

**ФГБОУ ВО «ВОРОНЕЖСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ»**

# **ВЕСТНИК**

**Воронежского государственного  
технического университета**

**Том 20 № 2 2024 г.**

**Основан в апреле 2000 г.**

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (регистрационный номер 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 четыре раза 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. Малюкова** – 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, Воронежская обл., г. Воронеж, Московский пр-т, д. 14, к. 211

**Телефон:** +7 (473) 278-38-89

**E-mail:** [vestnik@vorstu.ru](mailto: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», 2024**

12+

The journal is registered by the Federal service for supervision of communications, information technology, and mass media (registration number 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 four 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. Bashkirov – 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 Oblast, Voronezh, Moskovskiy prospekt, 14, office 211

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

**E-mail:** [vestnik@vorstu.ru](mailto: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, 2024**

12+

## СОДЕРЖАНИЕ

### Информатика, вычислительная техника и управление

Математическая модель индукционного генератора тепловой метки в неньютоновской жидкости в цилиндрическом трубопроводе <b>А.А. Хвостов, И.Г. Дроздов, Е.А. Соболева, Д.А. Коновалов, А.А. Журавлев.....</b>	<b>7</b>
Алгоритмизация обработки и подготовки данных для построения моделей предиктивной аналитики <b>П.Ю. Гусев, А.В. Таволжанский.....</b>	<b>14</b>
Модификация алгоритма DETR для обнаружения объектов в видеопотоке <b>А.И. Паршин, В.Ф. Барабанов, Н.И. Гребенникова, М.Н. Аралов, С.А. Коваленко.....</b>	<b>20</b>
Алгоритм сжатия растровых изображений без потерь <b>М.С. Войтенко, А.С. Войтенко, Ю.Н. Феденко, А.И. Антонов .....</b>	<b>25</b>
Архитектура СУБД, использующей метаграфовую модель данных <b>Д.Р. Никольский, В.Ф. Барабанов, В.В. Сафронов, А.М. Нужный, В.Н. Черников.....</b>	<b>29</b>
Моделирование поля в синхронной машине с электромагнитным возбуждением в области автоколебаний <b>К.Е. Кононенко, А.В. Кононенко, Кетима Саного.....</b>	<b>35</b>
Разработка универсального сервиса для просмотра студенческого расписания различных университетов <b>Д.Л. Сашенко, С.А. Олейникова.....</b>	<b>39</b>
Система интеллектуального управления транспортными потоками на перекрестках со светофорным регулированием <b>М.А. Стрижко, В.В. Червинский.....</b>	<b>48</b>
Байесовская сеть доверия в системе принятия решения при управлении БПЛА <b>В.А. Малиновкин, О.С. Мордвинкина, К.Н. Резников, А.В. Барабанов.....</b>	<b>56</b>
Моделирование плоского движения двухмоторного летательного аппарата легче воздуха <b>В.Б. Фурсов, Ю.В. Писаревский, Ж.А. Ген.....</b>	<b>61</b>
Энергичные методы и протоколы репликации в распределенных системах и средах <b>А.Д. Данилов, М.О. Саввин, А.Е. Карачевцев.....</b>	<b>67</b>

### Радиотехника и связь

Способы передачи данных с использованием линейно-частотно-модулированных сигналов <b>Л.А. Сенаторов.....</b>	<b>72</b>
Диэлектрическая антенна вытекающей волны с поперечным излучением <b>А.В. Останков, Д.Ю. Крюков.....</b>	<b>80</b>
Комплексное сравнение устройств управления в системах телекодовой и речевой связи <b>Я.С. Мотылёва, Ю.Г. Хренова, В.З. Циколия, А.Ю. Чернышев.....</b>	<b>92</b>
Совместная архитектура восходящей линии связи массивных систем MIMO и OFDM-радара <b>О.Н. Чирков, А.В. Башкиров, Ю.М. Пшеницина.....</b>	<b>96</b>
Методика проектирования цифровых СФ-блоков интегральных микросхем <b>И.Р. Чекалдин, А.В. Русанов, В.А. Смерек, А.И. Сукачев.....</b>	<b>102</b>
Разработка аппаратной части комплекса оптической дефектовки топологии электронных компонентов <b>М.А. Ромащенко, Д.В. Васильченко.....</b>	<b>110</b>

Возможности ослабления основного лепестка отраженной волны посредством спиралевидной треугольной метаструктуры <b>Н.А. Болдырев, И.Ш. Фитаев, М.М. Падалинский, Д.А. Полетаев, А.С. Мазин</b> .....	116
Показатель структурной эффективности управления информационным взаимодействием в гетерогенной сети передачи данных пространственно-распределенной системы мониторинга <b>В.А. Шевцов, А.М. Казанцев, А.В. Тимошенко, Р.А. Кочкаров, С.В. Прокопчина</b> .....	124
Способ обработки импульсных сигналов с ортогональным частотным разделением с использованием низкоплотностного кодирования <b>М.В. Хорошайлова</b> .....	132
Микрополосковый кроссовер диапазона УВЧ на основе малогабаритных шлейфных модификаций <b>А.В. Останков, Н.Н. Щетинин, С.А. Слинчук</b> .....	139
Прогнозирование процента выхода годных интегральных схем <b>А.В. Башкиров, А.Б. Антиликаторов, А.С. Костюков, П.И. Подмарков</b> .....	145
Повышение помехоустойчивости в беспроводных системах связи с OFDM-модуляцией путём снижения пик-фактора сигнала <b>О.Н. Чирков, Е.А. Куцев</b> .....	150
Исследование электрической и магнитной составляющей ближнего поля полосковой антенны <b>В.В. Глотов, А.И. Зимин</b> .....	159
К вопросу о макетировании микрополосковых полосовых фильтров в лабораторных условиях (Часть 2) <b>А.Е. Рудь, Л.Э. Черноиванов, И.А. Арзамасцев, А.В. Гречишкин</b> .....	167
Выявление размеров новообразований на основе радиоволн <b>Е.А. Ищенко, С.М. Фёдоров, Е.Д. Егорова, Д.А. Новиков, Ю.С. Цимбалист, Е.А. Тоцкая</b> .....	172
Применение метода роя частиц в задаче оптимизации системы ПИД-регулирования программируемой электронной нагрузки постоянного тока <b>И.С. Бобылкин, А.В. Иванов, А.А. Кузёмкин, Е.В. Парина, Е.М. Ивашкина</b> .....	181

### Машиностроение и машиноведение

Расширение области использования в машиностроении комбинированных наукоемких технологий <b>В.П. Смоленцев, О.Н. Кириллов, А.А. Извеков</b> .....	188
Моделирование производящих поверхностей фрез для высокопроизводительной обработки криволинейных зубчатых колес эксцентриково-циклоидаального зацепления <b>В.В. Куц, Ю.А. Мальнева</b> .....	193
Применение технологии трехмерного сканирования для создания цифровых двойников станочного оборудования <b>О.А. Рябинина, А.И. Болдырев, А.А. Болдырев, Д.Ю. Левин</b> .....	199

CONTENTS

**Informatics, computer engineering and control**

Mathematical model of local induction heating of petroleum products in a pipeline <b>A.A. Khvostov, I.G. Drozdov, E.A. Soboleva, D.A. Konovalov, A.A. Zhuravlev.....</b>	<b>7</b>
Algorithmisation of data processing and preparation for building predictive analytics models <b>P.Yu. Gusev, A.V. Tavalzhansky.....</b>	<b>14</b>
Options for modifying the DETR algorithm for detecting objects in a video stream <b>A.I. Parshin, V.F. Barabanov, N.I. Grebennikova, M.N. Aralov, S.A. Kovalenko.....</b>	<b>20</b>
Lossless raster image compression algorithm <b>M.S. Voitenko, A.S. Voitenko, Yu.N. Fedenko, A.I. Antonov.....</b>	<b>25</b>
The architecture of a DBMS using a metagraph data model <b>D.R. Nikolskiy, V.F. Barabanov, V.V. Safronov, A.M. Nuzhnyj, V.N. Chernikov.....</b>	<b>29</b>
Research of the field in a synchronous machine with electromagnetic excitation in the region of self-oscillations <b>K.E. Kononenko, A.V. Kononenko, Ketima Sanogo.....</b>	<b>35</b>
Designing of a universal service for viewing student schedules of different universities <b>D.L. Sashchenko, S.A. Oleinikova.....</b>	<b>39</b>
Intelligent traffic flow control system at intersections with traffic light regulation <b>M.A. Strizhko, V.V. Chervinskiy.....</b>	<b>48</b>
Bayesian network of trust in a decision making system when controlling a UAV <b>V.A. Malinovkin, O.S. Mordvinkina, K.N. Reznikov, A.V. Barabanov.....</b>	<b>56</b>
Flat motion simulation of a twin-engine lighter-air flight vehicle <b>V.B. Fursov, Yu.V. Pisarevsky, Zh.A. Gen.....</b>	<b>61</b>
Robust replication methods and protocols in distributed systems and environments <b>A.D. Danilov, M.O. Savvin, A.E. Karachevtsev.....</b>	<b>67</b>

**Radio engineering and communication**

Methods of data transmission using linear frequency modulated signals <b>L. A. Senatorov.....</b>	<b>72</b>
Dielectric leaky-wave antenna with transverse radiation <b>A.V. Ostankov, D.Yu. Kryukov.....</b>	<b>80</b>
Comprehensive comparison of control devices in telecode and voice communication systems <b>Ya.S. Motyleva, Yu.G. Khrenova, V.Z. Tsikolia, A.Yu. Chernyshev.....</b>	<b>92</b>
Joint uplink architecture of massive MIMO and OFDM radar systems <b>O.N. Chirkov, A.V. Bashkirov, Yu.M. Pshenitsyna.....</b>	<b>96</b>
Design methodology for digital IP-blocks of integrated circuits <b>I.R. Chekaldin, A.V. Rusanov, V.A. Smerek, A.I. Sukachev.....</b>	<b>102</b>
Development hardware for optical defect inspection system topology of electronic components <b>M.A. Romashchenko, D.V. Vasilchenko.....</b>	<b>110</b>
The possibility of attenuation of the main lobe of the reflected wave by means of a spiral triangular metastructure <b>N.A. Boldyrev, I.Sh. Fitaev, M.M. Padalinsky, D.A. Poletaev, A.S. Mazinov.....</b>	<b>116</b>

