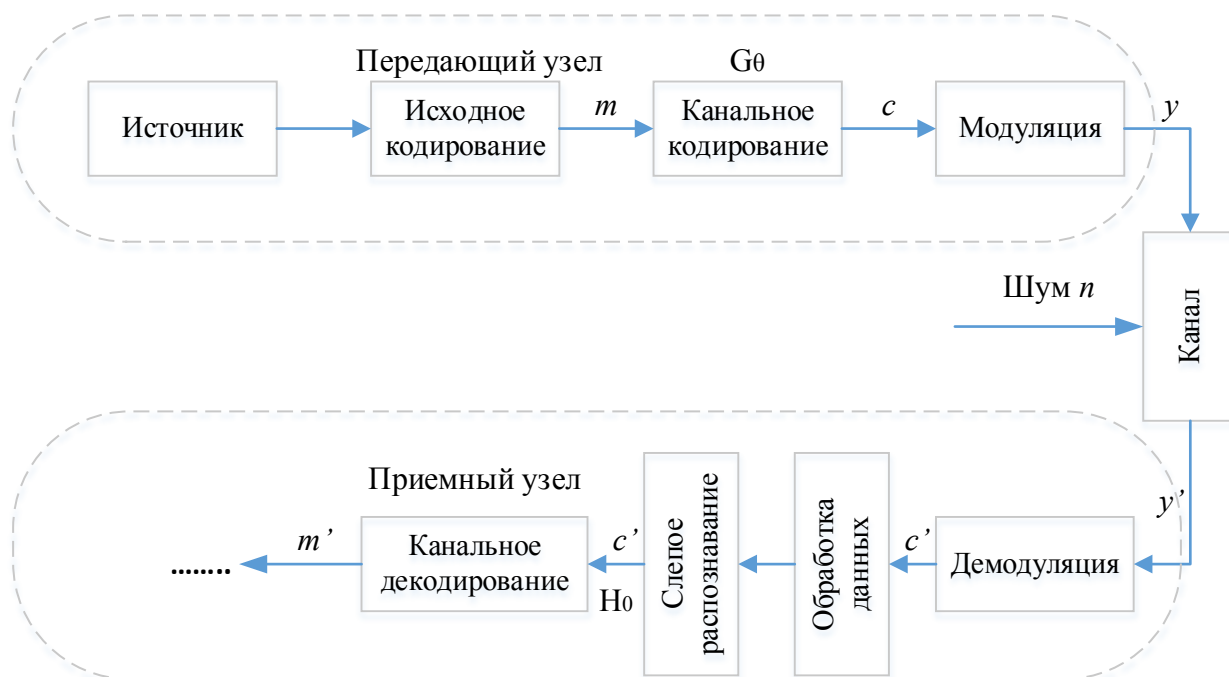


Рис. 1. Структурная схема цифровой системы связи с распознаванием вслепую

Как показано на рис. 1, $G^\theta = \{G^1, G^2, \dots, G^N\}$ представляет набор кодеров, где N – номер генерирующей матрицы, а G представляет матрицу генерации размера (k, n) . Кодер переключается передатчиком в соответствии с условиями канала. На передающем узле исходные биты делятся на группы, и каждая группа имеет длину k , i -ая информация $m_i = [m_{i,1}, m_{i,2}, \dots, m_{i,k}]$ отправляется в кодер с выводом n -битного кодового слова $c_i = [c_{i,1}, c_{i,2}, \dots, c_{i,n}]$, где $m_{i,j}, c_{i,j} \in GF(2)$. Формула кодирования показана в (1):

$$c_i = m_i \cdot G. \quad (1)$$

Матрица проверки четности H размера $(n - k, n)$ удовлетворяет $c_i \cdot H = 0$. Поскольку H является двойной матрицей G , восстановление H и G имеет одинаковое значение для слепого распознавания LDPC кода [5]. При двоичной фазовой манипуляции (BPSK) результат может быть выражен следующим образом

$$y = 2c_i - 1. \quad (2)$$

После модуляции, передачи по каналу и демодуляции кодовое слово c' отправляется на принимающий узел для декодирования. В данной работе рассматривается аддитивный белый гауссовский шум (АБГШ) n с нулевым средним значением и дисперсией σ^2 . Затем c' может быть представлен в виде

$$c' = y + n. \quad (3)$$

Обычным мягким решением для декодирования является вычисление коэффициента логарифмического отношения правдоподобия (LLR) с использованием предварительной информации о состоянии канала [6].

$$LLR_i = \ln \left(\frac{P(c[i] = 0 | c'[i])}{P(c[i] = 1 | c'[i])} \right), \quad (4)$$

где $P(c[i] = 0 | c'[i])$ и $P(c[i] = 1 | c'[i])$ указывает вероятность того, что $c[i]$ будет рассматриваться как 0 и 1 в приемнике с известным состоянием канала. Когда канал имеет значение АБГШ, получаем:

$$P(c[i] = 0 | c'[i]) = \frac{e^{-2c'[i]/\sigma^2}}{1 + e^{-2c'[i]/\sigma^2}}. \quad (5)$$

Заменим в (4), используя (5), получим

$$LLR_i = -2 \cdot \frac{c'[i]}{\sigma^2}. \quad (6)$$

Предлагаемая каскадная нейронная сеть

Используем сверточные нейронные сети (СНС) для слепого распознавания LDPC кода с помощью закрытого набора. Сначала сеть полу-

чает выходную последовательность. Выходная последовательность c' , обрабатываемая генераторами LLR, описывается формулой (6). СНС в основном состоит из слоев свертки, объединенных слоев и полностью связанных слоев. Объекты смежных данных извлекаются с помощью слоя свертки [7]. Объединяющий слой сохраняет основную функцию и уменьшает количество параметров. Каскад сверточных слоев и объединения преобразует локальные объекты в глобальные. Наконец, полностью подключенный слой принимает глобальный объект в качестве входных данных, а результат прогнозирования - в качестве выходных данных.

Входным сигналом подавляющей шум СНС является 1-мерный вектор x , в то время как выходным вектором является y . И x , и y имеют размер $(1, N)$. Как показано на рис. 2, принятые кодовые слова c' равномерно распределяются в виде N битов, а затем отправляются в СНС.

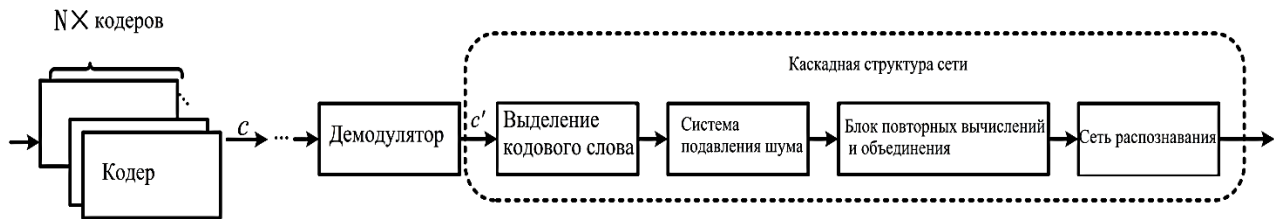


Рис. 2. Структура предлагаемой сети

После снижения уровня шума значения y используются для пересчета $LLR(L)$. L' обозначает объединение L с размером $(1, 15N)$. Сеть распознавания вслепую, основанная на трансформаторе, принимает входные данные

L' . Выходным сигналом сети распознавания является метка, соответствующая матрице проверки четности H .

На рис. 3 показаны сети подавления шума, использующие СНС.

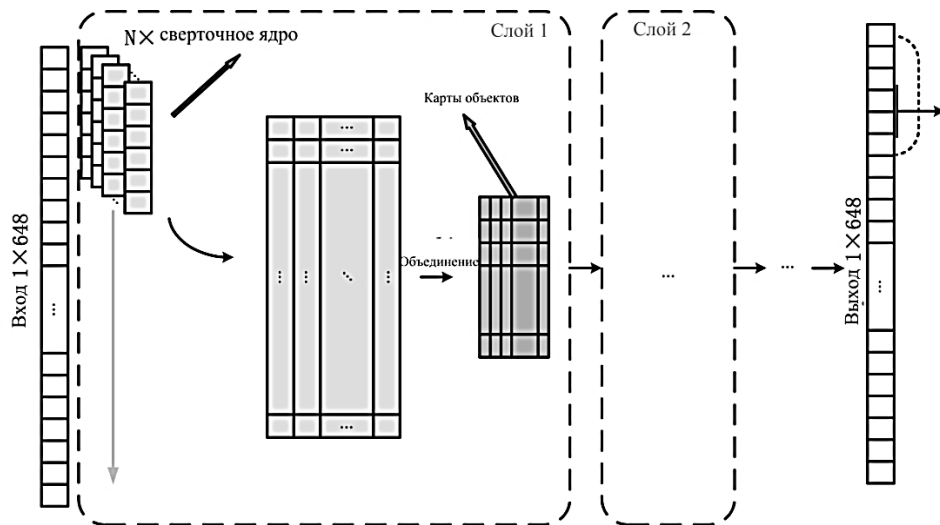


Рис. 3. Структура сети шумоподавления

Входными данными сетей является одномерный вектор. В дополнение к структуре сети, функция потерь также важна для проектирования сети. Это руководит тренировкой в правильном направлении. Потеря L_2 , которая также называется среднеквадратичной ошибкой (MSE), широко используется в области подавления шума изображения. Предположим, что $f(x)$ - это результат прямого вычисления сети, а y - ожидаемый результат. L_2 может быть представлен следующим образом

$$L_2 = \frac{\sum_{i=1}^n (f(x) - y)^2}{n}. \quad (7)$$

Здесь наборы-кандидаты LDPC кодов имеют длину $L = [648, 1296, 1944]$ и скорость $R = [1/2, 2/3, 3/4, 5/6]$. IEEE802.11 конкретно описывает эти LDPC коды и используется для обеспечения точности беспроводной связи (Wi-Fi). Матрица H кода LDPC с $n = 648$, $R = 2/3$ показана на рис. 4.

$$H = \begin{bmatrix} 25 & 26 & 14 & -1 & 20 & -1 & 2 & -1 & 4 & -1 & -1 & 8 & -1 & 16 & -1 & 18 & 1 & 0 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ 10 & 9 & 15 & 11 & -1 & 0 & -1 & 1 & -1 & -1 & 18 & -1 & 8 & -1 & 10 & -1 & 0 & 0 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ 16 & 2 & 20 & 26 & 21 & -1 & 6 & -1 & 1 & 26 & -1 & 7 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & 0 & 0 & -1 & -1 & -1 \\ 10 & 13 & 5 & 0 & -1 & 3 & -1 & 7 & -1 & -1 & 26 & -1 & -1 & 13 & -1 & 16 & -1 & -1 & 0 & 0 & -1 & -1 \\ 23 & 14 & 24 & -1 & 12 & -1 & 19 & -1 & 17 & -1 & -1 & -1 & 20 & -1 & 21 & -1 & 0 & -1 & -1 & 0 & 0 & -1 \\ 6 & 22 & 9 & 20 & -1 & 25 & 17 & -1 & 8 & -1 & -1 & 14 & -1 & 18 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & 0 & 0 & -1 \\ 14 & 23 & 21 & 11 & 20 & -1 & 24 & -1 & 18 & -1 & 19 & -1 & -1 & -1 & 22 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & 0 & 0 \\ 17 & 11 & 11 & 20 & -1 & 21 & -1 & 26 & -1 & 3 & -1 & -1 & 18 & -1 & 26 & -1 & 1 & -1 & -1 & -1 & -1 & 0 \end{bmatrix}$$

Рис. 4. H -матрица кода LDPC с $n = 648$, $R = 2/3$ в 802.11n

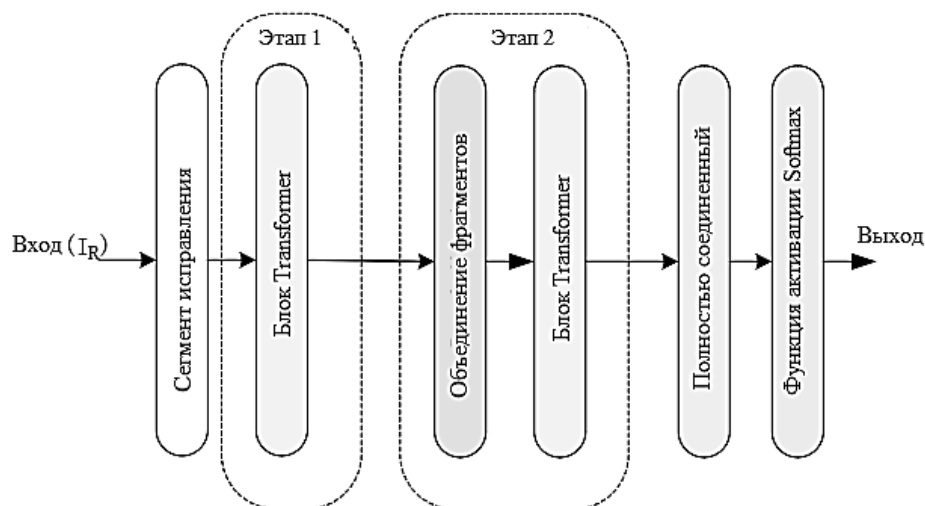


Рис. 5. Архитектура сети распознавания

Эта сеть принимает I_R в качестве входных данных. Поскольку размер токена в этой сети равен 324, I_R делится на 30×324 с помощью Patch Partition layer (Сегмент исправления).

Матрица H состоит из двух основных элементов, т.е. нулевой матрицы, представленной -1 , и единичной матрицы. Элементы в матрице H , которые не равны -1 , представляют собой цифры, расположенные справа налево от единичной матрицы. Чтобы обучить сети шумоподавления, рассматриваем АБГШ с различными уровнями $SNR = [0, 0.5, 1, 2, 4, 6, 8]$ дБ. На канал отправляются три кодовых слова $[c_1, c_2, c_3]$ разной длины. Чтобы предотвратить увеличение размерности нейронной сети и сократить время обучения, выбирается соответствующий размер входных данных сети, который составляет 648 бит. Таким образом, эти кодовые слова делятся на 648 бит c , что является самой короткой длиной кодового слова. После обработки передающего узла и канала получаем c' с добавлением белого гауссовского шума. Сети шумоподавления используют c и c' для обучения.

Сети распознавания. На рис. 5 показана архитектура сети распознавания.

Размер окна равен 10 токенам, а кодировка относительного положения (RPE) B является обучаемой переменной размера (1, 19).

Размер матрицы RPE определяется количеством токенов в окне, а взаимосвязь между токенами и окнами показана на рис. 6. Блок SwinTransformer содержит два уровня: один для вычисления многопоточного доступа (МНА), а другой для вычисления МНА со смещенным окном (SW-МНА).

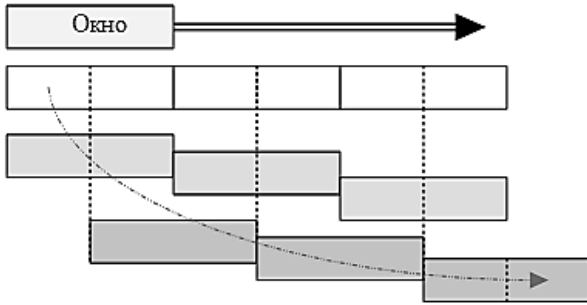


Рис. 6. Взаимосвязь между исправлениями и окнами

Функция уровня объединения участков аналогична функции уровня максимального объединения в СНС, которая используется для расширения области восприятия. Размер вектора выходных данных этапа 1 совпадает с его входными данными с размером (30, 324). Затем выходные данные изменяются до размера (10, 324) путем присвоения одного из каждых трех фрагментов данных из выходных данных этапа 1. позже нормализации в каждой строке и полностью подключенного слоя выходные данные становятся (10, 324). Блок Transformer на этапе 2 аналогичен этапу 1. Разница заключается только в размерности, которая на этапе 2 равна 10. Наконец, выходные данные этапа 2 размера (10, 324) отправляются на полностью подключенный уровень и обрабатываются с использованием функции softmax для классификации.

Существует три различных типа наборов данных для сети распознавания. Основное различие между этими тремя наборами данных заключается в том, что влияние шума на их внутренние данные различно. Данные в наборе данных 1 не содержат шума, данные в наборе данных 2 являются выходными данными блока пересчета и комбинирования, которые сохраняют остаточный шум, а данные в наборе данных 3 поступают непосредственно из демодулятора без шумоподавления. Отличительной чертой этих наборов данных являются одно-разрядные коды из 12 бит, которые соответствуют каждой матрице проверки четности Н.

Результаты моделирования

Сеть снижения уровня шума. Оценка момента первого порядка и оценка момента второго порядка градиентов вычисляются с использованием адаптивной оценки момента (Adam) для установки независимых адаптивных скоростей обучения различных параметров. Инициализаторы Кайминга широко используются в сверточных сетях и хорошо работают. После проведенных экспериментов установили, что скорость конвергенции является самой высокой, когда скорость обучения равна $1E-4$, и обучение будет прекращаться до тех пор, пока потери при проверке не уменьшатся за $1E+4$ эпохи.

Для того чтобы наглядно доказать, что если функция этой сети соответствует ожиданиям, то функции потерь будут равны L_2 и L_k , это показано на рис. 7.

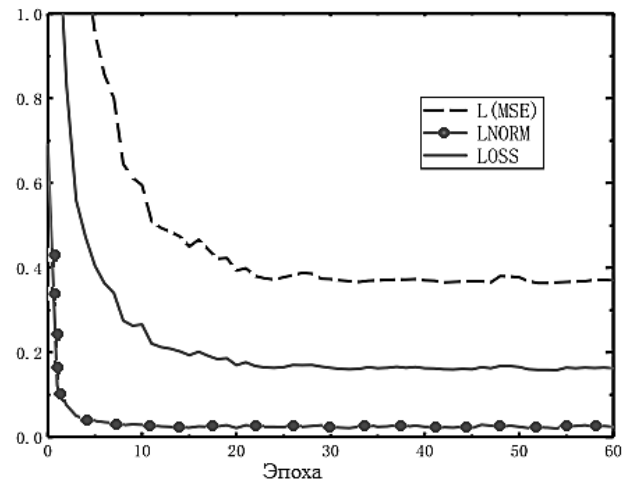


Рис. 7. Величина потерь на этапе независимого обучения

Набор данных 2 - это выходные данные этой сети с соответствующими метками. Подсчитывается дисперсия σ^2 остаточного шума, генерируемого сетью шумоподавления с различными входами SNR, и статистические результаты показывают, что σ^2 составляет около 0,4, что означает, что SNR на выходе составляет около 4 дБ, согласно приведенной ниже формуле.

$$SNR = 10 \log_{10} \left(\frac{1}{\sigma^2} \right). \quad (8)$$

Это приводит к хорошим результатам, когда SNR меньше 4 дБ. Даже если состояние канала достаточно хорошее, эта сеть также

может предоставить приблизительную информацию о канале, которую можно использовать для последующей работы.

Сеть распознавания. Подобно сети шумоподавления, сеть распознавания обучается с использованием трех наборов данных, упомянутых выше. Гиперпараметры всех этих трех сетей одинаковы. Оптимизатор такой же, как и в сети шумоподавления, в то время как в качестве инициализатора используется Xavier, который инициализирует среднее значение весов и смещения равным 0, а различных других значений - 1. Скорость обучения изначально устанавливается равной 0,001 и динамически корректируется во время обучения. Чтобы предотвратить переобучение, устанавливаем значение выбывания равным 0,5.

Для проверки точности и надежности сети используются двенадцать типов кодов LDPC с $[0, 0.5, 1, 2, 4, 6, 8, 10, \infty]$ Базы данных используются в качестве тестовых наборов. На рис. 8 показана производительность этих трех сетей, обученных по разным наборам данных.

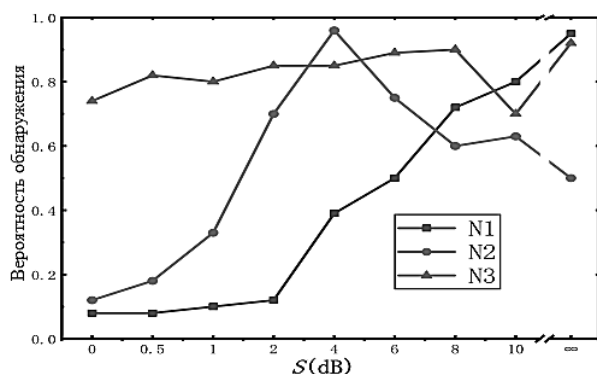


Рис. 8. Производительность сети распознавания, обученной на основе различных наборов данных

$[N1, N2, N3]$ - это сети, обученные $[dataset1, dataset2, dataset3]$, соответственно, для удобства. Как показано на рис. 8, N1 и N2 работают достаточно хорошо, когда SNR тестового набора совпадает с SNR обучающего

набора. Эта сеть надежна, поскольку она способна распознавать LDPC коды с SNR, которое не появилось в обучающем наборе. Однако производительность N1 и N2 постепенно ухудшается по мере увеличения разрыва в SNR между тестовыми наборами и обучающими наборами. Точность N1 является наихудшей, когда значение S тестового набора равно 0 дБ. Напротив, N3 обладает большей гибкостью и лучше адаптируется к различным ситуациям благодаря большому разнообразию данных в своем обучающем наборе. Но это менее точно, чем N1 и N2 для конкретного SNR. Приведенные выше рассуждения показывают, что можно получить высокоточную сеть распознавания вслепую, при условии, что отклонение SNR данных после сети шумоподавления будет как можно меньшим.

Кроме того, заметно, что точность довольно низкая, когда S составляет менее 0,5 дБ. Рассматриваем компромисс между точностью и гибкостью, перестраивая набор данных для сети шумоподавления. Добавление новых данных с низким SNR неизбежно приведет к ухудшению производительности сети шумоподавления, что приведет к снижению точности сети распознавания. Чтобы повысить точность прогнозирования σ' из сети шумоподавления, перестраиваем наборы данных с низким SNR $[-3, -2, -1, 0, 1, 2, 4]$ дБ для сети шумоподавления. После удаления данных с низким SNR сеть распознавания, использующая только данные с высоким SNR, может быть дополнительно оптимизирована. Следовательно, предлагаемая оптимизированная структура показана на рис. 9. Точность этой структуры показана в табл. 1. Примечательно, что эта система работает лучше с SNR от -3 дБ до 4 дБ, чем с другими SNR, благодаря использованию информации о канале. Его точность составляет около 90% при $-3 \text{ дБ} \leq S \leq 4 \text{ дБ}$, в то время как точность составляет около 87% при $5 \text{ дБ} \leq S \leq 10 \text{ дБ}$.

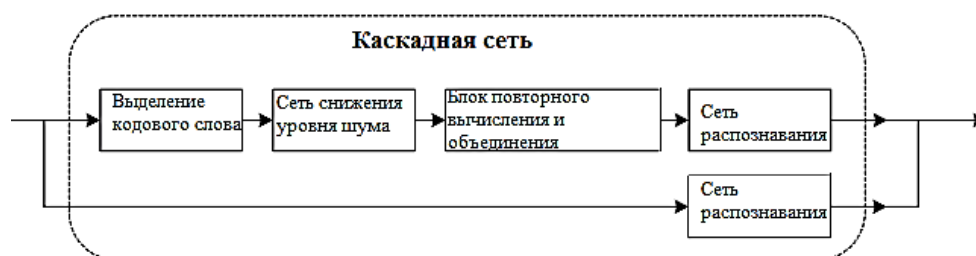


Рис. 9. Оптимизированная структура для распознавания вслепую

Таблица 1

Точность оптимизированной структуры

SNR/дБ	-3	-2	-1	0	1	2	4	6	8	10
Точность	0,86	0,87	0,89	0,92	0,93	0,95	0,91	0,87	0,86	0,86

Заключение

В этой статье предложена каскадная сетевая структура для распознавания LDPC кодирования вслепую. По сравнению с традиционным алгоритмом распознавания вслепую, он работает лучше в условиях низкого SNR.

Первоначальная цель нашей разработки сети шумоподавления состояла в том, чтобы отфильтровать часть шума и получить кодовое слово, которое содержит остаточный шум в распределении по Гауссу. Результаты показывают, что сеть шумоподавления может предоставлять точную информацию о канале, когда разрыв SNR в наборах данных невелико.

Матрица генерации LDPC кодов в наборах данных описана в стандарте IEEE802.11n, который широко используется в технологии беспроводной связи малой дальности. Предлагаемая каскадная сеть может идентифицировать матрицу проверки четности LDPC кодов в наборах данных с вероятностью 90 %, когда S больше 0 дБ. Кроме того, эта сеть обеспечивает точность около 80 % при значении S около -2 дБ, что лучше, чем другие традиционные методы.

После разделения набора данных и оптимизации структуры эта архитектура показала лучшие результаты, чем традиционный метод. Однако из-за ограничений каскадной структуры затраты на обучение сети высоки, и разделение данных также имеет решающее значение. Следовательно, слияние этой структуры и традиционных алгоритмов может привести к лучшим

результатам. Демодулированные данные отправляются по двум разным каналам передачи данных, и конечным результатом является тот, который имеет более высокую достоверность из этих двух путей передачи данных.

Литература

1. Perrins, E. FEC systems for aeronautical telemetry. IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst. 2013, 2340–2352.
2. Bonvard, A.; Houcke, S.; Marazin, M.; Gautier, R. Order statistics on minimal Euclidean distance for blind linear block code identification // Proceedings of the 2018 IEEE International Conference on Communications (ICC), Kansas City, MO, USA. 2018. Pp. 1–5.
3. Yu P., Peng H., Li J. On blind recognition of channel codes within a candidate set. IEEE Commun. Lett. 2016, 20, Pp. 736–739.
4. Blind Recognition of LDPC Codes Using Convolutional Neural Networks / L. Li, Z. Huang, C. Liu, J. Zhou, Y. Zhang // Proceedings of the 2021 IEEE 4th International Conference on Electronics Technology (ICET), Chengdu, China, 2021. Pp. 696–700.
5. Хорошайлова М.В. Архитектура для стохастических LDPC-декодеров с использованием эффективной площади кристалла на основе ПЛИС // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2018. Т. 14. № 1. С. 95–100.
6. Разработка QC-LDPC-декодера с высокой пропускной способностью для 5G беспроводной радиосвязи / А.В. Башкиров, М.В. Хорошайлова, П.П. Чураков, Е.В. Турецкая // Радиотехника. 2022. Т. 86. № 7. С. 14–19.
7. Хорошайлова М.В. Архитектура канального кодирования на основе ПЛИС для 5G беспроводной сети с использованием высокоуровневого синтеза // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2018. Т. 14. № 2. С. 99–105.

Поступила 18.10.2023; принята к публикации 12.12.2023

Информация об авторах

Башкиров Алексей Викторович – д-р техн. наук, проректор по науке и инновациям, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: fabi7@mail.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-0939-722X>

Хорошайлова Марина Владимировна – канд. техн. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет, (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: pmv2205@mail.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-9167-9538>

Демихова Алеся Сергеевна – аспирант, Воронежский государственный технический университет, (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: kibr@vorstu.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2948-3240>

DEVELOPMENT OF A BLIND RECOGNITION ARCHITECTURE FOR LINEAR BLOCK CODING USING A CASCADE NETWORK

A.V. Bashkirov, M.V. Khoroshailova, A.S. Demikhova

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract: this article proposes an architecture for blind recognition of LDPC codes. Most of the coding algorithm for blind recognition of low-density parity checking (LDPC) codes is difficult to apply, and the problem of high temporal complexity and high spatial complexity cannot be solved. The architecture proposed here combines a transformer-based network with a convolutional neural network (CNN). CNN is used for real-time noise suppression, followed by a transformer-based neural network designed to determine the speed and length of LDPC codes. It is assumed that this architecture will be used in the coding scheme for communication channels between unmanned aerial vehicles (UAVs) and users. To train noise-canceling networks and high-performance recognition networks, we create datasets and define loss functions for noise-canceling networks. The simulation results show that this architecture is capable of providing better performance than the standard method, with a lower signal-to-noise ratio (SNR). Compared to existing methods, this approach is more flexible and, therefore, can be quickly applied in the communication channel between the UAV and the user

Key words: coding with blind recognition, low-density code, convolutional neural network, noise reduction, communication channel

Acknowledgement: the work was financially supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the framework of a state project (no. FZGM-2023-0011)

References

1. Perrins E. "FEC systems for aeronautical telemetry", *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, 2013, 2340–2352.
2. Bonvard A., Houcke S., Marazin M., Gautier R. "Order statistics on minimal Euclidean distance for blind linear block code identification", *2018 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, Kansas City, MO, USA, 20–24 May 2018, pp. 1–5.
3. Yu P., Peng H., Li J. "On blind recognition of channel codes within a candidate set", *IEEE Commun. Lett.*, 2016, 20, 736–739.
4. Li L., Huang Z., Liu C., Zhou J., Zhang Y. "Blind Recognition of LDPC Codes Using Convolutional Neural Networks", *2021 IEEE 4th International Conference on Electronics Technology (ICET)*, Chengdu, China, 7–10 May 2021, pp. 696–700.
5. Khoroshailova M.V. "Architecture for stochastic LDPC decoders using the effective crystal area based on FPGA", *The Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2018, vol. 14, no. 1, pp. 95–100.
6. Bashkirov A.V., Khoroshailova M.V., Churakov P.P., Turetskaya E.V. "Development of a QC-LDPC decoder with high bandwidth for 5G wireless radio communication", *Radio Engineering (Radiotekhnika)*, 2022, vol. 86, no. 7, pp. 14–19.
7. Horoshaylova M.V. "Architecture of FPGA based channel coding for 5G wireless network using high-level synthesis", *The Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2018, vol. 14, no. 2, 99–105 pp.

Submitted 18.10.2023; revised 12.12.2023

Information about authors

Alexey V. Bashkirov - Dr. Sc. (Technical), Vice-Rector for Science and Innovation, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: fabi7@mail.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-0939-722X>

Marina V. Horoshaylova – Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: pmv2205@mail.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-9167-9538>

Alesya S. Demikhova - Graduate student, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: kipr@vorstu.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2948-3240>

МОДЕЛИРОВАНИЕ И АНАЛИЗ КОЭФФИЦИЕНТОВ ПРОХОЖДЕНИЯ И ОТРАЖЕНИЯ НА ГРАНИЦЕ РАЗДЕЛА СРЕД РАСПРОСТРАНЕНИЯ РАДИОВОЛН В СИСТЕМАХ СОТОВОЙ СВЯЗИ

И.С. Киреев¹, И.В. Зубарев¹, В.Л. Бурковский¹, А.И. Панина²

¹Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

²АО «Концерн «Созвездие», г. Воронеж, Россия

Аннотация: при разработке систем сотовой связи, а также систем специальной радиосвязи на уровне проектного решения расчет и анализ процессов распространения радиоволн являются передовой задачей, поскольку даст возможность в первом приближении выбрать приемопередающие устройства и ретрансляторы, а также выбрать тип антенн или предъявить требования для разработки данного оборудования. При проектировании систем связи, применяемых в районе с относительно предсказуемым рельефом местности, имеет место использование простых моделей, которые способны дать приближенную оценку эффективности организации связи. В случае, если имеется более сложная область распространения радиоволн, необходимо применять более совершенные методы анализа, учитывая рельеф местности, плотность, высоту застройки. Приводится анализ коэффициентов прохождения и отражения электромагнитных волн на границе раздела сред применительно к системам сотовой связи. Анализ проводится на основе представления векторов напряженности магнитного и электрического поля своими комплексными амплитудами, поскольку данный метод позволяет применять правила работы с комплексными числами, что упрощает задачу. По полученным результатам можно судить о траектории падения электромагнитной волны на поверхность и выбирать оптимальное направление

Ключевые слова: системы сотовой связи, радиосвязь, коэффициент прохождения, коэффициент падения, среда распространения

Введение

Явление отражения радиоволн от поверхности, вдоль которой они распространяются, является наиболее распространенным на практике. Распространение может осуществляться как вдоль поверхности земли, так и в городской застройке, а также внутри зданий при организации связи в помещениях. Отражение волны зависит от электрических и магнитных параметров среды, в которой происходит распространение, а также существенное влияние оказывают геометрические размеры и параметры самого сигнала, а именно – частота и амплитуда электромагнитного колебания, которое переносит энергию. При анализе за основу имеет смысл взять плоскую электромагнитную волну, которая является классическим примером. На рис. 1 представлена плоская электромагнитная волна.

Особенностью данного вида волн является распространение волнового фронта сонаправленно с вектором скорости.

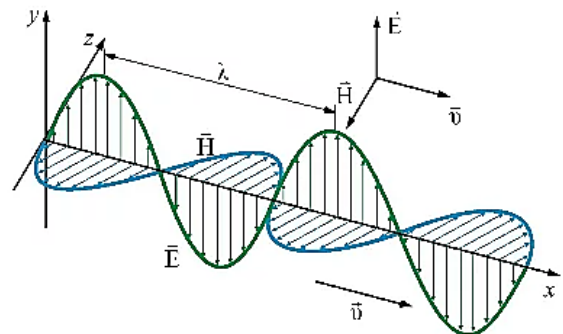


Рис. 1. Плоская электромагнитная волна

Анализ аналитических зависимостей при отражении

На рис. 2 представлена иллюстрация, характеризующая падение плоской волны на плоскую границу. Каждая из сред описывается собственными комплексными диэлектрическими константами ϵ_1 и ϵ_2 , а также магнитными константами μ_1 и μ_2 .

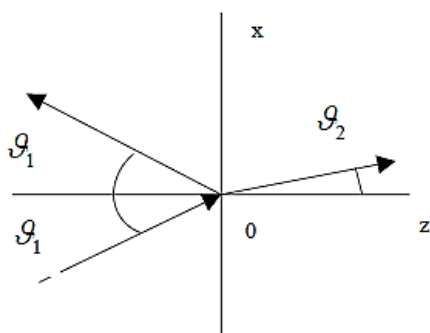


Рис. 2. Иллюстрация процесса на границе двух сред

Наиболее оптимальным способом анализа является рассмотрение отдельно ТЕ-компонент и ТМ-компонент (рис. 3) [1].

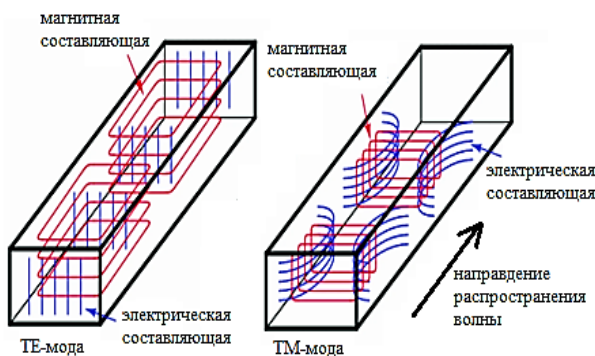


Рис. 3. Положение электрических и магнитных составляющих в ТЕ и ТМ волнах

Рассмотрим векторы декартовой системе координат, в которой ось z имеет направление, перпендикулярное границе раздела сред. Таким образом, суперпозиции векторов напряженностей для падающей и отраженной волны на участке, где $z < 0$ имеют следующий вид [2]

$$E_y^{(1)} = \exp(jk_1 \sin(\vartheta_1)x) \times (\exp(jk_1 \sin(\vartheta_1)z) + R \exp(-jk_1 \sin(\vartheta_1)z)), \quad (1)$$

$$H_x^{(1)} = -\exp(jk_1 \sin(\vartheta_1)x) \frac{\cos(\vartheta_1)}{\zeta_1} \times (-R \exp(-jk_1 \sin(\vartheta_1)z) + \exp(jk_1 \sin(\vartheta_1)z)). \quad (2)$$

где ϑ_1 – угол падения на границу раздела сред распространения;

$k_1 = \omega \sqrt{\varepsilon_1 \varepsilon_0 \mu_1 \mu_0}$ – волновое число, соответствующее первой среде распространения;

R – коэффициент отражения ТЕ-волны.

На участке, где $z > 0$ поле является прошедшей волной и задается следующим выражением

$$E_y^{(2)} = \exp(jk_2 \sin(\vartheta_2)x) \times T \exp(jk_2 \cos(\vartheta_2)z), \quad (3)$$

$$H_x^{(1)} = -\exp(jk_2 \sin(\vartheta_2)x) \frac{\cos(\vartheta_2)}{\zeta_2} \times T \exp(jk_2 \cos(\vartheta_2)z), \quad (4)$$

где ϑ_2 – угол преломления на границе раздела сред распространения;

$k_2 = \omega \sqrt{\varepsilon_2 \varepsilon_0 \mu_2 \mu_0}$ – волновое число, соответствующее второй среде распространения;

T – коэффициент прохождения ТЕ-волны.

Применяя условие непрерывности для тангенциальных составляющих электромагнитного поля на границе двух сред, когда $z = 0$, коэффициент отражения R и прохождения T определяется следующими выражениями

$$R^{TE} = \frac{\zeta_2 \cos(\vartheta_1) - \zeta_1 \cos(\vartheta_2)}{\zeta_2 \cos(\vartheta_1) + \zeta_1 \cos(\vartheta_2)}, \quad (5)$$

$$T^{TE} = \frac{2\zeta_2 \cos(\vartheta_1)}{\zeta_2 \cos(\vartheta_1) + \zeta_1 \cos(\vartheta_2)}. \quad (6)$$

Учитывая связь между углом падения ϑ_1 и углом преломления ϑ_2 на основании закона Снеллиуса можно записать [3]

$$k_1 \sin(\vartheta_1) = k_2 \sin(\vartheta_2). \quad (7)$$

Если условиться, что распространение радиоволн осуществляется вдоль поверхности земли или же в помещении, то магнитные проницаемости можно принять $\mu_1 = \mu_2 = 1$, а также для удобства имеет смысл ввести комплексный показатель преломления, который будет характеризовать преломление луча второй среды распространения относительно первой [4]

$$n^{2'} = \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1}. \quad (8)$$

Учитывая (8), выражения (5) и (6) можно представить в следующем виде

$$R^{TE} = \frac{\cos(\vartheta) - \sqrt{n^{2'} - \sin^2(\vartheta)}}{\cos(\vartheta) + \sqrt{n^{2'} - \sin^2(\vartheta)}}, \quad (9)$$

$$T^{TE} = \frac{2\zeta_2 \cos(\vartheta_1)}{\zeta_2 \cos(\vartheta_1) + \zeta_1 \cos(\vartheta_2)}. \quad (10)$$

Аналогичным образом выглядят выражения для ТМ-компонент коэффициентов прохождения и отражения

$$R^{TM} = \frac{n^{2'} \cos(\vartheta) - \sqrt{n^{2'} - \sin^2(\vartheta)}}{n^{2'} \cos(\vartheta) + \sqrt{n^{2'} - \sin^2(\vartheta)}} \quad (11)$$

$$T^{TM} = \frac{2n^{2'} \cos(\vartheta)}{n^{2'} \cos(\vartheta) + \sqrt{n^{2'} - \sin^2(\vartheta)}} \quad (12)$$

На рис. 4 приведены графики зависимости модулей и аргументов коэффициентов отражения для ТЕ и ТМ-компонент.

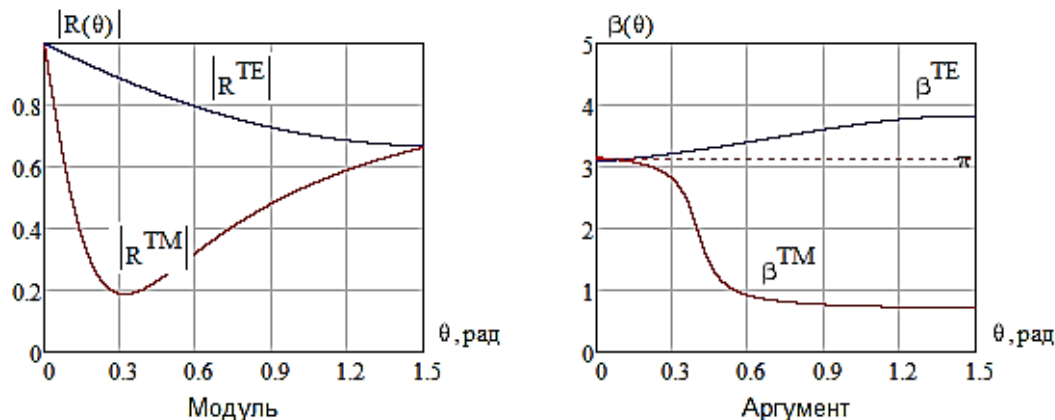


Рис. 4. Модуль и аргумент коэффициентов отражения

Из представленных выражений и полученных графических зависимостей можно сделать следующий вывод – коэффициенты отражения определяются углом падения на границе раздела сред, а также от частоты излучения. Параметры среды также определяют коэффициенты отражения, поскольку у различных видов земной поверхности существенно отличаются параметры диэлектрической проницаемости и удельной проводимости, более подробно об этом можно узнать из источника [5].

Заключение

В рамках проведенной работы были рассмотрены и получены выражения, а также представлены графические зависимости, характеризующие коэффициенты отражения при распространении радиоволн на границе раздела двух сред. Указаны параметры, на которые влияют

коэффициенты отражения, основным из которых является угол, под которым плоская волна падает на объект. Перспективой развития данной тематики является расчет и оценка напряженности электрического поля, излучаемого источником.

Литература

1. Константинов О.В., Бугров В.Е., Колесникова А.Л. Лекции по классической электродинамике: учебное пособие. СПб: Университет ИТМО, 2021. 140 с.
2. Дымович Н.Д. Красюк Н.П. Электродинамика и распространение радиоволн. М.: Радио и связь, 1984. 272 с.
3. Фризюк К.С., Маркина Д.И. Общая физика. Оптика. СПб.: Университет ИТМО, 2020. 57 с.
4. Фейнман Р., Фейнмановские лекции по физике. Т. 5. Физика сплошных сред / Р. Фейнман, Л. Роберт, М. Сендс. М.: Издательство АСТ, 2022. 320 с.
5. Macheret Yu.Ya., Sosnovsky A.V., Glazovsky A.F. Dielectric properties of soils and assessment of their hydrothermal state under snow cover based on radio-echo sounding data. *Led i Sneg. Ice and Snow*. 2022, 62 (2): 203–216.

Поступила 20.09.2023; принята к публикации 28.11.2023

Информация об авторах

Киреев Иван Сергеевич – аспирант, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), тел. +7 (473) 243-77-20, e-mail: vanchez_kireev@mail.ru

Зубарев Игорь Валентинович – канд. техн. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), тел. +7 (473) 243-77-20, e-mail: zubarev71@gmail.com

Бурковский Виктор Леонидович – д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой электропривода, автоматики и управления в технических системах, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), тел. +7 (473) 243-77-20, e-mail: bvl@vorstu.ru

Панина Анна Игоревна – инженер, АО «Концерн «Созвездие» (394018, Россия г. Воронеж, ул. Плехановская, 14), тел. +7(996)450-94-38, e-mail: anizubareva@gmail.com

ANALYSIS OF TRANSMISSION AND REFLECTION COEFFICIENTS AT THE INTERFACE OF RADIO WAVE PROPAGATION MEDIA IN CELLULAR COMMUNICATION SYSTEMS

I.S. Kireev¹, I.V. Zubarev¹, V.L. Burkovsky¹, A.I. Panina²

¹Voronezh state technical University, Voronezh, Russian Federation

²JSC Concern "Sozvezdie", Voronezh, Russia

Abstract: when developing cellular communication systems, as well as special radio communication systems at the level of a design solution, the calculation and analysis of radio wave propagation processes is an advanced task, since it makes it possible to select transceiver devices and repeaters as a first approximation, as well as select the type of antennas or present requirements for the development of this equipment. When designing communication systems used in an area with relatively predictable terrain, simple models are used that can give an approximate assessment of the effectiveness of communication organization. The presented work provides an analysis of the transmission and reflection coefficients of electromagnetic waves at the interface as applied to cellular communication systems. The analysis is carried out on the basis of representing the magnetic and electric field strength vectors with their complex amplitudes, since this method allows the use of rules for working with complex numbers, which simplifies the task. Based on the results obtained, one can judge the trajectory of the electromagnetic wave falling onto the surface and choose the optimal direction

Key words: cellular communication systems, radio communications, transmission coefficient, incidence coefficient, propagation medium.

References

1. Konstantinov O.V., Bugrov V.E., Kolesnikova A.L. "Lectures on classical electrodynamics: textbook" ("Lektsii po klassicheskoy elektrodinamike: uchebnoye posobiye"), St. Petersburg, Universitet ITMO, 2021, 140 p.
2. Dymovich N.D. Krasnyuk N.P. "Electrodynamics and radio wave propagation" ("Elektrodinamika i rasprostraneniye radiovoln"), Moscow, Radio i svyaz, 1984, 272 p.
3. Frizyuk K.S., Markina D.I. "General physics. Optics" ("Obshchaya fizika. Optika"), St. Petersburg, Universitet ITMO, 2020, 57 p.
4. Feynman R., Robert L., Sands M. "Feynman lectures on physics. Vol. 5. Physics of continuous media" (Feynmanovskie lektsii po fizike. Tom 5. Fizika sploshnykh sredstv), Moscow, Izdatelstvo AST, 2022, 320 p.
5. Macheret Yu.Ya., Sosnovsky A.V., Glazovsky A.F. "Dielectric properties of soils and assessment of their hydrothermal state under snow cover based on radio-echo sounding data", *Ice and Snow (Led i Sneg)*, 2022, no. 62 (2), pp. 203–216.

Submitted 20.09.2023; revised 28.11.2023

Information about the authors

Ivan S. Kireev – Graduate Student, the Department of electric drive, automation and control in technical systems, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), tel.: + 7 (473) 243-77-20, e-mail: zubarev71@gmail.com

Igor V. Zubarev – Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, the Department of electric drive, automation and control in technical systems, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), tel.: + 7 (473) 243-77-20, e-mail: zubarev71@gmail.com

Viktor L. Burkovsky – Dr. Sc. (Technical), Professor, the Department of electric drive, automation and control in technical systems, Voronezh State Technical University, (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), tel.: + 7 (473) 243-77-20, e-mail: bvl@vorstu.ru

Anna I. Panina - Engineer, JSC Concern "Sozvezdie" (14 Plekhanovskaya str., Voronezh 394018, Russia), tel.: +7(996)450-94-38, e-mail: anizubareva@gmail.com

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ЗАДАЧ ПОВЫШЕНИЕ ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТИ КАНАЛА УПРАВЛЕНИЯ БЕСПИЛОТНЫХ АВИАЦИОННЫХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА

М.А. Ромащенко, Д.В. Васильченко, Д.А. Пухов

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

Аннотация: проведен обзор современного состояния задач, связанных с повышением помехоустойчивости каналов связи беспилотных авиационных систем (БАС) с применением подходов на базе искусственного интеллекта. Проанализированы основные подходы к применению систем на основе искусственного интеллекта (ИИ) для обнаружения и фильтрации помех, оптимизации маршрутов полетов с учетом электромагнитной обстановки и реакции на непредвиденные возмущения спектра. Были выявлены следующие основные направления исследований, представляющие интерес для использования в БАС: адаптивные системы связи, изменяющие параметры в реальном времени (модуляция, полосы, центральные частоты и др.); оценка угрозы электромагнитных помех на основе сверточных нейронных сетей; введение дополнительных устройств анализа спектра для одновременной оценки информации о состоянии сигнала и отслеживания возникающей искусственной помехи; применение антенных систем с фазированными антенными решетками; применение ИИ для управления многоканальной передачей данных и автоматического переключения между каналами; подавление источников радиопомех группой беспилотных летательных аппаратов с применением ИИ; прогнозирование электромагнитной совместимости для динамической линии передачи данных беспилотного летательного аппарата. Комплексное применение различных подходов, адаптированных под конкретные задачи применения, позволит качественно повысить уровень систем связи в БАС

Ключевые слова: канал связи, электромагнитные помехи, электромагнитная обстановка, искусственный интеллект, беспилотные авиационные системы

Благодарности: работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания (проект № FZGM-2023-0011)

Введение

В современном мире беспилотные авиационные системы стали ключевым элементом во многих сферах деятельности человека, начиная от широкого спектра задач гражданского назначения и заканчивая применением при выполнении специальных задач. Однако, наряду с широкими перспективами, связанными с развитием и применением БАС, существуют и сложности, связанные с качеством и надежностью каналов связи, через которые беспилотные устройства взаимодействуют с окружающей средой и операторами.

На сегодняшний день электромагнитная среда далека от идеальной из-за широкого применения радиоэлектронных устройств (РЭУ), создающих загруженный радиочастотный спектр. Внешние факторы, такие как электромагнитные помехи (ЭМП) и природные источники радиоизлучения на различных участках спектра, ставят под угрозу качество связи, а в некоторых случаях и безопасность передачи данных, утечка которых может привести к различным неблагоприятным последствиям. Решение задач повышения помехо-

устойчивости каналов связи БАС является критически важной для обеспечения надежной и безопасной работы этих систем. В условиях динамической и многозадачной среды, включая разнообразие рельефов местности, климатических условий и сценарии применения, надежная связь с БАС является гарантией полноценного выполнения поставленных задач.

В последние десятилетия искусственный интеллект (ИИ) стал мощным инструментом в задачах повышения помехоустойчивости каналов связи. Использование алгоритмов машинного обучения и техник обработки данных позволяет адаптировать каналы связи в режиме реального времени, учитывая изменяющиеся условия приема-передачи данных и возникающие помехи. Это открывает перспективы для разработки интеллектуальных систем, способных на автоматическую оптимизацию и управление связью, обеспечивая непрерывное взаимодействие между беспилотным летательным аппаратом (БЛА) и операторами.

Для оценки современного состояния задач повышения помехоустойчивости канала управления БАС на основе ИИ был проведен анализ наиболее перспективных научных тенденций развития.

Автоматическое изменение частоты для защиты канала передачи от электромагнитных помех

Для решения проблемы электромагнитных помех в полосе рабочих частот БАС предлагается метод, который заключается в раннем обнаружении возмущений в спектральной области работы канала связи БАС, а затем использовании скачкообразной перестройки частоты [1]. При таком режиме работы анализируется взаимосвязь между дальностью полета и мощностью принимаемого сигнала. В ряд проведенных экспериментов по воздействию ЭМП на линии передачи данных БПЛА было установлено, что пороговое значение потери связи имеет сильную зависимость от частоты помех и рабочего состояния канала передачи данных. Был сделан вывод, что порог будет изменяться в зависимости от расстояния полета.

В соответствии с максимальным и минимальными значениями порога потеря связи определяет динамический диапазон устройства мониторинга ЭМП. Кроме того, сравниваются и анализируются следующие характеристики: порог потери связи, частота ошибок, отношение сигнал-шум (SNR). Результаты испытаний показали, что порог потери связи в качестве критерия прогнозирования ЭМП является оптимальным выбором. При выполнении экспериментов было установлено, что необходимо активировать систему на значении в 6 дБ. Когда уровень внешних ЭМП приблизится к данному значению, система мониторинга сообщит программе управления полетом о необходимости выполнения соответствующих мер, которые могут защитить БПЛА от прерывания работы.

Оценка угрозы электромагнитных помех на основе сверточных нейронных сетей

Учитывая уязвимость канала передачи данных к ЭМП, в [2] предлагается многозадачная сверточная нейронная сеть (CNN) с несколькими входами (MIMT-CNN) для идентификации помеховых воздействий и оценки канала передачи данных БПЛА. Основываясь на многозадачном обучении и объединении нескольких источников информации, сеть извлекает характеристики помеховых воздействий путем ввода визуализированных параметров, спектрограммы частотного содержания сигнала во времени (STFT) и нормализованного распределения плотности, а затем объединяет эти характеристики с помощью параллельных структур, оптимизированных Байесовским алгоритмом.

При изменении категории входных данных для обучения и тестирования нейронной сети было обнаружено, что визуализированные параметры производительности являются основой валидности модели и позволяют исследовать характеристики электромагнитного сигнала с большей точностью. При сравнении с методом, когда каждый вид помехи изучается отдельно, подобный подход может сократить временные затраты и затраты на вычисления. Сеть с наилучшими характеристиками классификации и регрессии может быть получена путем ввода визуализированных параметров производительности, спектрограммы STFT и нормализованного распределения плотности, но временные затраты будут увеличиваться по мере усложнения сети.

Знание типов ЭМП и уровня угрозы способствует адаптации канала передачи данных. Кроме того, данное решение может быть объединено с технологией подавления помех для достижения быстрой и точной перенастройки системы связи БПЛА для восстановления канала при помощи внутренних алгоритмов.

Применение децентрализованной системы фильтрации сигналов спутников

Низкоорбитальные спутники играют важную роль в современных коммуникационных и информационных технологиях, а также в научных исследованиях и многих других областях. На текущий момент распространена система централизованного управления, суть которой заключается в том, что существует один ведущий спутник, исполняющий роль центрального координатора и управляющего элемента. Однако в крупномасштабной спутниковой системе одновременная обработка информации всех подсистем одним абонентом значительно увеличит архитектуру и вычислительную сложность контроллера. Поэтому актуальным является применение систем связи с децентрализованной системой управления.

При формировании крупномасштабной спутниковой группы для управления и отслеживания применяется нейросетевая система управления. При таком подходе информация о состоянии спутниковой команды передается в наземную систему управления (НСУ), далее вычисляются команды управления, а затем НСУ отправляет управляющий сигнал обратно на спутник. Этот метод чаще всего используется при децентрализованном управлении крупномасштабной спутниковой группой. Однако в среде беспроводной сети GCS передаваемый сигнал может подвергаться воздей-

ствию ЭМП. Следовательно, выходная информация спутника и команды управления, полученные спутником, могут быть неверными, что приводит к ухудшению характеристик управления. Для решения этой проблемы предложена схема с использованием наблюдателя, позволяющая исключить влияние неизвестных сигналов на группу спутников [3].

Предложенная схема работает по принципу одновременной оценки информации о состоянии сигнала и отслеживания возникающей искусственной помехи на каждом спутнике. Оценка сигнала исполнительного механизма и датчика описываются двумя не сингулярными сглаженными моделями. Если система наблюдения при оценке передаваемого сигнала обнаруживает помеху, то срабатывают датчик и исполнительный механизм, который способствует усилению передаваемого сигнала и повышению помехоустойчивости системы.

Канал связи с искусственным источником помех

В работе [4] представлена система для повышения качества канала связи на основе создания искусственной помехи. Для улучшения условий распространения сигнала и повышения его мощности большое внимание было уделено применению реконфигурируемой интеллектуальной поверхности. Такие поверхности, которые также можно назвать интеллектуальными отражающими поверхностями, состоят из большого количества недорогих пассивных отражающих элементов и контроллера. Благодаря контроллеру каждый элемент может независимо вносить изменения в амплитуду, фазу и частоту падающего сигнала. Такая система обычно разворачивается между двумя узлами связи и может комбинировать сигналы из разных каналов на узле приема сигнала.

БПЛА, действующий в качестве базовой станции, отправляет информационные сигналы конечному пользователю. Однако зачастую на земле есть источник помех или устройства, осуществляющие перехват сигнала. Поэтому в систему вводится еще один БПЛА с искусственной системой создания помех с фиксированным местоположением, чтобы минимизировать вероятность перехвата сигнала в канале связи.

Принимающий абонент с помощью специализированного программного обеспечения выполняет аппроксимацию гармоник выделяя несущую с управляющим сигналом. Выборка точек аппроксимации производится с применением глубоких нейронных сетей, что позво-

ляет осуществить передачу зашифрованных данных с высокой скоростью. Результаты испытаний показывают, что предложенный алгоритм позволяет достичь более высокого уровня помехоустойчивости канала связи и защитить данные от перехвата.

Увеличение полосы пропускания двухканального приемника

Исследование в [5] показывает влияние увеличения полосы пропускания двухканального приемника на помехоустойчивость приемной системы при низких отношениях сигнал/шум ($C/\Pi = 0...3$). Приведена зависимость вероятности ложных срабатываний от отношения сигнал/шум при различных соотношениях полосы пропускания приемника к несущей частоте сигнала. Был сделан вывод, что уровень шума возрастает с увеличением полосы пропускания приемного устройства, тем самым снижая чувствительность и помехоустойчивость приемной системы при работе с импульсными сигналами. В большинстве практических случаев эта проблема решается путем увеличения отношения сигнал/шум на входе приемного устройства за счет увеличения мощности передатчика и использования линейной фильтрации на приемной стороне.

В качестве дополнительных информационных признаков и идентифицированы были использованы различия в структурах входных процессов, выделяемые с помощью нелинейных преобразователей (фазовые переключатели). Принцип его работы заключался в изменении спектра входного сигнала путем смещения фазы на 180 градусов, когда огибающая проходит через ноль. Исследование доказывает, что фазовые скачки сигнала и шума могут быть использованы в качестве вторичных информационных признаков. Следовательно, во втором канале приемника может быть использован обычный фазовый детектор.

Применение данного решения к приему коротких радиоимпульсов в узкополосных цифровых системах связи и исследование влияния увеличения полосы пропускания двухканального приемника, показало актуальность подхода для повышения помехоустойчивости каналов связи в узкополосных цифровых системах характеризующиеся низким отношением сигнал/шум.

Подавление электромагнитных помех при помощи БАС

Метод, основанный на применении БПЛА

с возможностью интеллектуального излучения помех в воздухе, представлен в работе [6].

Предполагается, что БПЛА обладает информацией о местоположении наземных узлов связи. Далее, используя методы оценки усиления помех и методы кластеризации гетерогенных решений в сочетании с нейронными сетями, определяется на какой узел связи излучаются помехи. Оптимальная стратегия постановки помех может быть выбрана таким образом, чтобы максимизировать эффект от постановки помех при рациональном использовании аппаратных ресурсов. Подавление источников радиопомех БАС позволяет повысить общий уровень вносимых в эфир помех, минимизируя влияние электромагнитных импульсов.

Прогнозирование электромагнитной совместимости для динамической линии передачи данных беспилотного летательного аппарата

В работе [7] создана модель динамической линии передачи данных с учетом расстояния полета и ориентации БПЛА. С увеличением расстояния между БПЛА и наземной станцией управления (НСУ) уровень рабочего сигнала постепенно снижается, при этом уровень помех наоборот увеличивается. При изменении положения БПЛА коэффициент усиления антенны также изменяется из-за влияния степени согласования поляризации между ней и НСУ. В работе представлен новый метод тестирования на электромагнитную совместимость (ЭМС), который использует статический тест вместо динамического летного испытания, основанный на количественной оценке рабочего состояния канала передачи данных. ЭМС канала передачи данных зависит от уровня излучаемого и принимаемого сигнала. Было установлено, что в линейном диапазоне отношение сигнал/шум остается постоянным. Однако в нелинейном диапазоне уровень полезного сигнала постепенно увеличивается, тогда как пороговое значение ЭМС резко падает. В итоге можно провести прогноз по ЭМС канала передачи данных во время динамического полета. Модель динамического канала передачи данных была скорректирована для повышения точности, учитывая влияние БПЛА и других устройств на прием полезного сигнала и ЭМП. Этот подход к оценке ЭМС канала позволяет регулировать мощность канала управления с целью обеспечения качественной связи с БПЛА.

Вывод

Современное состояние задач, связанных с повышением помехоустойчивости каналов управления БАС с использованием ИИ, подчеркивает не только актуальность этой проблемы, но и потенциальные преимущества такого подхода.

Применение ИИ дает возможность адаптировать каналы связи в реальном времени, принимать мгновенные решения на основе данных и условий окружающей среды, а также обнаруживать и преодолевать помехи. Это значительно повышает вероятность выполнения задач БАС в разнообразных условиях эксплуатации, в том числе и в сложной электромагнитной обстановке.

Перспективные исследования в этой области направлены на развитие методов обнаружения и компенсации помех, а также на создание более надежных и помехоустойчивых каналов связи и управления. Развитие БАС и технологий ИИ тесно связано, и их интеграция способствуют созданию более безопасных и эффективных БАС.

Литература

1. Implementation Method of Anti Electromagnetic Interference in Identical and Ad-jacent Frequency for the Data link of UAV / M. Zhao et al. // 2020 IEEE MTT-S International Conference on Numerical Electromagnetic and Multiphysics Modeling and Optimization (NEMO), Hangzhou, China, 2020. Pp. 1-4.
2. EMI Threat Assessment of UAV Data Link Based on Multi-Task CNN / Tong Xu, Y. Chen, Y. Wang, D. Zhang, M. Zhao // Electronics. 2023. 12(7). 1631.
3. Zhang R, Cui J. Application of Convolutional Neural Network in multi-channel Scenario D2D Communication Transmitting Power Control // 2020 International Conference on Computer Vision, Image and Deep Learning (CVIDL), Chongqing, China, 2020. Pp. 668-672.
4. RIS-assisted secure UAV communications with resource allocation and cooperative jamming / J. Guo, L. Yu, Z. Chen, Y. Yao, Z. Wang, Z. Wang, Q. Zhao // IET Commun. 16, 1582–1592 (2022).
5. Ilyin A.G., Khafaga Ali S. Mahdi. The effect of increasing the bandwidth of a two-channel receiver on noise-immunity // T-Comm. 2022. Vol. 16. № 1. Pp. 44 -49. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/the-effect-of-increasing-the-bandwidth-of-a-two-channel-receiver-on-noise-immunity> (дата обращения: 10.10.2023).
6. Luo S., Liu X. UAV Intelligent Approach Jamming Wireless Communication System // 2023 3rd International Conference on Neural Networks, Information and Communication Engineering (NNICE), Guangzhou, China, 2023, Pp. 427-432.
7. Prediction of Electromagnetic Compatibility for Dynamic Datalink of UAV / D. Zhang, E. Cheng, H. Wan, X. Zhou and Y. Chen // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. 2019. Vol. 61. №. 5. Pp. 1474-1482.

Информация об авторах

Ромашенко Михаил Александрович – д-р техн. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, д. 84), e-mail: kivr@vorstu.ru

Васильченко Дмитрий Владимирович – аспирант, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, д. 84), e-mail: Shadow951@bk.ru

Пухов Дмитрий Анатольевич – студент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, д. 84), e-mail: puhov.dm22@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6818-2715>

CURRENT STATE OF THE TASKS INCREASING THE INTERFERENCE IMMUNITY OF RADIO COMMUNICATION CHANNELS BASED ON ARTIFICIAL INTELLIGENCE SYSTEMS

M.A. Romashchenko, D.V. Vasilchenko, D.A. Puhov

Voronezh state technical University, Voronezh, Russia

Abstract: the article provides an overview of the current state of the problems associated with increasing the noise immunity of communication channels of unmanned aircraft systems (UAS) using approaches based on artificial intelligence. The main approaches to the use of systems based on artificial intelligence (AI) for detecting and filtering interference, optimizing flight routes taking into account the electromagnetic environment and the response to unforeseen disturbances of the spectrum are analyzed. The following main areas of research were identified that are of interest for use in BAS: adaptive communication systems that change parameters in real time (modulation, bands, central frequencies, etc.); assessment of the threat of electromagnetic interference based on convolutional neural networks; introduction of additional spectrum analysis devices for simultaneous evaluation of information- information about the state of the signal and tracking of the resulting artificial interference; the use of antenna systems with phased antenna arrays; application of AI to control multichannel data transmission and automatic switching between channels; suppression of radio interference sources by a group of unmanned aerial vehicles using AI; prediction of electromagnetic compatibility for a dynamic data transmission line of an unmanned aerial vehicle. The complex application of various approaches adapted to specific application tasks will allow to qualitatively increase the level of communication systems in the UAS

Key words: communication channel, electromagnetic interference, protection, quality improvement, artificial intelligence, unmanned aircraft systems

Acknowledgement: The work was financially supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the framework of the state project (no. FZGM-2023-0011).

References

1. M. Zhao et al. "Implementation Method of Anti Electromagnetic Interference in Identical and Adjacent Frequency for the Data link of UAV", *2020 IEEE MTT-S International Conference on Numerical Electromagnetic and Multiphysics Modeling and Optimization (NEMO)*, Hangzhou, China, 2020, pp. 1-4, doi: 10.1109/NEMO49486.2020.9343564.
2. Tong Xu, Chen Y., Zhang D. "EMI Threat Assessment of UAV Data Link Based on Multi-Task CNN", *IEEE*, 2023, DOI:10.3390/electronics12071631.
3. Zhang R., Cui J. "Application of Convolutional Neural Network in multi-channel Scenario D2D Communication Transmitting Power Control," *2020 International Conference on Computer Vision, Image and Deep Learning (CVIDL)*, Chongqing, China, 2020, pp. 668-672, doi: 10.1109/CVIDL51233.2020.000-3.
4. Guo J., Yu L., Chen Z., Yao Y., Wang Z., Wang Z., Zhao Q. "RIS-assisted secure UAV communications with resource allocation and cooperative jamming", *IET Commun.* 16, 1582–1592 (2022). <https://doi.org/10.1049/cmu2.12416>.
5. Ilyin A.G., Khafaga Ali S. M. "The effect of increasing the bandwidth of a two-channel receiver on noise-immunity", *T-Comm*, 2022, no. 1, available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/the-effect-of-increasing-the-bandwidth-of-a-two-channel-receiver-on-noise-immunity>.
6. Luo S., Liu X., "UAV Intelligent Approach Jamming Wireless Communication System," *2023 3rd International Conference on Neural Networks, Information and Communication Engineering (NNICE)*, Guangzhou, China, 2023, pp. 427-432, doi: 10.1109/NNICE58320.2023.10105795.
7. Zhang D., Cheng E., Wan H., Zhou X., Chen Y., "Prediction of Electromagnetic Compatibility for Dynamic Datalink of UAV," *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, Oct. 2019, vol. 61, no. 5, pp. 1474-1482, doi: 10.1109/TEM.2018.2867641.

Submitted 20.10.2023; revised 12.12.2023

Information about the authors

Mikhail A. Romashchenko – Dr. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: kivr@vorstu.ru

Dmitriy V. Vasilchenko – Postgraduate Student, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: Shadow951@bk.ru

Pukhov Dmitry A. – Student, Voronezh State Technical University, (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: puhov.dm22@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6818-2715>

АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТЕЙ И МЕТОДИКА МОДЕРНИЗАЦИИ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ, НАВИГАЦИИ И СВЯЗИ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ ПРОМЫШЛЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ НА ПРИМЕРЕ ИЗДЕЛИЙ ФИРМЫ DJI

М.В. Паринов¹, В.В. Ветохин¹, С.М. Фёдоров^{1,2}

¹Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

²Международный институт компьютерных технологий, г. Воронеж, Россия

Аннотация: выполнен анализ систем управления, связи и управления полезной нагрузкой промышленных беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) на примере продукции DJI, показаны их достоинства и недостатки. Рассмотрены наиболее значимые для практического применения варианты полезной нагрузки. Представлены характеристики каналов связи, рассмотрены вопросы защищенности от электромагнитных помех и надежности шифрования передаваемых данных. Описана проблема безопасности, связанная с раскрытием координат летательного аппарата и оператора. Показаны методы и варианты модернизации с целью устранения недостатков. Значительное внимание уделено программным интерфейсам, позволяющим расширить и изменить функциональность БПЛА без вмешательства в микропрограмму летательного аппарата. Выполнен анализ содержания и практической ценности наиболее значимых из них, показаны методики работы с ними. Рассмотрены специальные контроллеры для управления функциями БПЛА, описаны схемотехнические решения и методы их взаимодействия с летательными аппаратами. В частности, рассмотрено создание специального пользовательского контроллера, позволяющего добавлять дополнительный интерфейс на стандартный пульт БПЛА для управления модулем спутниковой навигации и многофункциональными сбросами. По результатам выполненных и опубликованных работ сделаны соответствующие выводы

Ключевые слова: беспилотные летательные аппараты, каналы связи, контроллеры управления полезной нагрузкой, модернизация, программные интерфейсы, защита данных, сбросы, управление навигацией

Благодарности: работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания (проект № FZGM-2023-0011)

Введение

Тенденция текущего развития рынка России, а также отечественных научных и оборонных технологий показывает выраженную актуальность беспилотных авиационных систем (БАС). Одним из наиболее востребованных решений являются коммерческие БПЛА от китайской компании DJI. Однако данные решения имеют ряд значительных недостатков, накладывающих серьезные ограничения на их применение [1,2].

Недостатки рассматриваемых аппаратов следует разделить на две основные категории: проблемы безопасности и ограниченная функциональность стандартных изделий. Первая группа недостатков выражается низкой защищенностью каналов и систем управления стандартных БАС DJI. Проблема заключается как в низкой помехозащищенности канала, так и в простоте неразрешенного получения конфиденциальных данных, а также в легкости подмены сигналов управления с целью несанкцио-

нированного вмешательства в функционирование БАС.

Поэтому использование большинства БПЛА DJI коммерческого назначения во многих случаях небезопасно. Например, их использование в системах безопасности и оборонных задачах недопустимо без внесения существенных изменений в программное обеспечение и конструкцию.

Анализ состояния вопроса

Одной из важнейших проблем безопасности заключается в передаче сведений о нахождении летательного аппарата и оператора по каналам, доступным для сканирования стандартными коммерческими решениями [3]. На рис. 1 показан внешний вид DJI Aeroscope. Соответственно, данная задача может решаться и радиопеленгационным оборудованием военного назначения.

Критичная проблемы безопасности выражена передачей координат местоположения летательного аппарата и оператора в предусмотренных протоколах радиообмена. На рис.

2 показан типовой фрейм, который передается летательными аппаратами DJI коммерческих линеек. Из важных сведений в нем можно обнаружить координаты внешнего пилота (пульта) и самого БПЛА, также присутствует серийный номер и модель аппарата. Посредством Aegroscope или специализированных приемных устройств эти данные легко доступны.



Рис. 1. DJI Aeroscope

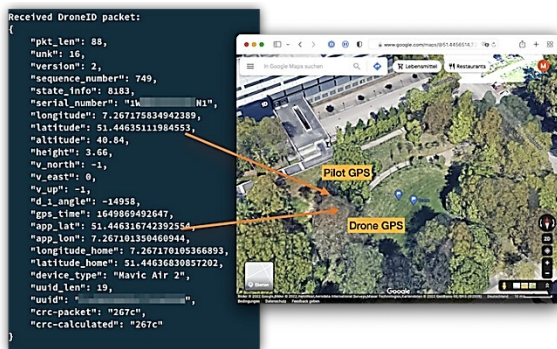


Рис. 2. DJI DroneID фрейм

БПЛА коммерческой линейки DJI используют шифрование передачи данных [4]. Теоретически оно обладает высокой надежностью вследствие использования протокола AES-256,

взлом которого в полевых условиях является сложной задачей. Однако все модели Aegroscope имеют доступ к данным ключам, что открывает информацию. Также эти ключи доступны значительному перечню лиц и организаций. Известны многочисленные заявления об угоне летательных аппаратов DJI, используемых в военных конфликтах, при которых использовалась подмена системы управления.

Следующей важной проблемой является уязвимый радиоканал для передачи команд и видео с камер БПЛА. Большинство рассматриваемых изделий используют одинаковые каналы связи, имеющие следующие параметры [5]:

- нижний частотный диапазон: 2,4–2,483 ГГц;
- верхний частотный диапазон 5500–6100 МГц;
- мощность: до 29,5 дБм (зависит от региона);
- вид модуляции: FSK2, PSK2, OFDM;
- быстродействие режима ППРЧ: 350 – 2 900 ск/сек;
- типовая длительность импульса: 500 мкс – 2,5 мс;
- типовая ширина импульса (типично) – 300 кГц – 2 МГц;
- типовая полоса ППРЧ: 80 МГц;
- типовое количество каналов: 40.

Типовая реализация канала связи коммерческих БАС от DJI использует псевдослучайную перестройку рабочей частоты (ППРЧ). На рис. 3 показана типовая диаграмма спектра БПЛА DJI.

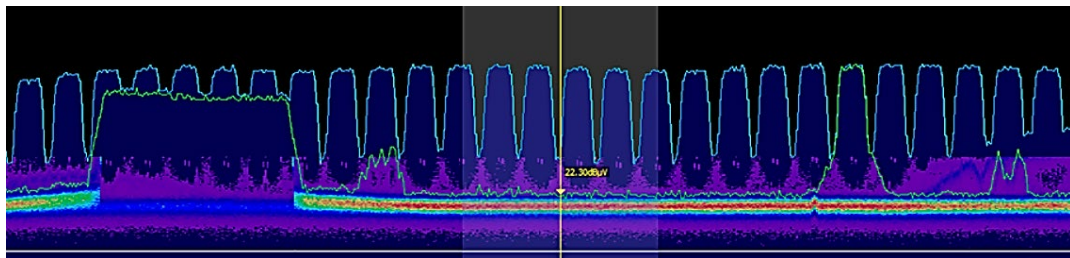


Рис. 3. Диаграмма спектра в режиме накопления канала управления БПЛА DJI коммерческого семейства

Данная технология хорошо зарекомендовала себя для реализации надежной связи в условиях помех. Однако эффективность значительно снижается с падением отношения сигнал/шум [6]. Поэтому при малой мощности передатчика БПЛА (менее 1 Вт) качественная пе-

редача данных невозможна при активном воздействии на аппарат электромагнитными помехами.

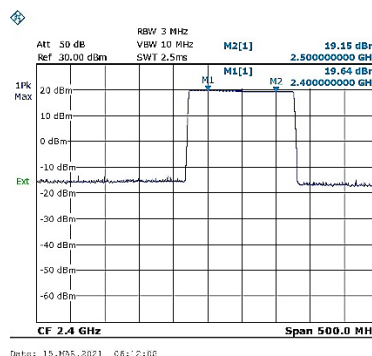
Проблема противодействия интенсивным электромагнитным помехам в настоящее время особенно остра. Она относится не только к пре-

одолению средств радиоэлектронной борьбы (РЭБ) при военном применении изделия, но и при выполнении общегражданских задач. В этом случае угроза для типового канала связи рассматриваемой техники обычно исходит от типовых постановщиков помех, имеющих в открытой продаже.

Например, на рис. 4 показан модуль для подавления Wi-Fi мощностью 1 Вт, частоты которого соответствуют типовому каналу



а) внешний вид



б) спектр выходного сигнала

Рис. 4. Модуль подавления сигнала

Необходимо отметить, что заявленная мощность зависит от региона использования БПЛА. Заявленные 29.5 дБм на практике труднодостижимы. Типовые значения для большинства регионов при использовании официального программного обеспечения (ПО) на 10 дБм ниже.

Значительной проблемой является ограниченный перечень типовой полезной нагрузки БПЛА коммерческого назначения. Для получения визуальных данных в видимом и ИК диапазоне они достаточны. Например, известны тепловизионные камеры для коптеров DJI, обеспечивающие достаточные характеристики для решения оперативно-тактических задач при малой массе и низкой стоимости. Однако номенклатура готовых подвесов и систем управления сбросом для них сильно лимитирована. Одно из лучших решений – сброс фирмы CZI (Китай) [7] показано на рис. 5.



Рис. 5. Сброс фирмы CZI

управлению БАС DJI, и его спектр. При этом в широком доступе имеются модули мощностью до 40 Вт. Широкий диапазон частот выходного сигнала обеспечивают надежное подавление каналов связи БАС. В этом случае летательный аппарат прекращает выполнение типового полетного задания и переходит к аварийной процедуре (посадке, зависанию или возвращению назад по системам спутниковой навигации).

Данное изделие предназначено только для одного сбрасываемого предмета, зажим нестандартной формы требует применения специализированного адаптера. Устройство очень медленно в работе и обладает высокой ценой.

Крупным недостатком является закрытость конструкции и программного обеспечения рассматриваемой техники. Поиск в конструкции заведомо реализованных уязвимостей малопродуктивен. Однако вероятность существования скрытых (в том числе вредоносных функций) в программном обеспечении БПЛА высока, а их выявление крайне затруднительно. Данный факт подтверждает потенциальную небезопасность рассматриваемой техники.

К дополнительным недостаткам также следует отнести недостаточную приспособленность рассматриваемых аппаратов для применения в тяжелых условиях (в том числе боевых). Они требуют аккуратного бережного обращения и недостаточно защищены от грязи, пыли и влаги.

Предложенные решения

Для решения рассмотренных проблем предлагается набор методов. Первая группа направлена на решение проблемы безопасности, связанной со спутниковой навигацией. Она может быть решена несколькими способами:

подменой или искажением реальных координат, физическим отключением или подавлением приемника спутниковой навигации, добавлением модуля коммутации штатного приемника.

Первый метод сложен в реализации и не всегда осуществим. Он требует значительного вмешательства в оригинальное закрытое ПО летательного аппарата. Это трудоемко и не всегда осуществимо. Преимуществом является дополнительные возможности в виде снятия ограничений, связанных с регионом полета (максимальная высота, мощность передатчика и другое). Физическое отключение реализуется отключением шлейфа модуля навигации или повреждением платы на ряде моделей.

Для реализации третьего решения в БПЛА устанавливается плата с полупроводниковым ключом, который коммутирует одну из линий передачи данных (Tx или Rx UART интерфейса) модуля спутниковой навигации. Управление ключом осуществляется посредством программных интерфейсов. Данный метод обеспечивает более эффективный результат, чем физическое отключение, так как при полной потере спутниковой навигации некоторые функции недоступны.

Для управления полезной нагрузкой летательного аппарата существует несколько методов. Простейший из них – использование типовых управляемых элементов БПЛА в качестве промежуточного звена. На рис. 6 показан набор для сброса мелкосерийного производства, устанавливаемый на DJI Mavic. Открытие держателя (сброс) осуществляется при включении штатного фонаря. Для регистрации включения фонаря используется фотодиод. Он показан в виде элемента с белым кабелем.

Недостатками рассматриваемого решения являются низкая скорость управления и ограниченный набор команд. На практике обычно реализуется только одна команда – сброс. Это объясняется наличием только одного доступного фонаря, и медленным временем отклика, что не позволяет кодировать сложные команды посредством световых импульсов.



Рис. 6. Сброс для DJI Mavic

Однако большинство рассматриваемых аппаратов имеют специализированные программные интерфейсы для управления полезной нагрузкой и рядом режимов полета. Далее мы рассмотрим методику и практическую реализацию на примере промышленных квадрокоптеров семейства DJI Matrice.

Представленные далее данные применимы для БПЛА DJI Matrice 30T [8] и DJI Matrice 300 RTK [9] – рис. 7, а, б. Приведенные примеры успешно реализованы на данных изделиях.