Indicator of structural efficiency of information interaction management in heterogeneous data transmission network of spatially distributed monitoring system <b>V.A. Shevtsov, A.M. Kazantsev, A.V. Timoshenko, R.A. Kochkarov, S.V. Prokopchina....</b>	<b>124</b>
A method for processing pulse signals with orthogonal frequency division using low-density coding <b>M.V. Khoroshailova.....</b>	<b>132</b>
Microstrip crossover for the UHF range based on compact loop modifications <b>A.V. Ostankov, N.N. Schetinin, S.A. Slinchuk.....</b>	<b>139</b>
Forecasting the yield percentage of suitable ics <b>A. V. Bashkirov, A.B. Antilikatorov, A.S. Kostyukov, P.I. Podmarkov.....</b>	<b>145</b>
Improving noise immunity in wireless communication systems with OFDM modulation by reducing the peak factor of the signal <b>O.N. Chirkov, E.A. Kushchev.....</b>	<b>150</b>
Study of near-field electrical and magnetic components for stripe antenna <b>V.V. Glotov, A.I. Zimin.....</b>	<b>159</b>
On the issue about microstrip bandpass filters prototyping in the laboratory conditions (Part 2) <b>A.E. Rud, L.E. Chernoiyanov, I.A. Arzamascev, A.V. Grechishkin.....</b>	<b>167</b>
Detecting the size of neoplasms on the basis of radio waves <b>E.A. Ishchenko, S.M. Fedorov, E.D. Egorova, D.A. Novikov, Yu.S. Tsimbalist, E.A. Totskaya.....</b>	<b>172</b>
Application of the particle swarm method in the task of optimizing the pid control system of a programmable dc electronic load <b>I.S. Bobylkin, A.V. Ivanov, A.A. Kuzyomkin, E.V. Parinova, E.M. Ivashkina.....</b>	<b>181</b>
<b>Mechanical engineering and science of machines</b>	
Expanding of the scope of use of combined high-tech technologies in mechanical engineering <b>V.P. Smolentsev, O.N. Kirillov, A.A. Izvekov.....</b>	<b>188</b>
Modeling of the producing surfaces of milling cutters for high-performance machining of curved gears eccentric-cycloidal engagement <b>V.V. Kutz, Yu.A. Malneva .....</b>	<b>193</b>
Application of three-dimensional scanning technology to create digital twins of machining facilities <b>O.A. Ryabinina, A.I. Boldyrev, A.A. Boldyrev, D.Yu. Levin.....</b>	<b>199</b>

## *Информатика, вычислительная техника и управление*

DOI 10.36622/1729-6501.2024.20.2.001

УДК 519.876.5

### **МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ИНДУКЦИОННОГО ГЕНЕРАТОРА ТЕПЛОВОЙ МЕТКИ В НЕНЬЮТОНОВСКОЙ ЖИДКОСТИ В ЦИЛИНДРИЧЕСКОМ ТРУБОПРОВОДЕ**

**А.А. Хвостов<sup>1</sup>, И.Г. Дроздов<sup>1</sup>, Е.А. Соболева<sup>1</sup>, Д.А. Коновалов<sup>1,2</sup>, А.А. Журавлев<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

<sup>2</sup>Национальный исследовательский университет «МЭИ», г. Москва, Россия

<sup>3</sup>Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», г. Воронеж, Россия

**Аннотация:** рассмотрен синтез математической модели генератора тепловой метки, формализующей процессы тепломассопереноса в движущейся в цилиндрическом стальном трубопроводе неньютоновской жидкости с динамической вязкостью, задаваемой реологической моделью Карро. Для обеспечения инвариантности к загрязнениям поверхности трубопровода и наличию неметаллической теплоизоляции предложено осуществлять подвод тепловой энергии для формирования тепловой метки локально-индукционным способом. Математическая модель включает в себя описание витков катушки с проводником, по которому протекает электрический ток, стальной стенки трубопровода и потока неньютоновской жидкости. Модель формализована на основе закона Ампера, уравнений сохранения импульса, массы и энергии. Решение уравнений для электромагнитного поля в частотной области использовано при задании источников члена в уравнении теплопроводности для стальной стенки. Приведены результаты моделирования эволюции электромагнитных, скоростных и тепловых полей при различных режимах течения жидкости и электромагнитного импульса индукционного генератора. В качестве модельных сред использованы: воздух для окружающей среды, конструкционная сталь для трубопровода, медь для проводника генератора тепловой метки, сырая нефть для транспортируемой по трубопроводу среды. Показано качественно верное описание основных закономерностей тепломассопереноса, происходящих в модельной среде при внесении теплового возмущения индукционным способом

**Ключевые слова:** индукционный нагрев, неньютоновская жидкость, модель Карро

#### **Введение**

Одной из проблем, возникающих при транспортировке сырой нефти по трубопроводам, является сложность контроля изменения физико-механических свойств продукта ввиду непостоянства фракционного состава нефти, который обусловлен технологией её добычи [1]. Инструментальный лабораторный контроль нефти в процессе транспортировки невозможно осуществлять непрерывно, а проводить процедуры частого отбора проб, приготовления образцов и проведение анализа экономически нецелесообразно. Контактные методы оценки фракционного состава, вязкости, температуры требуют технических решений, связанных с нарушением целостности трубопровода, и привязаны к одной точке контроля. Кроме того, высокая адгезия приводит к быстрому снижению метрологических характеристик измерительных приборов [2].

Перспективными методами измерения являются методы активной термометрии, одним из представителей которых является метод тепловой метки. Он используется при диагностике теплотехнических и гидродинамических параметров сред, транспортируемых по трубопроводам [3, 4]. Метод активной термометрии с использованием тепловой метки основан на внесении теплового возмущения в регулярный (эталонный) поток среды и регистрации возникающих изменений в характере распространения тепловых потоков в анализируемом объекте [4]. Предметом исследований являются нестационарные температурные поля на поверхности объекта, которые несут информацию о наличии неоднородностей в исследуемой среде и параметрах среды, оказывающих влияние на тепломассоперенос [5, 6]. При использовании метода тепловой метки наблюдается комплексный кондуктивно-конвективный перенос тепла, интенсивность которого определяется реологией среды. Так как динамика трансформации температурного профиля в измеряемой области определяется реологическими свойствами переносимой тепловой энергии субстанции, ко-

торая, в свою очередь, определяется количественным и качественным составом жидкости, метод тепловой метки может использоваться для контроля состава жидкости в системах контроля качества.

При реализации этого метода остается нерешенной проблема генератора тепловой метки в условиях отсутствия доступа к транспортируемой среде. Одним из вариантов эффективного теплового бесконтактного воздействия на поток жидкости является его индукционный нагрев, инвариантный к загрязнению поверхности трубопровода и наличию неметаллической теплоизоляции [7].

На основе индукционного метода возможно создание мобильных систем локального теплового неразрушающего воздействия для метода тепловой метки.

### Математическая модель

Для разработки технических решений по конструкции индукционного теплового генератора необходима математическая модель, связывающая параметры генератора тепловой энергии, трубопровода и потока жидкой среды.

Математическая модель описывает магнитное поле на основе закона Максвелла-Ампера в частотной области [8] для  $\Theta_1 - \Theta_4$  (рис. 1)

$$\begin{cases} \bar{H} = \frac{1}{\mu_0} \nabla \times \bar{A}; \\ \bar{E} = -j\omega \bar{A}; \\ \nabla \times \bar{H} + (i\omega\sigma - \omega^2\varepsilon_0)\bar{A} = \bar{J}_e, \end{cases} \quad (1)$$

где  $\bar{H}$  — вектор напряженности магнитного поля, А/м;

$\mu_0$  — магнитная постоянная, Гн/м;

$\bar{A}$  — векторный потенциал магнитного поля, Вб/м;

$\bar{E}$  — вектор напряженности электрического поля, В/м;

$\omega$  — частота, Гц;

$\sigma$  — проводимость среды, См;

$\varepsilon_0$  — электрическая постоянная, Ф/м;

$\bar{J}_e$  — вектор плотности тока, генерируемого в проводнике  $\Theta_3$ , А/м<sup>2</sup>.

Предполагается, что магнитная проницаемость и диэлектрическая проницаемость равны значениям в вакууме. Уравнение (1) решается относительно действительной и мнимой компонент векторного потенциала магнитного поля.

Связь вектора плотности тока  $\bar{J}$  в среде с рассчитанным из (1)  $\bar{E}$

$$\bar{J} = (\sigma + j\omega\varepsilon_0)\bar{E}. \quad (2)$$

В проводнике генератора  $\Theta_3$  задаются его геометрические и режимные параметры (напряжение  $V_{coil}$ ), определяющие  $\bar{J}_e = \sigma V_{coil} / 2\pi r$ .

В области  $\Theta_2$  (рис. 1) решена тепловая задача, сформулированная с помощью уравнения сохранения энергии. В  $\Theta_3$  (рис. 1) решены сопряженные тепловая и гидродинамическая задачи для ламинарного режима течения [9]

$$\begin{cases} \Theta_2 \rightarrow \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot \lambda \nabla T + \bar{J} \cdot \bar{E}; \\ \Theta_3 \rightarrow \rho \frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \rho (\bar{u} \cdot \nabla) \bar{u} = \nabla \cdot \left\{ -P \bar{I} + \mu \left[ \nabla \bar{u} + (\nabla \bar{u})^T \right] \right\}; \\ \frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \bar{u}) = 0; \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho c_p \bar{u} \cdot \nabla T = \nabla \cdot \lambda \nabla T; \end{cases} \quad (3)$$

где  $\rho$  — плотность, кг/м<sup>3</sup>;

$\bar{u}$  — вектор скорости, м/с;

$P$  — давление, Па;

$\bar{I}$  — единичный тензор;

$T$  — температура, К;

$c_p$  — удельная теплоемкость, Дж/(кг·К);

$\lambda$  — коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К);

$\mu$  — динамическая вязкость жидкости, Па·с;

$t$  — время, с.

В качестве реологической модели принята модель Карро [10], описывающая неньютоновской поведение нефтепродуктов при сдвиговом течении и позволяющая устранить вычислительные проблемы при расчете вязкости в случае предельных скоростей сдвига [11]

$$\mu = \mu_\infty + (\mu_0 - \mu_\infty) \left[ 1 + (\lambda \dot{\gamma})^2 \right]^{\frac{m-1}{2}}, \quad (4)$$

где  $\mu_0$ ,  $\mu_\infty$  — вязкости, соответствующие нулевой и бесконечной скорости сдвига, Па·с;

$\dot{\gamma} = \sqrt{2\bar{S} : \bar{S}}$  — скорость сдвига;

$\bar{S} = \frac{1}{2} \left[ \nabla \bar{u} + (\nabla \bar{u})^T \right]$  — тензор скорости деформации;

$m$  — показатель кривизны реологической кривой  $\mu(\dot{\gamma})$ ;

$\lambda$  — время релаксации, с.

Начальные условия задают температуру, давление и скорость потока в начальный момент времени. Граничные условия  $\Omega_1$ :

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial n} + \alpha(T_{ext} - T) = 0, \Omega_2: \bar{n} \times \bar{A} = 0, \Omega_3: u_z = u_{in}, u_r = 0$$

$\Omega_4: P = 0$ , где  $\bar{n}$  — вектор нормали к границе;  $\alpha$  — коэффициент теплоотдачи от поверхности стенки трубопровода к окружающей среде, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $T_{ext}$  — температура окружающей среды, К.