Они соответствуют промышленной линейке, что обеспечивает повышенную надежность и возможность эксплуатации в широком диапазоне параметров окружающей среды. Изделия способны нести широкий перечень типовых устройств полезной нагрузки. Наибольший интерес представляют тепловизионные камеры (показана на Matrice 30T на рис. 7, а).



а) DJI Matrice 30T



б) DJI Matrice 300 RTK

Рис. 7. Промышленные квадрокоптеры DJI серии Matrice

Однако наиболее важной опцией с позиции применения является наличие программных интерфейсов, функциональность которых на других линейках БПЛА ограничена. Компания DJI предлагает следующие типы API (application program interface (программный интерфейс)) [10]:

- Cloud API;
- Mobile SDK;
- UX SDK;
- Windows SDK;
- Payload SDK;
- Onboard SDK.

Cloud API – набор программных, средств, обеспечивающий простой доступ к сторонним облачным ресурсам. Mobile SDK и UX SDK используются получения управления с мобильных устройств. Windows SDK предназначен для связки летательного аппарата с компьютером под управлением ОС Windows.

Payload SDK [11] предназначен для управления полезной нагрузкой БПЛА. Позволяет выполнять широкий перечень операций посредством дополнительного контроллера, кото-

рый устанавливается на аппарат. Интерфейс позволяет коммуницировать как с летательным аппаратом, так и наземной станцией. Это позволяет реализовывать любые по сложности алгоритмы управления полезной нагрузкой.

Onboard SDK предназначен для управления полетом ограниченной функциональности, имеет некоторые функции управления полезной нагрузкой и возможности для анализа видео и изображений. Функциональность частично пересекается с Payload SDK. При этом интерфейс не позволяет организовать управление без связи с наземной станцией (пультом),

Рассмотрим DJI Payload SDK (PSDK) подробно. На рис. 8 показана схема возможностей данного интерфейса. Область применения с позиции разработчика включает безопасность, геоинформационные технологии, энергетику, образование и прочее. Однако это не ограничивает его применение указанными сферами. В частности, практический интерес представляют задачи компьютерного зрения, работа с лидами, препрограммируемые режимы полетов.

Application Field	Public Security	Surveying and Mapping	Energy	Education	More
Payload Application	Image Identification	Mapping Camera		Live Stream	
	Searchlight	Gas Detector		Lidar	
	Waypoint Flight	Indoor Flight		More	
Functional Module	Advanced Sensing	Positioning	Time Synchronization		MOP Communication
	Camera Managemen	Gimbal Management	Custom Widget		Power Management
	Data Subscription	Video Stream Transmission	Data Transmission		Firmware Upgrade
	Flight Control	Waypoint Mission	HMS Function		More
	PSDK Lib				
Payload Platform	RTOS	Linux		More	
Drone Platform	DJI M300 RTK	DJI M30 Series		More	

Рис. 8. Схема возможностей Payload SDK

Custom Widget реализует дополнительный интерфейс управления. Он позволяет создавать пользовательские элементы управления на экране приложения стандартного пульта управления БПЛА. На рис. 9 показан пример созданного пользователем интерфейса управления тепловизором посредством Custom Widget. Резуль-

таты изменения состояния любых органов управления может быть получен пользовательским контроллером, на котором работает программа PSDK и использован как для управления стандартными устройствами (например, различные камеры и другие приборы разведки), так и специализированными оригинальными изделия-

ми (например, сбросы боеприпасов и управление модулем включения/отключения навигации).

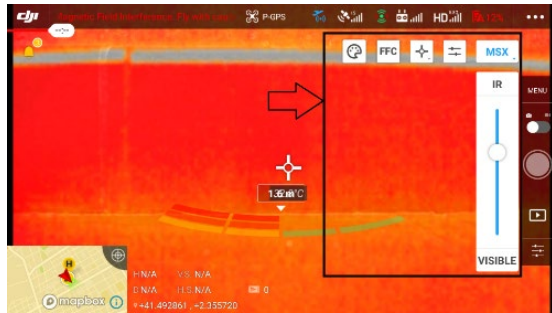


Рис. 9. Пользовательский интерфейс управления тепловизором посредством PSDK Custom Widget

Flight Controller обеспечивает управление летательным аппаратом посредством PSDK. Функциональность модуля достаточно широка. Однако он работоспособен только при наличии связи с пультом управления, что не позволяет его использовать для создания альтернативной системы управления, функционирующей при подавлении радиоканала.

HMS Functions (Health Management System) обеспечивает сбор и передачу практически любых сведений о состоянии элементов БПЛА. Данные, полученные через HMS, могут быть использованы для построения алгоритмов

пользовательского управления аппаратом посредством программных интерфейсов. Например, они могут быть использованы для определения факта подавления радиоканала для перехода на альтернативные методы управления.

Также на рис. 8 показаны платформы, поддерживаемые PSDK. К основным из них относятся RTOS и Linux. RTOS предлагается для применения на маломощных пользовательских контроллерах PSDK. Linux целесообразен для применения на одноплатных компьютерах. Для задач по автоматизации сбросов или управления модулем навигации ресурсы типовых контроллеров на ядре Cortex M4 под управления RTOS полностью достаточны и даже избыточны. Использование одноплатных компьютеров может быть рекомендовано для решения задач компьютерного зрения или для других требовательных к вычислительным мощностям алгоритмов.

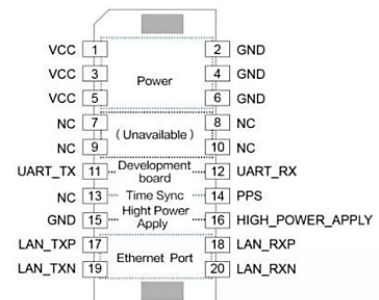
Для сопряжения пользовательского контроллера с рассматриваемыми летательными аппаратами используется специальный интерфейс, сочетающий в себе UART и сеть Ethernet. Механически разъемы выполнены в виде USB Type C. Однако работа в режиме USB не поддерживается.



а) универсальный подвес полезной нагрузки



б) адаптер интерфейса Skyport



б) выходной интерфейс адаптера Skyport

Рис. 10. Средства подключения PSDK через Skyport

На тяжелых мультироторных БПЛА DJI (Matrice 200, 300) для управления полезной нагрузкой (например, камер, тепловизоров, типовых сбросов, аналогично показанным на рис. 5) используется типовой интерфейс Skyport [12]. Он устанавливается на оригинальных подвесах DJI (рис. 10, а). Кабель подвеса подключается в гнездо PSDK летательного аппарата. В составе подвеса присутствует электронный модуль, включающий специальный микро-

контроллер с закрытым ПО, который отвечает за управление электропитанием (посредством программного модуля Power Management PSDK). Прямое подключение к PSDK посредством стандартным средств управления полезной нагрузкой невозможно.

Также полезная нагрузка не подключается напрямую к подвесу DJI. Производителем для этого предусмотрен промежуточный интеллектуальный адаптер, показанный на рис. 7, б. Он

преобразует интерфейс Skuport в типовые интерфейсы, подключаемые к пользовательскому контроллеру. Данный интерфейс имеет закрытый протокол обмена данными и требует обязательной регистрации на сайте производителя, тем самым ограничивая несанкционированную и неучтенную разработку устройств управления PSDK.

Выходной интерфейс адаптера DJI Skuport имеет стандартные средства коммуникации: последовательный интерфейс UART и сеть Ethernet

(рис. 10, в). Также в разъеме присутствуют контакты подключения питания нагрузки, линия управления питанием и синхронизации времени.

На средних и легких промышленных БПЛА DJI для подключения полезной нагрузки применяется OSDK порт. Например, он доступен для серии Matrice 30. В данном случае для подключения пользовательского контроллера используется механический переходной адаптер. Схема подключения показана на рис. 11.

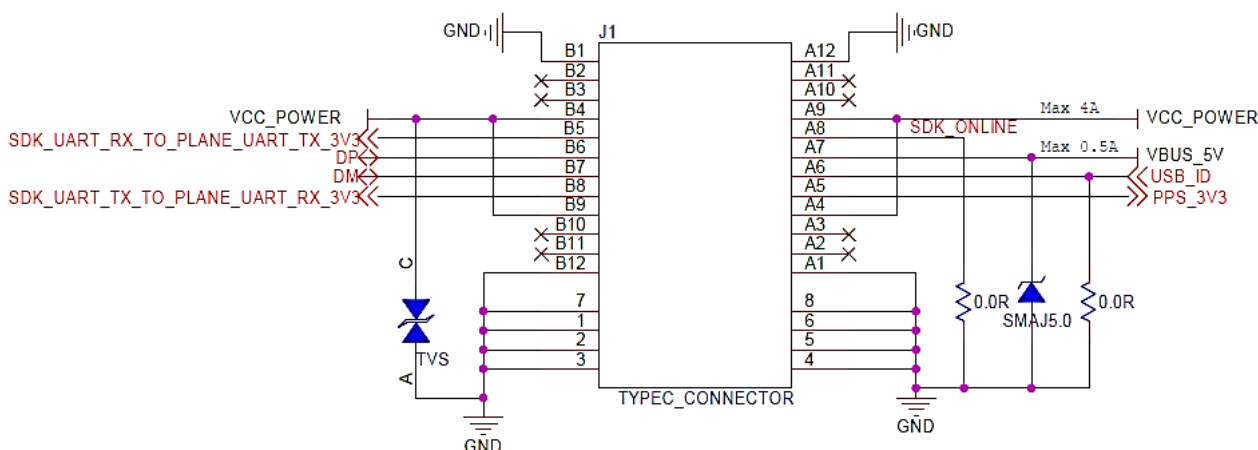


Рис. 11. Интерфейсы OSDK DJI

Адаптер подключения полезной нагрузки OSDK DJI также должен оснащаться модулем питания, обеспечивающим конвертацию напряжения интерфейса (типично 24В) в напряжение необходимое для питания полезной нагрузки и ее контроллера.

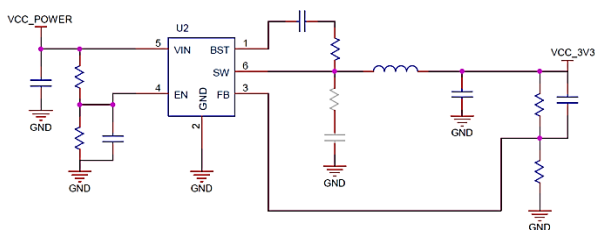


Рис. 12. Модуль питания контроллера DJI OSDK

На рис. 12 показан модуль питания для управляемого посредством PSDK сброса, представленного на рис. 13. Пользовательский контроллер полезной нагрузки и исполнительные механизмы в данном случае рассчитаны на напряжение 3.3 В.

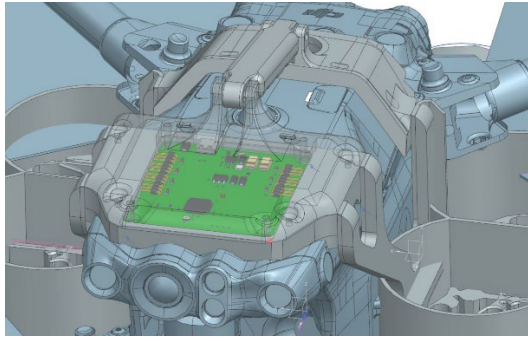
Плата контроллера является универсальной для всей рассмотренной линейки аппаратов. В нашей реализации она располагается в специальном отсеке в верхней части летательного аппара-

та. Трехмерная модель ее размещения показана на рис. 13, а. Плата соединяется с исполнительными механизмами сбросов с помощью кабелей.

Количество и функциональность разъемов платы достаточно для изготовления широкого перечня исполнительных механизмов полезной нагрузки. Функции управления исполнительными устройствами и режим их работы определяются программно и реализуются в процессе программирования пользовательского контроллера. При изменении функциональности модернизируемого БПЛА необходимо разработать новое программное обеспечение и выполнить подключение к соответствующим разъемам. Внесение изменений в схемотехнику не требуется.

На рис. 13, б показан DJI Matrice 30T в процессе модернизации. На него установлены механические элементы сбросов, корпус контроллера с установленной платой и исполнительные механизмы управления сбросами.

Также летательный аппарат обладает функцией оперативного включения/отключения спутниковой навигации посредством программного интерфейса и коммутацией от показанного на рис. 13, а контроллера.



а) 3D-модель размещения пользовательского контроллера на БПЛА

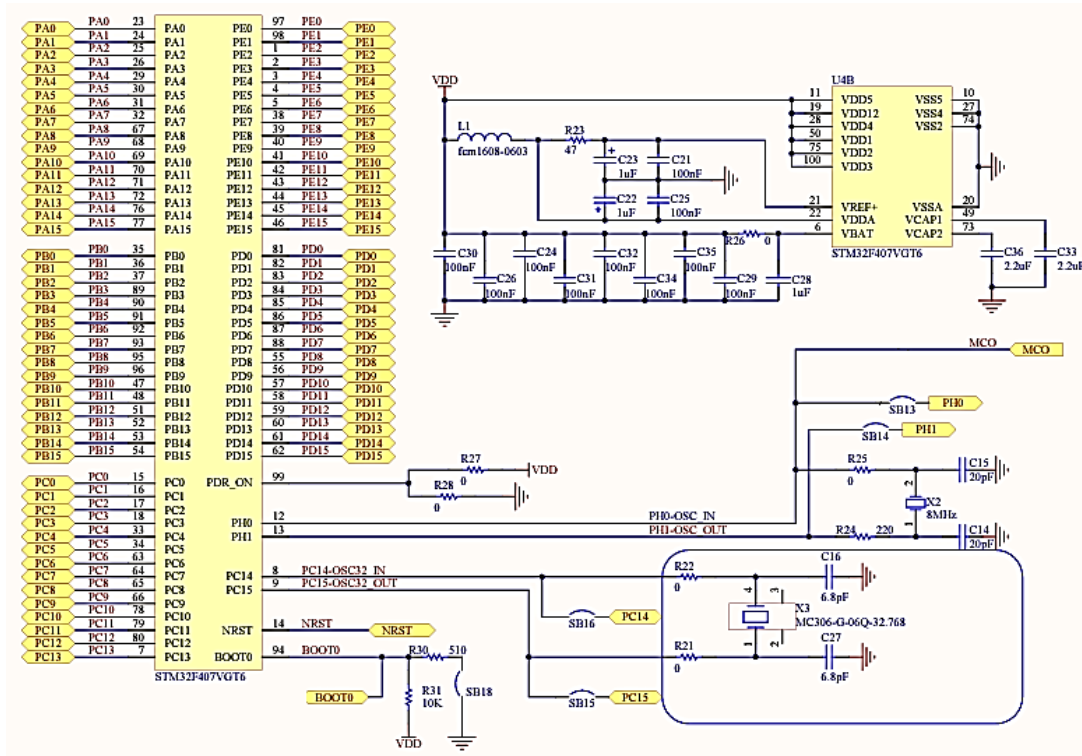


б) БПЛА с установленным сбросом в процессе наладки

Рис. 13. Управляемая полезная нагрузка БПЛА DJI Matrice 30T

Модуль контроллера может быть выполнен на широком перечне аппаратных платформ. Для реализации собственных разработок нами выбраны микроконтроллеры линейки STM32f4. Это объясняется их высокой вычислительной производительностью, включая операции с

плавающей точкой, и богатой периферией. Также важно наличие готовых примеров ПО для PSDK, созданных для STM32f427, что позволяет значительно минимизировать время разработки оригинальных программ.



нальны. Их назначение определяется программно. Для управления исполнительными механизмами полезной нагрузки наиболее востребованы выходы таймеров в режиме широтно-импульсной модуляции (ШИМ), цифровые порты ввода-вывода, входы аналого-цифровых преобразователей (АЦП).

Заключение

По результатам статьи можно сделать следующие выводы: коммерческие летательные аппараты DJI в штатной комплектации могут быть эффективно использованы для ограниченного перечня работ, основная часть которых связана с мониторингом в видимом и ИК диапазоне. Однако анализ характеристик радиоканала показал, что применение рассматриваемых изделий в условиях сильных помех затруднительно.

Выявлена значительная проблема, связанная с безопасностью канала связи. Она заключается в возможности несанкционированного дешифрования данных и получения сведений о местоположении оператора и БПЛА. Предложено частичное решение в виде подмены, полного или частичного блокирования спутниковой навигации.

Рассмотрены возможности по повышению функциональности летательных аппаратов посредством использования стандартных и специализированных полезных нагрузок. Представлены средства управления в виде программных интерфейсов. Предложена аппаратно-программная реализация с анализом возможных реализаций управления.

В качестве практической реализации предложено решение по модернизации DJI Matrice 30T путем оснащения мультифункциональным сбросом. Представлена методика реализации, схемотехнические решения, принципы программного управления.

Литература

1. Казамбаев М.К., Куатов Б.Ж. Некоторые вопросы использования беспилотных летательных аппаратов // Надежность и качество сложных систем. 2017. № 7(20). С. 97-100.
2. Полтавский А.В., Жумабаева А.С., Бикеев Р.Р. Многофункциональные комплексы беспилотных летательных аппаратов: развитие в системе вооружения // Надежность и качество сложных систем. 2016. № 1(13). С. 39-46.
3. DJI AEROSCOPE. Dji.com: оф сайт. URL: <https://www.dji.com/ru/aeroscope> (Дата обращения: 08/08/2023).
4. DJI Безопасность ваших данных — наш приоритет. Dji.com : оф сайт. URL <https://enterprise.dji.com/ru/data-security> (Дата обращения: 08/08/2023).
5. DJI Matrice 300 RTK Dji.com : оф сайт – URL <https://enterprise.dji.com/ru/matrice-300/specs> (Дата обращения: 08/08/2023).
6. Елишев В.В., Почивалов С.Г., Джумков В.В. Помехоустойчивость систем передачи информации с быстрой псевдослучайной перестройкой рабочей частоты в условиях гармонических помех // СПБНТОРЭС: ТРУДЫ ЕЖЕГОДНОЙ НТК. 2020. № 1(75). С. 16-19.
7. CZI TH4 Throwing Hook. dronenerds.com: оф сайт. URL: <https://www.dronenerds.com/products/parts/czi-drone-payloads/czi-th4-throwing-hook-czi-th4-v2-dronenerds.html> (Дата обращения: 08/08/2023).
8. MATRICE 30 SERIES. Dji.com: оф сайт. URL: <https://www.dji.com/ru/matrice-30> (Дата обращения: 08/08/20122).
9. MATRICE 300 RTK. Dji.com: оф. сайт. URL: <https://www.dji.com/ru/matrice-300> (Дата обращения: 08/08/2023).
10. DJI Developer Technologies. Dji.com: оф. сайт. URL: <https://developer.dji.com/> (Дата обращения: 08/08/2023).
11. Payload SDK V3. Dji.com: оф. сайт. URL: <https://developer.dji.com/payload-sdk/> (Дата обращения: 08/08/2023).
12. Enterprise Drone Solutions for a New Generation of Work. Dji.com. URL: <https://www.dji.com/products/enterprise#enterprise-accessories> (Дата обращения: 08/08/2023).
13. STM32F4 Series st.com: оф. сайт. URL: <https://www.st.com/en/microcontrollers-microprocessors/stm32f4-series.html> (Дата обращения: 08/08/2023).

Поступила 06.10.2023; принята к публикации 12.12.2023

Информация об авторах

Паринов Максим Викторович — канд. техн. наук, доцент кафедры компьютерных интеллектуальных технологий проектирования, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), тел. +7(473)243-77-29, e-mail: parmax@mail.ru

Ветохин Валерий Викторович — канд. техн. наук, доцент кафедры компьютерных интеллектуальных технологий проектирования, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), тел. +7(473)243-77-29, e-mail: daiolix@yandex.ru

Фёдоров Сергей Михайлович — канд. техн. наук, доцент кафедры радиоэлектронных устройств и систем, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84); доцент кафедры информационной безопасности и систем связи, Международный институт компьютерных технологий (394026, Россия, г. Воронеж, ул. Солнечная, д. 296), тел. +7(473)243-77-29, e-mail: fedorov_sm@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9027-6163>

ANALYSIS OF THE POSSIBILITIES AND METHODS FOR UPGRADING CONTROL, NAVIGATION AND COMMUNICATION SYSTEMS FOR INDUSTRIAL UNMANNED AERIAL VEHICLES USING THE EXAMPLE OF DJI PRODUCTS

M.V. Parinov¹, V.V. Vetokhin¹, S.M. Fedorov^{1,2}

¹Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

²International Institute of Computer Technologies, Voronezh, Russia

Abstract: the article analyzes the control, communication and payload control systems of industrial unmanned aerial vehicles (UAVs) on the example of DJI products, shows their advantages and disadvantages. The most significant payload variants for practical applications are considered. The characteristics of communication channels are presented, the issues of protection from electromagnetic interference and the reliability of encryption of transmitted data are considered. The security problem associated with the disclosure of the coordinates of the aircraft and the operator is described. Methods and options for modernization are shown in order to eliminate the shortcomings. Considerable attention is paid to software interfaces that allow you to expand and change the functionality of the UAV without interfering with the firmware of the aircraft. The analysis of the content and practical value of the most significant of them is carried out, methods of working with them are shown. Special controllers for controlling UAV functions are considered, schematic solutions and methods of their interaction with aircraft are described. In particular, the creation of a special user controller is considered, which allows adding an additional interface to the standard UAV remote control to control the satellite navigation module and multifunctional resets. According to the results of the performed and published works, the corresponding conclusions were drawn

Key words: unmanned aerial vehicles, communication channels, payload controllers, upgrades, software interfaces, data protection, resets, navigation control

Acknowledgments: the research was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation as a part of the state assignment (project no. FZGM-2023-0011)

References

1. Kazambaev M.K., Kumatov B. Zh. "Some issues regarding the use of unmanned aerial vehicles", *Reliability and quality of complex systems (Nadezhnost i kachestvo slozhnykh sistem)*, 2017, no. 7 (20), pp.97-100.
2. Poltavskij A.V., Zhumabaeva A.S., Bikeev R.R. "Multifunctional complexes of unmanned aerial vehicles: development in the weapon system", *Reliability and quality of complex systems (Nadezhnost i kachestvo slozhnykh sistem)*, 2016, no. 1 (13), pp.39-46.
3. "DJI AEROSCOPE", Dji.com., available at: <https://www.dji.com/ru/aeroscope> (accessed 08.08.2023).
4. "DJI The security of your data is our priority", Dji.com., available at: [enterprise.dji.com /ru/data-security](https://enterprise.dji.com/ru/data-security) (accessed 08.08.2023).
5. "DJI Matrice 300 RTK", Dji.com., available at: enterprise.dji.com/ru/matrice-300/specs (accessed 08.08.2023).
6. Elishev V.V., Pochivalov S.G., Dzhumkov V.V. "Noise immunity of information transmission systems with fast pseudo-random tuning of the operating frequency under conditions of harmonic interference", *proc. of the annual scientific and technical conference (St. Petersburg State Electrotechnical University "LETI")*, 2020, no. 1 (75), pp.16-19.
7. "CZI TH4 Throwing Hook", [dronerds.com.](https://www.dronerds.com/products/parts/czi-drone-payloads/czi-th4-throwing-hook-czi-th4-v2-dronerds.html), available at: <https://www.dronerds.com/products/parts/czi-drone-payloads/czi-th4-throwing-hook-czi-th4-v2-dronerds.html> (accessed 08.08.2023).
8. "MATRICE 30 SERIES", Dji.com., available at: <https://www.dji.com/ru/matrice-30> (accessed 08.08.2023).
9. "MATRICE 300 RTK", Dji.com., available at: <https://www.dji.com/ru/matrice-300> (accessed 08.08.2023).
10. "DJI Developer Technologies", Dji.com., available at: <https://developer.dji.com/> (accessed 08.08.2023).
11. "Payload SDK V3", Dji.com., available at: <https://developer.dji.com/payload-sdk/> (accessed 08.08.2023).
12. "Enterprise Drone Solutions for a New Generation of Work", Dji.com., available at: <https://www.dji.com/products/enterprise#enterprise-accessories> (accessed 08.08.2023).
13. "STM32F4 Series", [st.com.](https://www.st.com/en/microcontrollers-microprocessors/stm32f4-series.html), available at: <https://www.st.com/en/microcontrollers-microprocessors/stm32f4-series.html> (accessed 08.08.2023).

Submitted 06.10.2023; revised 12.12.2023

Information about the authors

Maxim V. Parinov – Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, the Department of Computer Intelligent Design Technologies, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), tel. +7 (473)243-77-29, e-mail: parmax@mail.ru

Valeriy V. Vetokhin – Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, the Department of Computer Intelligent Design Technologies, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), tel. +7 (473)243-77-29, e-mail: da-iolix@yandex.ru

Sergei M. Fedorov – Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Department of Radioelectronic Devices and Systems, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), International Institute of Computer Technologies (29 b Solnechnaya str., Voronezh 39026, Russia), tel.: +7 (473)243-77-29, e-mail: fedorov_sm@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9027-6163>

АНТЕННАЯ РЕШЕТКА ИЗ ДВУХЗАХОДНЫХ СПИРАЛЕЙ АРХИМЕДА, ВОЗБУЖДАЕМЫХ С ПОМОЩЬЮ ШТЫРЕЙ СВЯЗИ, ПОГРУЖЕННЫХ В ПРЯМОУГОЛЬНЫЙ ВОЛНОВОД

Ю.Г. Пастернак¹, В.А. Пендюрин², Д.К. Проскурин¹, К.С. Сафонов¹

¹Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

²Акционерное общество научно-производственное предприятие
«Автоматизированные системы связи», г. Воронеж, Россия

Аннотация: растущий спрос на широкополосные мультимедийные услуги побуждает авиационную отрасль в ближайшем будущем предоставлять услуги двунаправленной бортовой связи. Гражданские самолеты в настоящее время оснащаются терминалами высокоскоростной спутниковой связи. До настоящего времени терминалы спутниковой связи разрабатывались для L- и Ku-диапазонов частот. С учетом тенденций развития технологий широкополосных мультимедийных приложений возникла необходимость использования более высоких частот, в частности, частот Ka-диапазона, где может быть обеспечена требуемая пропускная способность. Исследования показывают, что для бортовой широкополосной спутниковой связи антенная система является одним из ключевых компонентов в конструкции аппаратуры. Из-за ограничений антенн с механическим управлением наиболее многообещающим решением представляется антенная решетка с электронным управлением, использующая цифровое формирование луча. Тем не менее, разработка подобных антенных решеток в Ka-диапазоне сталкивается с высокими требованиями в отношении производительности, интеграции и, что не менее важно, стоимости компонентов. Описан результат исследования антенной решетки, элементы которой запитаны с помощью синфазных и равноамплитудных делителей мощности в волноводном исполнении. Рассмотрены варианты конструкции излучателей; исследована возможность реализации элементов фазированной антенной решетки (ФАР) с использованием различных видов технологии. Проведена оценка потерь мощности в многоканальных волноводных делителях мощности

Ключевые слова: спутниковая связь мобильного и бортового базирования, спираль Архимеда

Благодарности: работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания (проект № FZGM-2023-0011)

Введение

В последние годы наблюдается стремительный рост использования беспилотных летательных аппаратов в гражданской и военной сфере [1]. Вследствие этого появляется необходимость разработки и постоянного совершенствования терминалов высокоскоростной спутниковой связи мобильного и бортового базирования, а также – аппаратуры спутниковой связи с высокой скрытностью функционирования, излучающей сверхширокополосные сигналы, спектральная плотность мощности которых, измеряемая на входе приемных устройств комплексов радиоконтроля, должна быть существенно ниже спектральной плотности мощности шумов, обусловлена следующими обстоятельствами:

— обеспечением надежной и высококачественной связи военных и гражданских пользователей;

— развитием отечественной элементной и технологической базы, импортозамещением;

— потребностью служб спасения в малогабаритных системах передачи и приема информации, доступных по стоимости автомобилистам, строителям, геологам, рыбакам, охотникам, туристам и т.д.;

— необходимостью развития спутниковых систем управления аппаратурой военного и гражданского назначения;

— развитием программы точного земледелия.

Модель антенной решетки

Рассматриваемая антенная система состоит из линейных подрешеток и образует решетку типа «жалюзи», рис. 1. Каждая линейная подрешетка расположена под углом 37.5° относительно зенитного направления для того, чтобы в секторе углов места от 0° до 75° обеспечить наиболее равномерную амплитудную диаграмму направленности и поляризацию, наиболее близкую к правой круговой в полосе частот от 10.95 до 11.7 ГГц.

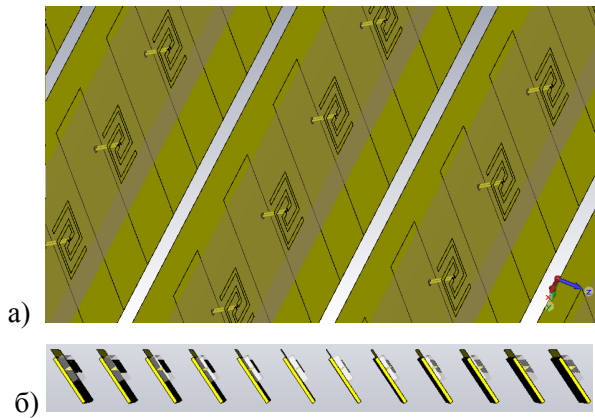


Рис. 1. Модель антенной решетки типа «жалюзи», состоящей из линейных подрешеток с печатными двухзаходными спиралями Архимеда:
а) вид сверху; б) вид сбоку

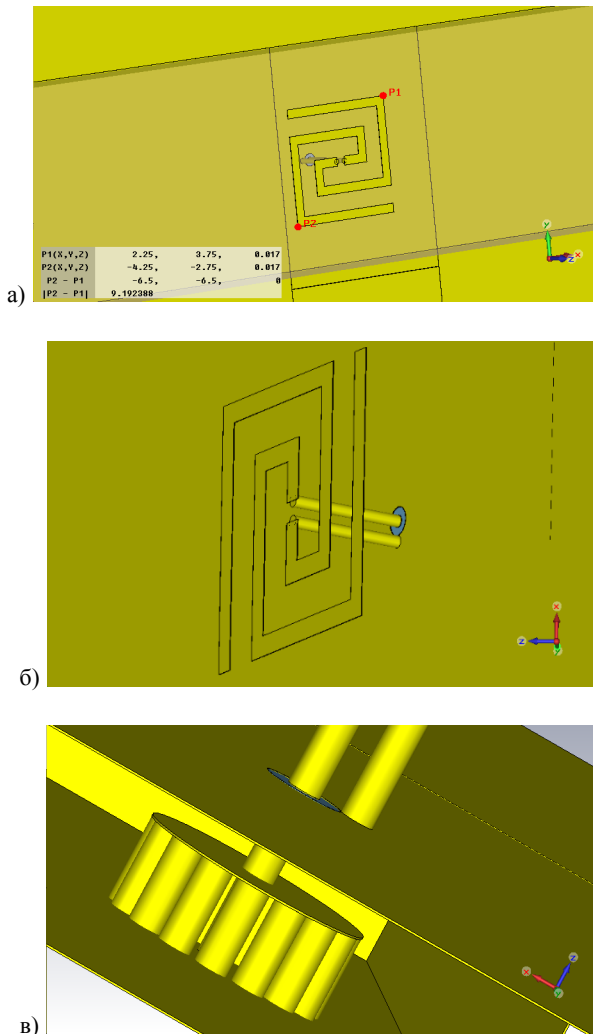


Рис. 2. Конструкция антенного элемента и особенности его запитки с помощью волновода: а) размеры излучающего элемента; б) запитка спирали; в) конструкция перехода от волновода к спирали Архимеда

Конструкция антенного элемента показана на рис. 2. Элементы антенной решетки пред-

ставляют собой спирали Архимеда с проводниками кусочно-линейной формы, одно плечо каждой спирали замкнуто на землю, а другое возбуждается с помощью волноводно-коаксиального перехода, и выполнены на печатной плате из материала Ro 3003 ($\epsilon_r = 3$, $tg(\delta_s) = 0.0013$) толщиной 3.04 мм. Волноводы, запитывающие элементы каждой линейной антенной решетки, запитываются от синфазного равноамплитудного делителя мощности 1:32.

Результаты моделирования

Для уменьшения уровня боковых лепестков диаграммы направленности линейных подрешеток можно использовать в центральной части подрешеток равноамплитудное распределение, а на краях – плавно спадающее.

Характеристики согласования антенного элемента (для волноводного входа с основной волной H_{10}) показаны на рис. 3.

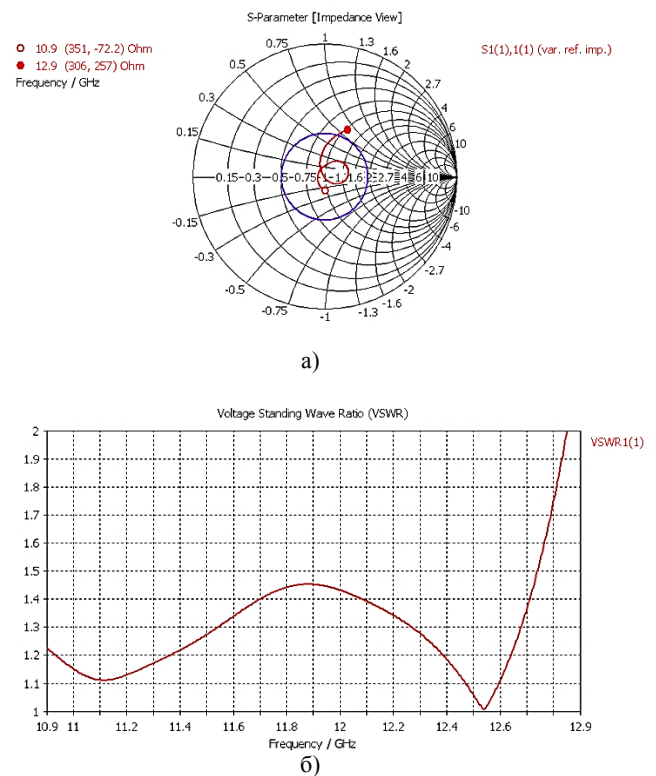


Рис. 3. Характеристики согласования антенного элемента:
а) номограмма Вольперта-Смита;
б) частотная зависимость коэффициента стоячей волны напряжения (КСВН)

Диаграммы направленности антенного элемента, расположенного на фрагменте подложки линейной подрешетки, на основной поляризации (правой круговой) и на кросс-поляризации (ле-

вой круговой) приведены на рис. 4. Видно, что использование несимметричной запитки элементов ФАР от волновода не приводит к существенной несимметрии диаграммы направленности на

основной поляризации (рис. 4, а, в) и не вызывает существенного повышения кросс-поляризованного излучения (рис. 4, б, г).

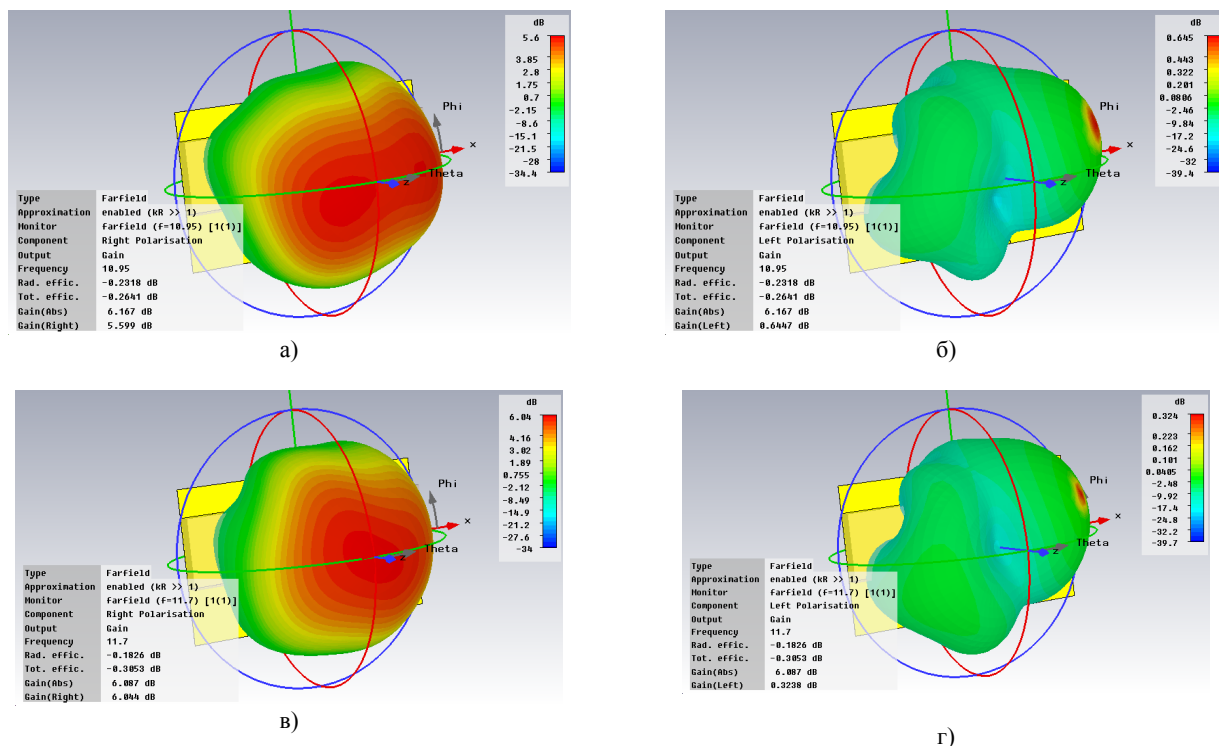


Рис. 4. Диаграммы направленности антенного элемента, расположенного на подложке линейной антенной решетки:

- а) правая круговая поляризация, частота 10.95 ГГц;
 б) левая (паразитная) круговая поляризация, частота 10.95 ГГц; в) правая круговая поляризация, частота 11.7 ГГц;
 г) левая (паразитная) круговая поляризация, частота 11.7 ГГц

Частотные зависимости потерь мощности в материалах антенного элемента, а также суммарных потерь, учитывающих также потери мощности из-за неидеального согласования с фидерной линией, показаны на рис. 5.

Диаграммы направленности линейной антенной решетки из 32 элементов, расположенных с периодом 21 мм, в которой реализовано синфазное и равноамплитудное распределение, показаны на рис. 6.

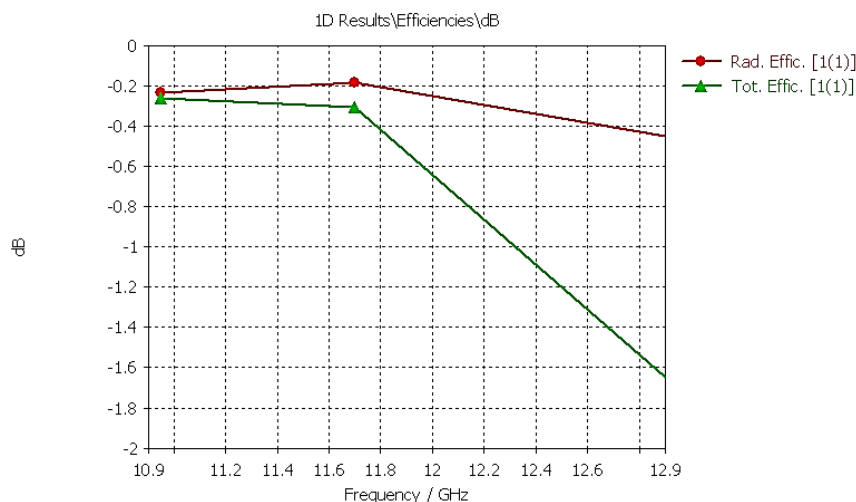
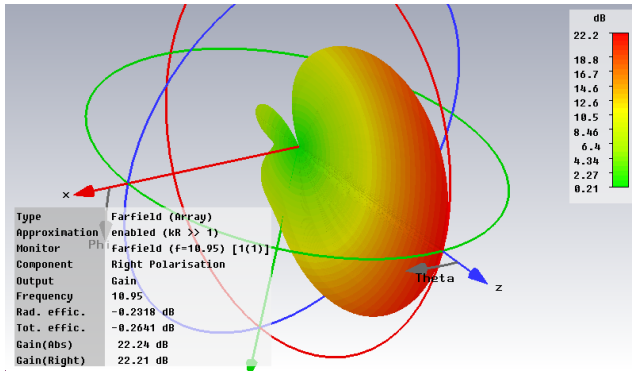
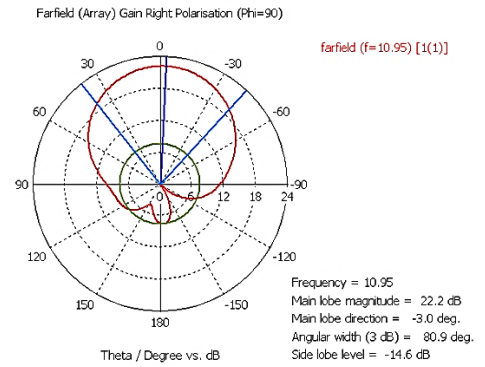


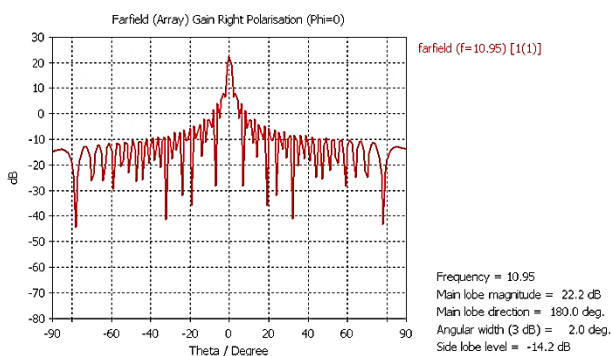
Рис. 5. Частотные зависимости эффективности (дБ) антенного элемента (линия с треугольником – с учетом рассогласования)



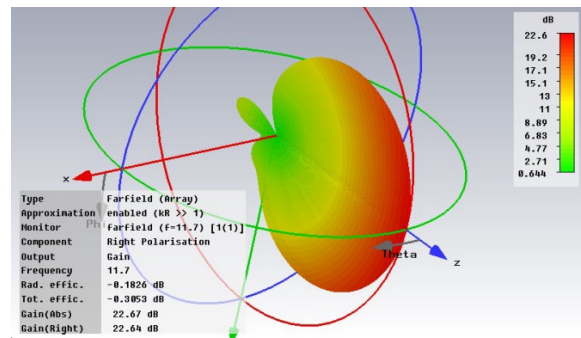
а) диаграмма направленности в объеме линейной антенной решетки из 32 элементов с периодом 21 мм, частота 10.95 ГГц



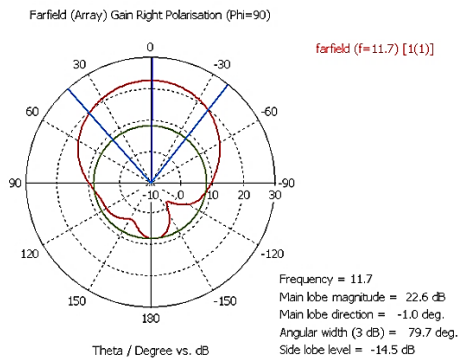
б) диаграмма направленности в угломерной плоскости линейной антенной решетки из 32 элементов с периодом 21 мм, частота 10.95 ГГц



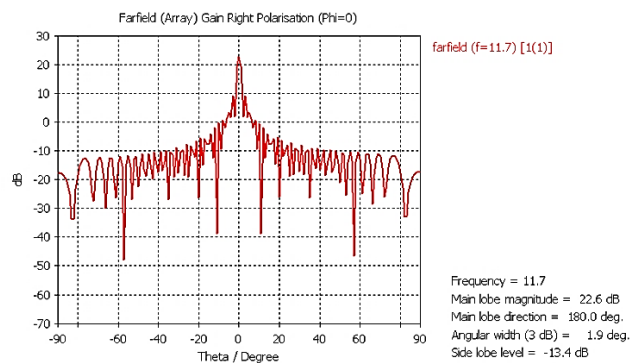
в) диаграмма направленности в азимутальной плоскости линейной антенной решетки из 32 элементов с периодом 21 мм, частота 10.95 ГГц



г) диаграмма направленности в объеме линейной антенной решетки из 32 элементов с периодом 21 мм, частота 11.7 ГГц



д) диаграмма направленности в угломерной плоскости линейной антенной решетки из 32 элементов с периодом 21 мм, частота 11.7 ГГц



е) ДН в азимутальной плоскости линейной антенной решетки из 32 элементов с периодом 21 мм, частота 11.7 ГГц

Рис. 6. Диаграмма направленности линейной антенной решетки из 32 элементов, расположенных с периодом 21 мм

Модель делителя мощности

Синфазная и равноамплитудная ФАР состоящая из 32×32 элементов с размерами 672×672 мм² характеризуется значением коэффициента усиления 35 дБ с учетом потерь 2 дБ в делителе мощности каждой линейной АР 1:32.

Модель делителя мощности, реализованного с использованием характеристик диэлектрической подложки сверхвысокочастотного (СВЧ) -

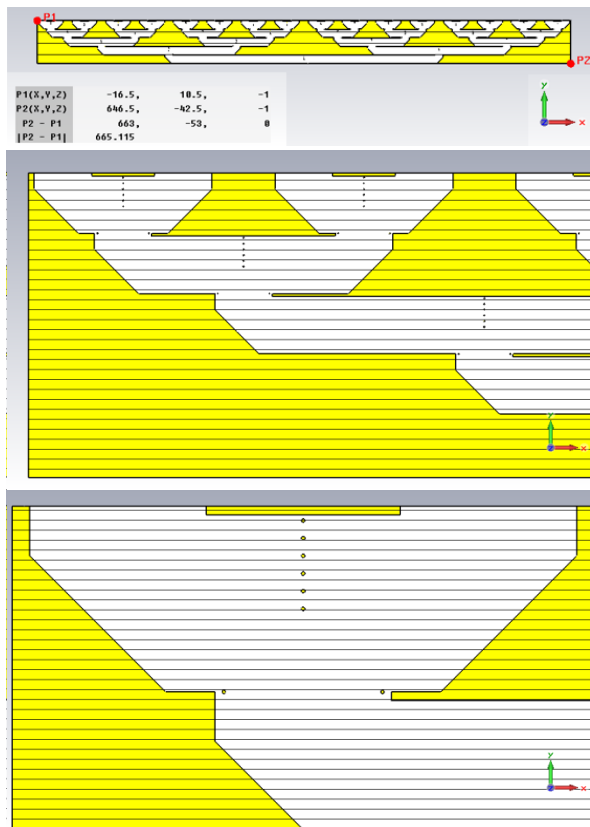
ламината марки Rogers 3003 ($\epsilon_r = 3$, $tg(\delta_s) = 0.0013$) с толщиной 1.52 мм, показана на рис. 7.

На рис. 8 показано распределение мощности в каналах делителя в диапазоне частот 10.95÷11.7 ГГц. Видно, что средние потери в делителе мощности составляют, около 2 дБ – для материала Rogers 3003, и 1 дБ – для полистирола (в идеальном случае отсутствия потерь в

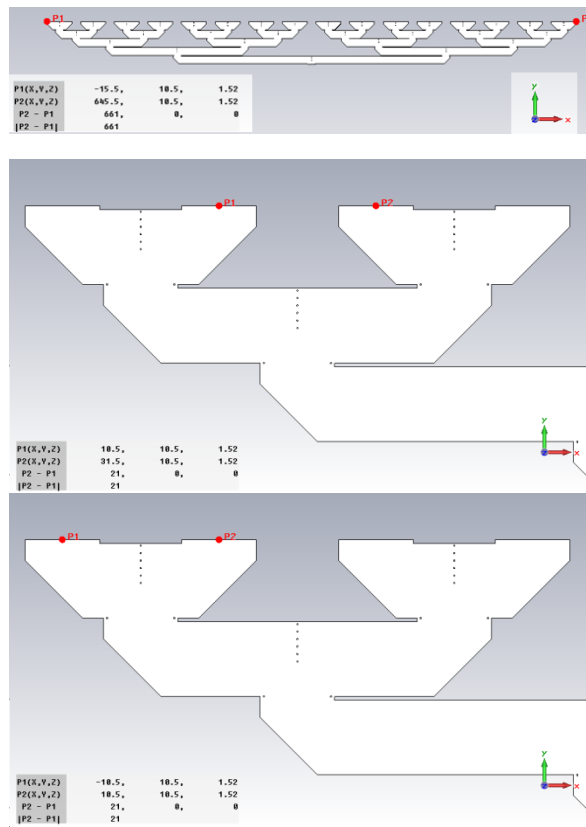
делителя мощности 1:32 должен быть уровень сигнала в каждом из 32 каналов приблизительно -15 дБ относительно входного сигнала).

Входные характеристики для входа делителя мощности 1:32 показаны на рис. 9, 10 для

случаев использования в качестве материала диэлектрической подложки Rogers 3003 и полистирола, соответственно.

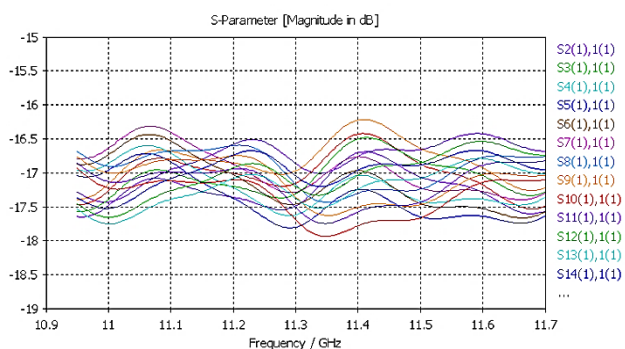


а) продольный разрез волноводного делителя мощности (фрагменты)

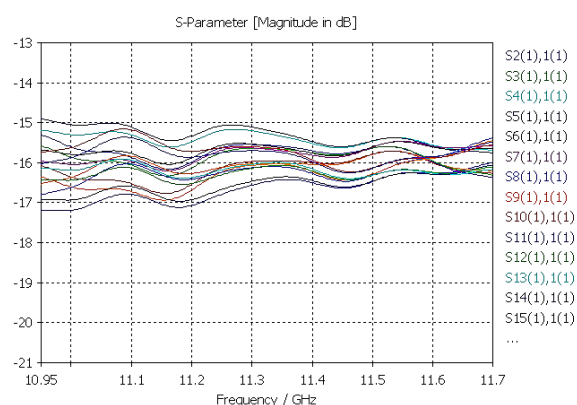


б) разрез диэлектрика заполнения с точками сквозной металлизации (согласующие штыри)

Рис. 7. Конструкция синфазного и равноамплитудного волноводного делителя мощности 1:32



а) подложка Rogers 3003 ($\epsilon_r = 3$, $tg(\delta_s) = 0.0013$) толщиной 1.52 мм



б) подложка из полистирола ($\epsilon_r = 2.6$, $tg(\delta_s) = 0.0002$) толщиной 1.5 мм

Рис. 8. Распределение мощности в каналах делителя мощности 1:32 при использовании в качестве диэлектрика, заполняющего волноводы, материала Rogers 3003 (а) и полистирола (б)

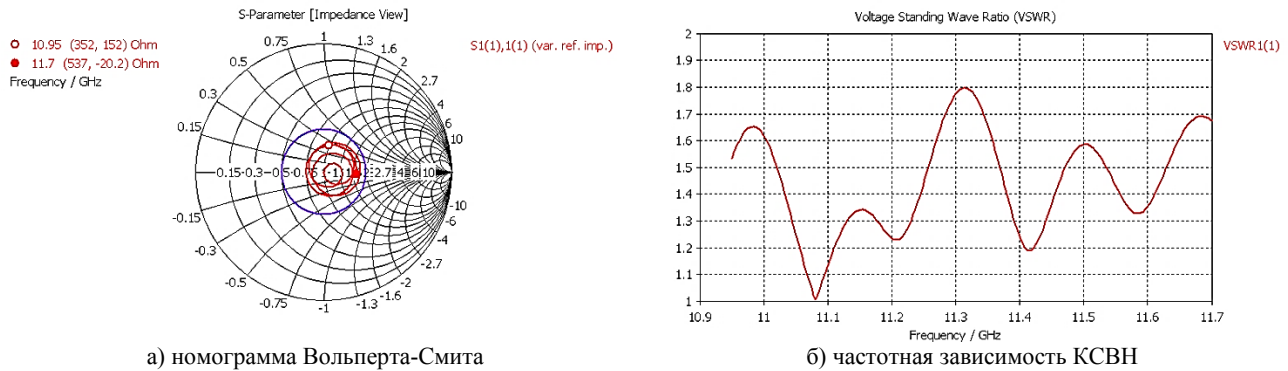


Рис. 9. Входные характеристики для входа делителя мощности 1:32 (материал подложки - Ro 3003)

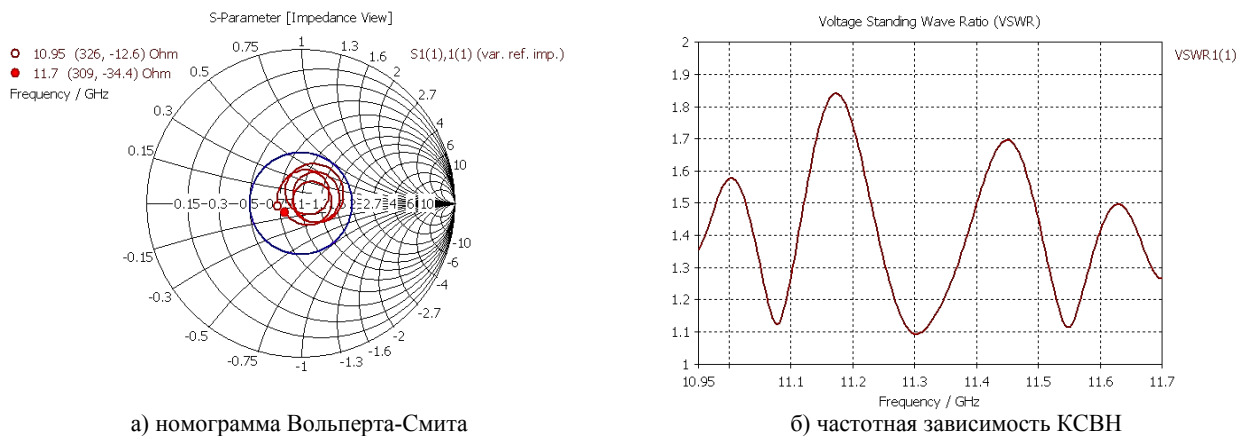


Рис. 10. Входные характеристики входа делителя мощности 1:32 (материал подложки - полистирол)

Заключение

В результате анализа были получены следующие результаты:

— диаграммы направленности на всех частотах расположен строго по нормали к линейной антенной решетке (АР), поэтому можно будет обойтись электронным сканированием только в угло-местной плоскости и механическим – в азимутальной плоскости, обеспечения функционирования ФАР во всей рабочей зоне углов;

— средние потери в делителе мощности составляют, около 2 дБ – для материала Rogers

3003, и 1 дБ – для полистирола (в идеальном случае отсутствия потерь в делителе мощности 1:32 должен быть уровень сигнала в каждом из 32 каналов приблизительно -15 дБ относительно входного сигнала). Также можно сделать вывод о том, что качество согласования антенной системы остается приемлемым для широкополосной приемной радиосистемы.

Литература

1. Просвирина Н.В. Анализ и перспективы развития беспилотных летательных аппаратов. Московский экономический журнал. 2021. № 10. С. 560-575.

Поступила 06.10.2023; принята к публикации 01.12.2023

Информация об авторах

- Пастернак Юрий Геннадьевич** – д-р техн. наук, профессор, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: pasternakug@mail.ru
- Пендюрин Владимир Андреевич** – генеральный директор, АО НПП "Автоматизированные системы связи" (394062, Россия, г. Воронеж, ул. Пешеходная, д. 108, офис 415), e-mail: pva77777@yandex.ru
- Проскурин Дмитрий Константинович** – канд. физ.-мат. наук, доцент, ректор, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: pdk@vgasu.vrn.ru
- Сафонов Кирилл Сергеевич** – младший научный сотрудник, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: Safonov-kirik@mail.ru

ANTENNA ARRAY OF DOUBLE-WAY ARCHIMEDEAN SPIRALS EXCITED USING COMMUNICATION PINS IMMEDIATELY INTO A RECTANGULAR WAVEGUIDE

Yu.G. Pasternak¹, V.A. Pendiurin², D.K. Proskurin¹, K. S. Safonov¹

¹Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

²Joint stock company research and production enterprise "Automated communication systems", Voronezh, Russia

Abstract: the growing demand for broadband multimedia services is encouraging the aviation industry to provide bidirectional in-flight communication services in the near future. Civil aircraft are currently equipped with high-speed satellite communications terminals. Until now, satellite communication terminals have been developed for the L- and Ku-band frequencies. Taking into account the trends in the development of technologies for wide-band multimedia applications, there is a need to use higher frequencies, in particular Ka-band frequencies, where the required throughput can be provided. Research shows that for airborne broadband satellite communications, the antenna system is one of the key components in the hardware design. Due to the limitations of mechanically steered antennas, the most promising solution appears to be an electronically steered antenna array using digital beamforming. However, the development of such Ka-band antenna arrays faces high demands in terms of performance, integration and, last but not least, component cost. The result of a study of an antenna array, the elements of which are powered using in-phase and equal-amplitude power dividers in a waveguide design, is described. Design options for emitters are considered; The possibility of implementing phased array antenna (PAR) elements using various types of technology was investigated. An assessment of power losses in multichannel waveguide power dividers has been carried out

Key words: mobile and airborne satellite communications, Archimedes spiral

Acknowledgments: the research was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation as a part of the state assignment (project no. FZGM-2023-0011)

References

1. Prosvirina N.V. "Analysis and prospects for the development of unmanned aerial vehicles", *Moscow Economic Journal (Moskovskiy ekonomicheskiy zhurnal)*, 2021, no. 10, pp. 560-575.

Submitted 06.10.2023; revised 01.12.2023

Information about the authors

Yuriy G. Pasternak – Dr. Sc. (Technical), Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), pasternakyg@mail.ru

Vladimir A. Pendiurin - General Manager, JSC "Automated Communication Systems" (office 415 108 Peshe-Streletskaya str., Voronezh 394062 Russia), e-mail: pva777777@yandex.ru

Dmitry K. Proskurin – Cand. Sc. (Physical and Mathematical), Associate Professor, Rector of Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: pdk@vgasu.vrn.ru

Kirill S. Safonov – Junior Researcher, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), Safonov-kirik@mail.ru

ПРИМЕНЕНИЕ АЛГОРИТМОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ В ЗАДАЧЕ ОЦЕНКИ БЕСПРОВОДНОГО КАНАЛА СВЯЗИ С OFDM

О.Н. Чирков, А.А. Пирогов

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

Аннотация: рассматривается возможность использования нейронной сети с алгоритмами глубокого обучения для определения и оценки истинных передаваемых данных после распространения по зашумленному каналу при мультиплексировании с ортогональным частотным разделением (OFDM). Оценка канала в системах OFDM обычно реализуется в виде оценки по пилотным символам, при которой известные данные передаются по каналу с заданным периодом. Наиболее распространенной пилотной оценкой канала связи является алгоритм по минимальной среднеквадратичной ошибке (MMSE). Для исследования производительности OFDM и качества связи предложено использовать нейронную сеть. Применены алгоритмы машинного обучения (ML) для оценки беспроводного канала связи. Оценка рассматривается как метод снижения битовых ошибок (BER) и повышения помехоустойчивости сигнала. Программа оценки с ML обучается с использованием данных, полученных в результате моделирования передатчика и приемника OFDM в среде MATLAB. Оценщик получает синфазный и квадратурный коэффициенты пилот-символа с модуляцией 16-QAM, а также оценку частотной характеристики канала с помощью сплайн-интерполяции методом наименьших квадратов. Производительность предложенной оценки с машинным обучением сравнивается с традиционной оценкой канала связи с минимальной среднеквадратичной ошибкой MMSE по зависимостям битовых ошибок (BER) к отношению сигнал/шум (SNR). Результаты исследования показывают, что приведенный оценщик на машинном обучении ML может соответствовать производительности стандартных методов оценки каналов, таких как MMSE, имея сопоставимые зависимости битовой ошибки от отношения сигнал/шум

Ключевые слова: оценка канала, модуляция, машинное обучение, нейронная сеть, OFDM

Благодарности: работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания (проект № FZGM-2023-0011)

Введение

Современные системы беспроводной связи, начиная от Wi-Fi, WLAN, высокоскоростных LTE, 5G и заканчивая системами цифрового телевидения DVB-T/H, используют для передачи данных метод модуляции OFDM - мультиплексирование с ортогональным частотным разделением каналов [1]. Основная идея OFDM заключается в использовании нескольких одинаково разнесенных поднесущих частот для передачи данных. Каждой поднесущей присваивается символ модулированных данных. Типичная передача по беспроводной сети может использовать от 52 до 64 поднесущих в одном символе OFDM. Современные системы мобильной связи 5G, LTE могут использовать до 2048 различных поднесущих для обеспечения высокой производительности, а также для использования многопользовательских схем, где разные поднесущие назначаются разным пользователям.

В ходе распространения по беспроводному каналу сигнал многократно отражается, преломляется и рассеивается. Таким образом, на приемник поступает несколько версий отправленного

сигнала с различными задержками [8]. Помехи многолучевого распространения в системах OFDM устраняются с помощью циклической вставки - префикса. Однако циклический префикс не полностью устраняет искажения сигнала в беспроводном канале, а указанные случаи приводят к ошибкам при передаче данных.

Для борьбы с ошибками передачи данных используют различные методы оценки канала связи, позволяющие выровнять содержимое принимаемой несущей [8]. Цель оценки канала – восстановление переданной формы сигнала.

Основным методом оценки информации о состоянии канала в системах мультиплексирования с ортогональным частотным разделением является использование пилотных символов [1-3]. Существует несколько традиционных алгоритмов оценки, наиболее распространенная – оценка с минимальной среднеквадратичной ошибкой MMSE.

В связи с широким распространением применения нейронных алгоритмов в последнее время проведен ряд исследований по использованию методов машинного обучения для передачи OFDM [5, 6].

В данной статье рассматривается изучение возможности использования в приемнике средства оценки канала на основе машинного обучения (ML). Производительность ML-оценщика будет сравниваться с алгоритмом минимальной среднеквадратичной ошибки (MMSE), с точки

зрения частоты битовых ошибок (BER) как функции отношения сигнал/шум (SNR). Обучающие данные для ML-оценщика будут сгенерированы с использованием симулятора OFDM на базе Matlab. Тесты производительности также будут выполнены в среде Matlab.

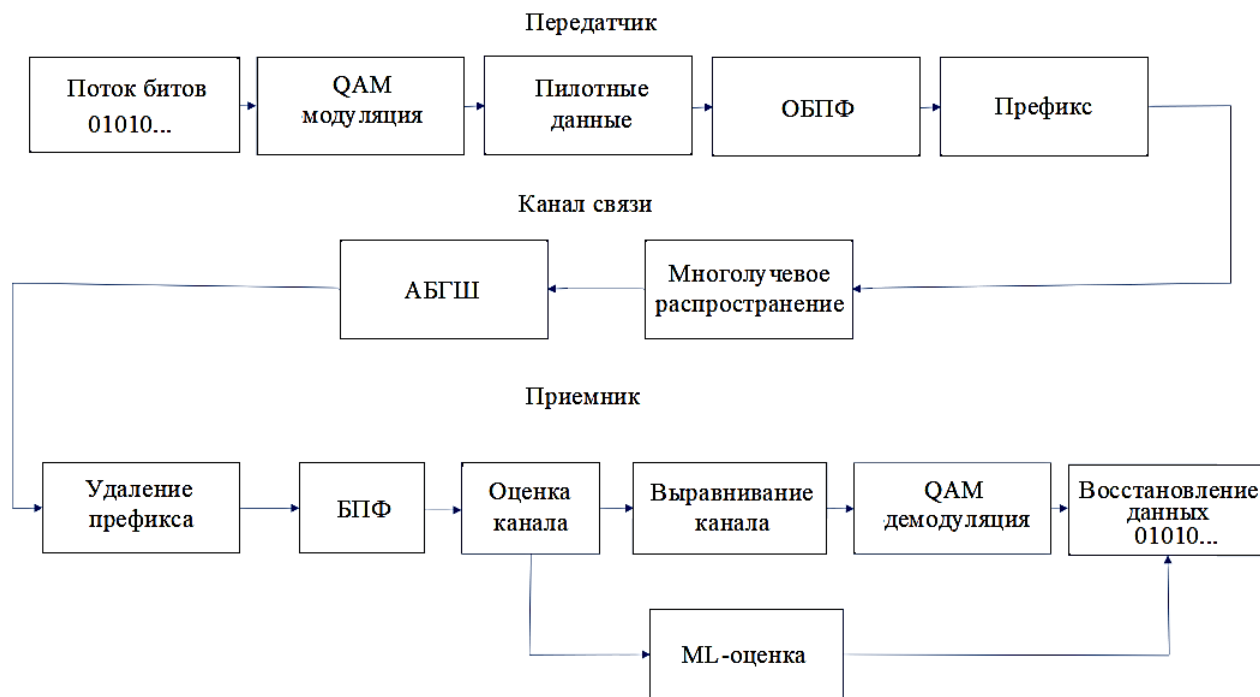


Рис. 1. Блок-схем OFDM системы в Matlab

Модель OFDM в среде Matlab

Блок-схема симулятора представлена на рис. 1, включает в себя основные процессы. Сначала генерируется случайное число битов: $k \cdot N$, где N - количество используемых поднесущих. Затем биты модулируются в символы с квадратурной амплитудной модуляцией (QAM). Далее выделяются пилотные поднесущие одним из традиционных способов [4,7].

Для перехода из частотной области во временную выполняется обратное быстрое преобразование Фурье (ОБПФ). Циклический префикс длины $n \cdot T$ вставляется в начало символа временной области OFDM.

Сигнал проходит через беспроводной канал, который моделируется путем свертки сигнала во временной области с помощью многолучевого канального фильтра и добавления аддитивного белого гауссова шума (АБГШ). Коэффициенты канала рандомизируются для каждого символа OFDM.

Приемник отбрасывает циклический префикс и выполняет быстрое преобразование

Фурье (БПФ), чтобы вернуться в частотную область. Оценка частотной характеристики канала методом наименьших квадратов выполняется на контрольных частотах. Затем эта оценка сплайн-интерполируется по всему каналу, и полученные символы выравниваются с использованием алгоритмов MMSE.

Симулятор вызывает скрипт на Python, который взаимодействует с нейронной сетью. Нейронная сеть выполняет оценку канала, выравнивание и демодуляцию символов.

Символы демодулируются, преобразуются обратно в биты и вычисляется количество битовых ошибок по диаграмме BER/SNR. Диаграмму можно использовать для сравнения эффективности различных методов оценки канала.

Нейронная сеть

Для машинного обучения использована нейронная сеть прямого действия - простейший вид сети глубокого обучения. Каждый персептрон состоит из входных синапсов, функции суммирования и функции активации. Персеп-

трон получает входные данные от предыдущих персептронов.

Затем эти данные умножаются на соответствующий вес и суммируются. К сумме добавляется дополнительный регулируемый коэффициент смещения b . Затем сумма вводится в функцию активации, которая определяет выходные данные персептрона. Сеть классифицирует свои входные данные на основе того, какой выходной персептрон будет иметь наибольшее значение активации.

Предложенный метод оценки канала с применением машинного обучения

Предлагаемый ML-оценщик представляет собой нейронную сеть прямого действия, состоящую из одного скрытого слоя шириной 64 и выходного слоя размером 16. Функции активации (1), функцией потерь (2), скорость обучения установлена равной 0,001. Обучающие данные были сгенерированы с помощью симулятора OFDM. Входными данными сети являются принятые квадратурные и синфазные компоненты QAM-модуляции, а также интерполированная оценка канала методом наименьших квадратов. Сеть обучена классифицировать десятичное представление отправленного символа в кодировке серого на основе входных данных. На рис. 2 приведен пример тестовых данных, используемых при обучении для оценки ML.

	1	2	3	4	5
Variables - test_data_8pilots					
test_data_8pilots					
17280x5 double					
	1 ↓	2 ↓	3 ↓	4 ↓	5 ↓
1	-0.2601	-0.1805	-0.2322	0.0420	8
2	-0.3343	0.3426	-0.4641	0.1578	10
3	0.4078	0.1069	-0.6464	0.2696	3
4	-0.5464	-0.0408	-0.7829	0.3771	9

Рис. 2. Данные, используемые при обучении для ML оценки: 1) Синфазный компонент принятого символа (вход); 2) Квадратурная составляющая полученного символа (вход); 3) Реальная составляющая оценки (входные данные); 4) Комплексный компонент оценки (входные данные); 5) Десятичное представление отправленного символа (выход)

Созданы модели для 8 и для 16 пилотов в обозначении OFDM. 8-пилотная модель была обучена с использованием 2682 выборок символов OFDM в диапазоне SNR от 25 до 30. 16-пилотная модель была обучена с использованием 15630 выборок символов OFDM, также в диапазоне SNR от 25 до 30. Обе модели были протестированы данными из 270 символов OFDM в диапазоне SNR от 1 до 30.

Результаты моделирования

Эксперименты были проведены в среде Matlab 2020. Оценщик минимальной средне-квадратичной ошибки MMSE реализован на языке Matlab, а оценщик машинного обучения ML написан на языке Python с использованием библиотек TensorFlow. При выполнении оценки канала код Matlab вызывает скрипт Python, который взаимодействует с оценщиком ML.

Эксперименты проводились на симуляторе OFDM путем увеличения SNR в диапазоне [1, 30] и отправки 10^5 бит, или 446 символов OFDM, на итерацию. После каждого успешно отправленного символа OFDM вычислялось количество битовых ошибок для каждого метода оценки и отслеживалось их общее количество. На основе полученных данных была сгенерирована диаграмма BER/SNR. Из диаграммы можно сравнить производительность каждого оценщика. Были проведены два эксперимента, в которых количество пилотных поднесущих сначала было установлено равным 8, а затем 16. Порядок модуляции m-QAM – 16, количество поднесущих - 64. Модель предполагает, что циклический префикс способен полностью покрыть разброс задержки в канале.

Результаты показывают, что с 8 пилотными поднесущими предлагаемый ML-оценщик может соответствовать производительности традиционных методов оценки ZF и MMSE. Графики битовой ошибки близки друг к другу, и все они находятся в диапазоне 10^{-1} BER при высоком SNR. Общие результаты для 8 пилотных поднесущих показаны на рис. 3.

Для случая 16 пилотных поднесущих ML-оценщик аналогично достигает тех же значений BER при том же SNR, что и традиционные методы, результаты показаны на рис. 4.

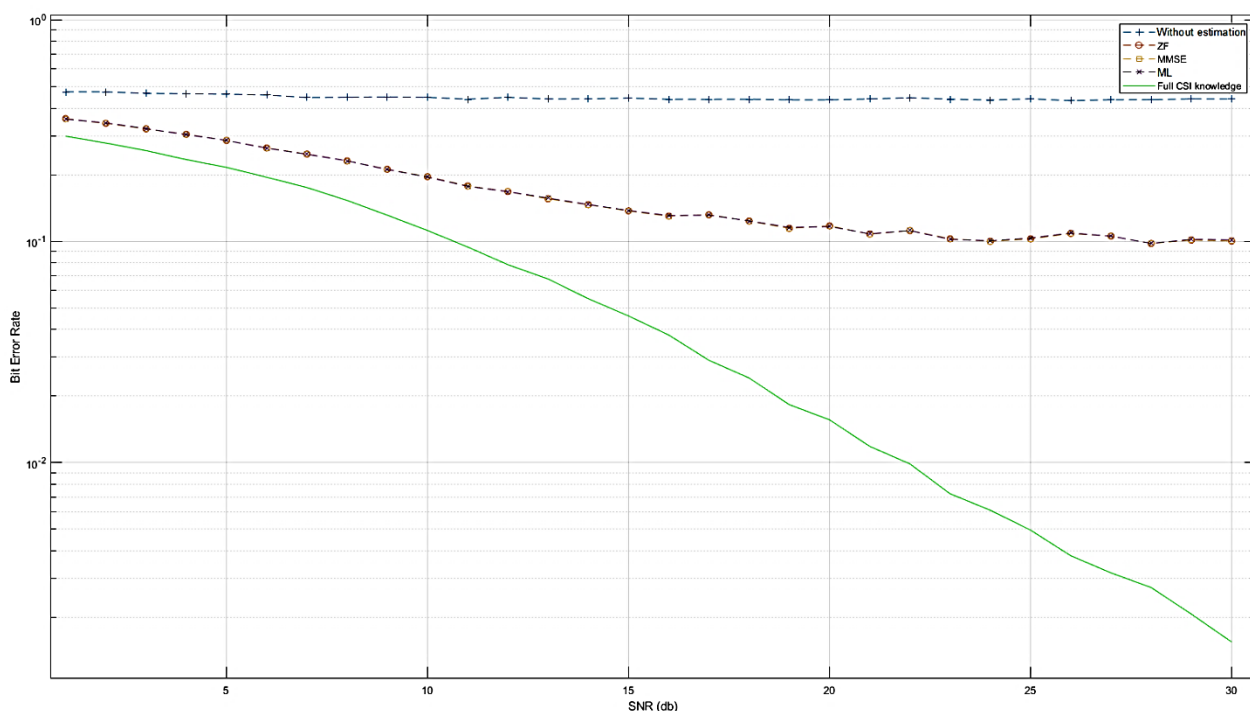


Рис. 3. Диаграмма BER/SNR для 8 пилотных поднесущих

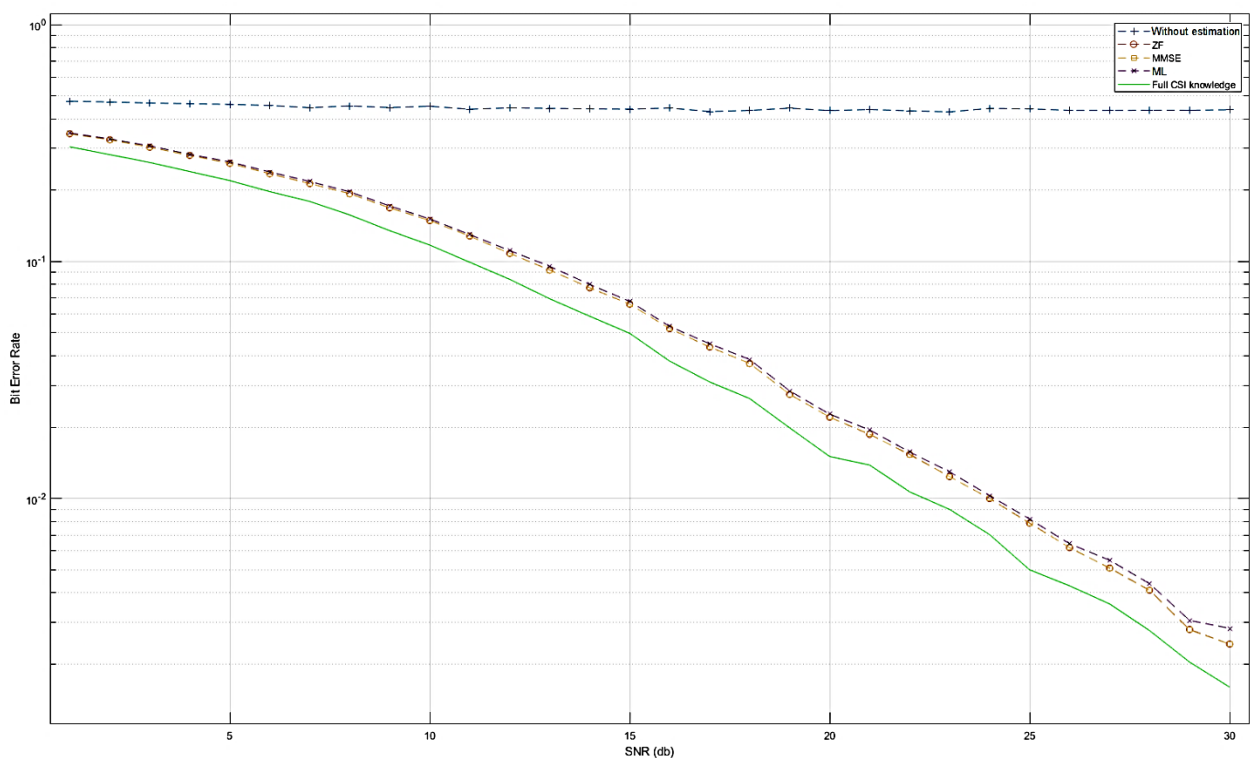


Рис. 4. Диаграмма BER/SNR для 16 пилотных поднесущих

Заключение

В статье исследована возможность использования машинного обучения при оценке и выравнивании каналов связи с OFDM модуляцией.

Данный сценарий был описан в симуляторе OFDM в Matlab, и представляет собой передачу данных по беспроводной сети с некоторыми многолучевыми элементами, при этом одновременно передается только один символ OFDM.

Показано, что предлагаемый ML-оценщик с машинным обучением работает не хуже, чем традиционные методы, основанные на ZF и MMSE, создавая аналогичную кривую BER/SNR. ML-оценщик имеет преимущество: он выдает отправленные символы напрямую, эффективно выполняя демодуляцию.

Таким образом, можно сделать вывод что предложенный метод оценки на нейронной сети с глубоким обучением может применяться в задачах помехоустойчивой передачи данных по зашумленному каналу с OFDM.

Модель можно улучшить, используя одномерные сверточные слои для более высокого разрешения выделения признаков или преобразовав ее в рекуррентную нейронную сеть.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания (проект № FZGM-2023-0011).

Литература

1. Пилотная оценка канала радиосвязи в MIMO-OFDM системах / О.Н. Чирков, М.А. Ромашенко,

И.С. Бобылкин [и др.] // Труды международного симпозиума «Надежность и качество». 2019. Т. 2. С. 87-90.

2. Чирков О.Н. Эффективный алгоритм динамического распространения пилот-сигналов для оценки канала радиосвязи в многоантенных системах MIMO с ортогональным частотным уплотнением OFDM // Радиотехника. 2019. Т. 83. № 6 (8). С. 163-168.

3. Чирков О.Н. Актуальные подходы к оценке канала радиосвязи в системе подвижных абонентов с высокой скоростью перемещения // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2019. Т. 15. № 6. С. 89-93.