Математическая модель позволяет для заданных условий оценить поля скоростей, температур, локальные реологические параметры транспортируемых по трубопроводу нефтепродуктов (рис. 1-3), а также провести параметрические исследования влияния режимных показателей на кинематические и динамические параметры течения и условия теплообмена в трубопроводе.

### Вычислительный эксперимент

Вычислительный эксперимент заключался в нанесении теплового воздействия, индуцируемого электромагнитным полем, на движущуюся по цилиндрическому трубопроводу жидкую среду и анализе электромагнитных, тепловых и скоростных полей среды, а также характера теплового отклика в заданных контрольных точках. В области  $\Theta_4$  задается напряжение на концах проводника индукционного генератора в виде сглаженного прямоугольного импульса длиной  $\Delta t = t_2 - t_1$

$$V_{\Omega_4} = V_{coil} \cdot \Psi(t), \Psi(t) = \begin{cases} 0, & t < t_1; \\ 1, & t_1 \leq t \leq t_2; \\ 0, & t > t_2. \end{cases} \quad (5)$$

где  $t_1, t_2$  — время начала и окончания импульса, с. В точках перехода  $t_1$  и  $t_2$  производилось сглаживание с использованием обобщенной логистической функции вида [12]

$$l(t) = \left(1 + e^{-t+t_{nep}}\right)^{-\xi} \quad (6)$$

где  $t_{nep}$  — время перехода импульса из одного состояния в другое, с;

$\xi$  — характеризующий длительность перехода параметр.

Математическая модель реализована в программной среде мультифизического моделирования Comsol Multiphysics<sup>TM</sup>. Для дискретизации расчетной области использована вычислительная сетка из 8487 конечных элементов. Для решения системы дифференциальных уравнений используются метод конечных элементов и прямой решатель на основе алгоритма PARADISO. В качестве модельных сред приняты: окружающая среда – воздух, трубопровод – конструкционная сталь, проводник генератора тепловой метки – медь, транспортируемая по трубопроводу среда – сырая нефть. Электрофизические и теплофизические параметры воздуха, стали и меди оценивались по данным [13], теплофизические и реологические параметры нефти по [14, 15]. Режимные и конструктивные параметры вычислительного эксперимента представлены в табл. 1.

Контрольные точки регистрации температурного отклика располагались в окрестности внутренней поверхности трубы на расстоянии 0.2 и 0.4 м от входа.

Результатом решения являются нестационарные поля скоростей и температур исследуемой среды (рис. 2, 3).

Таблица 1

Параметры вычислительного эксперимента

Параметр	Значение	Ед. изм.	№	Параметр	Значение	Ед. изм.
Внутренний диаметр трубопровода	0,19	м	8	Длина участка трубопровода	1,2	м
Толщина стенки трубопровода	1	мм	9	Скорость течения на входе	0,05	м/с
Диаметр проводника	5	мм	10	Температура окружающей воздуха	25	°С
Напряжение	220	В	11	Наибольшая вязкость	17,228	Па·с
Продолжительность импульса	15	с	12	Наименьшая вязкость	3,309	Па·с
Расстояние до контрольной точки 1	0,2	м	13	Время релаксации	0,01	с
Расстояние до контрольной точки 2	0,4	м	14	Показатель кривизны реологической кривой	0,405	безразм.

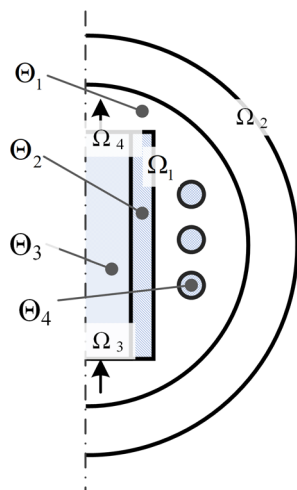


Рис. 1. Расчетная область моделирования:  
 $\Theta_1$  – внешняя среда (воздух);  $\Theta_2$  – стенка трубопровода;  
 $\Theta_3$  – жидкая среда;  $\Theta_4$  – проводник;  $\Omega_1$  – граница  
 стенка-воздух;  $\Omega_2$  – границы расчётной области;  $\Omega_3$  – вход  
 $\Omega_4$  – выход

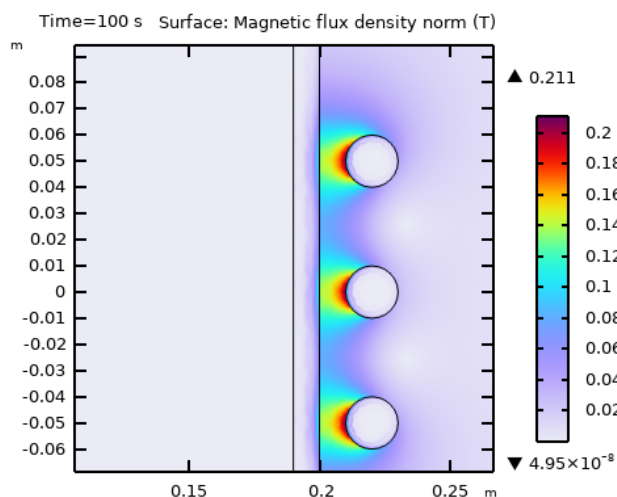


Рис. 2. График плотности потока магнитного поля

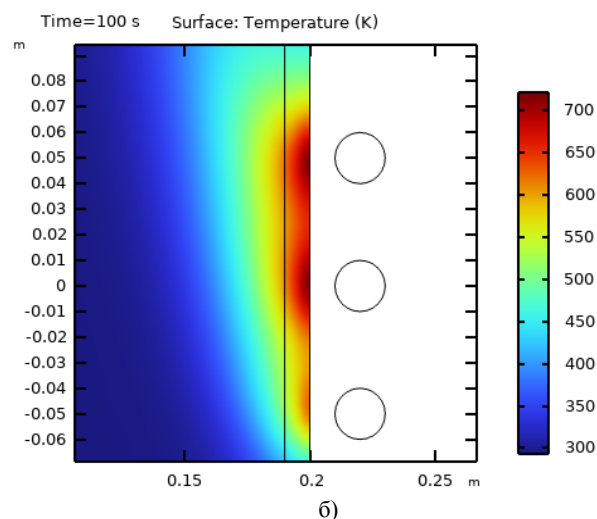
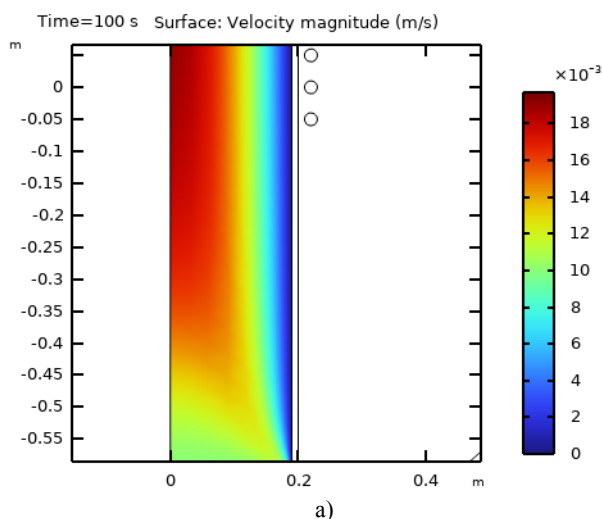


Рис. 3. Результаты моделирования: а – распределение скорости; б – распределение температуры

### Анализ результатов

На рис. 2 показан график плотности потока магнитного поля. Магнитное поле сосредоточено между поверхностью стального трубопровода и проводника электрического тока. Максимальное значение потока магнитного поля наблюдается вблизи поверхности медного проводника. Происходит формирование магнитного потока в приповерхностном слое стенки стального трубопровода (рис. 2). В области  $\Theta_3$  развивается ламинарный поток, характеризующийся полем скоростей с максимумом на оси трубопровода (рис. 3, а).

С течением времени происходит разогрев стенки трубопровода в приповерхностном

слое за счёт электрического тока, индуцированного внешним магнитным полем, и эффекта Джоуля-Ленца (рис. 3, б). Далее тепловая энергия распространяется по стенке трубопровода по механизму теплопроводности. Разогрев стенки приводит к нагреву контактирующего со стенкой пограничного слоя жидкой среды (рис. 3, б). В дальнейшем осуществляется кондуктивно-конвективный перенос тепловой энергии, характер которого обусловлен режимом течения и реологией среды. Тепловой отклик регистрируется на расстоянии от источника теплового импульса и отражает трансформацию формы теплового возмущающего сигнала при прохождении через транспортируемую среду (рис. 4).

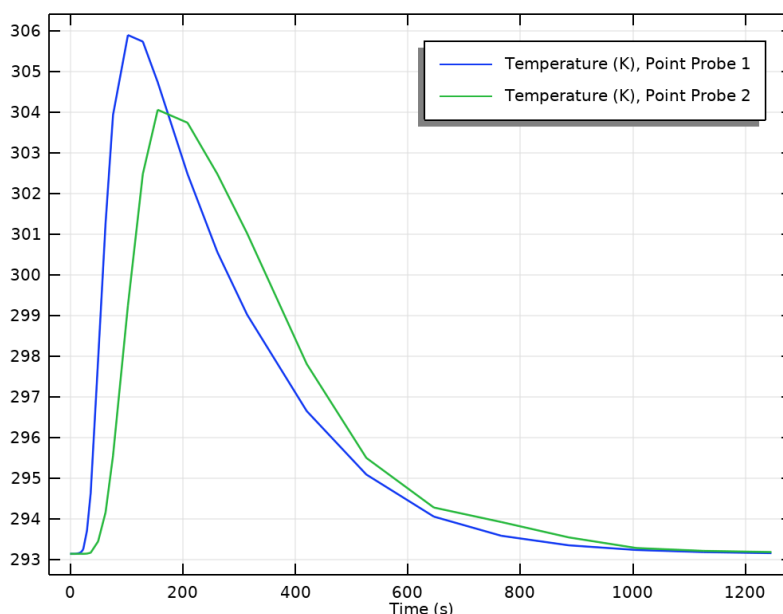


Рис. 4. Температурный отклик в контрольных точках

### Заключение

В работе синтезирована математическая модель индукционного генератора тепловой энергии для внесения теплового возмущения в поток неньютоновской жидкости в цилиндрическом трубопроводе.

Анализ результатов вычислительного эксперимента показал возможность формирования качественно верной картины процессов тепломассопереноса в результате индукционного нагрева трубопровода, по которому транспортируется неньютоновская жидкость, описываемая реологической моделью Карро.

Разработанная математическая модель локального индукционного нагрева может применяться при проектировании мобильных индукционных нагревателей и разработке технических решений, учитывающих геометрию объекта, реологию среды и режимные параметры (температура и давление среды, температура окружающего воздуха).