4. Чирков О.Н., Ромашенко М.А., Бобылкин И.С. Эффективный метод моделирования систем беспроводной связи // Радиотехника. 2023. Т. 87. № 8. С. 110-115.

5. Performance Evaluation of Machine Learning-Based Channel Equalization Techniques: New Trends and Challenges, 2022. / H. Shahzad, T. Noshaba, A. N. Rizwan, U. R. Ateeq, K.A.K. Mohammed // Journal of Sensors, vol. 2022.

6. Ye H., Li Y. G., Juang F. B-H. Power of Deep Learning for Channel Estimation and Signal Detection in OFDM Systems, 2017.

7. Чирков О.Н. Прямое формирование OFDM сигналов // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2012. Т. 8. № 5. С. 54-56.

8. Чирков О.Н. Повышение помехоустойчивости высокоскоростной беспроводной системы обмена информации WI-FI // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2011. Т. 7. № 3. С. 66-67.

Поступила 30.10.2023; принята к публикации 12.12.2023

Информация об авторах

Чирков Олег Николаевич - старший преподаватель, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: chir_oleg@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2250-2100>

Пирогов Александр Александрович – канд. техн. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: pirogov.alx@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5105-0505>

APPLICATION OF MACHINE LEARNING ALGORITHMS IN THE TASK OF EVALUATING A WIRELESS COMMUNICATION CHANNEL WITH OFDM

O.N. Chirkov, A.A. Pirogov

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract: the article discusses the possibility of using a neural network with deep learning algorithms to determine and evaluate the true transmitted data after propagation over a noisy channel during multiplexing with orthogonal frequency division (OFDM). Channel evaluation in OFDM systems is usually implemented in the form of evaluation by pilot symbols, in which known data is transmitted over the channel with a specified period. The most common pilot evaluation of the communication channel is the minimum standard error (MMSE) algorithm. To study OFDM performance and communication quality, it is proposed to use a neural network. Machine learning (ML) algorithms have been applied to evaluate the wireless communication channel. Evaluation is considered as a method of reducing bit errors (BER) and increasing the noise immunity of the signal. The evaluation program with ML is trained using data obtained from the simulation of the OFDM transmitter and receiver in the MATLAB environment. The estimator receives the common-mode and quadrature coefficients of the pilot symbol with 16-QAM modulation, as well as an estimate of the frequency response of the channel using spline interpolation by the least squares method. The performance of the proposed evaluation with machine learning is compared with the traditional evaluation of a communication channel with a minimum standard error MMSE by the dependencies of bit errors (BER) to the signal-to-noise ratio (SNR) The results of the study show that the given ML machine learning estimator can match the performance of standard channel evaluation methods such as MMSE, having comparable bit error dependencies from the signal-to-noise ratio

Key words: channel estimation, modulation, machine learning, neural network, OFDM

Acknowledgment: the work was financially supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the framework of a state project (no. FZGM-2023-0011)

References

1. Chirkov O.N., Romashchenko M.A., Bobylkin I.S. et al. "Pilot evaluation of the radio communication channel in MIMO-OFDM systems", *Proceedings of the International symposium "Reliability and quality" ("Trudy mezhdunarodnogo simpoziuma «Nadezhnost i kachestvo»")*, 2019, vol. 2, pp. 87-90.
2. Chirkov O.N. "Effective algorithm of dynamic propagation of pilot signals for evaluation of a radio communication channel in multi-antenna MIMO systems with orthogonal frequency compaction OFDM", *Radio Engineering (Radiotekhnika)*, 2019, vol. 83, no. 6 (8), pp. 163-168.
3. Chirkov O.N. "Actual approaches to the evaluation of the radio communication channel in the system of mobile subscribers with high speed of movement", *The Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2019, vol. 15, no. 6, pp. 89-93.
4. Chirkov O.N., Romashchenko M.A., Bobylkin I.S. "An effective method for modeling wireless communication systems", *Radio Engineering (Radiotekhnika)*, 2023, vol. 87, no. 8, pp. 110-115.
5. Shahzad H., Noshaba T., Rizwan A. N., Ateeq U.R., Mohammed K.A.K. "Performance Evaluation of Machine Learning-Based Channel Equalization Techniques: New Trends and Challenges, 2022", *Journal of Sensors*, vol. 2022.
6. Ye H., Li Y.G., Juang F.B-H. "Power of Deep Learning for Channel Estimation and Signal Detection in OFDM Systems", 2017.
7. Chirkov O.N. "Direct formation of OFDM signals" *The Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2012, vol. 8, no. 5, pp. 54-56.
8. Chirkov O.N. "Improving the noise immunity of a high-speed wireless information exchange system WI-FI", *The Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2011, vol. 7, no. 3, pp. 66-67.

Submitted 30.10.2023; revised 12.12.2023

Information about the authors

Oleg N. Chirkov - Senior Lecturer, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: chir_oleg@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2250-2100>

Alexander A. Pirogov - Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: pirogov.alx@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5105-0505>

ПРОЕКТИРОВАНИЕ БЛОКА КОДИРОВАНИЯ LDPC-КОДА ДЛЯ МНОГОПОЛЬЗОВАТЕЛЬСКОЙ СИСТЕМЫ

М.В. Хорошайлова, И.В. Свиридова, И.В. Остроумов

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

Аннотация: разработана схема кодирования с низкой плотностью проверки четности (LDPC) с использованием глубокого обучения для двух пользовательских гауссовских каналов множественного доступа с одинаковой скоростью и равными ограничениями средней мощности. Для этого канала предполагается, что любая пара скоростей в пределах области пропускной способности может быть достигнута без необходимости распределения времени или разделения скоростей, просто путем выбора соответствующих кодов и применения совместного декодера. Предложенная модель нейронной сети одновременно оптимизирует распределение мощности и совместный декодер для заданного ограничения мощности и набора LDPC кодов. Для любого пользователя кодовое слово делится на две части одинаковой длины и передается с двумя уровнями мощности. В предлагаемой модели нейронной сети распределение мощности и обучаемые веса объединенного декодера оптимизируются одновременно. Численные результаты показывают, что предложенная схема обеспечивает лучшую производительность BER. Анализ порога декодирования показал, что оптимизированные схемы совместного декодирования с LDPC кодами могут приближаться к пределу Шеннона. Численные результаты показывают, что предложенная схема обеспечивает лучшую производительность по частоте ошибок по битам, чем существующие схемы, для более коротких длин кода и меньшего количества итераций декодирования

Ключевые слова: коды LDPC, гауссовский канал множественного доступа, совместное декодирование, глубокое обучение

Введение

Гауссовский канал множественного доступа (GMAC) состоит из двух пользователей, взаимодействующих с одним приемником в присутствии аддитивного белого гауссовского шума (AWGN). Краевые точки области пропускной способности могут быть достигнуты с помощью однопользовательского декодирования и, следовательно, с помощью разделения времени можно достичь промежуточных точек. Также показано, что любая пара скоростей в области пропускной способности может быть достигнута с использованием разделения скоростей или совместного декодирования без необходимости разделения времени [1]. С практической точки зрения канального кодирования, авторы в [1], [2] используют коды с низкой плотностью проверки на четность (LDPC) и реализуют итеративный алгоритм совместного декодирования, обеспечивающий пары скоростей, близкие к границе для двухпользовательского GMAC с равным коэффициентом усиления канала.

Здесь рассматриваем двухпользовательский гауссовский канал множественного доступа (GMAC) с одинаковой мощностью и

скоростью в присутствии аддитивного белого гауссовского шума (AWGN). Для этого канала предполагается, что любая пара скоростей в пределах области пропускной способности может быть достигнута без необходимости разделения времени или разделения скорости, просто путем выбора соответствующих кодов и применения совместного декодера. Анализ порога декодирования показал, что оптимизированные схемы совместного декодирования с кодированием LDPC могут приближаться к пределу Шеннона. Однако, поскольку эти схемы совместного декодирования основаны на большом количестве итераций и кодах большой длины, результаты их моделирования конечной длины менее удовлетворительны. Для достижения более высокой производительности декодирования конечной длины в [3] разработана новая схема кодирования LDPC для двухпользовательского GMAC. Для каждого пользователя кодовое слово делится на две части одинаковой длины и передается с двумя уровнями мощности. Эта схема может обеспечить лучшую производительность по частоте ошибок по битам (BER) при умеренной длине кодового слова с достаточным количеством итераций. К сожалению, случаи с короткой длиной кодового слова и меньшим количеством итераций в [3] не рассматривались, несмотря на их практичность.

Для двухпользовательского GMAC необходимо разработать новую схему LDPC кодирования, основанную на глубокой нейронной сети. В предложенной нами модели нейронной сети распределение мощности и обучаемые веса совместного декодера оптимизируются одновременно. Численные результаты показывают, что предложенная схема обеспечивает лучшую производительность BER.

Описание модели канала и схемы кодирования

«Пользователь-1» и «Пользователь-2» имеют одинаковые ограничения средней мощности и используют два LDPC кода из одного и того же набора. Битовые последовательности «Пользователь-и» кодируются в кодовое слово длиной N $c^u = (c_1^u, c_2^u, \dots, c_N^u)$. Обозначаем P_1 и P_2 как две разные степени двоичных сигналов фазовой манипуляции. Пусть $X = \{1, 2, \dots, N/2\}$ и $J = \{N/2 + 1, N/2 + 2, \dots, N\}$ — наборы индексов первой и второй половин кодового слова длины N и $x^u = (x_1^u, x_2^u, \dots, x_N^u)$, где $x_v^u = 1 - 2c_v^u$. Полученный сигнал $y = (y_1, y_2, \dots, y_N)$ затем выражается как

$$y_i = \sqrt{P_1} x_i^1 + \sqrt{P_2} x_i^2 + n \quad \text{для } i \in X, \quad (1)$$

$$y_j = \sqrt{P_2} x_j^1 + \sqrt{P_1} x_j^2 + n \quad \text{для } j \in J, \quad (2)$$

где n - гауссова переменная с нулевым средним значением и дисперсией $\sigma^2 = N_0/2$, а N_0 - плотность спектра одностороннего шума. Две различные мощности устанавливаются так, чтобы удовлетворять $(P_1 + P_2)/2 = 1$ таким образом, чтобы «пользователь-1» и «пользователь-2» имели среднюю мощность передачи, равную 1.

Чтобы декодировать кодовые слова (c_1 и c_2) каждого пользователя, используется факторный граф, необходимый для выполнения нескольких итераций распространения доверия (BP). Для совместного декодирования этот факторный граф составлен из двух факторных графов LDPC кодов. Для каждого пользователя его переменные узлы (VN) и контрольные узлы (CN) подключены через ребра, а их переменные узлы (VN) подключены через узлы проверки состояния (SCN). Алгоритм совместного декодирования состоит из трех этапов на каждой итерации. Сначала сообщения передаются из VN в CN. Затем сообщения передаются из CN в VN. Далее осуществляется обмен сообщениями между VN и SCN.

Рассмотрим правило передачи сообщений только для третьего этапа, поскольку правила для первого и второго этапа обмена данными соответствуют обычному LDPC декодированию по алгоритму BP. Пусть $L_{k,t}^{v \rightarrow sc,u}$, $t = 1, 2, \dots, N$ - сообщения, переданные из VN в узлы проверки состояния (SCN) «пользователя-и» на k -й итерации, которые являются суммированием сообщений из CN в VN. Сообщение, переданное из SCN в VN для «Пользователя-1», вычисляется как

$$L_{k,i}^{sc \rightarrow v,1} = \log \frac{p(y_i | s_3) + p(y_i | s_4) e^{L_{k,i}^{v \rightarrow sc,2}}}{p(y_i | s_1) + p(y_i | s_2) e^{L_{k,i}^{v \rightarrow sc,2}}} \quad \text{для } i \in X, \quad (3)$$

$$L_{k,j}^{sc \rightarrow v,1} = \log \frac{p(y_j | s_2) + p(y_j | s_4) e^{L_{k,j}^{v \rightarrow sc,2}}}{p(y_j | s_1) + p(y_j | s_3) e^{L_{k,j}^{v \rightarrow sc,2}}} \quad \text{для } j \in J, \quad (4)$$

и для «Пользователя -2»

$$L_{k,i}^{sc \rightarrow v,2} = \log \frac{p(y_i | s_2) + p(y_i | s_4) e^{L_{k,i}^{v \rightarrow sc,1}}}{p(y_i | s_1) + p(y_i | s_3) e^{L_{k,i}^{v \rightarrow sc,1}}} \quad \text{для } i \in X, \quad (5)$$

$$L_{k,j}^{sc \rightarrow v,2} = \log \frac{p(y_j | s_3) + p(y_j | s_4) e^{L_{k,j}^{v \rightarrow sc,1}}}{p(y_j | s_1) + p(y_j | s_2) e^{L_{k,j}^{v \rightarrow sc,1}}} \quad \text{для } j \in J, \quad (6)$$

где $s_1 = -\sqrt{P_1} - \sqrt{P_2}$, $s_2 = -\sqrt{P_1} + \sqrt{P_2}$, $s_3 = \sqrt{P_1} - \sqrt{P_2}$ и $s_4 = \sqrt{P_1} + \sqrt{P_2}$ соответственно. Эти сообщения основаны на логарифмическом отношении правдоподобия (LLR), вычисленном на основе наблюдения канала y и созвездий s_1, s_2, s_3 и s_4 .

На стороне передатчика информационные биты каждого пользователя, обозначаемые как c_j ($j = 1, 2$), кодируются LDPC кодом, и i -й закодированный бит c_j , обозначаемый $c_j(i)$, модулируется с использованием двоичной фазовой манипуляции (BPSK) и передается по каналу как $X_j(i) = (1 - 2c_j(i))$. На стороне приемника используется совместный декодер, в котором используется алгоритм на основе ВР для декодирования сообщений итеративным способом [4]. Как показано на рис. 1, объединенный декодер может быть сформирован путем объединения двух компонентных LDPC-декодеров, которые обмениваются обновленным LLR через узлы состояния.

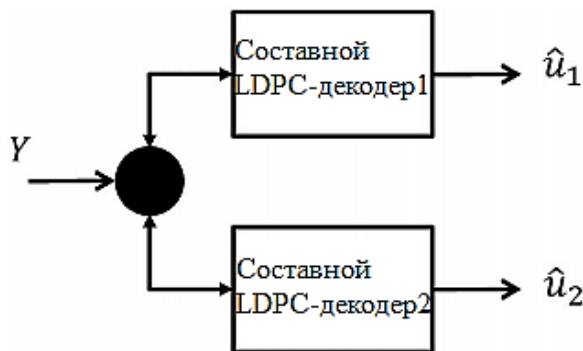


Рис. 1. Структурная схема объединенного декодера, используемого на стороне приемника

Обмен дополнительной информацией между компонентными LDPC-декодерами может быть запланирован последовательно или параллельно [5, 6]. При последовательном планировании одновременно активен только один компонентный декодер, в то время как при параллельном планировании оба работают одновременно.

Предлагаемая схема с поддержкой глубокого обучения

Разработанная сеть построена путем развертывания серии распределений мощности и совместного декодера, которые позволяют одновременно предварительно оптимизировать распределение мощности и обучаемые параметры в процессе совместного декодирования. Предлагаемая сетевая архитектура представляет собой нейронную сеть, в которой для обучения параметров используется метод стохастического градиентного спуска. Эта сеть получается путем непосредственного развертывания итеративного процесса декодирования, и сообщения, передаваемые между CN и VN, имеют обучаемые параметры [7]. Предложенная глубокая нейронная сеть позволяет избежать нежелательного воздействия циклов в матрицах проверки четности.

Осуществляя совместный процесс декодирования с помощью ℓ итераций, можем получить решетчатое представление, соответствующее процессу декодирования. На рис. 2 показаны слои предлагаемой нейронной сети. В этой решетке узлы скрытого слоя соответствуют ребрам факторного графа.

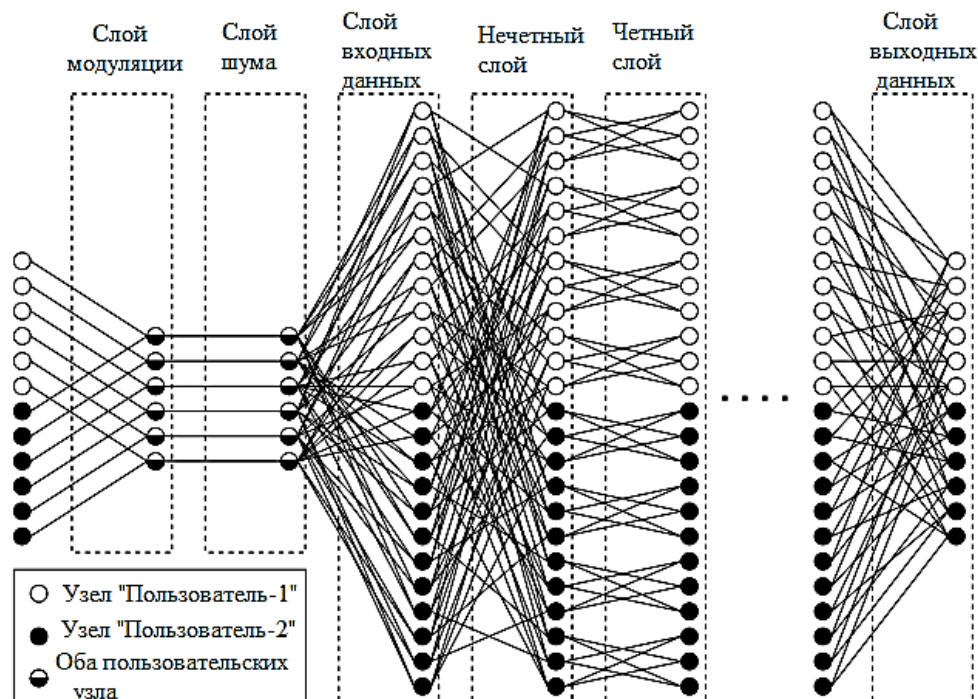


Рис. 2. Слои предлагаемой нейронной сети

Решетчатая структура состоит из шести различных слоев: слоя модуляции, слоя шума, входного слоя, нечетного слоя, четного слоя и выходного слоя. Набор нечетных и четных слоев соответствует одной итерации совместного декодирования.

Пусть $x^A = (x_1^A, x_2^A, \dots, x_N^A)$ - объединение первой половины x^1 и второй половины x^2 , а $x^B = (x_1^B, x_2^B, \dots, x_N^B)$ - объединение первой половины x^2 и вторая половина x^1 . Уровень модуляции z_t , $t = 1, 2, \dots, N$ затем задается формулой

$$z_t = w_{P_1} x_t^A + w_{P_2} x_t^B, \quad (7)$$

где w_{P_1} и w_{P_2} - обучаемые веса, соответствующие P_1 и P_2 . В слое шума к z_t добавляется белый гауссовский шум, т.е. $y_t = z_t + n$. Позволяя быть узлом обработки, соответствующим ребру $e = (n_v, n_c)$ между n_v -м VN и n_c -м CN «пользователя-и», входной уровень обозначается

$$z_{0,e=(n_v,n_c)}^u = 2 \tanh^{-1} \left(\prod_{e'=(n'_v,n'_c), n'_v \neq n_v} \tanh \left(\frac{w_{n_v}^u L_{0,n_v}^{sc \rightarrow v,u}}{2} \right) \right), \quad (8)$$

где $L_{0,n_v}^{sc \rightarrow v,u}$ это LLR, рассчитывается по (3)–(6) на основе y_t .

Цель состоит в том, чтобы обучить веса и получить выходные слова (o^1 и o^2), которые

максимально приближены к кодовым словам (c^1 и c^2). Точнее, хотели бы минимизировать функцию перекрестных потерь энтропии на последнем временном шаге.

$$L(o^1, o^2; c^1, c^2) := -\frac{1}{2N} \sum_{u=1}^2 \sum_{t=1}^N (1 - c_t^u) \log(o_t^u) + c_t^u \log(1 - o_t^u). \quad (9)$$

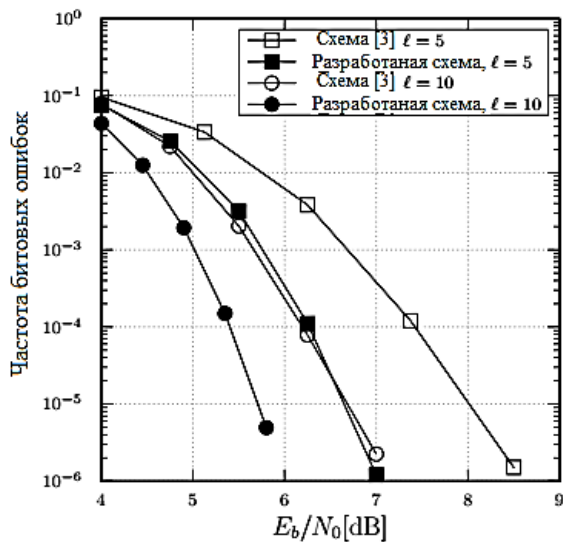
Моделирование результатов

В этом исследовании использовали (3,6)-регулярный LDPC-код и нерегулярный LDPC-код со скоростью 0,6 с оптимизированным распределением ребер. Коды LDPC длиной $N = 500, 2000$ были построены с использованием алгоритма прогрессивного увеличения границ, ограниченного приближенной степенью внешнего сообщения цикла.

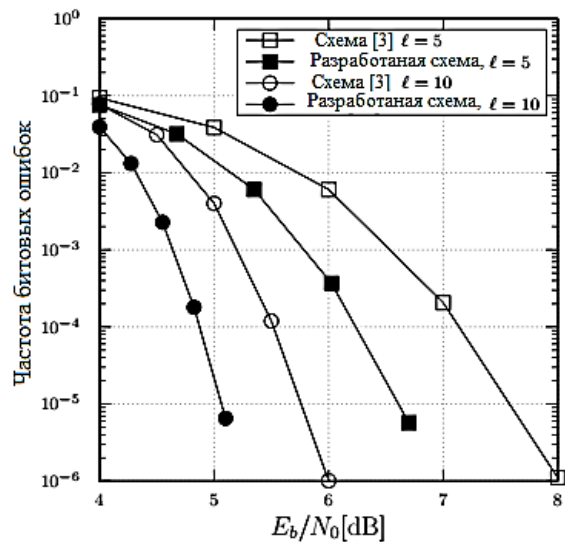
Обучение было применено к предложенной нейронной сети для $\ell = 5, 10$ с регулярными и нерегулярными кодами, где w_{P_1} и w_{P_2} были установлены так, чтобы удовлетворять

$w_{P_1}^2 + w_{P_2}^2 = 2$. Кроме того, обучение проводилось с использованием стохастического градиентного спуска с мини-выборками. Обучающие данные были сгенерированы с помощью случайных кодовых слов с двоичным вводом и АБГШ с отношением сигнал/шум (SNR), равным $\{2, 3, 4, 5, 6\}$. Была добавлена база данных. Обучение проводилось в порядке увеличения SNR, и размеры каждой эпохи и мини-партии были установлены равными 2000 и 100 соответственно. Модель была обучена с помощью оптимизатора Adam (с использованием скорости обучения 0,001).

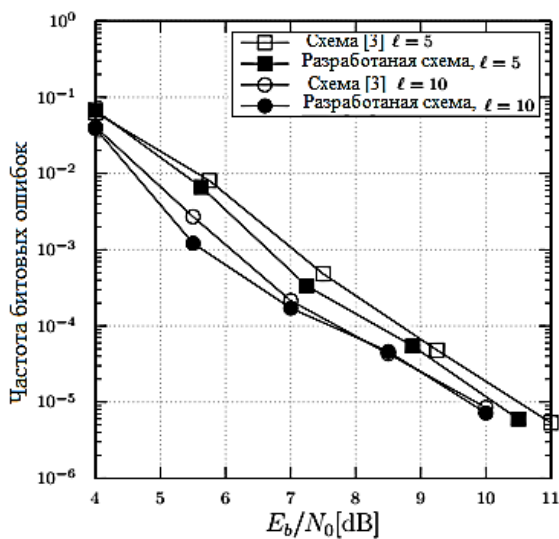
На рис. 3 (а), (б) показаны характеристики BER для (3,6)-регулярных кодов LDPC.



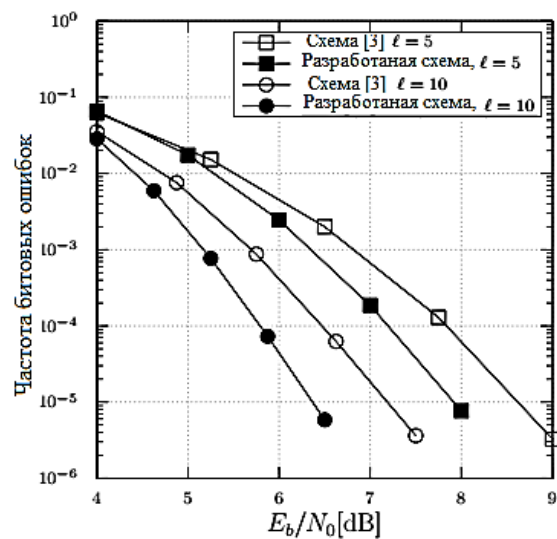
а) (3,6)-регулярный код ($N = 500$)



б) (3,6)-регулярный код ($N = 2000$)



в) нерегулярный код скорости 0,6 ($N = 500$)



г) нерегулярный код скорости 0,6 ($N = 500$)

Рис. 3. Сравнение характеристик BER

Как видно, разработанная схема имеет значительный выигрыш в отношении сигнал/шум по сравнению со схемами из [3] для всех длин моделируемого кода и количества итераций. Для $N = 500$ BER разработанной схемы при $\ell = 5$ почти такой же, как и у обычной схемы при $\ell = 10$. Прирост SNR разработанной схемы по сравнению с эталонными схемами составляет 0,70 дБ при уровне BER 10^{-5} , для $N = 2000$, $\ell = 10$, что увеличивается до 0,97 дБ, для $N = 2000$, $\ell = 5$.

На рис. 3 (в), (г) показаны характеристики BER для LDPC кодов со скоростью 0,6. Разработанная схема обеспечивает лучший BER, чем традиционные схемы. Прирост SNR разработанной схемы по сравнению с эталоном составляет 0,70 дБ при уровне BER 10^{-5} для $N = 2000$, $\ell = 5$, который увеличивается до 0,82 дБ для $N = 2000$, $\ell = 10$.

Заключение

Здесь разработана и промоделирована схема LDPC кодирования с глубоким обучением для двухпользовательских Гауссовских каналов множественного доступа. Предложенная модель нейронной сети позволяет одновременно оптимизировать распределение мощности и совместный декодер. Численные результаты показали, что предложенная схема обеспечивает более высокую производительность

BER, чем существующие схемы, для более коротких длин кода и меньшего количества итераций декодирования.

Литература

1. Amraoui A., Dusad S., and Urbanke R. Achieving general points in the 2-user Gaussian MAC without time-sharing or rate-splitting by means of iterative coding // Proc. IEEE Int. Symp. Inf. Theory, Lausanne, Switzerland, Jul. 2002, p. 334.
2. Roumy A., Declercq D. Characterization and optimization of LDPC codes for the 2-user Gaussian multiple access channel // EURASIP J. Wireless Commun. Netw., May 2007, Art. ID. 074890
3. A new LDPC coded scheme for two-user Gaussian multiple access channels / J. Du, L. Zhou, L. Yang, S. Peng and J. Yuan // IEEE Commun. Lett. Jan. 2018. Vol. 22. No. 1. Pp. 21-24,
4. LDPC code design for the two-user Gaussian multiple access channel / S. Sharifi et al. // IEEE Trans. Wireless Commun. Apr. 2016. Vol. 15. No. 4. Pp. 2833-2844,
5. Хорошайлова М. В. Архитектура для стохастических LDPC-декодеров с использованием эффективной площади кристалла на основе ПЛИС // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2018. Т. 14. № 1. С. 95-100.
6. Разработка QC-LDPC-декодера с высокой пропускной способностью для 5G беспроводной радиосвязи / А.В. Башкиров, М.В. Хорошайлова, П.П. Чураков, Е.В. Турецкая // Радиотехника. 2022. Т. 86. № 7. С. 14-19.
7. Хорошайлова М. В. Архитектура канального кодирования на основе ПЛИС для 5G беспроводной сети с использованием высокоуровневого синтеза // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2018. Т. 14. № 2. С. 99-105.

Поступила 19.10.2023; принята к публикации 12.12.2023

Информация об авторах

Хорошайлова Марина Владимировна – канд. техн. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: pmv2205@mail.ru, ORCID: orcid.org/0000-0001-9167-9538

Свиридова Ирина Владимировна – старший преподаватель, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: ri-ss-ka@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5279-0807>

Остроумов Иван Владимирович – канд. техн. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), тел. 8-952-541-04-14, e-mail: vanik07@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2796-2886>

DESIGNING AN LDPC CODING BLOCK FOR A TWO-USER SYSTEM

M.V. Khoroshailova, I.V. Sviridova, I.V. Ostroumov

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract: a low-density parity check (LDPC) coding scheme using deep learning for two user Gaussian multiple access channels with the same rate and equal average power constraints has been developed. For this channel, it is assumed that any pair of rates within the capacity region can be achieved without the need for timing or rate sharing, simply by selecting appropriate codes and using a shared decoder. The proposed neural network model simultaneously optimizes the power allocation and joint decoder for a given power constraint and set of LDPC codes. For any user, the codeword is divided into two parts of

equal length and transmitted at two power levels. In the proposed neural network model, the power distribution and trainable weights of the joint decoder are optimized simultaneously. Numerical results show that the proposed scheme achieves better BER performance. Analysis of the decoding threshold showed that optimized joint decoding schemes with LDPC codes can approach the Shannon limit. Numerical results show that the proposed scheme achieves better bit error rate performance than existing schemes for shorter code lengths and fewer decoding iterations

Key words: LDPC codes, Gaussian multiple access channel, joint decoding, deep learning

References

1. Amraoui A., Dusad S., Urbanke R. "Achieving general points in the 2-user Gaussian MAC without time-sharing or rate-splitting by means of iterative coding," *IEEE Int. Symp. Inf. Theory*, Lausanne, Switzerland, Jul. 2002, p. 334.
2. Roumy A., Declercq D. "Characterization and optimization of LDPC codes for the 2-user Gaussian multiple access channel," *EURASIP J. Wireless Commun. Netw.*, May 2007, Art. ID. 074890
3. Du J., Zhou L., Yang L., Peng S., Yuan J. "A new LDPC coded scheme for two-user Gaussian multiple access channels," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 22, no. 1, pp. 21-24, Jan. 2018
4. S. Sharifi et al., "LDPC code design for the two-user Gaussian multiple access channel," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, Apr. 2016, vol. 15, no. 4, pp. 2833-2844.
5. Khoroshailova M.V. "Architecture for stochastic LDPC decoders using the effective crystal area based on FPGA", *The Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2018, vol. 14, no. 1, pp. 95-100.
6. Bashkirov A.V., Khoroshailova M.V., Churakov P.P., Turetskaya E.V. "Development of a QC-LDPC decoder with high bandwidth for 5G wireless radio communication", *Radio Engineering (Radiotekhnika)*, 2022, vol. 86, no. 7, pp. 14-19.
7. Horoshaylova M.V. "Architecture of FPGA based channel coding for 5G wireless network using high-level synthesis", *The Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2018, vol. 14, no. 2, pp. 99-105.

Submitted 19.10.2023; revised 12.12.2023

Information about authors

Marina V. Horoshaylova – Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: pmv2205@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9167-9538>

Irina V. Sviridova – Senior Lecturer, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: ri-ss-ka@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5279-0807>

Ivan V. Ostroumov – Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), tel.: 8-952-541-04-14, e-mail: vanik07@mail.ru ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2796-2886>

Машиностроение и машиноведение

DOI 10.36622/VSTU.2023.19.6.027

УДК 621.791

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ РЕЖИМА ЛАЗЕРНОЙ СВАРКИ РАЗНОРОДНЫХ СПЛАВОВ НА ОСНОВЕ НИКЕЛЯ

И.М. Горбач, А.Б. Булков, В.Ф. Селиванов, И.Б. Корчагин

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

Аннотация: определены оптимальные параметры лазерной сварки тонколистовых конструкций из аустенитной стали и высоколегированного сплава на основе никеля. С помощью физико-математического моделирования тепловых процессов определены основные параметры режима сварки, обеспечивающие требуемую форму проплавления и размеры зоны термического влияния. Установлено, что оптимальное распределение температур при сварке формируется при смещении луча на заготовку из аустенитной стали на величину 0,25 мм. Отработка режимов на образцах показала хорошее совпадение расчетных и экспериментальных данных. Результаты визуального и металлографического контроля подтверждают получение бездефектных швов с минимальной долей участия инконеля в формировании сечения шва. Проведены расчеты напряженно-деформированного состояния, возникающего при сварке по проектной технологии листовых и трубчатых заготовок. Результаты расчетов показывают, что в деталях после сварки возникает практически одноосное напряженное состояние, формирующееся за счет высоких растягивающих напряжений в околошовной зоне. Величина напряжений для каждой из заготовок превышает ее предел текучести, вызывая появление в указанной зоне пластических деформаций. Равномерное распределение температуры по толщине заготовок, сваренных по данной технологии, обуславливает минимальный уровень остаточных деформаций и отсутствие необходимости в последующей механической обработке

Ключевые слова: лазерная сварка, инконель, аустенитная сталь, напряженно-деформированное состояние

Введение

При изготовлении элементов энергетической аппаратуры, работающих в условиях высоких температур и механических нагрузок, широко используют никелевые сплавы. С учетом высокой стоимости таких сплавов экономически целесообразным является применение никелевых сплавов для наиболее нагруженных частей оборудования, в то время как остальные элементы могут быть изготовлены из хромоникелевых аустенитных сталей. При таком подходе необходимо решать сложную технологическую задачу неразъемного соединения разнородных материалов, обладающих различными теплофизическими и механическими свойствами.

Перспективным технологическим процессом для решения таких задач является лазерная сварка, обладающая возможностью прецизионного управления количеством энергии, подаваемого в зону сварки и геометрией этой зоны [1, 2].

Последнее обстоятельство определяет перспективность применения лазерной сварки для соединения разнородных материалов, суще-

ственно отличающихся между собой по свойствам.

Целью работы данной работы являлся анализ влияния параметров режима сварки на геометрию сварного шва, распределение температур в околошовной зоне и напряженно-деформированное состояние заготовок при лазерной сварке элементов энергетической аппаратуры толщиной 1,5 мм из аустенитной стали 12X18H10T и никелевого сплава INCONEL625.

Методика проведения исследований

Для моделирования термодеформационных процессов использован метод конечных элементов, обладающий широкими возможностями описания геометрии свариваемых тел, распределения теплоты от источников нагрева и свойств материалов [3, 4].

Расчет температурных полей, напряженно-деформированного состояния и экспериментальная отработка режимов проводились на образцах в виде пластин размерами 40×40×1,5 мм и обечаек с внешним диаметром 50 мм, длиной 40 мм и толщиной стенки 1,5 мм, свариваемых стыковым швом. Материал образцов – высоколегированная сталь 12X18H10T и никелевый сплав INCONEL625.

Для проведения экспериментов использовали иттербиевый оптоволоконный лазер ЛС-3 с максимальной выходной мощностью 3,0 кВт и длиной волны излучения 1,06 мкм, обеспечивающий маломодовый тип излучения в квазинепрерывном режиме. Фокусировку осуществляли объективом с фокусным расстоянием 150 мм, обеспечивающим диаметр сфокусированного луча 0,30...0,35 мм. За нулевое положение фокальной плоскости принимали поверхность образцов.

Определение геометрических параметров сварного шва и визуальную оценку сваренных образцов с целью выявления трещин, открытых пор, несплавов и т. д. проводили с помощью оптического микроскопа МЕТАМ РВ-21-1 при увеличении 50 крат. Поверхности образцов для макроанализа полировали и подвергали химическому травлению в растворе Марбле в течение 10-20 с.

Результаты исследований

Исходя из анализа литературы [5] установлено, что для сварки стык листов из никелевых сплавов и аустенитных сталей толщиной 1,5...2 мм рекомендуется мощность луча 1,6...2,3 кВт при скорости перемещения 40...60 м/ч.

С учетом Х-образной формы поперечного сечения шва, характерной для лазерной сварки листового металла малых толщин, для расчетов использован комбинированный источник теплоты, состоящий из двух эллипсоидальных источников (схема Голдака). Хорошее совпадение расчетной и экспериментальной геометрии шва на образцах толщиной 1,5 мм для скорости сварки 50 м/ч получено при погонной энергии источников 32...38 Дж/мм. При этом 75-80 % энергии обеспечивает источник, нагревающий образцы с верхней поверхности, и 20-25 % - с нижней.

Типичное распределение температур в поперечном сечении приведено на рис. 1, а. Выбранный режим обеспечивает полное проплавление заготовок при этом ширина ванны составляет от 0,3 до 0,65 мм для аустенитной стали и от 0,35 до 0,85 мм для инконеля. Т.е. сварочная ванна формируется несимметрично относительно оси шва и смещена в сторону никелевого сплава ($T_{пл}=1290...1350$ °С), температура плавления которого примерно на 100 °С ниже, чем у аустенитной стали ($T_{пл}=1400...1420$ °С). Такое распределение температур приводит к формированию сварочной ванны преимуще-

ственно из никелевого сплава и может повышать склонность металла шва к образованию кристаллизационных трещин порообразования.

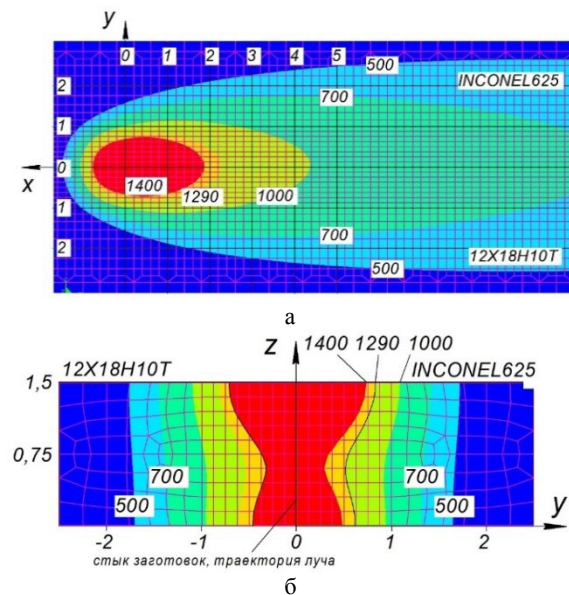


Рис. 1. Распределение температур по поверхности (а) и поперечному сечению заготовок при $x=-0,4$ мм (б) при сварке без смещения луча

В соответствии с результатами исследований [6] при лазерной сварке разнородных материалов рекомендуется смещать ось луча на заготовку с материалом, обладающим более высокой температурой плавления, на расстояние составляющее примерно половину от диаметра лазерного луча. Это обеспечивает гарантированное плавление тугоплавкой заготовки энергией лазерного луча и дает достаточное количество энергии для плавления легкоплавкой заготовки за счет теплоты, доставляемой к свариваемому стыку путем теплопроводности и конвекции через жидкую фазу. Такая технология сварки обеспечивает минимальное участие металла легкоплавкой заготовки в формировании сварного шва.