### Литература

1. Механика и реология нефтяных дисперсных систем: монография / Г.И. Келбалиев, С.Р. Расулов, Д.Б. Тагиев, Г.Р. Мустафаева. М.: Маска, 2017. 462 с.
2. Шрамм Г. Основы практической реологии и реометрии. М.: КолосС, 2003. 312 с.
3. Динамические термографические методы неразрушающего экспресс-контроля / Д.Ю. Головин, А.И. Тюрин, А.А. Самодуров, А.Г. Дивин, Ю.И. Головин; под общ. ред. Ю.И. Головина. М.: ТЕХНОСФЕРА, 2019. 214 с.

4. Использование нестационарной термометрии для диагностики состояния скважин / П.А. Валиуллин [и др.] // Нефтяное хозяйство. 2015. № 5. С. 93-95.

5. Infrared thermography for condition monitoring – A review / S. Bagavathiappan, B.B. Lahiri, T. Saravanan, J. Philip, T. Jayakumar // Infrared Physics&Thecnology. 2013. V. 60. PP. 35-50.

6. Active Thermometry Based DS18B20 Temperature Sensor Network for Offshore Pipeline Scour Monitoring Using K-Means Clustering Algorithm / X. Zhao, W. Li, L. Zhou, G.-B. Song, Q. Ba, J. Ou // International Journal of Distributed Sensor Networks. 2013. Vol. 9. No. (6). PP. 852090.

7. Handbook of Induction Heating / V. Rudnev, D. Loveless, R. Cook, M. Black. Marcel Dekker, Inc. New York, USA. 2003. 796 p.

8. Griffiths. D. Introduction to Electrodynamics. 3rd ed. Prentice Hall. 1999. 576 p.

9. Теория тепломассообмена: учебник для вузов / С.И. Исаев и др.; под ред. А.И. Леонтьева. 3-е изд., испр. и доп. М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2018. 462 с.

10. Малкин А.Я., Исаев А.И. Реология: концепции, методы, приложения. СПб.: Профессия, 2007. 560 с.

11. Механика и реология нефтяных дисперсных систем: монография / Г.И. Келбалиев, С.Р. Расулов, Д.Б. Тагиев, Г.Р. Мустафаева. М.: Маска, 2017. 462 с.

12. Kanwal R.P. Generalized Functions: Theory and Technique. 2nd ed. Boston, MA: Birkhäuser. 1998. 474 p.

13. Lide D.R. CRC Handbook of Chemistry and Physics (84th ed.). CRC Press LLC: Boca Raton. 2003. 2616 p.

14. Карманный справочник нефтепереработчика / Под ред. М.Г. Рудина. М.: ЦНИИТЭнефтехим, 2004. 336 с.

15. Закиров А.И., Николаев А.К., Пшенин В.В. Исследование реологических моделей смеси битуминозной и маловязкой нефтей Ашальтинского месторождений // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2015. № 11. С. 353-359.

## Информация об авторах

**Хвостов Анатолий Анатольевич** – д-р техн. наук, профессор кафедры прикладной математики и механики, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: khvtol1974@yandex.ru, ORCID: 0000-0002-3836-9407

**Дроздов Игорь Геннадьевич** – д-р техн. наук, профессор, первый проректор, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: dig@cchgeu.ru

**Соболева Елена Александровна** – канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры прикладной математики и механики, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: sobol5661@yandex.ru, ORCID: 0000-0002-5860-9615

**Коновалов Дмитрий Альбертович** – д-р техн. наук, профессор, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), д-р техн. наук, доцент, профессор кафедры теоретических основ теплотехники, Национальный исследовательский университет «МЭИ», (111250, Россия, г. Москва, Красноказарменная улица, дом 14, стр. 1), e-mail: dmikonovalov@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4435-1526>

**Журавлев Алексей Александрович** – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры математики, 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: zhuraal@rambler.ru, ORCID: 0000-0002-2194-767X

## MATHEMATICAL MODEL OF LOCAL INDUCTION HEATING OF PETROLEUM PRODUCTS IN A PIPELINE

A.A. Khvostov<sup>1</sup>, I.G. Drozdov<sup>1</sup>, E.A. Soboleva<sup>1</sup>, D.A. Konovalov<sup>1,2</sup>, A.A. Zhuravlev<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

<sup>2</sup>National Research University “MPEI”, Moscow, Russia

<sup>3</sup>Military Educational and Scientific Center of the Air Force “N.E. Zhukovsky and Yu. A. Gagarin Air Force Academy”, Voronezh, Russia

**Annotation:** the synthesis of a mathematical model of a thermal marker generator, formalizing the processes of heat and mass transfer in a non-Newtonian fluid moving in a cylindrical steel pipeline with dynamic viscosity specified by the Carreau rheological model, is considered. To ensure invariance to contamination of the pipeline surface and the presence of non-metallic thermal insulation, it is proposed to supply thermal energy to form a thermal mark locally by induction. The mathematical model includes a description of the turns of a coil with a conductor through which electric current flows, the steel wall of the pipeline and the flow of non-Newtonian fluid. The model is formalized on the basis of Ampere's law, equations of conservation of momentum, mass and energy. The solution of equations for the electromagnetic field in the frequency domain is used to specify the source term in the heat conduction equation for a steel wall. The results of modeling the evolution of electromagnetic, velocity and thermal fields under different regimes of fluid flow and electromagnetic pulse of an induction generator are presented. The following model media were used: air for the environment, structural steel for the pipeline, copper for the conductor of the heat tag generator, crude oil for the medium transported through the pipeline. A qualitatively correct description of the main patterns of heat and mass transfer occurring in a model environment when a thermal disturbance is introduced by induction is shown

**Key words:** induction heating, non-Newtonian fluid, Carreau model

### References

1. Kelbaliev G.I., Rasulov S.R., Tagiyev D.B., Mustafayeva G.R. “Mechanics and rheology of petroleum dispersed systems: monograph” (“Mekhanika i reologiya neftyanykh dispersnykh sistem: monografiya”), Moscow, Maska, 2017, 462 p.
2. Shramm G. “Fundamentals of practical rheology and rheometry” (“Osnovy prakticheskoy reologii i reometrii”), Moscow, KolosS, 2003, 312 p.
3. Golovin D.Yu., Tyurin A.I., Samodurov A.A., Divin A.G., Golovin Yu.I. “Dynamic thermographic methods of non-destructive express testing” (“Dinamicheskiye termograficheskiye metody neraz-rushayushchego ekspress-kontrolya”), ed. by Yu.I. Golovin, Moscow, Technosfera, 2019, 214 p.
4. Valiullin R.A., Sharafutdinov R.F., Fedotov V.Ya., Zakirov M.F. et al. “The use of non-stationary thermometry for diagnosing the condition of wells”, *Oil Industry (Nefyanoye khozyaystvo)*, 2015, no. 5, pp. 93-95.
5. Bagavathiappan S., Lahiri B.B., Saravanan T., Philip J., Jayakumar T. “Infrared thermography for condition monitoring – A review”, *Infrared Physics & Technology*, 2013. vol. 60, pp 35-50.
6. Zhao, X., Li, W., Zhou, L., Song, G.-B., Ba, Q., & Ou, J. “Active Thermometry Based DS18B20 Temperature Sensor Network for Offshore Pipeline Scour Monitoring Using K-Means Clustering Algorithm”, *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 2013, vol. 9, no. 9 (6), pp. 852090.
7. Rudnev V., Loveless D., Cook R., Black M. “Handbook of Induction Heating”, New York, Marcel Dekker Inc., 2003, 796 p.
8. Griffiths D. “Introduction to Electrodynamics”, 3<sup>rd</sup> ed., Prentice Hall, 1999.
9. Isaev S.I. et al. “Theory of heat and mass transfer: textbook for universities”, ed. by Leontiev A.I., 3<sup>rd</sup> ed., Moscow, Izdatel'stvo MGTU im. N.E. Bauman, 2018, 462 p.

10. Malkin A.Ya., Isaev A.I. "Rheology: concepts, methods, applications", St. Petersburg, Professiya, 2007, 560 p.
11. Kelbaliev G.I., Rasulov S.R., Tagiyev D.B., Mustafayeva G.R. "Mechanics and rheology of petroleum dispersed systems: monograph", Moscow, Maska, 2017, 462 p.
12. Kanwal R.P. "Generalized Functions: Theory and Technique", 2nd ed., Boston, MA Birkhäuser, 1998.
13. Lide D.R. "CRC Handbook of Chemistry and Physics", 84th ed., CRC Press LLC Boca Raton, 2003, 2616 p.
14. Rudin M.G. "Pocket guide of an oil refiner", ed. by M.G. Rudin, Moscow, TSNIITeneftkhim, 2004, 336 p.
15. Zakirov A.I., Nikolaev A.K., Pshenin V.V. "Investigation of rheological models of a mixture of bituminous and low-viscosity oils of the Ashalta deposit", The Mining Information and Analytical Bulletin ("Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten"), 2015, no. 11, pp. 353 – 359.

Submitted 12.02.2024; revised 07.05.2024

#### Information about the authors

**Anatoly A. Khvostov** – Dr. Sc. (Technical), Professor, Professor of the Department of Applied Mathematics and Mechanics, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: khvtol1974@yandex.ru, ORCID: 0000-0002-3836-9407

**Igor G. Drozdov** – Dr. Sc. (Technical), Professor, First Vice-Rector, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: dig@cchgeu.ru

**Elena A. Soboleva** – Cand. Sc. (Physical and Mathematical), Associate Professor of the Department of Applied Mathematics and Mechanics, Voronezh State Technical University, (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: sobol5661@yandex.ru, ORCID: 0000-0002-5860-9615

**Dmitry A. Kononov** – Dr. Sc. (Technical), Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), Dr. Sc. (Technical), Associate Professor, Professor of the Department of Theoretical Fundamentals of Heat Engineering, National Research University "MPEI" (14 stroenie 1 Krasnokazarmennaya str., Moscow 111250, Russia), e-mail: dmikononov@yandex.ru, ORCID: 0000-0003-4435-1526

**Alexey A. Zhuravlev** – Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Mathematics, Military Educational and Scientific Center of the Air Force "N.E. Zhukovsky and Yu. A. Gagarin Air Force Academy" (54a Starykh Bolshevikov str., Voronezh 394064, Russia), e-mail: zhuraa1@rambler.ru, ORCID: 0000-0002-2194-767X

## АЛГОРИТМИЗАЦИЯ ОБРАБОТКИ И ПОДГОТОВКИ ДАННЫХ ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ МОДЕЛЕЙ ПРЕДИКТИВНОЙ АНАЛИТИКИ

П.Ю. Гусев, А.В. Таволжанский

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

**Аннотация:** решается задача алгоритмизации обработки данных для их дальнейшего использования в моделях предиктивного анализа. Показаны достоинства применения моделей предиктивной аналитики, такие как увеличение производительности, снижение риска и оптимизация затрат, а также возникающие сложности, в частности, трудоёмкость обработки исходной информации. Для решения обозначенной проблемы приводится алгоритм, представленный в виде блок-схемы, которая условно поделена на три уровня. На первом уровне происходит первичное получение информации и её перевод в доступный язык программных средств. Операции второго уровня предназначены для снижения влияния факторов, негативно сказывающихся на качестве итоговой модели. На третьем уровне данные трансформируются и видоизменяются для более удобного их использования. Для каждого уровня приведены наиболее распространённые действия с данными, показаны варианты их применения. Рассмотрена реализация предложенного алгоритма для системы обучения модели предиктивной аналитики на примере электрогенератора. На практике показана возможность не строгого следования предписаниям, а выбора операций под конкретную задачу, что позволяет достичь большей гибкости и эффективности в работе. После необходимой подготовки было проведено исследование выбросов для изучения нештатных режимов работы системы, которые представляют интерес, в соответствии с постановкой задачи

**Ключевые слова:** предиктивная аналитика, обработка данных, анализ данных, прогнозирование

### Введение

С развитием систем возрастает сложность управления и прогнозирования их развития.