В соответствии с приведенными выше рекомендациями выполнен ряд расчетов для сварки лучом, смещенным от оси шва на заготовку из стали 12X18H10T на величину от 0,2 до 0,5 мм. При величине смещения 0,5 мм изотерма с температурой 1290 °С практически совпадает со стыком заготовок, что, вероятно, может привести к появлению непроваров в сварном шве со стороны стали. Результаты расчетов показывают, что оптимальная величина смещения луча на заготовку из стали лежит в пределах 0,2...0,3 мм (рис. 2).

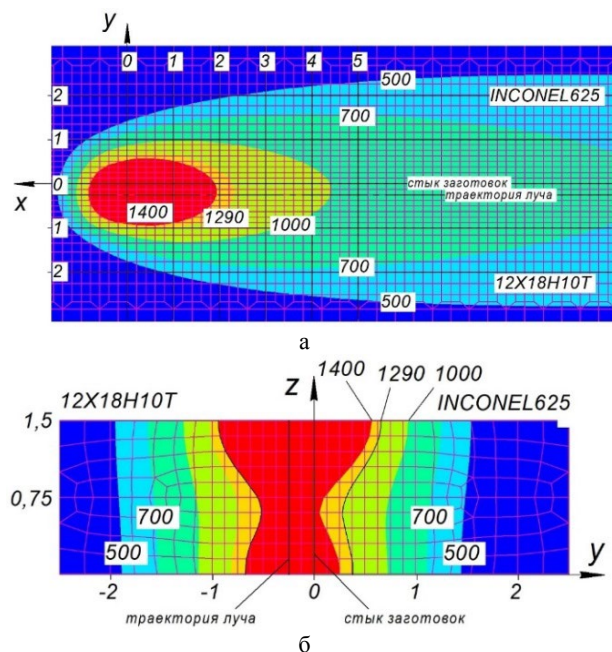


Рис. 2. Распределение температур по поверхности (а) поперечному сечению заготовок $x=-0,4$ мм (б) при смещении луча на $y=0,25$ мм на заготовку 12X18H10T

Сварочная ванна формируется в основном на заготовке из стали (ширина зоны плавления от 0,5 до 1,0 мм), минимальная ширина проплавления на никелевом сплаве в среднем по высоте заготовки сечении составляет 0,2...0,25 мм, что обеспечивает ее гарантированное проплавление при минимальном участии никелевого сплава в формировании сварного шва. Ширина шва на поверхности составляет 1,5 мм, в средней части шва 0,6...0,8 мм, что хорошо согласуется с результатами экспериментов (рис. 3).

Распределение температур по толщине заготовок при $T < 1000$ °C равномерное. Высокотемпературные зоны нагрева смещены на заготовку из стали в соответствии со смещением источника теплоты, по мере снижения температуры ширина изотерм выравнивается, что связано с более высокой теплопроводностью стали. Ширина зоны термического влияния ($T > 700$ °C) на никелевом сплаве, в которой возможно растворение упрочняющих карбидных фаз составляет порядка 1,5 мм.

На основании формы поперечного сечения сварных швов (рис. 3), с учетом диаметра луча 0,3...0,4 мм, можно предположить следующий механизм формирования зоны сплавления. На начальном этапе сварочная ванна образуется на заготовке из аустенитной стали, на которую смещен лазерный луч. По мере углубления ванны происходит формирование прямолиней-

ного парогазового канала, часть которого сохраняется в средней зоне после кристаллизации металла шва.

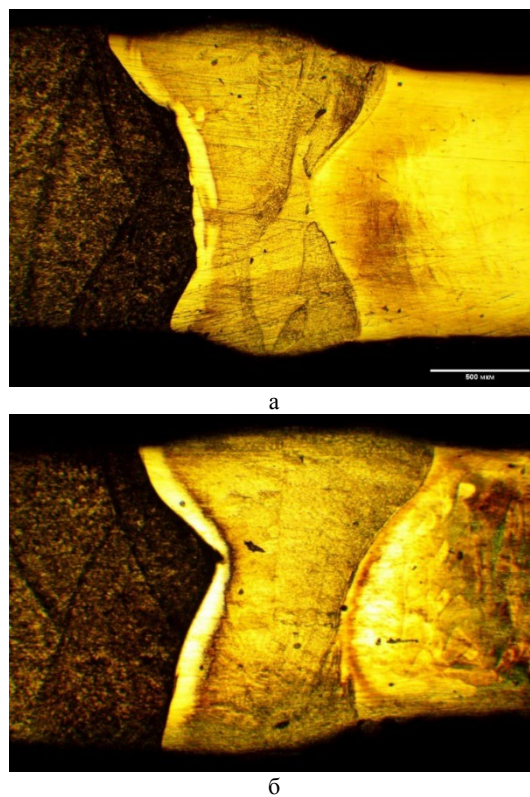


Рис. 3. Поперечное сечение сварного шва при смещении луча на заготовку 12X18H10T: а - 0,25 мм; а - 0,5 мм

Стык свариваемых заготовок находится в зоне жидкой фазы, окружающей парогазовый канал. Плавление материала заготовки из никелевого сплава происходит за счет теплоты, поступающей через жидкую фазу. В области контакта расплава с никелевым сплавом происходит перемешивание материалов заготовок с образованием переходной зоны. В связи с высокой скоростью кристаллизации, обусловленной быстрым перемещением источника теплоты, полного выравнивания химического состава по сечению шва не происходит и вдоль линии плавления детали из инконеля формируется переходная зона (светлая полоса у границы шов-инконель на рис. 3). Увеличение ширины шва в верхней и нижней части, вероятно, связано с ограниченным теплоотводом в этих зонах и подогревом поверхностей заготовки за счет рассеяния энергии луча в облаке паров металла над их поверхностью.

Основные закономерности распределения напряжений при сварке исследованы на модели, представляющей собой две пластины размерами $80 \times 40 \times 1,5$ мм, сваренные встык, на

приведенных выше параметрах режима. Пластины перед сваркой прихватывали в нескольких точках по длине шва для исключения смещения в продольном направлении, вызванного различным нагревом вследствие разницы в теплофизических свойствах материалов. В процессе сварки пластины прижимались к основанию жесткими прижимами, расположенными вдоль шва на расстоянии 20 мм от его оси. Освобождение от закрепления производилось после остывания пластин через 600 с.

Для сравнения напряженно-деформированного состояния пластины и обечайки целесообразно рассматривать среднюю часть пластины, на которую не распространяется влияние краевых эффектов, связанных с началом и окончанием шва [7, 8].

Результаты расчетов приведены на рис. 4-5.

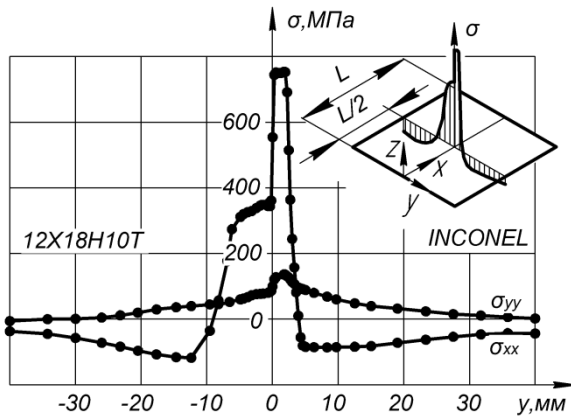


Рис. 4. Распределение продольных (σ_{xx}) и поперечных (σ_{yy}) напряжений на поверхности заготовок

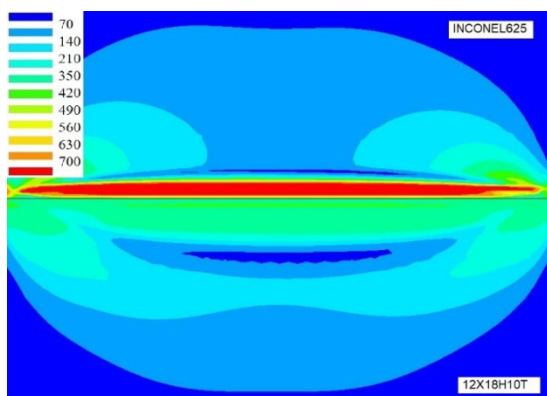


Рис. 5. Распределение эквивалентных напряжений по Мизесу на верхней поверхности пластины

Распределение продольных напряжений характеризуется ярко выраженной неравномерностью по ширине пластин (рис. 5). В зоне шириной около 2 мм для никелевого сплава и 4,5 мм для аустенитной стали по всей длине шва

действуют растягивающие напряжения, достигающие предела текучести материалов. Далее, на участке малой ширины уровень напряжений резко падает, и большая часть обеих пластин находится в области с невысокими напряжениями сжатия.

Поперечные напряжения по ширине (σ_{yy}) пластин в средней части шва распределены достаточно равномерно и не превышают 30 % от предела текучести материалов (рис. 6). Они являются растягивающими и формируются вследствие поперечной усадки металла в зоне термического влияния.

Поперечные напряжения по толщине (σ_{zz}) в основном объеме пластин практически отсутствуют, а в зоне контакта заготовок возрастают, но не превышают 20 % от предела текучести материалов. В аустенитной стали действуют сжимающие, а в инконеле — растягивающие напряжения, что объясняется различным сокращением при остывании вследствие разности в коэффициентах линейного расширения.

Поле эквивалентных напряжений (рис. 8) по размерам и величине напряжений в целом совпадает с полем продольных (т.к. этот компонент напряженного состояния существенно больше других) и позволяет оценить ширину зоны остаточных пластических деформаций в пределах 3 мм от стыка заготовок для аустенитной стали и 5 мм — для никелевого сплава.

Распределение остаточных пластических деформаций в поперечном сечении пластин в средней части шва показано на рис. 6.

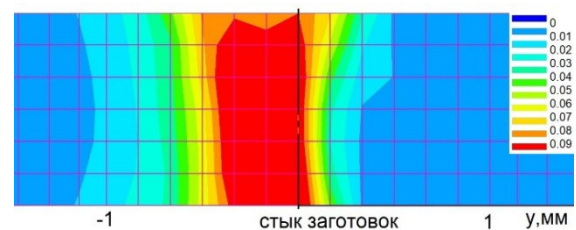


Рис. 6. Распределение эквивалентных пластических деформаций по Мизесу в поперечном сечении заготовок

Остаточные пластические деформации достаточно велики и превышают 10 %. Зона пластической деформации практически полностью расположена в объеме стальной заготовки, что объясняется ее большей пластичностью. Результаты расчета показывают, что деформационная способность аустенитной стали не исчерпана (относительное удлинение отожженного проката стали 12X18H10T при разрыве $\delta \approx 40\%$) и образование трещин маловероятно.

Асимметричное распределение напряжений и деформаций вызвано существенным различием в теплофизических и механических свойствах – теплопроводность и коэффициент линейного расширения стали 12X18H10T в интервале температур сварки на 15...25 % выше, а предел текучести в 2,5...3 раза ниже, чем у сплава INCONEL625.

Величина остаточных перемещений, пренебрежимо мала для сварки пластин толщиной 1,5 мм и составляет $\Delta=0,08$ мм на базе 80 мм (угловая деформация $\beta \approx 0,06$ град), что связано с достаточно равномерным распределением температур по толщине заготовки малой шириной зоны термического влияния.

Расчет напряженно-деформированного состояния трубчатых заготовок произведен при сварке на режимах, аналогичных сварке пластин. Выбранная схема закрепления заготовок препятствовала перемещению конструкции как жесткого целого, но не ограничивала деформации, вызванные нагревом.

Распределение продольных (радиальных) и эквивалентных напряжений подчиняется закономерностям, полученным при расчете пластин, отклонение не превышает 10 % (рис. 7, 8).

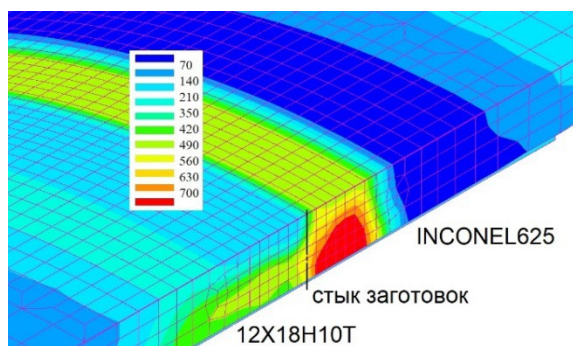


Рис. 7. Распределение продольных ($\sigma_{\theta\theta}$) напряжений при сварке трубных заготовок

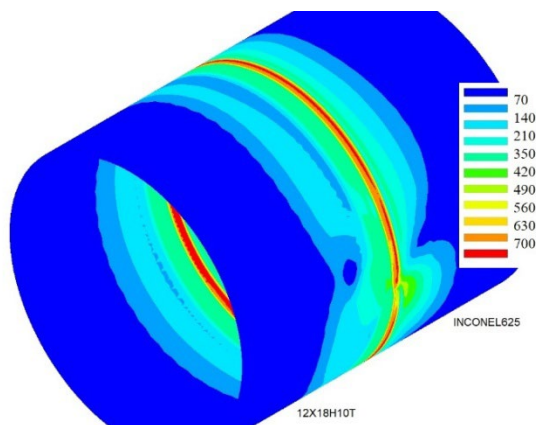


Рис. 8. Распределение эквивалентных напряжений по Мизесу

Разницу в величине напряжений можно объяснить:

- стесненными деформациями при сварке кольцевого шва обечаек относительно небольшого диаметра – замкнутая форма шва препятствует деформации в продольном направлении;
- замыкающий участок шва выполняется на предварительно прогревом металле.

Картина напряжений является осесимметричной за исключением участка начала-замыкания шва, на котором температурное поле является нестационарным. Неравномерность распределения напряжений по толщине обечаек объясняется, по-видимому, их изгибом в процессе нагрева из-за неравномерного распределения температур.

Величина остаточных пластических деформаций металла составляет около 10 % (рис. 9).

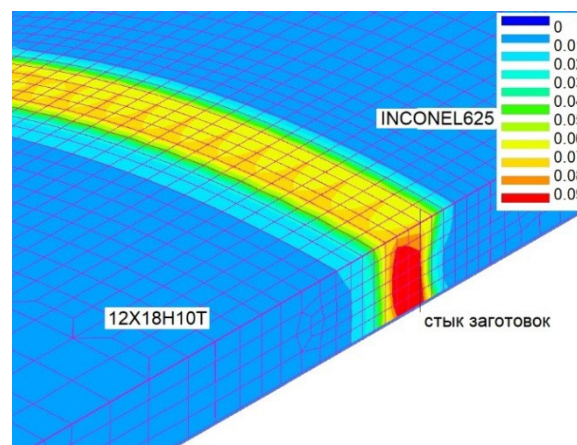


Рис. 9. Распределение эквивалентных пластических деформаций по Мизесу в сечении заготовок

В соответствии с [7, 8], остаточная пластическая деформация укорочения при сварке кольцевого шва должна вызывать локальный прогиб поверхности обечайки внутрь и уменьшать проходное сечение конструкции. Соответствующие перемещения, полученные в результате расчетов вдоль образующей на внешней поверхности модели, не превышают 0,06 мм (рис. 10).

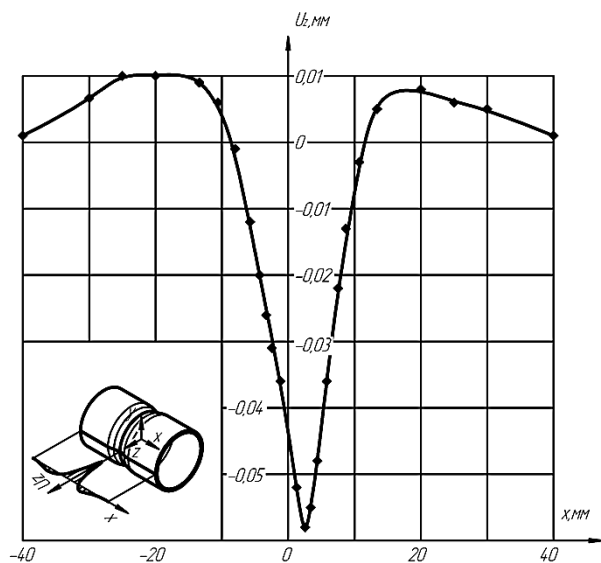


Рис. 10. Распределение прогибов на внешней поверхности заготовок

Заключение

1. Анализ температурных полей при сварке позволил установить, что оптимальное распределение температур при сварке формируется при смещении луча на заготовку из аустенитной стали на величину 0,25 мм. Это позволяет достичь полного проплавления обеих заготовок и при этом обеспечить минимальное участие в формировании шва никелевого сплава, более склонного к образованию кристаллизационных трещин и пор.

2. Полученное расчетным путем распределение остаточных сварочных напряжений показывает, что в околошовной зоне на каждой заготовке формируется практически одноосное напряженное состояние. Растягивающие напряжения в металле шва и зоны термического влияния достигают величины предела теку-

чести на ширине до 2 мм для никелевого сплава и до 4,5 мм для аустенитной стали.

3. Малая ширина зоны термического влияния и достаточно равномерное распределение температур по толщине заготовок обеспечивают невысокий уровень остаточных деформаций конструкции после сварки. При сварке кольцевого стыкового шва труб диаметром 50 мм усадка в околошовной зоне составляет не более 0,15 мм на диаметр, что сопоставимо с высотой усиления на обратной стороне шва и не оказывает влияния на служебные характеристики изделия.

Литература

1. Технологические процессы лазерной обработки: учеб. пособие для вузов / А.Г. Григорьянц [и др.]; под ред. А.Г. Григорьянца. М.: МГТУ имени Н. Э. Баумана, 2006. 667 с.
2. LIA Handbook of Laser Materials Processing / J.F. Ready [et al.]. Orlando: Laser Institute of America, 2001. 704 p.
3. Компьютерное проектирование и подготовка производства сварных конструкций: учеб. пособие для вузов / С.А. Куркин, В.М. Ховов, Ю.Н. Аксенов [и др.]; ред. С.А. Куркин, В.М. Ховов М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. 463 с.
4. Биленко Г.А. Моделирование процессов сварки при помощи продуктов ESIGROUP // САПР и графика. 2010. № 7 (165). С. 58-60.
5. Сварка и свариваемые материалы: справочник: в 3 т. Т. 2. Технологии и оборудование / В.Н. Волченко и др.; под ред. В.М. Ямпольского. М.: Изд-во МГТУ им. Баумана, 1996. 574 с.
6. Особенности процесса лазерной сварки разнородных материалов на железной и медно-никелевой основе / Ф.И. Пантелеенко, О.Г. Девойно, А.С. Лапковский, Н.И. Луцко // Наука и техника. 2014. №1. С. 7-11.
7. Николаев Г.А., Куркин С.А., Винокуров В.А. Сварные конструкции. Прочность сварных соединений и деформации конструкций. М.: Высшая школа, 1982. 272 с.
8. Гатовский К.М. Теория сварочных напряжений и деформаций. Л.: Изд. Ленинградского Ордена Ленина кораблестроительного института. 1980. 331 с.

Поступила 24.10.2023, принята к публикации 12.12.2023

Информация об авторах

Горбач Илья Михайлович – аспирант, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), тел. 8-473-278-38-84, e-mail: gorbach1999@yandex.ru

Булков Алексей Борисович – канд. техн. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), тел. 8-960-124-38-11, e-mail: abulkov@cchgeu.ru

Селиванов Владимир Федорович – д-р техн. наук, профессор, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), тел. 8-473-278-38-84, e-mail: vf_selivanov@mail.ru

Корчагин Илья Борисович – канд. техн. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), тел. 8-950-756-82-83, e-mail: ikorchagin@cchgeu.ru

DETERMINATION OF OPTIMAL PARAMETERS OF THE LASER WELDING MODE OF VARIOUS NICKEL-BASED ALLOYS

I.M. Gorbach, A.B. Bulkov, V.F. Selivanov, I.B. Korchagin

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract: optimal parameters of laser welding of thin-sheet structures made of austenitic steel and a high-alloy nickel-based alloy have been determined. With the help of physical and mathematical modeling of thermal processes, the main parameters of the welding mode are determined, providing the required form of penetration and the size of the zone of thermal influence. It is established that the optimal temperature distribution during welding is formed when the beam is shifted to an austenitic steel billet by 0.25 mm. The analysis of the modes on the samples showed a good coincidence of the calculated and experimental data. The results of visual and metallographic control confirm the receipt of defect-free seams with a minimum degree of inconel participation in the formation of the seam section. Calculations of the stress-strain state arising during welding according to the design technology of sheet and tubular workpieces have been carried out. The calculation results show that an almost uniaxial stress state occurs in the parts after welding, which is formed due to high tensile stresses in the near-seam zone. The magnitude of the stresses for each of the workpieces exceeds its yield strength, causing the appearance of plastic deformations in the specified zone. The uniform temperature distribution over the thickness of the workpieces welded using this technology determines the minimum level of residual deformations and the absence of the need for subsequent machining.

Key words: laser welding, inconel, austenitic steel, stress-strain state

References

1. Grigoriants A.G. et al. "Technological Processes of Laser Processing. Textbook" ("Tekhnologicheskiye protsessy lazernoy obrabotki: ucheb. Posobiye", ed. by Grigoriants A.G., Moscow, MGTU imeni N. E. Bauman, 2006, 667 p.
2. Ready J.F. et al. "LIA Handbook of Laser Materials Processing", Orlando, Laser Institute of America, 2001, 704 p.
3. Kurkin S.A., Khovov V.M., Aksenov Yu.N. et al. "Computer-aided design and preparation of production of welded structures. Textbook" ("Tekhnologicheskiye protsessy lazernoy obrabotki: ucheb. posobie dlya vuzov"), ed. by Kurkin S.A., Khovov V.M. - Moscow, Izd-vo MGTU im. N. E. Bauman, 2002, 463 p.
4. Bilenko G.A. "Modeling of welding processes using ESI GROUP products", *CAD and graphics (SAPR i grafika)*, 2010, no. 7 (165), pp. 58-60.
5. Volchenko V.N. et. al. "Welding and materials to be welded. Handbook in 3 vol." ("Svarka i svarivaemye materialy. Spravochnik: v 3 t."), vol. 2. "Technologies and equipment" ("Tekhnologii i oborudovaniye"), ed. by Yampolsky V.M., Moscow, Izd-vo MGTU im. N. E. Bauman, 1996, 574 p.
6. Panteleenko F.I., Devoino O.G., Lapkovsky A.S., Lutsko N.I. "Features of the process of laser welding of dissimilar materials on an iron and copper-nickel basis", *Science and Technology (Nauka i tekhnika)*, 2014, no. 1, pp. 7-11.
7. Nikolaev G. A., Kurkin S. A., Vinokurov V. A. "Welded structures. Strength of welded joints and deformation of structures" ("Svarnye konstrukcii. Prochnost svarnykh soedinenij i deformacii konstrukcij"), Moscow, Vysshaya shkola, 1982, 272 p.
8. Gatovsky K.M. "Theory of welding stresses and deformations" ("Teoriya svarochnykh napryazhenij i deformacij"), Leningrad, izd. Leningradskogo Ordena Lenina korablestroitel'nogo instituta, 1980, 331 p.

Submitted 24.10.2023; revised 12.12.2023

Information about the authors

Ilya M. Gorbach - Graduate student, Voronezh State Technical University, (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: gorbach1999@yandex.ru

Alexey B. Bulkov - Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University, (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: abulkov@cchgeu.ru

Vladimir F. Selivanov, Dr. Sc. (Technical), Professor, Voronezh State Technical University, (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: vlvlpeshkov@cchgeu.ru

Ilya B. Korchagin - Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: ikorchagin@cchgeu.ru

**ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ КИНЕМАТИЧЕСКИХ УГЛОВ ФРЕЗЫ
ПРИ ОБРАБОТКЕ РК-ПРОФИЛЬНЫХ ОТВЕРСТИЙ****В.В. Куц¹, М.В. Митрофанов¹, О.Н. Кириллов²**¹Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Россия,²Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

Аннотация: одной из главных задач, стоящих перед отечественным машиностроением и, в частности, инструментальным производством, является проектирование металлорежущего инструмента на основе современных компьютерных технологий с использованием математического моделирования процессов резания на стадии разработки. Применение компьютерных технологий позволяет спрогнозировать качественные и количественные показатели оценочных параметров срезаемого слоя до стадии изготовления, что, в свою очередь, позволяет вносить изменения в геометрию инструмента, решать задачи по улучшению эффективности обработки до его изготовления. Проведено исследование на примере предложенного метода формообразования РК-профильных отверстий, суть которого заключается в применении фрезы с конструктивной радиальной подачей. С применением разработанного программного обеспечения был проведен анализ изменения кинематических углов фрезы, определены интервалы изменения передних и задних углов в процессе резания, установлено время контакта i -го зуба фрезы, сформированы выводы о неравнозначности условий нагружении зубьев фрезы при обработке и созданы предпосылки для последующего изучения износостойкости инструмента. Результаты проведенного исследования могут быть применены при проектировании металлорежущего инструмента для формообразования гранных внутренних поверхностей, в частности, при расчете значения переднего и заднего углов инструмента

Ключевые слова: РК-профиль, кинематические углы, математическая модель, фреза, формообразование, эксцентриситет, моделирование, передняя поверхность, задняя поверхность, время контакта

Введение

В настоящее время на предприятиях машиностроительного комплекса одной из наиболее важных и приоритетных задач является повышение качества деталей, эксплуатационных характеристик, технического уровня. Импортозамещение и экономические предпосылки требуют решения задач подобного уровня путем увеличения исследований в области проектирования и изготовления инструмента. При рассмотрении данного вопроса перспективными соединениями для передачи крутящего момента являются бесшпоночные РК-профильные соединения, которые обладают повышенными эксплуатационными преимуществами, меньшей металлоемкостью [10-12]. Анализ состояния вопроса технологичности [6] изготовления деталей показал, что существующие методы изготовления РК-профильных отверстий обладают низкой эффективностью в условиях крупносерийного и массового производства ввиду использования сложных кинематических систем, наличия в схемах формообразования механизмов-построителей, затруднительного процесса пе-

реналаживания оборудования. В свою очередь это приводит к отсутствию унификации и появлению проблем, связанных с вопросом наладки и ремонтпригодности оборудования. Поэтому проектирование высокоэффективных и производительных методов обработки РК-профильных отверстий является актуальной задачей на сегодняшний день.

Для повышения эффективности обработки РК-профильных отверстий предложен метод [5], где кинематическая схема формообразования РК-профильного при обработке фрезой с радиальной конструктивной подачей изложена следующим образом:

1. Частоты вращения шпинделя с заготовкой и инструмента задано соотношением 1:3, где инструмент опережает заготовку.

2. Инструмент смещен относительно заготовки на некоторое межосевое расстояние a_{w0} .

3. Вращение заготовки и инструмента направлено в одну сторону.

Схема предложенного метода обработки отверстий с равноосным контуром фрезой с переменным радиусом изображена на рис. 1. и задана параметрами: θ_1 – угол поворота заготовки; ω – угол поворота фрезы; e – величина эксцентриситета РК-профиля; $R_{РК}$ – средний

радиус РК-профиля; $a_w(t)$ – величина межосевого смещения фрезы и заготовки.

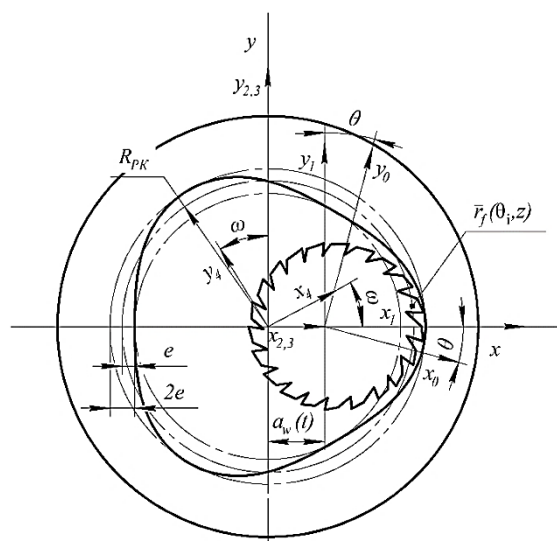


Рис. 1. Схема обработки РК-3 отверстия фрезой с переменным радиусом

Методика расчета производящей поверхности фрезы, определения положения зуба на профиле инструмента, передней и задней поверхности подробно изложена в работах [4, 5]. На рис. 2, с помощью математического моделирования представлен результат установки плоскости передней и задней поверхности для всех режущих зубьев фрезы с параметрами профиля РК $R_{PK} = 40$ мм, эксцентриситета $e = 3,4$ мм, количества граней $N = 3$, радиуса инструмента $R_f = 24$ мм, количества зубьев фрезы $Z_f = 21$ [7, 8].

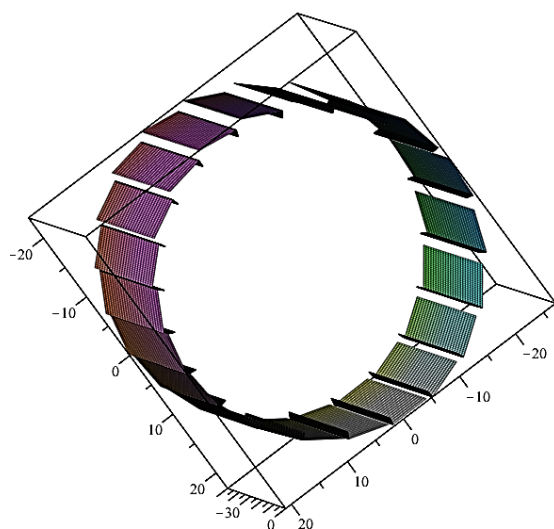


Рис. 2. Результаты моделирования зубьев фрезы

Основная часть

Кинематические углы образуются в процессе резания и зависят от различных параметров, главным образом от геометрических параметров самого инструмента и заданных режимов резания. Их необходимо знать для решения таких конструктивных задач, как: проверка работоспособности фрезы, оценка величины заднего угла и исключения возможного затирания заготовки по задней поверхности зуба, а также для оценки величины переднего угла, обеспечения одинаковой нагрузки режущих элементов за счет компенсации силы резания путем изменения угла затачивания i -го зуба фрезы.

Решение задачи определения углов сводится к определению пространственного положения передней поверхности, задней поверхности и плоскости резания (рис. 3). Ориентация плоскостей однозначно определяется векторами нормалей к ним [1, 2, 9].

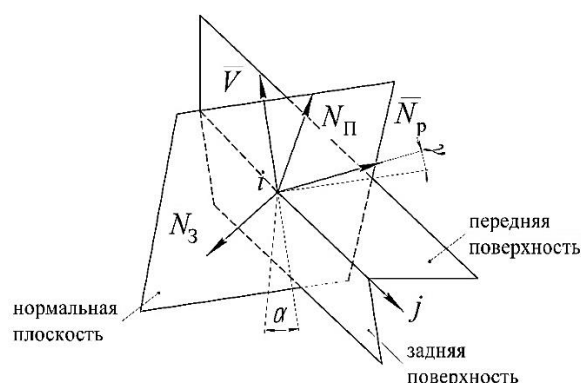


Рис. 3. Схема расчета геометрических углов резания [3]

Положение вектора скорости резания относительно режущей кромки определяется как

$$\bar{V}_k(\theta_i, z, t) = A_{\Sigma}^{-1} \cdot \frac{\partial \bar{Q}(i, z, t)}{\partial t}, \quad (1)$$

где A_{Σ}^{-1} – обратная матрица формообразующей системы технологического оборудования; где $A_{\Sigma} = A^{(6)}(\theta(t))A^{(1)}(a_w(t))A^{(6)}(-\theta(t) \cdot N)$ – матрица формообразующей системы технологического оборудования;

$A^{(6)}(\theta(t))$ – матрица, соответствующая повороту заготовки

$$A^{(6)}(\theta(t)) = \begin{bmatrix} \cos \theta(t) & -\sin \theta(t) & 0 & 0 \\ \sin \theta(t) & \cos \theta(t) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix};$$

$A^{(1)}(a_w(t))$ - матрица сближения заготовки и инструмента

$$A^{(1)}(a_w(t)) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a_w(t) \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix};$$

$A^{(6)}(-\theta(t) \cdot N)$ - матрица, соответствующая повороту инструмента

$$A^{(6)}(\theta(t)) = \begin{bmatrix} \cos(-\theta(t) \cdot N) & -\sin(-\theta(t) \cdot N) & 0 & 0 \\ \sin(-\theta(t) \cdot N) & \cos(-\theta(t) \cdot N) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix};$$

$\bar{Q}(i, z, t)$ - поверхность резания, представленная в виде:

$$\bar{Q}(i, z, t) = A_{\Sigma} \cdot \bar{r}_f(\theta_i, z), \quad (2)$$

где $\bar{r}_f(\theta_i, z)$ - уравнение поверхности инструмента;

θ_i - угловой параметр профиля фрезы;

z - параметр ширины инструмента;

i - номер зуба фрезы;

$\theta(t)$ - функция изменения угла поворота инструмента от времени

$$\theta(t) = \frac{N_{об} \cdot \pi \cdot t}{30}; \quad (3)$$

t - время контакта в процессе обработки, с;

N - количество граней РК-профиля;

$N_{об}$ - частота оборотов заготовки (об/мин);

$a_w(t)$ - функция сближения фрезы и заготовки

$$a_w(t) = \begin{cases} a_{w0} \leq a_{w0} + \frac{S \cdot t}{60} \leq R_{ПК} - R_f \\ a_{w0} + \frac{S \cdot t}{60} > R_{ПК} - R_f \end{cases} \quad (4)$$

a_{w0} - начальная величина смещения

$$a_{w0} = R_{ПК} - R_f - e, \quad (5)$$

S - величина поперечной подачи, мм/мин.

Вектор нормали к передней поверхности зададим как:

$$\bar{N}_{Pi}(\theta_i, z, \gamma_i) = A_{wi}(\theta_i, z) A^{(6)}\left(\frac{\pi}{2} - \gamma_i\right) \bar{k}_{Pi}, \quad (6)$$

где $A_{wi}(\theta_i, z)$ - матрица установки системы координат радиальной секущей плоскости с центром, проходящим через начало системы координат и режущую кромку;

$A^{(6)}\left(\frac{\pi}{2} - \gamma_i\right)$ - матрица поворота секущей плоскости

$$A^{(6)}\left(\frac{\pi}{2} - \gamma_i\right) = \begin{bmatrix} \cos\left(\frac{\pi}{2} - \gamma_i\right) & -\sin\left(\frac{\pi}{2} - \gamma_i\right) & 0 & 0 \\ \sin\left(\frac{\pi}{2} - \gamma_i\right) & \cos\left(\frac{\pi}{2} - \gamma_i\right) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix};$$

γ_i - передний угол;

$\bar{k}_{Pi}$ - орт, соответствующий положительному направлению оси Z_{Pi} ;

Вектор нормали к задней поверхности определим как:

$$\bar{N}_{3i}(\theta_i, z, \alpha_i) = A_{wi}(\theta_i, z) A^{(6)}(-\alpha) \bar{k}_{3i}, \quad (7)$$

где $A^{(6)}(-\alpha)$ - матрица поворота секущей плоскости вокруг оси на угол $-\alpha$;

α - задний угол;

$\bar{k}_{3i}$ - орт, соответствующий положительному направлению оси Z_{3i} .

Передний угол зуба фрезы для обработки РК-профильных отверстий определен как

$$\gamma(\theta_i, z, \gamma_i) = \arcsin(\bar{N}_{Pi}(\theta_i, z, \gamma_i) \cdot \bar{N}_{Pi}(\theta_i, z, \gamma_i)), \quad (8)$$

где $\bar{N}_p(\theta_i, z, \gamma_i)$ - нормаль к плоскости резания

$$\bar{N}_p(\theta_i, z, \gamma_i) = \frac{[\bar{V}_k(\theta_i, z, t) \cdot [\bar{N}_{3i}(\theta_i, z, \gamma_i) \cdot \bar{N}_{1i}(\theta_i, z, \gamma_i)]]}{\left| [\bar{V}_k(\theta_i, z, t) \cdot [\bar{N}_{3i}(\theta_i, z, \gamma_i) \cdot \bar{N}_{1i}(\theta_i, z, \gamma_i)]] \right|} \cdot \text{sign}\{-[\bar{V}_k(\theta_i, z, t) \cdot [\bar{N}_{3i}(\theta_i, z, \gamma_i) \cdot \bar{N}_{1i}(\theta_i, z, \gamma_i)]]\}. \quad (9)$$

Величина заднего угла между задней поверхностью резания определим как:

$$\alpha(\theta_i, z, \gamma_i) = \arccos(-\bar{N}_{3i}(\theta_i, z, \gamma_i) \cdot \bar{N}_p(\theta_i, z, \gamma_i)) \cdot \text{sign}\{[\bar{V}_k(\theta_i, z, \gamma_i)] \cdot [\bar{N}_{3i}(\theta_i, z, \gamma_i)]\}. \quad (10)$$

Так как исследуемый инструмент имеет переменный радиус профиля, то в процессе работы время контакта зуба фрезы с заготовкой будет различно (рис. 4), и зависит от геометрических параметров инструмента, положения зуба на профиле. Неодинаковая величина

на времени контакта, напрямую влияет на износ инструмента, поэтому необходимо знать величину изменения переднего угла для снижения сил и мощности при фрезеровании. Вследствие этого, на стадии проектирования, с использованием математического моделирования необходимо установить интервалы изменения кинематических углов.

Исследование проводилось для фрезы, профиль которого изображен на рис. 2, расположение зубьев на профиле фрезы выполнено с равным угловым шагом, значения переднего и заднего геометрических углов соответствует $\gamma_{ст} = 5^\circ$, $\alpha_{ст} = 12^\circ$. Из рис. 4 установлено, самыми нагруженными зубьями являются 12 и 13 зубья. Из-за более длительного контакта они будут подвержены наибольшему износу по сравнению с остальными зубьями.

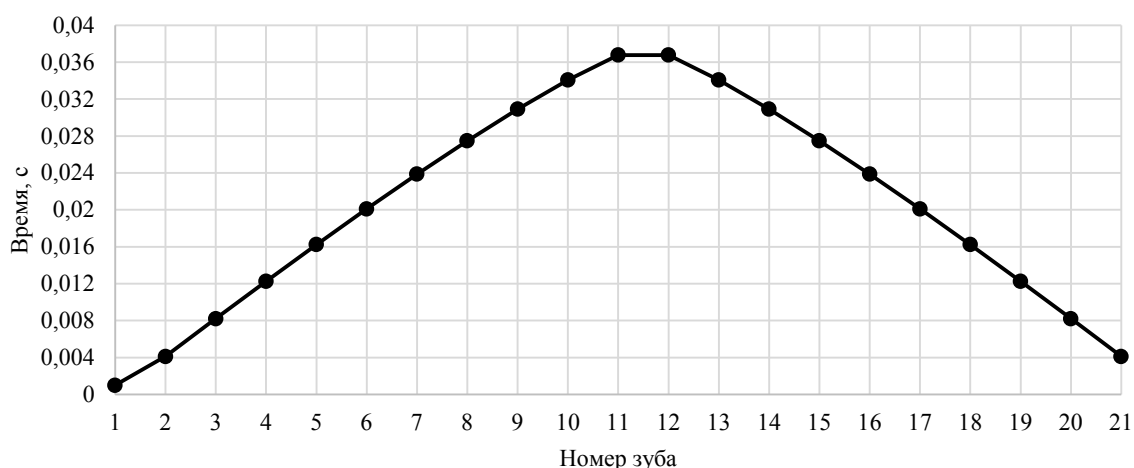


Рис. 4. График длительности контакта зуба фрезы с материалом заготовки

С использованием разработанного программного обеспечения проведен анализ изменения кинематических переднего и заднего углов, установлены диапазоны их значений в процессе резания. Построены графики изменения углов в предельных точках припуска: в начале контакта фрезы с заготовкой и в точке, когда i -й зуб фрезы выходит из зоны резания. Для определения интервалов варьирования углов рассматривали процесс фрезерования, где в качестве предельных точек расчета были выбраны моменты времени: начальный — момент времени контакта (съема припуска) фрезы с

заготовкой, конечный — момент окончания съема припуска рассматриваемым зубом фрезы.