Прогнозирование состояния системы является приоритетной задачей в процессе принятия решений, что в свою очередь обеспечивает возможность оценки влияния управляющих воздействий на процесс функционирования системы.

Аналогичная ситуация проявляется при управлении техническими объектами – прогнозирование их состояния позволяет применять превентивные меры по исключению нештатных режимов работы.

Прогноз состояния технических систем может быть осуществлён различными способами [1-2]. Однако одним из наиболее эффективных является применение методов предиктивной аналитики [3-4]. Предиктивная аналитика представляет собой метод прогнозирования, основанный на интеллектуальном анализе статистических данных, и использующий, как правило, технологии искусственного интеллекта [5].

Особенно актуально использование методов предиктивной аналитики для прогнозирования состояния производственных объектов. Среди наиболее важных достоинств стоит отметить увеличение общей производительности

труда, оптимизацию затрачиваемых ресурсов и, что немаловажно, коррекцию уровня риска в меньшую сторону [6].

Однако, при всех этих достоинствах, предиктивный анализ не лишен недостатков. Один из них будет рассмотрен в данной работе, а именно – сложность разработки, обусловленная трудоёмкими операциями подготовки и обработки данных, для их последующего использования.

В предлагаемой работе приводится алгоритм действий, охватываются основные этапы подготовки, а также рассматривается применение алгоритма на примере с данными с функционирующего объекта.

### Алгоритм подготовки данных

В данной работе под **объектом** будем понимать любую интересующую нас сущность, будь то промышленное предприятие, конкретная единица оборудования, информационная система и то многое другое, для которого необходимо построить математическую **модель**, пригодную для использования методами предиктивной аналитики.

Рассмотрим алгоритм на рис. 1.

На первом уровне происходит получение информации, на втором – избавление от обстоятельств, негативно сказывающихся на качестве модели, а на третьем уровне данные видоизменяются для более удобного дальнейшего

использования. Вниманием не обделена и возможность повторного прохождения алгоритма со второго и третьего уровней по результатам применения модели или её настройки, если это необходимо.

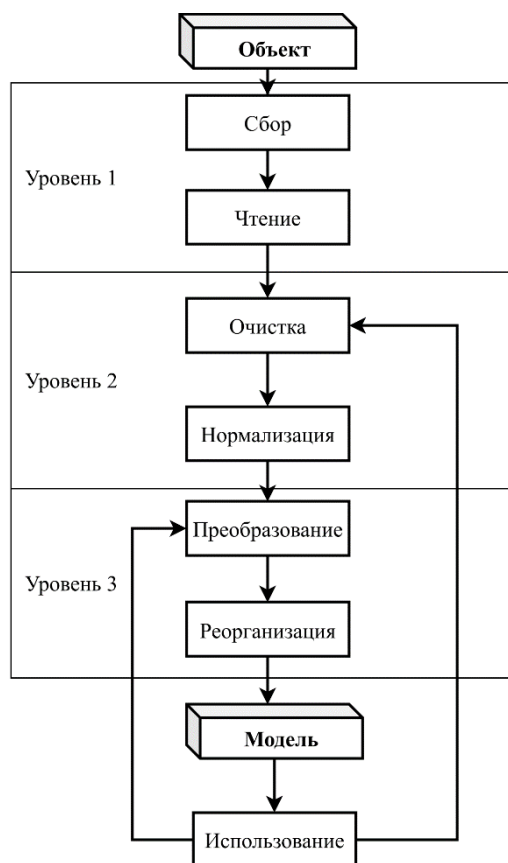


Рис. 1. Предлагаемый алгоритм обработки данных

### Уровень 1. Сбор и чтение

Сбор данных является специфической задачей, поскольку целиком зависит от объекта исследования. Технология сбора данных может отличаться автоматическим получением значений с датчиков, расположенных на объекте, а может осуществляться ручным съемом показаний через определенные промежутки времени.

Без операций чтения или загрузки данных невозможно использование различных программных инструментов. Такие операции представляет собой следующие категории действий: чтение строковых, текстовых файлов, а также файлов в других двоичных форматах; работа с результатами структурированных запросов либо со всей реляционной базой данных; загрузка данных из сетевых расположений через специальные интерфейсы.

При выполнении этих операций дополнительные инструкции могут включать индекса-

цию (выбор индексов и имен столбцов), определение преобразований типов данных, создание «маски» для даты и времени и итерацию для обхода больших файлов, выбор разделителя и кодировки.

### Уровень 2. Очистка и нормализация

По некоторым оценкам дальнейшая подготовка данных занимает около восьмидесяти процентов рабочего времени аналитика. Далее рассмотрим возможные проблемы, с которыми приходится сталкиваться специалисту.

Проблема отсутствующих данных, в зависимости от решаемой технической задачи может быть решена двумя способами – удалением и заполнением. Первый подход предполагает удаление строк с определенным количеством отсутствующих значений, а второй – заполнение ячеек константами либо же результатами интерполяции.

Также встречается обратная проблема – дублирование. Игнорирование дубликатов способно повлиять на конечную точность разрабатываемой модели, поэтому следует сохранять первый или последний уникальный элемент из множества дублированных строк.

Третья проблема, которую стоит отметить – это наличие выбросов. Выбросы – это аномальные значения, не свойственные для набора данных. Для их идентификации применяются такие методы визуализации, как квадратичные диаграммы или диаграммы рассеяния. Выбор дальнейшей операции с выпадающими значениями определяется на основе их типа.

Можно выделить два обобщённых типа выбросов: первый тип – ухудшающие итоговое качество и, как следствие, требующие действий по снижению их влияния, и второй тип – являющиеся целью исследования, требующие действий по их идентификации и прогнозированию.

Первый тип – снижающие итоговое качество и требующие действий по снижению степени их воздействия, например, в задачах нахождения трендов показателей. Сюда же можно отнести и возникающие проблемы с получением информации с измерительных устройств, которые появляются из-за задержек, затухания сигнала, наличия шумов и т.д. Для уменьшения негативного влияния чрезмерных отклонений, последние могут исключаться, либо их значения могут корректироваться до более подходящих значений.

Для второго типа выбросы являются целью исследования, например, при работе с изучением внештатных режимов работы. В таком случае выброс становится целевой переменной, а момент его обнаружения требуется минимизировать.

### Уровень 3. Преобразование и реорганизация

Возникают случаи, для решения которых необходимо использование некоторых категорий, изначально не предусмотренных алгоритмом сбора информации. Тогда, по имеющимся определениям классов, представленных в виде пар ключ–значение, создаём нужную колонку, то есть добавляем новые столбцы.

Другим случаем применения категорий можно считать задачу группировки строк. К примерам таких событий можно отнести следующее деление по времени суток, например, утро – с 04:00 до 10:00, день – с 10:00 до 16:00, вечер – с 16:00 до 22:00, ночь – с 22:00 до 04:00. При этом в программной реализации указывается принадлежность пограничных значений к определенному классу, например, 16:00:00 – вечер.

Широкое распространение в практических задачах получила операция иерархического или многомерного индексирования [7]. Она предназначена для более глубокого анализа, агрегирования и манипуляций с многомерными данными, представляя их в табличной форме. Пример мультииндексации строк показан в табл. 1, где индексом является как год, так и полугодие.

Таблица 1

Мультииндексация строк

Год	Полугодие		Параметр 2
	Тип	Параметр 1	
2022	1	68	36,7
	2	80	37,8
2023	1	60	37,2
	2	75	36,5

Ещё одной модификацией можно назвать операцию транспонирования данных, то есть перенос данных из столбцов в строки или наоборот. Другое название для этого действия – изменение формы, что в свою очередь направлено на улучшение быстродействия, так как много алгоритмов лучше работают с определённой формой, в частности, с большим количеством строк; на улучшение наглядности; на совместимость с определёнными алгоритмами и методами, например, машинного обучения [8].

### Постановка задачи

В данной работе рассматривается подготовка данных для обучения модели предиктивной аналитики на примере электрогенератора. Электрогенератор представляет из себя технический объект, состояние которого определяется 600 параметрами. Дискретность сбора данных с датчиков варьируется от 1 до 3 секунд.

Определена задача подготовки данных для последующего обучения модели – разработать способы подготовки данных, обеспечивающие достаточную точность прогнозирования возникновения внештатных ситуаций. Также необходимо учесть, что модель должна быть способна прогнозировать показания определённой величины по накопленной информации, а также иметь возможность изменения временного отрезка и количества величин для обучения.

Исходный набор данных представляет из себя четыре текстовых файла, каждый из которых состоит из показаний, снятых за пять дней измерений. В них построчно записаны время и дата измерения, уникальное обозначение измерительного устройства (UID), измеренное значение, единицы измерения и описание. Фрагмент данных приведён в табл. 2.

Таблица 2

Фрагмент исходных данных

Время	UID	Знач	Ед.изм	Описание
01.03.22 11:12:00,000	UID333	1.1066	ММ/СЕК	ВИБР КОРП ПОДШ N12(П 0-20 ММ/СЕК
...	...	...	...	...
02.03.22 17:09:00,000	UID456	116.9609	МЗ/Ч	F ДИСТ.ОХЛ.АКТ.СТАЛИ 0-160 МЗ/Ч
...	...	...	...	...
03.03.22 22:03:00,000	UID585	148.9766	м3/ч	F ВОДЫ К ВОЗДУХООХЛ 0-200 МЗ/Ч

В качестве целевого показателя примем наиболее часто встречающийся UID, для обучения будем использовать три самых часто представленных UID. Временной промежуток для обучения установим два дня. Шаг дискретизации выберем равным трём секундам.

Согласно постановке задачи обработка данных начинается со второго этапа первого уровня – чтения представленных данных.

В качестве дополнительных инструкций определено, что разделителем между столбцами является табуляция, а стандарт кодирования символов – UTF-8. Вместе с этим сформирована маска, для корректного считывания даты, в которой явно укажем расположение дня, месяца и года, а также отбросим тысячные доли секунды.

Второй уровень обработки начнём с проверки отсутствующих значений, которая показала отсутствие небольшого числа единиц измерения, что для решаемой задачи не является критическим и не требует действий по исключению данной проблемы.