По полученным результатам построены графики изменения переднего и заднего углов фрезы от влияния режимов резания при различных величинах поперечной подачи S , частоты вращения $N_{об}$ (рис. 5, рис. 6) для фрезы с параметрами $R_f = 24$ мм, количества зубьев фрезы $Z_f = 21$, передний угол $\gamma = 5^\circ$, задний угол $\alpha = 12^\circ$ и параметрами РК-3 профиля $R_{ПК} = 40$ мм, эксцентриситета $e = 3,4$ мм, количества граней $N = 3$.

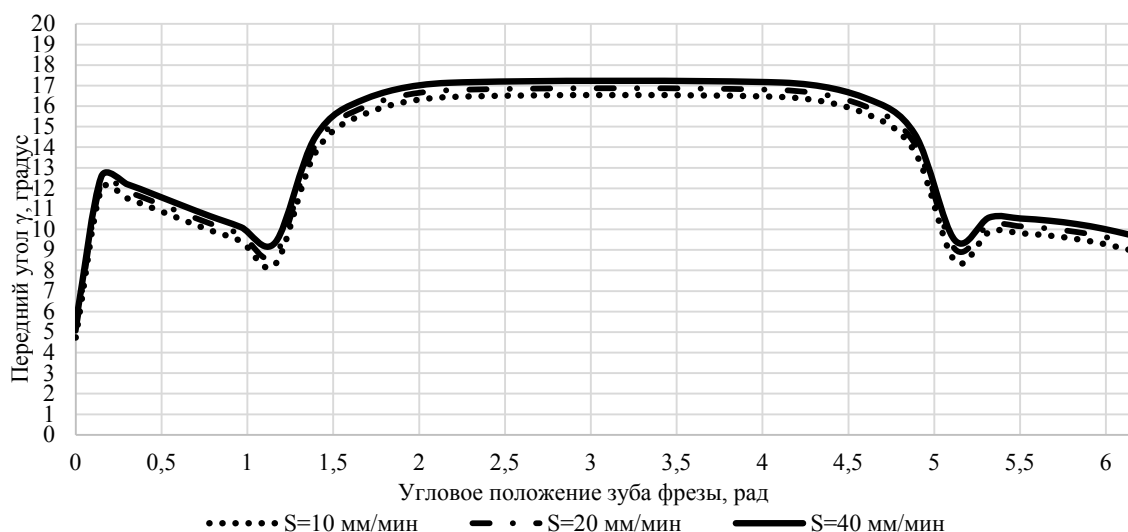


Рис. 5. Изменение переднего угла зубьев фрезы при частоте вращения $N_{об}=100$ об/мин

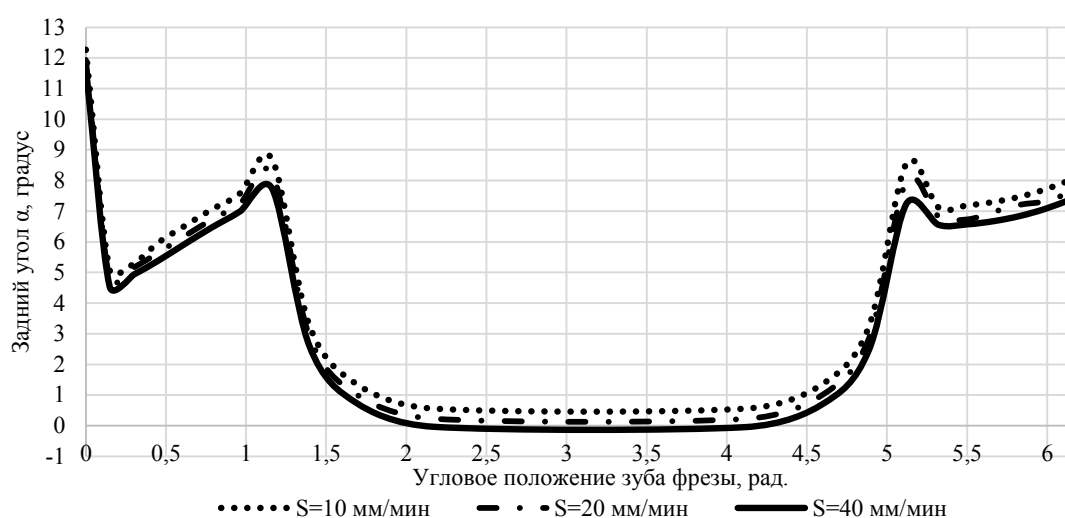


Рис. 6. Изменение заднего угла зубьев фрезы при частоте вращения $N_{об}=100$ об/мин

Из графиков видно, что величина переднего угла, в момент контакта рассматриваемого зуба фрезы с заготовкой варьируется от 17° до $4,7^\circ$, а величина заднего угла при этом меняется от 12° до 0° . Таким образом, для рассматриваемой фрезы с заданными параметрами статический угол $\alpha_{ст} = 12^\circ$ обеспечивает работоспособность фрезы на всем участке при обработке заготовки, и способствует формированию отверстия РК-3 профиля. Исходя из полученных графиков стоит отметить, что с увеличением величины поперечной подачи передний угол увеличивается, а задний наоборот – уменьшается.

Так как величина переднего угла оказывает влияние на силу резания, то необходимо провести исследование и определить значения статического угла заточивания, когда кинематический будет неизменным в заданных точках

контакта зуба с заготовкой. Аналогичное исследование проводилось и для заднего угла, т.к. в совокупности заточка переднего и заднего угла позволяет оценить жесткость и прочность зуба.

Решение поставленной проектной задачи достигается тем, что для фрезы с параметрами $R_f = 24$ мм, $Z_f = 21$, режимами $S = 20$ мм/мин, $N_{об} = 100$ об/мин и параметрами профиля РК-3 $R_{РК} = 40$ мм, $e = 3,4$ мм, $N = 3$, подобран индивидуальный угол заточивания переднего $\gamma_{ст}$ и заднего угла $\alpha_{ст}$, при котором значения кинематического угла переднего равно $\gamma_{кин} = 5^\circ$, заднего угла $\alpha_{кин} = 12^\circ$. Полученные данные сведены в табл. 1.

Таблица 1
Величины затачивания углов для фрезы
с заданными параметрами

№ зуба	Угол затачивания переднего угла $\gamma_{ст}$, град	Угол затачивания заднего угла $\alpha_{ст}$, град
1	5	12
2	-2	19
3	-2	19
4	-1	18
5	-1	18
6	0	17
7	0	17
8	1	16
9	-4	21
10	-6	23
11	-7	24
12	-7	24
13	-6	23
14	-4	21
15	0	16
16	0	17
17	0	17
18	0	17
19	0	17
20	1	17
21	1	17
12	-7	24
13	-6	23

По полученным результатам построены графики, определяющие величины затачивания переднего и заднего углов, при котором обеспечивается постоянный кинематический угол в процессе обработки (рис. 7).

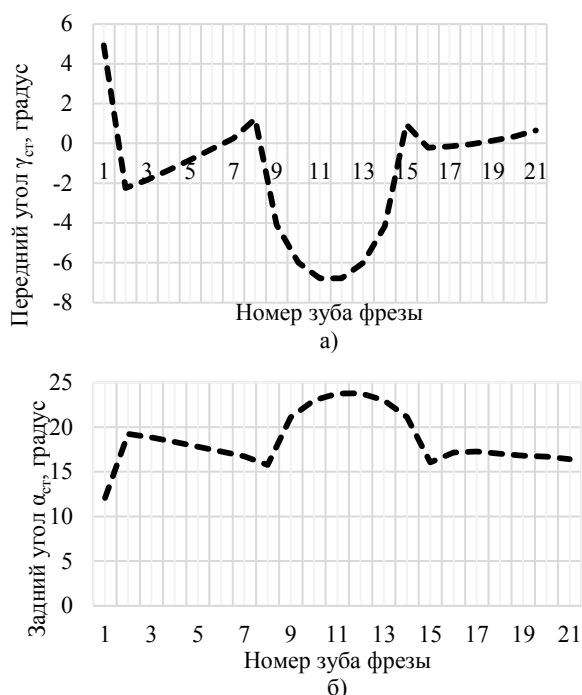


Рис. 7. Величины углов затачивания зубьев фрезы при обеспечении постоянного кинематического угла в процессе обработки: а) переднего угла; б) заднего угла

Так как в процессе резания может происходить затирание задней поверхности фрезы по поверхности резания, то важно понимать, как меняется задний кинематический угол в процессе обработки. Важно отметить, что обеспечивать постоянство заднего кинематического угла для фрезы с переменным радиусом не обязательно. Исходя из увеличения сечения режущего клина, руководствуясь при этом проверочным расчетом, можно варьировать угол затачивания, исключая значения с отрицательным показателем кинематического заднего угла.

На рис. 8 показаны схемы, определяющие положения переднего и заднего улов.

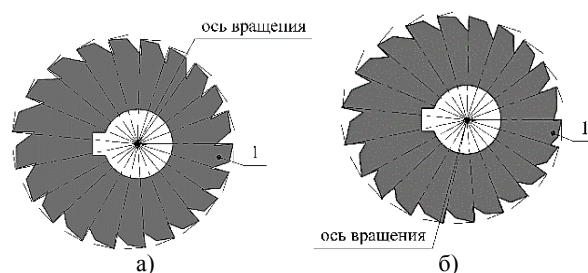


Рис. 8. Положения переднего и заднего улов:
а) при одинаковых углах затачивания;
б) с учетом величины затачивания для обеспечения неизменности кинематических передних и задних углов

Результатом исследования может являться 3D-модель для обработки РК-профильного отверстия с учетом разных углов затачивания зубьев. Полученные трехмерные модели могут быть использованы для дальнейших исследований, в частности при оценке работоспособности фрез, определения стойкости и прочности зубьев.

Заключение

С применением разработанного программного обеспечения проведен анализ изменения кинематических углов фрезы, определены интервалы изменения передних и задних углов, установлено время контакта i -го зуба фрезы даны рекомендации по назначению углов заточки фрезы. Выполненный расчет кинематических углов фрезы позволяет на стадии математического моделирования проверить геометрические параметры режущих элементов, что может быть полезным при решении конструкторско-технологических задач. С помощью представленного расчета возможно дальнейшее проведение исследований условий работы инструмента при различных геометрических параметрах, конструкциях режущих зубьев, вариантов заточки углов и режимов резания.

Литература

1. Бронштейн И.Н., Семендяев К. А. Справочник по математике. Для инженеров и учащихся вузов: учебное пособие. М: Наука, 2010. 544 с.
2. Емельянов С.Г., Куц В.В. Моделирование процесса обработки шейки коленчатого вала сборной дисковой фрезой, оснащенной сменными многогранными пластинами // Техника машиностроения. 1999. № 2. С. 21-25.
3. Емельянов С.Г., Куц В.В. Математическое моделирование сборных фасонных фрез: монография. Курск: гос. техн. ун-т, 2008. 254 с.
4. Куц В.В., Максименко Ю.А. Структурный синтез специализированных металлорежущих систем для обработки РК – профильных валов // Известия Юго-Западного государственного университета. 2012. №6(45). С.65-70.
5. Куц В.В., Разумов М.С., Митрофанов М.В. Моделирование фрезы с радиальной конструктивной подачей для обработки РК-профильных отверстий // Известия Юго-Западного государственного университета. 2019. Т. 23. № 5. С. 82-93.
6. Куц В.В., Мальнева Ю.А., Митрофанов М.В. Обзор существующих методов обработки РК-профильных отверстий // Молодежь и наука: шаг к успеху: сб. науч. ст.

5-й Всерос. науч. конф. перспективных разработок молодых ученых. Курск, 2021. С. 188-192.

7. Куц В.В. Расчет величин искажения профиля обрабатываемой фасонной поверхности при разработке CAD/CAM – системы сборных фасонных фрез // Автоматизация и современные технологии. 2004. № 11. С. 5-7.

8. Куц В.В., Пономарев В.В. Метод определения положения зубьев сборной дисковой фрезы с конструктивной радиальной подачей // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2017. Т. 13. № 6. С. 81-85.

9. Куц В.В., Мальнева Ю.А., Бейе А. Исследование кинематических углов фрезы-протяжки при обработке эксцентриковых валов // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2022. Т. 18. № 3. С. 133-138.

10. Тимченко А.И. Исследование процесса формообразования профильных валов с равноосным контуром: дис. ... канд. техн. наук. Москва, 1979. 120 с.

11. Тимченко А. И. Процессы формообразования профильных поверхностей изделий с равноосным контуром: дис. ... д-р техн. наук. Москва, 1993. 549 с.

12. Тимченко, А.И. Технология изготовления деталей профильных бесшпоночных соединений. М.: ВНИИТЭМР, 1988. 160 с.

Поступила 20.10.2023; принята к публикации 07.12.2023

Информация об авторах

Куц Вадим Васильевич - д-р техн. наук, профессор, Юго-Западный государственный университет (305000, Россия, г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94), e-mail: kuc-vadim@yandex.ru

Митрофанов Максим Владимирович – аспирант, Юго-Западный государственный университет (305000, Россия, г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94), e-mail: mitrofanovmaksim@list.ru

Кириллов Олег Николаевич – д-р техн. наук, профессор, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), тел. 8(473)2530973, e-mail: kirillov.olli@yandex.ru

THEORETICAL STUDY OF CUTTER KINEMATIC ANGLES WHEN MACHINING PROFILE HOLES WITH EQUIAXED SHAPE

V.V. Kuts¹, M.V. Mitrofanov¹, O.N. Kirillov¹

¹South-West State University, Kursk, Russia

²Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract: one of the main tasks facing the domestic mechanical engineering, and, in particular, tool production, is the design of metal-cutting tools based on modern computer technologies using mathematical modeling of cutting processes at the development stage. The use of computer technology makes it possible to predict the qualitative and quantitative indicators of the estimated parameters of the cut layer before the manufacturing stage, which in turn makes it possible to make changes to the geometry of the tool and solve problems to improve the processing efficiency before its manufacture. In this article, a study was carried out using the example of the proposed method of shaping profile holes with equiaxed shape, the essence of which is the use of a cutter with a constructive radial feed. Using the developed software, an analysis of changes in the kinematic angles of the cutter was carried out, the intervals for changing the front and rear angles during the cutting process were determined, the contact time of the *i*-th cutter tooth was determined, conclusions were drawn about the unequal loading conditions of the cutter teeth during processing, and the prerequisites were created for the subsequent study of wear resistance tool. The results of the study can be used in the design of metal-cutting tools for shaping faceted internal surfaces, in particular when calculating the values of the rake and back angles of the tool

Key words: equiaxed shaped profile, kinematic angles, mathematical model, cutter, shaping, eccentricity, modeling, front surface, rear surface, contact time

References

1. Bronshtein I.N., Semendyaev K.A. "Handbook of mathematics. For engineers and university students" (Spravochnik po matematike. Dlya inzhenerov i uchashchikhsya vuzov), Moscow, Nauka, 2010, 544 p.

2. Emelyanov S.G., Kuts V.V. "Modeling the process of machining the crankshaft journal with a prefabricated disk cutter equipped with replaceable multifaceted plates", *Mechanical engineering (Tekhnika mashinostroyeniya)*, 1999, no. 2, pp. 21-25.
3. Emelyanov S.G., V.V. Kuts "Mathematical modeling of prefabricated shaped cutters: monograph" ("Matematicheskoye modelirovaniye sbornykh fazonnykh frez: monografiya"), Kursk, gos. tekhn. un-t, 2008, 254 p.
4. Kuts V.V., Maksimenko Yu.A. "Structural synthesis of specialized metal-cutting systems for processing equiaxed shaped profile shafts", *News of the South-West State University (Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta)*, 2012, no. 6 (45), pp.65-70.
5. Kuts V.V. Razumov M.S., Mitrofanov M.V. "Modeling of a milling cutter with a radial structural feed for processing equiaxed shaped profile holes", *News of the South-West State University (Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta)*, 2019, vol. 23, no. 5, pp. 82-93.
6. Kuts V.V. Malneva Yu.A., Mitrofanov M.V. "Review of existing methods for processing equiaxed shaped profile holes", *The youth and science: a step to success (Molodezh i nauka: shag k uspekhu)*, coll of scientific articles of the 5th All-Russian scientific conference on promising developments of young scientists, Kursk, 2021, pp. 188-192.
7. Kuts V.V. "Calculation of the distortion values of the profile of the machined shaped surface when developing CAD\CAM - a system of prefabricated shaped cutters", *Automation and modern technologies (Avtomatizatsiya i sovremennyye tekhnologii)*, 2004, no. 11, pp.5-7.
8. Kuts, V.V., Ponomarev V.V. "Method for determining the position of the teeth of a prefabricated disk cutter with a constructive radial feed", *The Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2017, vol. 13, no. 6, pp. 81-85.
9. Kuts V.V., Malneva Yu.A., Beye A. "Study of the kinematic angles of the broach cutter when processing eccentric shaft", *The Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2022, vol. 18, no. 3, pp. 133-138.
10. Timchenko A.I. "Study of the process of shaping profile shafts with an equiaxial contour" ("Protsessy formoobrazovaniya profilnykh poverkhnostey izdeliy s ravnoosnym konturom", diss. Cand. Sc. (tech.), Moscow, 1979, 120 p.
11. Timchenko A.I. "Processes of shaping profile surfaces of products with an equiaxial contour" ("Issledovaniye protsessa formoobrazovaniya profilnykh valov s ravnoosnym konturom"), diss. Dr. Sc. (tech.), Moscow, 1993, 549 p.
12. Timchenko A.I. Technology for manufacturing parts of profile keyless connections ("Tekhnologiya izgotovleniya detaley profilnykh besshponochnykh soedineniy"), Moscow, VNIITEMR, 1988, 160 p.

Submitted 20.10.2023; revised 07.12.2023

Information about the authors

Vadim V. Kuts – Dr. Sc. (Technical), Professor, South-West State University (94 50 let Oktyabrya str., Kursk 305000, Russia), e-mail: kuc-vadim@yandex.ru
Maxim V. Mitrofanov – Postgraduate student, South-West State University (94 50 let Oktyabrya str., Kursk 305000, Russia), e-mail: mitrofanovmaksim@list.ru
Oleg N. Kirillov – Dr. Sc. (Technical), Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), tel. +7 (473) 253-09-73, e-mail: kirillov.oli@yandex.ru

ВЛИЯНИЕ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА И СТРУКТУРЫ НА ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ
МАЛОУГЛЕРОДИСТЫХ БЕЛЫХ ЧУГУНОВ

Л.С. Печенкина, И.И. Емельянов

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

Аннотация: износостойкость является важной характеристикой долговечности самих машин и изделий, работающих при трении. Она определяется в основном твердостью. Износостойкие белые чугуны – группа хромистых и никель-хромистых чугунов, их главная особенность – при затвердевании выделяется карбидная фаза, наделяющая высокой износостойкостью при абразивном изнашивании. Область для применения деталей из белых чугунов, устойчивых к износу, охватывает многие промышленные отрасли, где долговечность деталей можно соотнести с абразивным износом. Есть условия подбора марки износостойкого чугуна: рабочая среда и скорость износа. Следует помнить о механической обработке, прокаливаемости и экономичности выбранного материала. Изучая влияние легирующих компонентов на величину износостойкости белых чугунов, можно сказать, что содержание таких элементов, как хром, марганец и никель благоприятно воздействуют на интересующие характеристики изделий. Многие предприятия вносят в свою номенклатуру большое число отливок как раз из рассматриваемого чугуна. Особенно мало сведений о малоуглеродистых белых чугунах, что характеризует актуальность исследования. В качестве рассматриваемых материалов были взяты белые чугуны без содержания меди и с её содержанием. Все испытания проводились на машине трения МИ-1М. Было изучено, какое влияние удельная нагрузка оказывает на величину износа. В качестве эталона был выбран сплав марки ШХ15. Было выявлено, что наименьшее различие между зависимостями для сплавов и эталона наблюдается в промежутке нагрузки до 5 МПа. Но начиная с нагрузки в 1,5 МПа, видно, что удельная нагрузка напрямую влияет на коэффициент износостойкости. Основываясь на получившихся корреляционных зависимостях коэффициентов относительной износостойкости от механических свойств, факторов химического и фазового состава сплавов, был выполнен анализ износостойкости этих самых сплавов. Предварительно была проведена комплексная оценка относительно основного элемента-аустенитизатора – марганца, а также влияния степени аустенитизации структуры. В результате исследования установлены зависимости влияния содержания химических элементов и содержания аустенита в структуре на коэффициент износостойкости малоуглеродистых сплавов. Наибольшая износостойкость отмечается у малоуглеродистых чугунов при содержании марганца в пределах двух-трех процентов, что сочетается с содержанием в структуре двадцати – тридцати пяти процентов аустенита. Это объясняется влиянием марганца на структуру. В условиях абразивного износа максимум увеличивается на десять процентов, так как наблюдается более сильное уплотнение поверхностного слоя. Определены количества мартенсита, аустенита, карбидов, дающие наибольшую стойкость к изнашиванию в разных условиях, применительно к исследуемым сплавам

Ключевые слова: изнашивание, отливка, белый чугун, структура, коэффициент износостойкости

Введение

Износостойкость является важной характеристикой долговечности самих машин и изделий, работающих при трении. Износ проявляется в условиях трения со смазанной поверхностью, возможен абразивный, под действием сухого трения, и эрозионно-кавитационный.

У деталей, работающих на изнашивание один из наиболее важных эксплуатационных параметров – износостойкость, которая определяется в основном твердостью[1].

Явление, что подразумевает собой объемное уменьшение изделий в процессе его работы под действием трения, называется изнашиванием. На деталях это можно увидеть в виде небольшой остаточной деформации контактирующих поверхностей или самого металла.

Существующие группы износа можно разделить на следующие: механическое, коррозионно-механическое, молекулярно-механическое и гравитационное. Такие виды износа присущи некоторым сплавам (рис. 1).

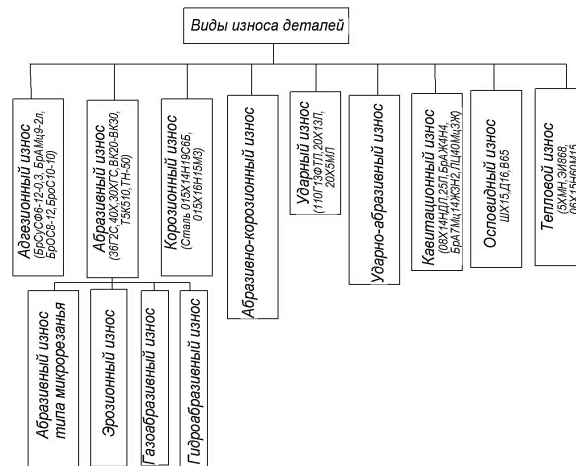


Рис. 1. Виды износа деталей

Износостойкие белые чугуны – группа хромистых и никель-хромистых чугунов, их главная особенность – при затвердевании выделяется карбидная фаза, наделяющая высокой износостойкостью при абразивном изнашивании. Область для применения деталей из белых чугунов, устойчивых к износу, охватывает многие промышленные отрасли, где долговечность деталей можно соотнести с абразивным износом. Есть условия подбора марки износостойкого чугуна – рабочая среда и скорость износа. Следует помнить о механической обработке, прокаливаемости и экономичности выбранного материала [2].

Многие предприятия вносят в свою номенклатуру большое число отливок как раз из рассматриваемого чугуна. Особенно недостаточно сведений о малоуглеродистых белых чугунах, что характеризует актуальность исследования.

При изучении первоисточников возникла проблема с подбором металла для производства элементов конструкции, которые должны будут эксплуатироваться с абразивом и средой, точнее сказать, в гидроабразивных средах. Также нужно не забывать о показателях среды и абразива (концентрации в жидкости, формы, твердости), продолжительности работы детали. Но в существующем положении производители хотят получить усовершенствованные качества материала, иными словами, повысить эксплуатационные характеристики.

Желаемых результатов возможно добиться, координируя следующие показатели: формирование характеристик и строения металла в изделиях из белых чугунов; соотношение основных химических элементов; модифицирование; режимы термической обработки; комплексные легирования [3].

По причине коррозии износ деталей и снижение прочности верхнего слоя в окислительной среде, под действием абразивного изнашивания, быстро увеличивается. Поэтому большой устойчивостью к износу обладают только чугуны, являющиеся одновременно также коррозионностойкими. В то же время, для хромистых белых чугунов данное условие выполняется при достижении содержания хрома в сплаве не менее 12 %, когда тот оказывается коррозионностойким в кислых, нейтральных и окислительных средах из-за пассивности при пленкообразовании оксидов хрома. Авторами [4] представлены результаты определения интенсивности коррозии белых износостойких чугунов обогащенной фа-

рики медно-серного комбината в технической воде. Пассивное состояние в данных условиях наступает после превышения содержания хрома в чугуне более 30 %. Отожженные образцы имеют коррозионную стойкость ниже, чем закаленные. Связано это с большей легированностью хромом мартенсита, в сравнении с перлитом.

Литые закаленные детали из чугунов с повышенным содержанием кремния имеют одинаковую стойкость к коррозии.

Дополнительное легирование молибденом (до 1,5 %), кремнием (до 4 %) и марганцем (до 9 %) при постоянном содержании хрома и углерода на коррозионную стойкость закаленных образцов не влияет. Отожженные образцы обладают пониженной коррозионной стойкостью.

Изучив анализы воздействия легирующих компонентов на качества чугуна марки ИЧХ28Н2, можно судить, что углерод и хром равнозначно положительно отражаются на всех рассмотренных параметрах. Одинаковое хорошее действие на твердость проявляют марганец, кремний и никель. Из прочих легирующих элементов большое воздействие на прочность оказывает кремний, а никель не в такой степени как прочие действует на износостойкость. Неблагоприятные элементы, главные из которых сера и фосфор, постоянно негативно влияют на все качества [4].

Примеси меди в белых хромистых чугунах благоприятствуют повышению его сопротивления ударным нагрузкам, улучшению обрабатываемости, увеличению износостойкости, а также твердости. В высокохромистом чугуне можно сделать стабильным аустенит в перлитной области, используя медь, увеличивающую прокаливаемость сплава. Концентрация меди в чугуне не должно быть больше 1,5 %. Выделению меди на межфазных поверхностях способствует повышение ее содержания в сплаве до 5 % [5].

В качестве материала, для изготовления отливок в условиях крупного производства, которые в дальнейшем планируют использовать под действием гидроабразивного износа, применяют чугун марки ИЧХ28Н2 – легированный преимущественно хромом. Этот сплав включает ресурсно-экономически затратный никель. Данный металл не может похвастаться хорошей обрабатываемостью резанием. Расчёт необходимых концентраций легирующих элементов в чугуне составляет наибольший интерес работы. Делается это с той целью, чтобы оставить неизменными требуемые механические и литейные

свойства, а также добиться максимальной износостойкости. Немалый объём исследований был выполнен относительно зависимости износостойкости белого чугуна, в составе которого имеется около 4% марганца, от содержания хрома. Основываясь на них, можно сказать, что лучшей износостойкостью обладает чугун, в составе которого хром содержится 17 – 22 %. Стабилизировать аустенит помогает марганец. В общем итоге, выбор пал на хромомарганцевый чугун марки 290Х19Г4, в составе которого хрома 18 – 20 % и марганца 3,8 – 4,5 %.

Для повышения долговечности белых чугунов следует обратиться к еще одному микролегированию. К примеру, сурьма, может увеличить численность эвтектики, а также поменять ее строение. Последующее повышение концентрации сурьмы ослабляет износостойкость по причине выделения структурно – свободного цементита, который равным образом, под влиянием абразива, просто выкрашивается [6].

Вследствие изучения теоретической литературы и опытных испытаний, было установлено, что:

- углерод, медь и хром являются первыми источниками позитивного влияния на прочность, твердость, износостойкость;
- на смену дорогому высоколегированному хромоникелевому чугуну марки ИЧХ28Н2, в составе которого содержится редкий и дорогостоящий никель, можно использовать хромомарганцевый чугун марки 290Х19Г4;
- малое легирование сурьмой провоцирует повышение износостойкости;
- рафинирование и модифицирование оказывают благоприятный эффект на некоторые характеристики чугуна, а именно модифицирование комплексной лигатурой БФТ – 1, которое повышает целый комплекс эксплуатационных свойств чугуна ИЧХ28Н2.

Износостойкость определяется структурой и твердостью НВ сплава, поэтому очень важно знать влияние химического состава на эксплуатационные характеристики изделий из износостойкого белого чугуна. Особенно мало информации по малоуглеродистому специальному чугуну.

Методика проведения исследования

Метод индукционной плавки является одним из самых распространенных и прогрессирующих методов подготовки металла при изготовлении отливок из чугуна. С плавкой в индукционных печах появляется возможность

регулирования температуры и состава в широких пределах, что очень помогает с выбором нужной лигатуры.

Необходимо понимать, что печь использовалась с основной футеровкой. Основная футеровка изготавливалась из основной шамотной глины, которая содержит более низкую концентрацию кремнезема и алюминия по сравнению с кислой футеровкой. Имеет щелочную химическую реакцию и может быть нейтрализована кислотами. Обладает высокой прочностью на сжатие и стойкостью к термическому шоку. Чаще всего применяется в случаях, когда процессы в печи не вызывают образование щелочных веществ.

Методика выплавки чугуна в индукционной печи с основной футеровкой включала следующие этапы:

Подготовка индукционной печи.

Проверка состояния печи и её работоспособности. Следом проверка состояния футеровки печи. Если есть повреждения или износ, необходимо выполнить ремонтные работы. Подготовка сырья для выплавки чугуна необходимого состава.

Загрузка сырья.

Запуск процесса выплавки.

Этап включения индукционной печи и установки необходимых параметров нагрева (мощность и время). Доведение загрузочной смеси до температуры плавления чугуна. Поддержание необходимой температуры.

Отливка образцов чугуна в разовые песчаные формы.

Обслуживание печи.

Химический состав сплавов определяли методами химического анализа. Фазовый состав – методами карбидного, рентгено-спектрального и –структурного анализов. Чтобы провести испытания на износ применяли машины МИ и МИ-1М. На машинах типа МИ осуществляются испытания в двух разных вариантах: на двух прижатых роликах друг к другу, которые вращаются в противоположные стороны с разными скоростями; и на одном вращающемся ролике, с прижимающимся к нему вкладышем. В случае с двумя роликами возможно получить скольжение различной степени, во втором же случае – десятипроцентное. Нагрузка, подаваемая на вкладыш или ролик, может изменяться в пределах от 2 до 20 МПа.

Машины модели МИ дают возможность проверять износостойкость материалов в зависимости от внешних факторов: нагрузка, добавочное скольжение при качении, смазка, попе-

речное скольжение, среда (окислительная и нейтральная газовые среды, жидкая и сыпучая абразивные среды).

В качестве показателей износа при испытаниях на машинах МИ можно использовать: абсолютный износ в граммах за определенное время или путь трения, относительный износ, отнесенный к 100 МПа работы трения, изменение диаметра кольца величину.

Исследования на машинах МИ показывают, что для твердых сталей увеличение нагрузки повышает износ, а для мягких сталей (благодаря дополнительному действию наклепа) износ может уменьшаться, а не увеличиваться.

Влияние нагрузок на машинах модели МИ можно рассматривать при чистом качении (в случаях когда верхний образец изолирован от принудительного вращения), в случаях качения с частичным скольжением и десятипроцентным скольжением. Давление рассчитывают по формуле Герца. Таким образом, влияние размера образца сводится к нулю, потому как одинаковая нагрузка при разных размерах образца спровоцирует появление участков различной величины, также разные сжимающие напряжения. Давление обладает довольно большим значением и превышает предел упругости линейного напряженного состояния. Однако, это не означает, что предел пластичности в сложном напряженном состоянии достигается в месте соприкосновения образцов.

Проведение исследования

Для анализа были выплавлены сплавы, содержащие, в процентах, от 1,46 до 2,33 углерода, от 0,71 до 4,79 марганца, от 5,3 до 7,2 хрома, от 5 до 8,2 ванадия. Отдельная группа образцов дополнительно содержала 0,22 до 2,13 процентов меди. Определена твердость образцов, их химический состав, фазовый по количеству аустенита, составляющих карбидов. В табл. 1. приведены результаты испытаний на изнашивание под действием трения, проведенных на машине МИ-1М под разными нагрузками, учитывающие также значения следующих основных влияющих факторов: средней твердости, факторов химического и фазового состава. Были получены зависимости, которые могут характеризовать как удельная нагрузка влияет на величину износа, применив регрессионный анализ для сплавов (табл. 1).

Было введено условие на время статистического анализа полученных результатов: при $P = 0$, $I = 0$ (здесь и далее P – удельная нагрузка,

МПа, I – износ, мг/см² на 1000 п.м.). Зависимости показывают нелинейный характер. Несколько из них можно наблюдать на рис. 2. Делаем выводы: при возрастающем давлении, износ образцов начинает активно увеличиваться. Яркое это видно на примере данного нам эталона – стали ШХ15 (HRC 61).

Таблица 1
Влияние удельной нагрузки (P , МПа)
на величину износа (I , мг)

Номер сплава	Уравнение для I	R^2
2	$5,0 P - 0,75 P^2 + 0,052 P^3$	0,995
7	$12 P - 1,41 P^2 + 0,066 P^3$	0,9989
8	$4,3 P - 0,65 P^2 + 0,046 P^3$	0,996
13	$2,6 P - 0,42 P^2 + 0,033 P^3$	0,994
14	$2,41 P - 0,48 P^2 + 0,043 P^3$	0,997
15	$7 P - 0,92 P^2 + 0,052 P^3$	0,995
16	$2,4 P - 0,47 P^2 + 0,035 P^3$	0,998
18	$2,4 P - 0,47 P^2 + 0,036 P^3$	0,997
19	$2,1 P - 0,34 P^2 + 0,032 P^3$	0,998
20	$11 P - 1,72 P^2 + 0,097 P^3$	0,972
21	$2,13 P - 0,43 P^2 + 0,038 P^3$	0,994
22	$3,4 P - 0,61 P^2 + 0,041 P^3$	0,986
23	$6,2 P - 0,77 P^2 + 0,048 P^3$	0,994
M1	$5,2 P - 0,87 P^2 + 0,058 P^3$	0,997
M2	$2,3 P - 0,42 P^2 + 0,031 P^3$	0,997
M3	$2,5 P - 0,47 P^2 + 0,037 P^3$	0,998
M4	$2,1 P - 0,35 P^2 + 0,028 P^3$	0,997
M5	$4,4 P - 0,72 P^2 + 0,051 P^3$	0,993
M6	$12,4 P - 1,62 P^2 + 0,096 P^3$	0,998
M7	$10,3 P - 1,64 P^2 + 0,092 P^3$	0,993
ШХ15 (эталон)	$19 P - 4,16 P^2 + 0,356 P^3$	0,995

Наименьшее различие между зависимостями для сплавов и эталона наблюдается в промежутке нагрузки до 5 МПа. K_n – коэффициент относительной износостойкости. Этот коэффициент, для всех рассматриваемых сплавов, при давлении равном примерно 5 МПа, должен принимать свои наименьшие значения.

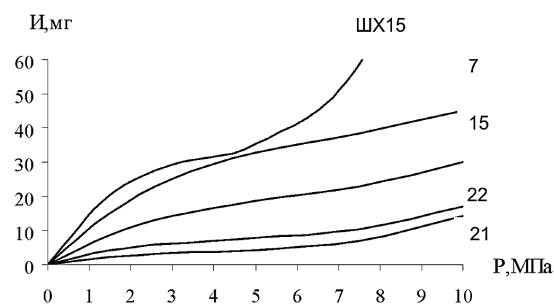


Рис. 2. Зависимость величины износа некоторых сплавов от удельной нагрузки (сопоставляя с эталоном ШХ15); номера выбранных сплавов показаны рядом с кривыми

В табл. 2 указаны значения коэффициента износостойкости для заданных удельных нагрузок от 1,5 до 10 МПа, полученные согласно отношению износа эталона к износу исследуемого сплава. Вычисления были выполнены, используя зависимости износа от удельной нагрузки, для эталона и используемых сплавов. Значения представлены в табл. 2. На рис. 3 можно видеть зависимости нескольких сплавов. Полученные кривые показывают, что значения удельной нагрузки P на промежутке P от 1,5 до 10 МПа напрямую влияют на значения величины K_n . Их минимум довольно близок к значениям $P = 5$ МПа. Последующий анализ будет выполнен согласно рассчитанным минимальным значениям.

Основываясь на табл. 2 и рис. 3 можно сделать выводы о том, что по износостойкости больше всех приблизились к эталонному материалу следующие сплавы: 7, 20 и М6. Помимо этого сплавы 7 и 20 выделяются пониженной твердостью (меньше HRC 50), а сплав М6 в свою очередь – относительно малой степенью легирования (по содержанию хрома, марганца, ванадия).

Таблица 2

Коэффициенты износостойкости сплавов (эталон – сталь ШХ 15 с твердостью HRC 61)

Номер сплава	К _н при удельных нагрузках Р, МПа				
	1,5	3	5	7,5	10
2	3,38	3,02	2,74	3,32	4,63
7	1,34	1,15	1,07	1,52	2,88
8	3,84	3,42	3,12	3,72	5,21
13	6,26	5,45	4,71	5,07	6,51
14	7,04	6,83	6,72	6,81	7,11
15	2,35	2,04	1,91	2,55	4,32
16	7,27	7,02	7,07	8,43	10,1
18	7,55	7,16	6,91	7,58	8,68
19	7,76	6,78	5,77	5,91	7,21
20	1,56	1,43	1,43	2,11	3,52
21	8,71	8,56	8,26	8,51	9,08
22	5,02	4,68	4,55	5,72	7,64
23	2,63	2,26	2,03	2,62	4,18
М1	3,26	2,98	2,86	3,64	5,11
М2	7,72	7,12	6,71	7,61	9,28
М3	7,28	7,02	7,12	8,52	10,07
М4	7,86	7,11	6,61	7,62	9,93
М5	3,82	3,43	3,12	3,68	4,93
М6	1,32	1,12	1,02	1,31	2,12
М7	1,65	1,52	1,54	2,31	3,88
Сталь ШХ 15	1	1	1	1	1

Основываясь на получившихся корреляционных зависимостях коэффициентов относительной износостойкости от механических свойств, факторов химического и фазового состава сплавов, был выполнен анализ износостойкости

этих самых сплавов. Предварительно была проведена комплексная оценка относительно основного элемента-аустенитизатора – марганца, а также влияния степени аустенизации структуры.

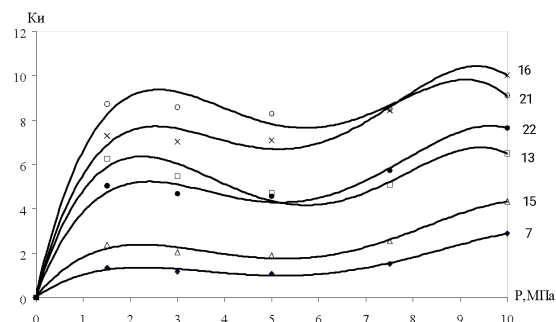


Рис. 3. Зависимость коэффициента износостойкости под действием трения относительно удельной нагрузки для некоторых сплавов (в качестве эталона – сталь ШХ15)

На рис. 4 и 5 можно увидеть зависимости корреляции для материалов 2-23 без меди и других дополнительных легирующих компонентов (кривые 1), помимо этого для металлов группы «М», в составе которых медь и набор иных компонентов (кривые 2). Данные зависимости обладают экстремальным характером.

Основываясь на этих зависимостях, сплавы в составе которых отсутствует медь можно выделить подгруппы «а» и «б». Необходимо это сделать для того, чтобы была возможность пользоваться как можно более простыми корреляционными зависимостями (линейные для множественной и полиномиальные для парной корреляций) для каждой подгруппы. В подгруппу «а» наиболее логично было внести металлы, имеющие в структуре до 2 % Mn и содержащие до 20 % аустенита (сплавы 2, 7, 8, 13, 14, 15 и 19).

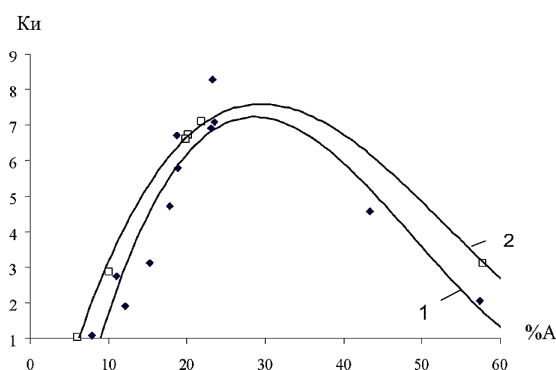


Рис. 4. Корреляционное влияние степени аустенизации структуры материалов на коэффициент износостойкости: 1 – металлы 2-23, 2 – металлы от М1 до М7

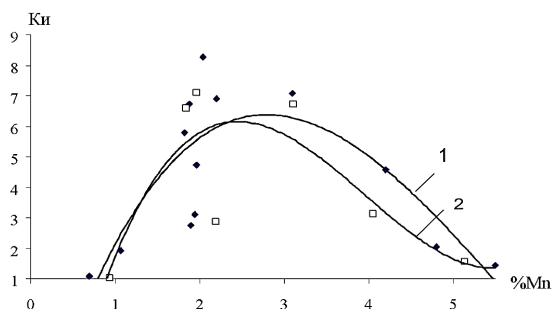


Рис. 5. Корреляционное влияние содержания элемента марганца на коэффициент степени износостойкости: 1 – сплавы без содержания меди, 2 – сплавы с медью

Оставшиеся металлы (16, 18, 20, 21, 22 и 23) соотносятся в следующую подгруппу «б». Данные подгруппы несколько разнятся теми группами «а» и «б», что были выделены до этого и применялись во время анализа механических свойств. Это обусловлено тем, что выборка сплавов сократилась, и испытуемых, подверженных износу, вместо 25 стало всего 13. Также важным фактором стали особенности зависимостей, показанных на рис. 4 и 5.

Главным образом необходимо рассмотреть корреляционную зависимость износостойкости от механических свойств (твердость, предел прочности и ударная вязкость). На рис. 6 можно видеть как влияет твердость HRC на коэффициент износа $K_{и}$ для металлов подгрупп «а» и «б», но помимо этих – для комплексно-легированных металлов группы М. Во время анализа металлов последней группы не брался во внимание металл Мб, потому что он не обладал достаточной степенью легирования и не соответствовал по структуре рассматриваемым сплавам.

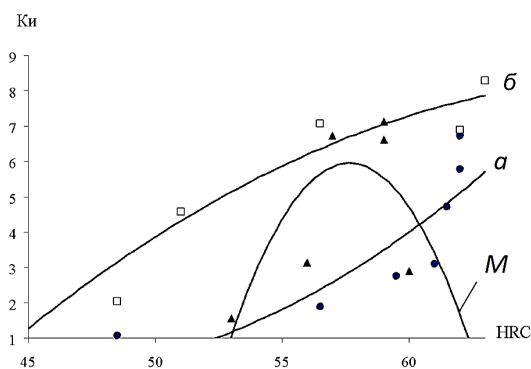


Рис. 6. Зависимость величины коэффициента износостойкости от значения твердости металлов: а и б – сплавы без содержания меди, М – сплавы с медью

Максимум износостойкости наблюдается при увеличении твердости выше 60 HRC. В

образцах с медью наблюдается другая картина. Максимум твердости находится строго в интервале 55-60 HRC.

Заключение

Установлены зависимости влияния содержания химических элементов и содержания аустенита в структуре на коэффициент износостойкости малоуглеродистых сплавов. Наибольшая износостойкость отмечается у малоуглеродистых чугунов при содержании марганца в пределах двух-трех процентов, что сочетается с содержанием в структуре двадцати – тридцати пяти процентов аустенита. Это объясняется влиянием марганца на структуру. В условиях абразивного износа максимум увеличивается на десять процентов, так как наблюдается более сильное уплотнение поверхностного слоя.

Определены количества мартенсита, аустенита, карбидов, дающие наибольшую стойкость к изнашиванию в разных условиях, применительно к исследуемым сплавам.

Исходя из полученных результатов, возможен подбор химического состава и структуры малоуглеродистых белых чугунов в зависимости от условий изнашивания, что обеспечит большую долговечность машин и механизмов, работающих в условиях трения в народном хозяйстве, например деталей экскаваторов, насосов и др.

Литература

1. Печенкина Л.С. Влияние химического состава на ударную вязкость износостойких белых чугунов // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2018. Т. 14. № 5. С. 165-171.
2. Печенкина Л.С. Влияние содержания структурообразующих компонентов на твердость малоуглеродистых белых чугунов // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2017. Т. 14. № 6. С. 134-138.
3. Петроченко Е.В. Взаимосвязь химического состава, структуры и свойств комплексно-легированных белых чугунов в литом состоянии // Известия высших учебных заведений. Черная Металлургия. 2012. № 3. С. 51-55.
4. Печенкина Л.С., Сильман Г.И., Рукавицына А.А. Влияние хрома и ванадия на структуру малоуглеродистых белых чугунов // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2015. Т. 11. № 6. С. 13-17.
5. Нетребко В.В. Особенности легирования белых износостойких чугунов // Литье и металлургия. 2014. С. 37-41.
6. Колокольцев Е.М., Петроченко Е.В. Металлургические и металловедческие аспекты повышения функциональных свойств литых изделий из белых чугунов // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г. И. Носова. 2014. № 4. С. 87-98.

Информация об авторах

Печенкина Лариса Степановна – канд. техн. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: pls-7@mail.ru

Емельянов Игорь Иванович – бакалавр, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: jemper579@gmail.com

INFLUENCE OF CHEMICAL COMPOSITION AND STRUCTURE ON WEAR RESISTANCE OF LOW CARBON WHITE CAST IRONS

L.S. Pechenkina, I.I. Emelianov

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract: wear resistance is an important characteristic of the durability of the machines and products themselves that operate under friction. It is determined mainly by hardness. Wear-resistant white cast irons are a group of chromium and nickel-chromium cast irons; their main feature is that upon solidification, a carbide phase is released, which imparts high wear resistance during abrasive wear. The application area for wear-resistant white cast iron parts covers many industrial sectors where the durability of parts can be correlated with abrasive wear. There are conditions for selecting a grade of wear-resistant cast iron—working environment and wear rate. The machinability, hardenability and economics of the selected material should be kept in mind. Studying the influence of alloying components on the wear resistance of white cast iron, we can say that the content of elements such as chromium, manganese and nickel have a beneficial effect on the characteristics of products of interest. Many enterprises add to their product range a large number of castings made from the cast iron in question. There is especially insufficient information about low-carbon white cast irons, which characterizes the relevance of the study. The materials under consideration were white cast iron without and with copper content. All tests were carried out on an MI-1M friction machine. It was studied what effect specific load has on the amount of wear. Alloy grade ShKh15 was chosen as a standard. It was found that the smallest difference between the dependences for the alloys and the standard is observed in the load range up to 5 MPa. But starting from a load of 1.5 MPa, it is clear that the specific load directly affects the wear resistance coefficient. Based on the resulting correlation dependences of the relative wear resistance coefficients on the mechanical properties, factors of the chemical and phase composition of the alloys, an analysis of the wear resistance of these same alloys was performed. Previously, a comprehensive assessment was carried out regarding the main austenitizing element - manganese, as well as the influence of the degree of austenitization of the structure. As a result of the study, the dependence of the influence of the content of chemical elements and the austenite content in the structure on the wear resistance coefficient of low-carbon alloys was established. The greatest wear resistance is observed in low-carbon cast irons with a manganese content of two to three percent, which is combined with a structure containing twenty to thirty-five percent austenite. This is explained by the influence of manganese on the structure. Under conditions of abrasive wear, the maximum increases by ten percent, as a stronger compaction of the surface layer is observed. The amounts of martensite, austenite, and carbides that provide the greatest resistance to wear under different conditions were determined in relation to the alloys under study

Key words: wear, casting, white cast iron, structure, wear resistance coefficient

References

1. Pechenkina L.S. "Influence of chemical composition on the impact strength of wear-resistant white cast irons", *The Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2018, vol. 14 no. 5, pp. 165-171.
2. Pechenkina L.S. "Influence of the content of structure-forming components on the hardness of low-carbon white cast iron" *The Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2017, vol. 14, no. 6, pp. 134-138.
3. Petrochenko E.V. "Relationship between the chemical composition, structure and properties of complex-alloyed whitecast irons in cast state", *News of higher educational institutions. Ferrous Metallurgy (Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Chernaya Metallurgiya)*, 2012, no. 3, pp. 51-55.
4. Pechenkina L.S., Silman G.I., Rukavitsyna A.A. "Influence of chromium and vanadium on the structure of low-carbon white cast irons", *The Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2015, vol. 11, no. 6, pp. 13-17.
5. Netrebko V.V. "Features of alloying white wear-resistant cast irons", *Casting and Metallurgy (Lit'ye i metallurgiya)*, 2014, pp. 37-41.
6. Kolokoltsev E.M., Petrochenko E.V. "Metallurgical and metallurgical aspects of increasing the functional properties of cast products from white cast irons", *The Bulletin of Magnitogorsk State Technical University named after G.I. Nosov (Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G. I. Nosova)*, 2014, no. 4, pp. 87-98.

Submitted 05.10.2023; revised 29.11.2023

Information about the authors

Larisa S. Pechenkina – Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: pls-7@mail.ru

Igor I. Emelianov - Bachelor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: jemper579@gmail.com

ВЛИЯНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ КИСЛОРОДА НА ФАЗОВЫЙ СОСТАВ НАНОКОМПОЗИТОВ Fe-Zr-O

О.В. Стогней, Н.А. Касаткин, А.В. Ситников, А.М. Дерябин

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

Аннотация: исследуется влияние концентрации кислорода на фазовый состав наноструктурированных композитов Fe-Zr-O. Объекты исследования получены с помощью метода ионно-лучевого распыления составной мишени, изготовленной из литой металлической основы (Fe) и оксидных навесок (ZrO_2). Изменение концентрации кислорода в композитах достигалось за счет изменения парциального давления кислорода, добавляемого в аргон при напылении. Получены три композитные системы: в чистом аргоне ($P_{Ar}=6 \cdot 10^{-4}$ Торр) и при добавлении кислорода $P_O=0,6 \cdot 10^{-5}$ Торр и $P_O=0,9 \cdot 10^{-5}$ Торр, соответственно. Исследование полученных композитов показало, что варьирование парциальным давлением кислорода в камере позволяет существенно менять его концентрацию в напыленных покрытиях и менять фазовый состав композитов, не изменяя состава и конфигурации исходной (распыляемой) мишени. При напылении композитов в чистом аргоне формируется фаза чистого железа и неопределенного оксида циркония ($Fe + ZrO_n, n < 2$). Добавление кислорода приводит к формированию стехиометричного оксида циркония ZrO_2 и частичному окислению железа до фазы вюститита (FeO). В зависимости от количества кислорода фаза железа окисляется полностью или частично, поэтому структура таких композитов является двухфазной или трёхфазной: $Fe + ZrO_2 + FeO$ или $FeO + ZrO_2$.

Ключевые слова: наногранулированный композит, ионно-лучевое распыление, стехиометрия, рентгенодифракционный анализ, фазовый состав

Благодарности: работа выполнена при финансовой поддержке РНФ (грант № 23-29-00176)

Введение

Одной из серьёзных задач, стоящих перед современным машиностроением, является создание эффективных защитных покрытий, которые препятствовали бы ускоренному износу пар трения, а также защищали рабочие поверхности от агрессивного воздействия внешней среды. Одним из направлений создания таких защитных покрытий является применение наноструктурированных композитных материалов металл-керамика [1-2]. Эти материалы содержат наноразмерные фазовые включения керамической (чаще всего оксида или нитрида) и металлической фаз. При этом наличие керамической фазы в композитах определяет их высокую механическую твёрдость и коррозионную стойкость, а наличие наноразмерных включений металла препятствует хрупкому разрушению керамической фазы [3], делая композитные покрытия устойчивыми к ударам и циклическим нагрузкам. Помимо фазового состава (металл + керамика) большой вклад в повышение прочности нанокompозитных покрытий вносит собственно их наноструктурированность. Это связано с выполнением закона Холла-Петча, то есть, уменьшение размера фазовых включений

приводит к росту твёрдости и прочности материала за счёт блокирования движения дислокаций [4].

Вместе с тем, несмотря на очевидные плюсы таких покрытий, существует и ряд проблем. Например, интенсивная работа покрытий в парах трения приводит к их разогреву и если это происходит в воздушной среде, то неминуемо влечёт за собой поверхностное окисление металлической фазы, что сказывается на адгезионной прочности межфазных границ металл-керамика и прочности всего покрытия [5]. Возможным вариантом решения данной проблемы является создание на поверхности металлических включений оксидного слоя в момент формирования покрытия, с тем, чтобы в дальнейшем (в процессе эксплуатации) межфазная граница не меняла свой элементный состав [6].

Одним из основных методов создания нанокompозитных покрытий является ионно-плазменное напыление, которое может осуществляться не только в чистом аргоне, но и в смешанной газовой среде (реактивное напыление). Такая технология удобна для частичного окисления металлической фазы, поскольку варьируя парциальным давлением кислорода можно регулировать степень окисления металла.

В данной работе исследовано влияние кислорода на фазовый состав композитов Fe-Zr-O, полученных при различном парциальном давлении кислорода методом ионно-лучевого распы-

ления составной мишени. Целью исследования было определение того, в какой степени добавление кислорода в аргон позволяет окислять металлическую фазу композитов непосредственно при их получении. Металлическая фаза исследованных композитов формировалась из железа, являющегося основным элементом большинства конструкционных сталей. Выбор железа в качестве металлической фазы композитов призван обеспечивать высокую адгезию напыляемого покрытия к защищаемой стальной поверхности. В качестве керамической фазы выбран оксид циркония, поскольку этот материал обладает совокупностью характеристик, оптимальных для защитного покрытия: высокой твёрдостью и прочностью, химической инертностью, значением коэффициента теплового расширения близким по величине к коэффициенту железа и крайне низкой теплопроводностью [7].

Методика

Получение композитов Fe-Zr-O осуществлялось методом ионно-лучевого распыления комбинированной мишени, составленной из железной основы и керамических навесок из диоксида циркония. Получены три серии композитов: первая – в чистом аргоне ($P_{Ar}=6 \cdot 10^{-4}$ Торр), следующие две – с добавлением в аргон кислорода ($P_{O_2}=0,6 \cdot 10^{-5}$ Торр и $P_{O_2}=0,9 \cdot 10^{-5}$ Торр, соответственно). В каждой серии получены композиты с различным соотношением металлической (Fe) и керамической (Zr-O) фаз. Изменение соотношения фаз в композитах достигалось за счет изменения соотношения площадей металла и керамики на поверхности распыляемой мишени. Фактически, в каждой серии композитов получено по 80 образцов, отличающихся друг от друга составом (соотношением Fe и ZrO). В каждой серии концентрация железа в образцах плавно меняется от 25 до 70 ат. %. Все композиты напылялись на стеклянные подложки. Концентрация элементов в напылённых композитах определялась с помощью электронно-зондового рентгеноспектрального микроанализа (JXA-840). Структурные исследования проводились на дифрактометре BRUKER D2 Phaser в геометрии Брегга-Брентано в «медном» излучении ($\lambda=1.541 \text{ \AA}$).

Результаты и обсуждение

Измерения элементного состава полученных образцов показали, что концентрация кислорода в композитах определяется двумя основными факторами: условиями напыления (то

есть парциальным давлением кислорода) и концентрацией циркония. На рис. 1 приведены зависимости измеренной концентрации основных элементов от номера образца для композитов, напылённых в чистом аргоне и в смешанной среде (Ar+O₂ с парциальным давлением $0,6 \cdot 10^{-5}$ Торр и $0,9 \cdot 10^{-5}$ Торр).

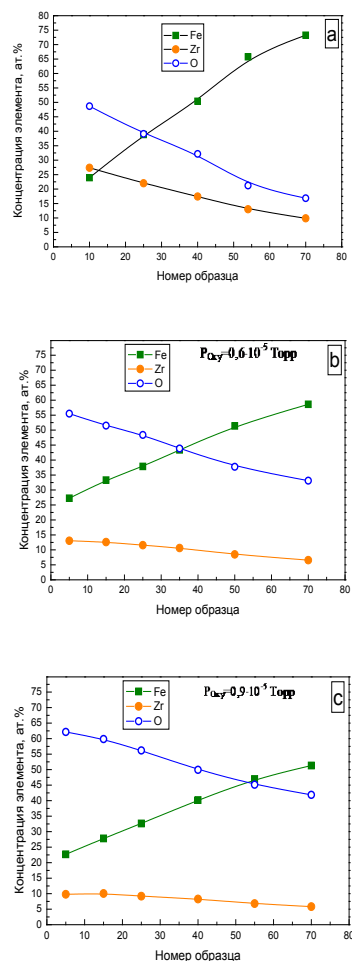


Рис. 1. Зависимость измеренной концентрации элементов от номера образца в композитах, напылённых в чистом аргоне (а) и в смешанной среде Ar+O₂ (б, в)

Очевидно, что концентрация кислорода коррелирует с концентрацией циркония, причём, эта корреляция наблюдается как в композитах, полученных в чистом аргоне, так и в композитах, сформированных в смешанной газовой среде. Уменьшение концентрации циркония в композите, приводит к уменьшению концентрации кислорода, независимо от его парциального давления в газовой фазе. Это свидетельствует о том, что кислород, конденсирующийся на поверхность формирующегося композита, прежде всего взаимодействует с цирконием, образуя его оксид.

Состав газовой фазы (парциальное давление кислорода) определяет абсолютное количество кислорода в композитах. Введение в газовую среду кислорода увеличивает уровень его концентрации и в композитах (см. рис. 1 а,б,с). Например, если сопоставить количество кислорода в композитах, содержащих 10 ат. % Zr, но полученных при различном давлении кислорода в газовой фазе, то концентрация кислорода возрастает с 24 ат. % до 63 ат. % (см. рис. 1).

При анализе элементного состава полученных образцов важным параметром является отношение концентрации кислорода к концентрации циркония. В стехиометричном диоксиде циркония это соотношение должно быть равно двум. В полученных образцах Fe-Zr-O это соотношение, как показали данные исследования, определяется условиями напыления. В табл. 1 приведены интервалы значений и средние значения отношения измеренной концентрации кислорода и циркония.

Таблица 1

Величина отношения концентрации кислорода к концентрации циркония в композитах Fe-Zr-O, полученных в различных газовых средах

Состав газовой среды в процессе напыления	Отношение C_{Oxy}/C_{Zr} (интервал для пяти измеренных образцов)	Среднее значение отношения C_{Oxy}/C_{Zr}
Ar	1,63-1,84	1,75
Ar+O ₂ $P_{Oxy}=0,6 \cdot 10^{-5}$ Торр	4,088-5,03	4,35
Ar+O ₂ $P_{Oxy}=0,9 \cdot 10^{-5}$ Торр	5,96-7,19	6,38

Следует подчеркнуть, что концентрации элементов в напыленных образцах получены в результате прямого измерения с помощью высокоразрешающего метода. Используемый метод даёт абсолютное значение концентрации безотносительно того, какие химические связи образует этот элемент. Так, например, если речь идёт о кислороде, то атомы этого элемента могут входить в состав оксидов (оксида циркония или железа), а также просто формировать твёрдый раствор в структуре уже существующего оксида. Поэтому абсолютное значение концентрации кислорода может быть существенно выше стехиометрической концентрации. Для композитов, полученных в среде чистого аргона, результат оказался вполне ожидаемым. Соотношение элементов не соответствует стехиометрии диоксида циркония ($C_{Oxy}/C_{Zr} < 2$), то есть количества кислорода, оказавшегося в напыленных образцах, недостаточно для полного окисления циркония,

содержащегося в композите. Иными словами, матрицей композита является не диоксид циркония (ZrO₂), а неопределённый оксид с примерной формулой ZrO_{1,8}. Эти данные хорошо согласуются с результатами рентгенодифракционного анализа образцов первой серии (рис. 2). На рис. 2 приведено несколько дифракционных кривых, соответствующих композитным образцам с разной концентрацией железа.

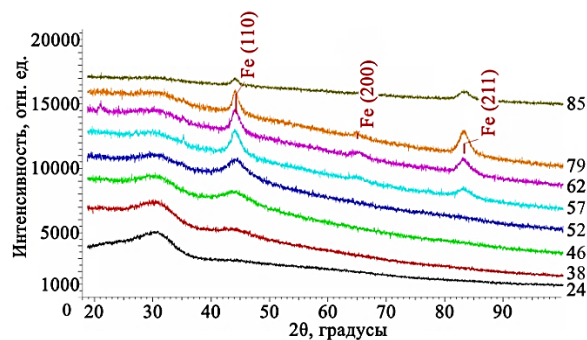


Рис. 2. Рентгеновская дифракция от образцов Fe-Zr-O, полученных в среде чистого аргона. Концентрация железа в композите приведена у кривых в ат. %

На дифрактограммах, соответствующих образцам с низкой концентрацией железа, дифракционные пики отсутствуют. Это обусловлено следующими причинами. Несмотря на то, что оксида циркония в этих композитах много, дифракционных максимумов от него нет, поскольку он имеет аморфную структуру. На дифрактограммах присутствует только гало с размытым максимумом в области углов 30-32 градуса. Именно это угловое положение соответствует основному отражению, которое должно было бы быть от семейства плоскостей (111) в случае кристаллического диоксида циркония. Образование аморфной структуры при напылении диоксида циркония известный факт, который неоднократно описан в литературе [8-9]. Принадлежность этого гало фазе оксида циркония подтверждается также тем, что по мере увеличения концентрации железа в композите (и уменьшения, соответственно, концентрации оксида циркония) интенсивность гало снижается.

На дифрактограммах от композитов с более высоким содержанием железа наблюдаются дифракционные максимумы, угловое положение которых соответствует отражениям от плоскостей ОЦК железа (α-Fe). Высота и ширина этих максимумов свидетельствует о том, что фаза железа является мелкодисперсной, что в полной мере соответствует морфологии нанокompозитов. Таким образом, композиты Fe-Zr-O, полученные в среде чистого аргона, представляют собой нанодисперсную фазу чистого ОЦК

железа и аморфную фазу нестехиометричного оксида циркония.

В композитах, полученных в смешанной газовой среде ($\text{Ar}+\text{O}_2$) соотношение концентраций $C_{\text{Oxy}}/C_{\text{Zr}}$ иное, оно в два – три раза больше, чем это требуется в соответствии со стехиометрией (см. табл. 1). С одной стороны это гарантирует, что в данных композитах оксид циркония является стехиометричным и все химические связи циркония заполнены. С другой стороны, тот кислород, который оказался избыточным и не может взаимодействовать с атомами циркония, должен неминуемо взаимодействовать с железом, формируя оксид железа. Данное предположение подтверждается результатами рентгенодифракционного анализа.

На рис. 3 приведены дифракционные кривые, полученные от образцов композитов, напыленных при парциальном давлении кислорода $P_{\text{Oxy}}=0,6 \cdot 10^{-5}$ Торр. Основное отличие от дифрактограмм образцов первой группы заключается в том, что помимо пиков от чистого железа наблюдается пик от семейства плоскостей (200) оксида железа. Причём, угловое положение пика свидетельствует о том, что сформировавшаяся фаза это фаза вюститита, то есть гексагональная фаза, стехиометрия которой FeO . Эта фаза, которая содержит наименьшее количество кислорода по сравнению с другими равновесными оксидами железа, гематитом и магнетитом (Fe_2O_3 и Fe_3O_4).

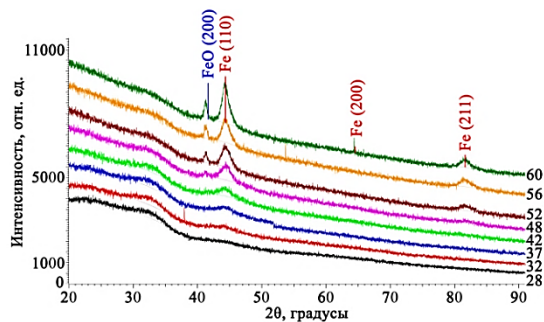


Рис. 3. Рентгеновская дифракция от образцов Fe-Zr-O, полученных при парциальном давлении кислорода $0,6 \cdot 10^{-5}$ Торр. Концентрация железа в композите приведена у кривых в ат. %

Характерно, что от фазы железа на дифрактограммах присутствуют два пика, в то время как от вюститита лишь один и его интенсивность меньше чем интенсивность дифракционных максимумов от железа. Таким образом, добавление в напылительную камеру кислорода с парциальным давлением $0,6 \cdot 10^{-5}$ Торр (1 % от рабочего давления аргона) приводит к незначительному окислению фазы железа. По всей ви-

димости, происходит окисление поверхности металлических гранул и формирование структуры «core-shell» то есть сердцевина металлических гранул это чистое железо, а на поверхности гранул формируется оксидный слой.

Увеличение парциального давления кислорода с $0,6 \cdot 10^{-5}$ до $0,9 \cdot 10^{-5}$ Торр приводит к более существенным фазовым изменениям в композитах. При таком парциальном давлении кислорода в камере его концентрация в композитах оказывается более чем в три раза больше, чем это необходимо для обеспечения стехиометричности диоксида циркония ($C_{\text{Oxy}}/C_{\text{Zr}} = 6,38$, см. табл. 1). Очевидно, что избыточный кислород идет на окисление железа. На дифрактограммах от образцов этой группы (см. рис. 4) присутствуют два интенсивных и два слабых максимума, соответствующих дифракции от оксида железа (FeO – вюстит). Следует подчеркнуть два важных отличия от предыдущих дифрактограмм (см. рис. 3).

Во-первых, в том случае, когда концентрация железа невысока (32-42 ат.%) на дифрактограммах отсутствуют пики от чистого железа, однако пики от вюститита чёткие и большие. Это означает, что вся фаза железа в композите полностью окислена и композит представляет собой смесь двух оксидов: аморфный диоксид циркония и оксид железа (ZrO_2+FeO).

Во-вторых, при увеличении концентрации металлической фазы (47 - 51 ат.%) на дифрактограммах появляется основной пик от железа (110), однако его интенсивность в несколько раз меньше интенсивности основного пика вюститита (200). Иными словами, большая часть фазы железа является окисленной и лишь незначительная его доля остаётся в виде чистого металла. Логично предположить, что при дальнейшем увеличении парциального давления кислорода полное окисление металлической фазы будет происходить и в композитах с высокой концентрацией железа.

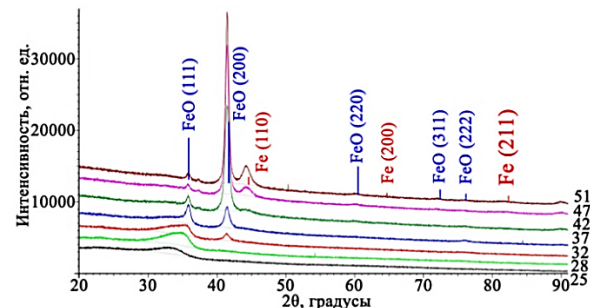


Рис. 4. Рентгеновская дифракция от образцов Fe-Zr-O, полученных при парциальном давлении кислорода $0,9 \cdot 10^{-5}$ Торр. Концентрация железа в композите приведена у кривых в ат. %

Полученные результаты свидетельствуют о том, что технология реактивного напыления покрытия Fe-Zr-O позволяет формировать композиты с разной степенью окисления фазы железа, начиная с незначительного окисления поверхности металлических наногранул и заканчивая полным окислением всей металлической фазы. Это важный технологический результат, поскольку ранее, для композитных покрытий Ni-Zr-O, было показано, что окисление никелевой фазы приводит к повышению микротвёрдости покрытий относительно композитов с неокисленной фазы Ni в среднем в полтора раза, достигая максимального значения 16,5 ГПа [10]. Предполагается, что и в композитах на основе железа окисление металлической фазы должно способствовать достижению высоких значений микротвёрдости. Однако, в отличие от покрытий Ni-Zr-O, адгезия композитных покрытий Fe-Zr-O к стальной поверхности должна быть значительно выше. Очевидная область применения таких композитов в машиностроении – создание защитных и упрочняющих покрытий на поверхности изделий из стали. Причём, в случае защиты изделий из низколегированных сталей эффект упрочнения и повышения коррозионной стойкости должен быть весьма существенным.

Следует также добавить, что технология получения (ионно-лучевое распыление мишени) позволяет легко наносить защитное композитное покрытие Fe-Zr-O на плоские или цилиндрические поверхности достаточно большого размера, соизмеримого с размерами используемой мишени.

Заключение

Полученная совокупность результатов свидетельствует о том, что изменение парциального давления кислорода, добавляемого в вакуумную камеру при напылении композитного материала Fe-Zr-O, позволяет в значительной степени изменять его фазовый состав.

При напылении композитов Fe-Zr-O в среде чистого аргона кислорода, содержащегося в распыляемой мишени, недостаточно для формирования стехиометричного оксида, поэтому в напыленных образцах формируется неопределённый диоксид циркония и фаза чистого ОЦК-железа.

Добавление в аргон кислорода приводит к существенному росту его содержания и в напыленных композитах. При парциальном давлении

кислорода в камере $0,6 \cdot 10^{-5}$ Торр его концентрация в напыленных композитах в два раза превышает значение, требуемое для формирования стехиометричного диоксида циркония. В результате происходит частичное окисление железа и формирование неопределённого оксида со структурой вюстита (FeO). Результирующий фазовый состав композитов включает в себя аморфный ZrO₂, Fe и небольшое количество FeO.

При парциальном давлении кислорода в камере $0,9 \cdot 10^{-5}$ Торр происходит практически полное окисление фазы железа, если его концентрация в композите не превышает 42 ат.%. В случае более высокой концентрации небольшая доля железа остаётся неокисленной. Результирующий фазовый состав композитов включает в себя аморфный ZrO₂, FeO (вюстит) и небольшое количество чистого Fe.

Литература

1. Особенности структуры и физико-механических свойств наноструктурных тонких плёнок / Д.В. Штанский, С.А. Кулинич, Е.А. Левашов, J.J. Moore // ФТТ. 2003. Т. 4. Вып. 6. С. 1122-1129.
2. Левашов Е.А., Штанский Д.В. Многофункциональные наноструктурные плёнки (Обзор) // Успехи химии. 2007. Т. 76. № 5. С. 501-509.
3. Упрочняющие наноконпозиционные покрытия (Co₄₅Fe₄₅Zr₁₀)_x(Al₂O₃)_{100-x} / О.В. Стогней, С.Г. Валухов, И.М. Трегубов, М.А. Каширин // Альтернативная энергетика и экология. 2011. № 9(101). С. 57-61.
4. Структура и свойства твердых и сверхтвердых наноконпозиционных покрытий / А.Д. Погребняк, А.П. Шпак, Н.А. Азаренков, В.М. Береснев // УФН. 2009. Т. 179. № 1. С. 35-64.
5. Possible role of oxygen impurities in degradation of nc – TiN/α – Si₃N₄ nanocomposite / S.Veprek, P. Karankova, G. Maritz, G. Veprek-Heijman // Vac. Sci. Technol. B. 2005. Vol. 23. № 6. PP. L17 – L21.
6. Филатов М.С., Стогней О.В. Влияние отжига на структуру наноконпозиционных NiZr(Y)O₂, полученных методом реактивного ВЧ-магнетронного напыления // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2018. Т. 14. № 2. С. 147-153.
7. Керамические материалы на основе диоксида циркония. Под общей редакцией Ю.И. Головина. М.: Техносфера. 2018. 358 с.
8. Akira S., Kazuki N., Teiichi H. Preparation and properties of radiofrequency sputtered X-ray amorphous films in the system SiO₂-ZrO₂ // Thin Solid Films. 2008. Vol. 516. PP. 4665-4672.
9. Structural investigations of YSZ coatings prepared by DC magnetron sputtering / P. Briois, F. Lapostolle, V. Demange, E. Djurado, A. Billard // Surface and Coatings Technology. 2007. Vol. 201. № 12. PP. 6012-6018.
10. Filatov M.S. Stognei O.V., Antonova M.S. Structure and mechanical properties of nanocomposite Ni-ZrO₂ films // Journal of Physics: Conference Series. 2017. Vol. 872. PP. 012029-012033.

Информация об авторах

Стогней Олег Владимирович – д-р физ.-мат. наук, профессор кафедры твердотельной электроники, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: sto@sci.vrn.ru

Косаткин Николай Александрович – магистрант, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: nikolay.kasatkin94@mail.ru

Ситников Александр Викторович – д-р физ.-мат. наук, профессор кафедры твердотельной электроники, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: sitnikov04@mail.ru

Дерябин Андрей Михайлович – студент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: andrey.derabin@gmail.com

INFLUENCE OF OXYGEN CONCENTRATION
ON THE PHASE COMPOSITION OF Fe-Zr-O NANOCOMPOSITES

O.V. Stognei, N.A. Kasatkin, A.V. Sitnikov, A.M. Deryabin

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract: the influence of oxygen concentration on the phase composition of nanostructured Fe-Zr-O composites is studied. The objects of investigation were obtained by ion-beam sputtering of a composite target made of a cast metal base (Fe) and oxide plates (ZrO_2). Changing the oxygen concentration in the composites was achieved by changing the partial pressure of oxygen added to argon during sputtering process. Three composite systems were obtained: in pure argon ($P_{Ar}=6 \cdot 10^{-4}$ Torr) and with the addition of oxygen $P_{O_2}=0.6 \cdot 10^{-5}$ Torr and $P_{O_2}=0.9 \cdot 10^{-5}$ Torr, respectively. The study of the resulting composites showed that varying the partial pressure of oxygen in the chamber allows to significantly change the oxygen concentration in the deposited coatings and change the phase composition of the composites without changing the composition and configuration of the original (sputtered) target. When the composites were obtained in pure argon, a phase of pure iron and unsaturated zirconium oxide ($Fe + ZrO_n$, $n < 2$) is formed. The addition of the oxygen leads to the formation of stoichiometric zirconium oxide ZrO_2 and partial oxidation of iron to the wustite phase (FeO). Depending on the amount of oxygen, the iron phase is oxidized completely or partially, therefore the structure of such composites is two-phase or three-phase: $Fe + ZrO_2 + FeO$ or $FeO + ZrO_2$

Key words: nanogranulated composite, ion beam sputtering, stoichiometry, X-ray crystallography, phase composition

Acknowledgments: the research was supported by the Russian Science Foundation (grant no. 23-29-00176)

References

1. Shtanskij D.V., Kulinich S.A., Levashov E.A., Moore J.J. "Features of the structure and physical and mechanical properties of nanostructured thin films", *Solid State Physics (Fizika tverdogo tela)*, 2003, vol. 4, no. 6, pp.1122-1129.
2. Levashov E.A., Shtanskij D.V. "Multifunctional nano-structured films (Review)", *Advances in Chemistry (Uspekhi himii)*, 2007, vol.76, no. 5, pp. 501-509.
3. Stognei O.V., Valyuhov S.G., Tregubov I.M., Kashirin M.A. "Strengthening nanocomposite coatings ($Co_{45}Fe_{45}Zr_{10}x(Al_2O_3)_{100-x}$)", *Alternative Energy and Ecology (Alternativnaya energetika i ekologiya)*, 2011, no. 9 (101), pp. 57-61.
4. Pogrebnyak A.D., Shpak A.P., Azarenkov N.A., Beresnev V.M. "Structure and properties of hard and superhard nanocomposite coatings", *Advances in Physical Sciences (Uspekhi fizicheskikh nauk)*, 2009, vol.179, no. 1, pp.35-64.
5. Veprek S., Karankova P., Maritz G., Veprek-Heijman G. "Possible role of oxygen impurities in deg-radation of nc – TiN/ α – Si3N4 nanocomposite", *Vac. Sci. Tech-nol. B.*, 2005, vol. 23, no. 6, pp. L17 – L21.
6. Filatov M.S., Stognei O.V. "Effect of annealing on the structure of NiZr(Y)O₂ nanocomposites obtained by reactive RF magnetron sputtering", *The Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2018, vol. 14, no. 2, pp. 147-153.
7. "Ceramic materials based on zirconium dioxide" ("Keramicheskiye materialy na osnove dioksida tsirkoniya"), ed. by Yu.I. Golovin, Moscow, Tekhnosfera, 2018, 358 p.
8. Akira S., Kazuki N., Teiichi H. "Preparation and properties of radiofrequency sputtered X-ray amorphous films in the system SiO₂–ZrO₂", *Thin Solid Films*, 2008, vol. 516, pp. 4665–4672.
9. Briois P., Lapostolle F., Demange V., Djurado E., Billard A. "Structural investigations of YSZ coatings prepared by DC magnetron sputtering", *Surface and Coatings Technology*, 2007, vol. 201, no.12, pp. 6012-6018.
10. Filatov M.S., Stognei O.V., Antonova M.S. "Structure and mechanical properties of nanocomposite Ni-ZrO₂ films", *Journal of Physics: Conference Series*, 2017, vol. 872, pp. 012029-012033.

Information about the authors

Oleg V. Stognei – Dr. Sc. (Technical), Professor, the Department of Solid State Electronics, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: sto.sci.vrn@gmail.com

Nikolay A. Kasatkin - Master's student, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: nikolay.kasatkin94@mail.ru

Aleksandr V. Sitnikov – Dr. Sc. (Technical), Professor, the Department of Solid-state Electronics, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: sitnikov04@mail.ru

Andrey M. Deryabin – Undergraduate student, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: andrey.derabin@gmail.com