Проверку на выбросы проводить на текущем этапе не представляется возможным из-за особенностей структуры представления данных. К этому можно добавить и очень строгие требования к показаниям измерительных устройств, которые должны быть в жестко ограниченных пределах. Однако проверка на выделяющие значения будет проведена после операций реорганизации, для исключения ошибок записи и чтения.

В завершении, удалим неиспользуемые признаки, такие как «Ед.изм» и «Описание», чтобы исключить их влияние на скорость работы алгоритмов и производительность вычислений.

Перейдём к последнему, третьему уровню. Отсортировав по списку уникальных UID, в

соответствие с частотой их появления определим целевой признак. Его и два, следующих за ним UID примем в качестве признаков для обучения модели (табл. 3).

Таблица 3

Наиболее часто встречающиеся UID

UID	Количество измерений
UID1	200149
UID2	182180
UID3	179988

Далее, последовательно проходя все имеющиеся дни, получаем данные, содержащие только UID из табл. 3, отдельно по каждому дню (табл. 4).

Таблица 4

Фрагмент таблицы с записями по каждому дню

Время	UID	Знач
2022-03-01 00:00:00	UID3	177.0703
2022-03-01 00:00:02	UID3	176.6953
2022-03-01 00:00:02	UID1	148.0781
2022-03-01 00:00:02	UID2	0.3371

Как уже было сказано ранее, после приведения структуры данных в приемлемую для проверки на выбросы форму займёмся проведением данного исследования. Для рассматриваемой задачи выбросы представляют собой практический интерес, так как есть необходимость изучения нештатных режимов работы. Построим диаграмму размаха для целевого показателя (рис. 2), и получим количество выбросов по переменным, используемым для обучения (табл. 5).

Таблица 5

Количество выбросов

UID /День	1	2	3	4	5	6	7	8	9
UID1	101	6	0	0	0	385	872	0	57
UID2	159	170	166	179	136	151	164	163	148
UID3	242	203	0	0	49	595	708	0	148

Видим, что количество выбросов второй переменной изменяется в небольших пределах, в первой и третьей же наоборот, их количество

варьируется от нуля до 3% от количества измерений. Подготовка данных для обучения завершена; обучение далее не рассматривается.

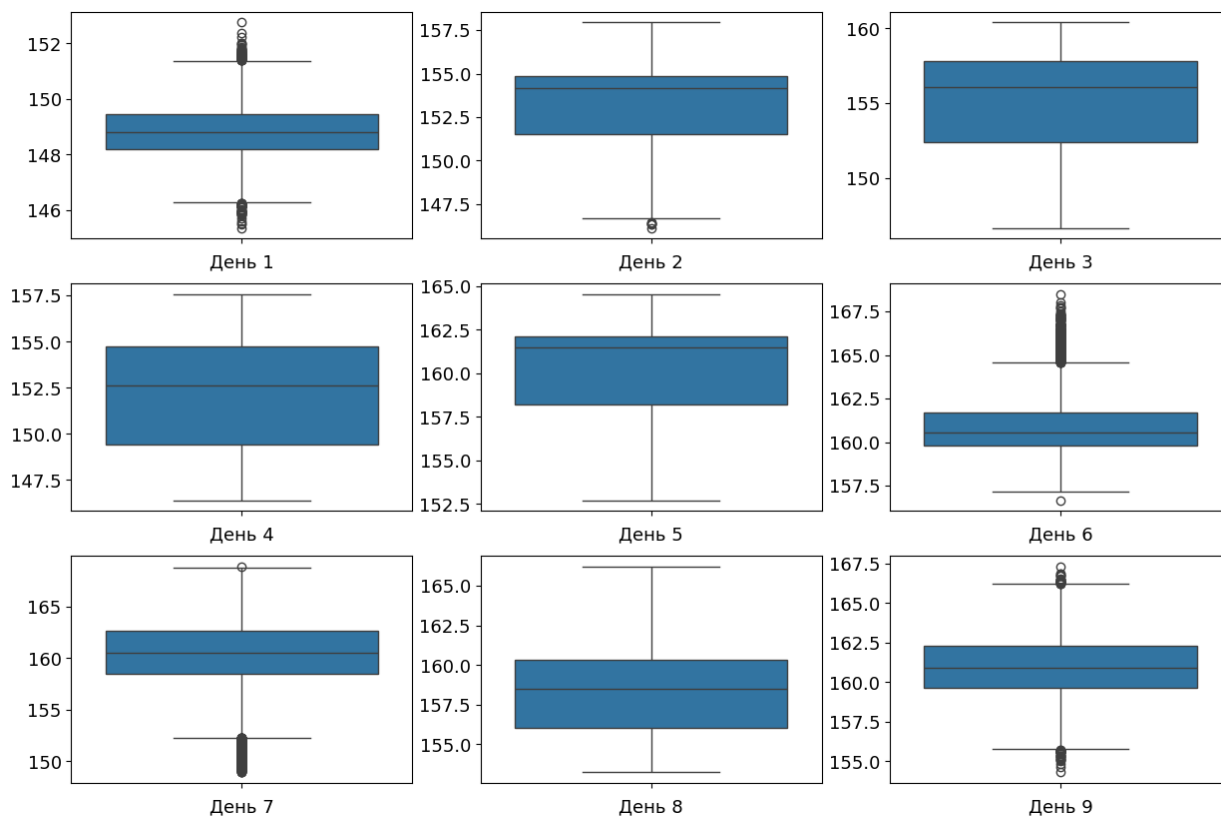


Рис. 2. Диаграмма размаха переменной UID1

### Заключение

В заключение стоит отметить, что внедрение прогнозной аналитики для любой технической системы, будь то промышленная установка или предприятие, позволяет повысить производительность и смягчить негативные факторы за счет использования собираемых или агрегированных данных, которые требуют предварительной обработки для разработки моделей с достаточной точностью.

В результате работы:

- 1) проведен анализ существующих методов подготовки данных для обучения моделей прогнозной аналитики;
- 2) предложен алгоритм предварительной обработки данных для обучения моделей прогнозной аналитики;
- 3) проведена практическая апробация предложенного алгоритма.

Дальнейшие исследования по тематике предполагают анализ подготовки исходных данных для разных моделей прогнозирования и определение оптимальных вариантов подготовки данных.

### Литература

1. Авакьянц А.В., Урубкин М.Ю. Методы прогнозирования // *Инновационная наука*. 2017. №2-1. С. 12-14.
2. Ковалев В.З., Швецов С.Ю., Архипова О.В. Анализ методов прогнозирования потребления электрической энергии и мощности // *Инженерный вестник Дона*. 2023. №4 (100). URL: [http://www.ivdon.ru/tu/magazine/archive/n4\\_y2023/8324](http://www.ivdon.ru/tu/magazine/archive/n4_y2023/8324).
3. Цыгулева А.А. Анализ и структуризация поля знаний методов предиктивной аналитики // *Теория и практика современной науки*. 2022. №12 (90). С. 381-386.
4. Неизвестный О.Г. Программа имитационного моделирования системы предиктивного управления процессом гидрирования этилбензола // *Вестник Воронежского государственного технического университета*. 2023. Т. 19. № 6. С. 32-40.
5. Чуланова О.Л. Возможности применения дескриптивной, прогнозной, предиктивной и прескриптивной ИТ-аналитики как цифровых трендов // *Материалы Афанасьевских чтений*. 2020. №1 (30). С. 40-49.
6. Гусев П.Ю., Таволжанский А.В. Инструменты предиктивной аналитики // *Сборник научных статей 12-й Международной молодежной научной конференции*. 2023. С. 96–99.
7. Шабурова Н. Н. Использование многомерного индексирования для повышения точности поиска научной информации // *Библиосфера*. 2009. №3. С. 53-55.
8. Бахтин И.В. Использование python для математических вычислений // *Форум молодых ученых*. 2019. №2 (30). С. 271-274.

Поступила 14.02.2024; принята к публикации 08.05.2024

### Информация об авторах

**Гусев Павел Юрьевич** – канд. техн. наук, доцент, и.о. заведующего кафедрой систем автоматизированного проектирования и информационных систем, проректор по цифровому развитию, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, д. 84), e-mail: pgusev@cchgeu.ru, тел. 7(473)207-22-20 доб. 6669  
**Таволжанский Александр Валентинович** – аспирант кафедры систем автоматизированного проектирования и информационных систем, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, д. 84), e-mail: tavalzhanskij.a@yandex.ru, тел. +7 (473) 207-22-20 доб. 6127

## ALGORITHMISATION OF DATA PROCESSING AND PREPARATION FOR BUILDING PREDICTIVE ANALYTICS MODELS

P.Yu. Gusev, A.V. Tavalzhansky

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

**Abstract:** the paper presents the problem of algorithmizing of data processing for further use in predictive analytics models. The advantages of using predictive analytics models, such as increased productivity, risk reduction and cost optimization, are shown, as well as the difficulties that arise, in particular the labor-intensive processing of raw data. To solve this problem, an algorithm is presented in the form of a flowchart, which is roughly divided into three levels. The first level involves the initial obtaining of information and its translation into the available language of software tools. The operations of the second level are aimed at reducing the influence of factors that negatively affect the quality of the final model. At the third level, data is transformed and modified for more convenient use. For each level, the most common operations with data are given and examples of their use are shown. An example of the implementation of the proposed algorithm for the predictive analytics model training system on the example of an electric generator is considered. In practice, it is shown that it is possible not to strictly follow the rules, but to select operations for a specific problem, which allows to achieve greater flexibility and efficiency in work. After the necessary preparations, emission research has been carried out to study the abnormal system operation modes that are of interest according to the problem statement

**Key words:** predictive analytics, data processing, data analysis, forecasting

### References

1. Avakyants A.V., Urubkin M.Yu. "Methods of forecasting", *Innovation Science (Innovatsionnaya nauka)*, 2017. no. 2-1.
2. Kovalev V.Z.; Shvetsov, S.Yu.; Arkhipova, O.V. "Analysis of the forecasting methods for the electric energy and power consumption", *Engineering Bulletin of the Don (Inzhenernyy vestnik Dona)*, 2023, no. 4 (100).
3. Tsyguleva A.A. "Analysis and structuring of the knowledge field of the predictive analytics methods", *Theory and practice of modern science (Teoriya i praktika sovremennoj nauki)*, 2022, no. 12 (90).
4. Neizvestny O.G. "Simulation modelling program of the predictive control system of the ethylbenzene dehydrogenation process", *The Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2023, vol. 19, no. 6, pp.32-40.
5. Chulanova O.L. "Possibilities of application of descriptive, predictive, and prescriptive hr -analytics as digital trends", *Proc. of Afanasiev's Reports (Materialy Afanas'yevskikh chteniy)*, 2020, no. 1 (30).
6. Gusev P.Yu., Tavalzhansky, A.V. "Tools of predicative analytics, *Coll. of scientific articles of the 12th International Youth Scientific Conference (Sbornik nauchnykh statej 12-j Mezhdunarodnoj molodezhnoj nauchnoj konferencii)*, 2023, pp. 96-99.
7. Shaburova N.N. "Use of multidimensional indexing to improve the accuracy of scientific information search", *Bibliosphere (Bibliosfera)*, 2009, no. 3.
8. Bakhtin I.V. "Using python for mathematical computations", *Forum of Young Scientists (Forum molodykh uchenykh)*, 2019, no. 2 (30).

Submitted 14.02.2024; revised 08.05.2024

### Information about the authors

**Pavel Yu. Gusev** - Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Acting Head of Computer Aided Design and Information Systems, Vice-Rector for Digital Development, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: pgusev@cchgeu.ru, tel.: +7 (473) 207-22-20 ext. 6669  
**Alexander V. Tavalzhansky** - Postgraduate Student, the Department of Computer Aided Design and Information Systems, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: tavalzhanskij.a@yandex.ru, tel.: +7 (473) 207-22-20 ext. 6127

## МОДИФИКАЦИЯ АЛГОРИТМА DETR ДЛЯ ОБНАРУЖЕНИЯ ОБЪЕКТОВ В ВИДЕОПОТОКЕ

А.И. Паршин<sup>1</sup>, В.Ф. Барабанов<sup>1</sup>, Н.И. Гребенникова<sup>1</sup>, М.Н. Аралов<sup>1,2</sup>, С.А. Коваленко<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

<sup>2</sup>Научно-исследовательский институт электронной техники, г. Воронеж, Россия

**Аннотация:** несмотря на заметный прогресс, произошедший в последние годы, задача обнаружения объектов в видеопотоке остается одной из самых сложных и требующих больших вычислительных ресурсов. Алгоритмы, основанные на классических детекторах, не обеспечивают высокое качество детектирования, в связи с чем на основе свёрточных нейронных сетей были разработаны такие алгоритмы, как YOLO (аббревиатура от слов «You Only Look Once») и DETR (аббревиатура от слов «DEtection TRansformer»). Эти алгоритмы отличаются высокой точностью и хорошо зарекомендовали себя в задаче распознавания объектов в видеопотоке. В то же время, они обладают рядом существенных недостатков, главным из которых является высокая математическая сложность, что приводит к существенному увеличению времени обучения. В связи с этим в настоящее время важной задачей становится модернизации существующих современных алгоритмов. Описаны некоторые возможные пути и методы модернизации алгоритма DETR, даны оценки влияния на конечный результат. Предлагаемый вариант модификации содержит как оптимизацию слоев декодера при помощи нейронной сети, так и модификацию механизма влияния для уменьшения математической сложности вычислений и увеличения итоговой точности

**Ключевые слова:** распознавание объектов, DETR, искусственная нейронная сеть, анализ изображений, свёрточная нейронная сеть

### Введение

Применение свёрточных нейронных сетей дает возможность получить высокие результаты при решении задач поиска объектов как на статичном изображении, так и в видеопотоке [1]. На их основе в последнее время было разработано большое количество алгоритмов, которые показывают еще более значимые результаты качества предсказания. Одним из таких алгоритмов является представленный в 2015 году алгоритм YOLO [2].

Алгоритм YOLO основан на использовании глубокой свёрточной нейронной сети. Одной из особенностей алгоритма является то, что YOLO делит исходное изображение на  $N$  сеток с размером  $S \times S$ . Каждая из этих сеток используется для поиска объекта внутри себя и определения его местоположения. Ячейка сетки предсказывает вероятность нахождения объекта, координаты ограничивающей рамки относительно координат ячейки и класс, к которому данный объект относится. Этот алгоритм значительно уменьшает время вычислений, поскольку как обнаружение, так и распознавание производится ячейками из изображения.

Алгоритм YOLO показал существенные преимущества в качестве распознавания объектов и подтолкнул исследования в этом направ-

лении. Дальнейшим развитием идеи использования свёрточных нейронных сетей в задаче распознавания объектов в видеопотоке является появившийся в 2020 году алгоритм DETR [3].

### Архитектура алгоритма DETR

На сегодняшний день DETR является одним из самых перспективных алгоритмов для обнаружения объектов в видеопотоке. На рис. 1 представлена общая структура алгоритма [3]. Первоначальные признаки для последующих частей алгоритма берутся из свёрточной нейронной сети глубокого обучения. Затем CNN-признаки дополнительно обогащаются с помощью специального энкодера, который добавляет глобальный механизм внимания признаков друг на друга (Attention), состоящий из двух частей — Cross-Attention и Self-Attention. Механизм Внимания — это специальный алгоритм, используемый в свёрточных (CNN) и рекуррентных (RNN) нейронных сетях для обнаружения зависимости между различными частями как входных, так и выходных данных. Self-Attention — один из возможных вариантов механизма внимания, направленный на нахождение зависимости между входными данными, Cross-Attention, напротив, добавляет информацию с трансформер-энкодера и входной свёрточной сети. Таким образом, информация с каждого слоя энкодера обновляется с помощью данных, поступающих с других релевантных слоев.

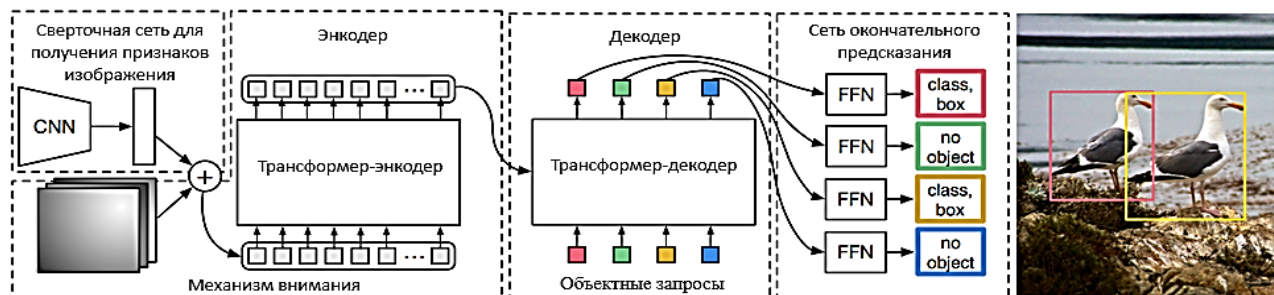


Рис. 1. Общая структура алгоритма DETR

Затем данные декодируются в декодере в координаты блока и метки классов с помощью сети прямого распространения (FFN), по которым делаются окончательные прогнозы  $N$ . В алгоритме DETR вместо классических геометрических декодеров используются специальные объектные запросы («object queries»), состоящие из двух частей:

— позиционные включения («positional embeddings»), отвечающие за обнаружение объектов на различных частях изображения. Как упоминалось ранее, в отличие от классических декодеров, эти признаки не имеют прямой геометрической интерпретации и не используют конкретную информацию об изображении. На рис. 2 каждая точка соответствует одному «query», и предсказания относительно равномерно распределяются по изображению;

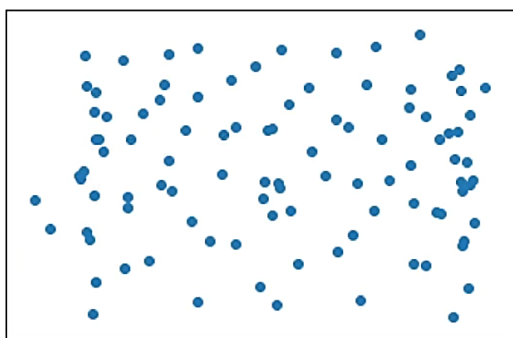


Рис. 2. Признаки «positional embeddings» объектов на разных частях изображения

— контентные запросы («content queries») добавляют пространственные ключи, которые, в некотором роде, служат для компенсации отсутствия геометрической интерпретации у позиционных включений, тем самым увеличивая точность предсказания. Эти ключи инициализируются перед первым слоем как нулевые векторы.

Две эти части суммируются, и полученные признаки объектов используются в дальнейшем для увеличения точности предсказания в оконечной нейронной сети.

Окончательное предсказание вычисляется с помощью 3-слойного перцептрона с функцией

активации ReLU и скрытым измерением  $d$ , а также слоем линейной проекции. Оконечная нейронная сеть (FFN) предсказывает высоту и ширину прямоугольника относительно входного изображения и его нормализованные координаты центра, а линейный слой предсказывает имя класса с помощью функции softmax. Поскольку предсказывается набор из  $N$  ограничивающих прямоугольников заранее определенного размера, где  $N$ , как правило, намного больше фактического количества искоемых объектов на изображении, дополнительная специальная метка класса  $\emptyset$  используется для обозначения того, что в пределах интервала не обнаружен ни один объект. Этот класс играет аналогичную роль классу «фон» в стандартных подходах к обнаружению объектов.

Несмотря на высокое качество обнаружения объектов, алгоритм DETR имеет и ряд существенных недостатков:

— невысокое качество предсказания для небольших объектов. Алгоритм DETR использует только один набор признаков на выходе сверточной нейронной сети, который обычно имеет недостаточное разрешение для точной идентификации небольших объектов;

— большое время обучения. Из-за сложной структуры для достижения приемлемой точности алгоритму DETR нужно на порядок большее время обучения, чем классическим детекторам. Наибольшие математические затраты происходят в Механизме Внимания (Attention), оптимизация этого механизма является наиболее перспективной задачей с целью уменьшения времени обучения при приемлемом уровне точности предсказания.

Рассмотрим некоторые пути модификации алгоритма.

### Возможные варианты модификации

Одним из вариантов модификации является уменьшение слоев декодера. Как говорилось выше, данные, полученные на выходе декодера, поступают в сеть прямого распространения,

которая генерирует предсказанные координаты и идентификаторы классов. Как правило, предсказания генерируются после каждого слоя декодера, далее для стабилизации и увеличения скорости обучения накладывается дополни-

тельная функция потерь. На рис. 3 представлена зависимость ошибки обучения после каждого из четырех слоёв декодера (отмечены соответствующими цифрами).

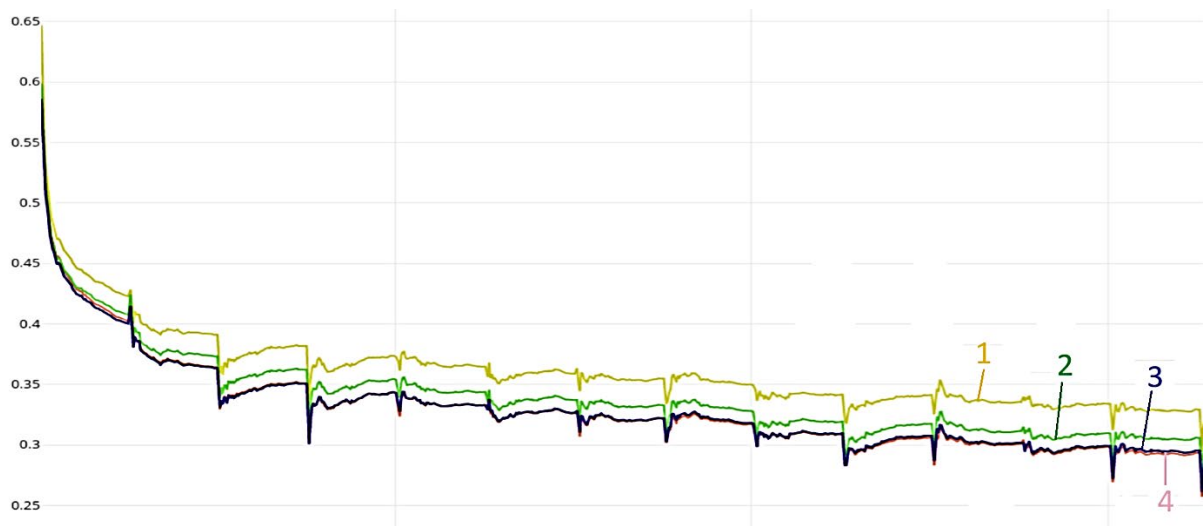


Рис. 3. Зависимость ошибки обучения от количества слоев детектора

Как видно из графика, каждый последующий слой оказывает всё меньшее влияние на точность предсказания, и выгода от использования каждого следующего слоя всё меньше и меньше. Как показано на рис. 2, количество слоев детектора можно ограничить тремя без существенной потери качества предсказания. Для дальнейшей оптимизации слоев декодера без существенной потери качества предсказания необходимо отказаться от случайной инициализации векторов объектных запросов. Как показано на рис. 4, вместо случайной инициализации можно предсказывать начальный вектор при помощи сверточной нейронной сети, подавая на её вход данные с энкодера.

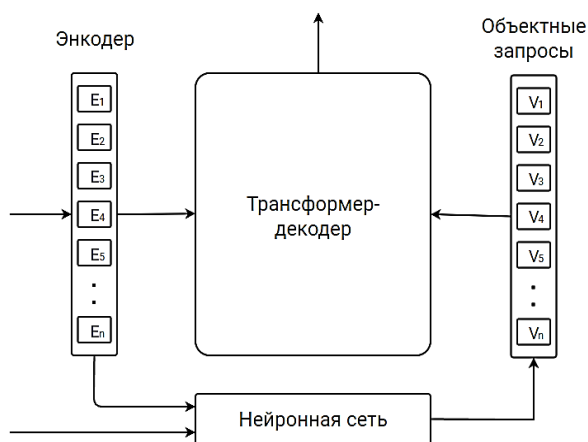


Рис. 4. Предсказание начальных весов объектных запросов при помощи нейронной сети

Другой возможностью модификации алгоритма DETR является замена или модификация дорогостоящего в вычислительном плане механизма внимания. Как показано в [3] и [4], позиционные включения («positional embeddings») вносят довольно незначительный вклад в общий механизм объектных запросов. Более того, объектные запросы дают только общую карту веса механизма внимания, не используя конкретную информацию об изображении, таким образом, замена позиционных включений на классические геометрические детекторы или любой другой механизм, позволяющий сделать эти признаки адаптивными к изображению или привязывающий признаки к геометрическим параметрам искомым классам, может положительно сказаться на качестве итогового предсказания.

Еще одним вариантом модификации является полный отказ от механизма внимания, и замена его другим алгоритмом, например, алгоритмом Adaptive Mixing [5]. Этот алгоритм состоит из двух частей: канальное смешивание («channel mixing») и пространственное смешивание («spatial mixing»). В первой части производится «channel mixing».

В механизме канального смешивания контентные запросы линейно проецируются в матрицу параметров размером  $S \times C$ , где  $C$  — количество каналов. Выходные данные энкодера перемножаются с этой матрицей, в результате между каналами происходит смешивание при-

знаков. Для каждой группы признаков матрица  $S \times S$  рассчитывается независимо, но она доступна для всех пространственных точек.

В механизме пространственного смешивания по «content queries» рассчитывается адаптивная матрица весов, с помощью которой производится сложение признаков по пространственному измерению. Новые признаки, полученные после этой операции, проецируются в размерность «content queries» и складываются с ними же, чтобы получить финальный результат работы слоя. Полученные признаки пропускаются через сеть прямого распространения (FFN), а затем по ним предсказываются вероятности классов и сдвиги для «positional embeddings» ( $x, y, z, r$ ).

В статье рассмотрены только некоторые возможности модификации алгоритма DETR.

Вне рамок этой статьи остались возможные модификации входной нейронной сети, а также сети окончательного предсказания [6], подбор и оптимизация их параметров. Также остались не рассмотренными возможности комбинирования алгоритма DETR с другими современными алгоритмами обнаружения и классификации объектов. В результате проделанной работы предложен комбинированный вариант модификации алгоритма DETR (рис. 5).

Предлагаемый вариант модификации содержит как оптимизацию слоев декодера посредством подбора начальных весов при помощи нейронной сети, так и модификацию механизма влияния для уменьшения математической сложности вычислений и увеличения итоговой точности.

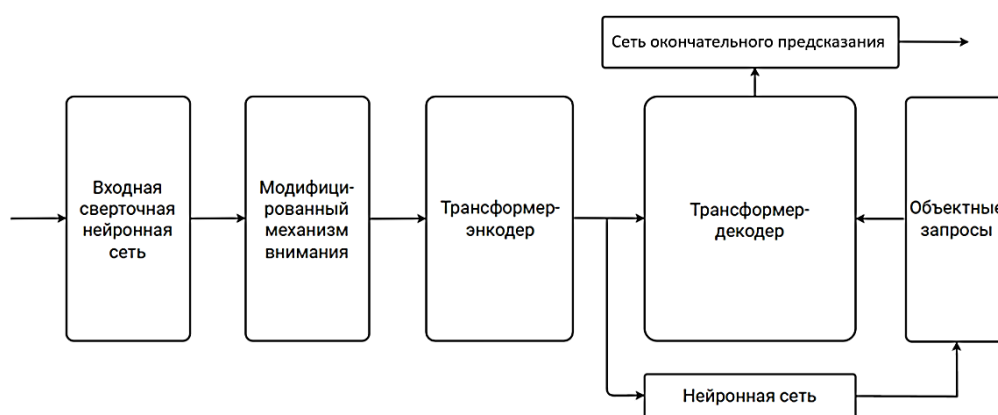


Рис. 5. Принципиальная схема модификации алгоритма DETR

## Заключение

Вычислительная мощность компьютерных систем растет год от года, что приводит к появлению все более совершенных алгоритмов обработки данных. Алгоритм DETR на сегодняшний день является одним из самых перспективных алгоритмов распознавания и классификации объектов в видеопотоке.

В ходе проделанной работы были выполнены следующие этапы.

1. Рассмотрен алгоритм обнаружения объектов в видеопотоке DETR.
2. Рассмотрены некоторые пути возможной модификации этого алгоритма.
3. Предложен вариант, основанный на модификации механизма влияния и оптимизации декодера. Данные изменения должны положительно сказаться на времени обучения и точности итоговой модели.

## Литература

1. Детектирование графических объектов с использованием искусственной нейронной сети / А.И. Паршин, А.О. Калашников, В.Ф. Барабанов, С.Л. Кенин // Актуальные проблемы прикладной математики, информатики и механики: сб. тр. Международ. науч. конф. Воронеж, 2022. С. 1000-1005.
2. You Only Look Once: Unified, Real-Time Object Detection / J. Redmon, S. Divvala, R. Girshick, A. Farhadi // IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). 2015. PP. 779-788.
3. End-to-end object detection with transformers / N. Carion [et al.] // Computer Vision–ECCV 2020: 16th European Conference, Glasgow, UK, August 23-28, 2020. Proceedings. Part I. PP. 213-229.
4. Conditional DETR for Fast Training Convergence / D. Meng [et al.] // IEEE/CVF International Conference on Computer Vision (ICCV). 2021. PP. 3631-3640.
5. AdaMixer: A Fast-Converging Query-Based Object Detector / Z. Gao, L. Wang, B. Han, S. Guo // Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. 2022. PP. 5364–5373.
6. Zong Z., Song G., Liu Y. DETRs with Collaborative Hybrid Assignments Training // IEEE/CVF International Conference on Computer Vision (ICCV). 2023. PP. 6725-6735.

Поступила 04.03.2024; принята к публикации 08.05.2024

Информация об авторах

**Паршин Александр Иванович** – аспирант, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: alexparshin20150@gmail.com

**Барabanов Владимир Федорович** – 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

**Аралов Михаил Николаевич** – старший преподаватель, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84); инженер-конструктор, Научно-исследовательский институт электронной техники (394033, Россия, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 5), e-mail: aralow@mail.ru

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

**OPTIONS FOR MODIFYING THE DETR ALGORITHM  
FOR DETECTING OBJECTS IN A VIDEO STREAM**

**A.I. Parshin<sup>1</sup>, V.F. Barabanov<sup>1</sup>, N.I. Grebennikova<sup>1</sup>, M.N. Aralov<sup>1,2</sup>, S.A. Kovalenko<sup>1</sup>**

**<sup>1</sup>Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia**

**<sup>2</sup>Scientific Research Institute of Electronic Technology, Voronezh, Russia**

**Abstract:** despite the remarkable progress that has taken place in recent years, the task of detecting objects in a video stream remains one of the most difficult and requires large computing resources. The convolutional neural networks that have already become classical, on which almost all modern algorithms are based, to one degree or another, are characterized by a large number of variable parameters, such as the dimension of the convolution core for each of the layers, the number of these layers, the parameters of the subdescriptization layers, etc. On the other hand, an increase in the requirements for the quality of object recognition leads both to an increase in the complexity of the structure of the convolutional networks used, and to a constant complication of the final algorithms based on these networks. Currently, an important task is the task of upgrading existing algorithms, one of which is DETR (DEtection TRansformer). The article describes some possible ways and methods of upgrading this algorithm, and estimates the impact on the final result. The proposed modification option contains both optimization of the decoder layers using a neural network, and modification of the influence mechanism to reduce the mathematical complexity of calculations and increase the total accuracy

**Key words:** object recognition, DETR, artificial neural network, image analysis, convolutional neural network

**References**

1. Parshin A.I., Kalashnikov A.O., Barabanov V.F., Kenin S.L. "Detection of graphic objects using an artificial neural network", *Current problems of applied mathematics, computer science and mechanics (Aktual'nyye problemy prikladnoy matematiki, informatiki i mekhaniki)*, proc. of int. sci. conf., Voronezh, 2022, pp. 1000-1005.
2. Redmon J., Divvala S., Girshick R., Farhadi A. "You Only Look Once: Unified, Real-Time Object Detection", *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 2015, pp. 779-788.
3. Carion N. et al. "End-to-end object detection with transformers", *Computer Vision—ECCV 2020*, proc. of the 16th European Conference, Glasgow, UK, 2020, August 23-28, part I, pp. 213-229.
4. Meng D. et al. "Conditional DETR for Fast Training Convergence", *EEE/CVF International Conference on Computer Vision (ICCV)*, 2021, pp. 3631-3640.
5. Gao Z., Wang L., Han B., Guo S. "AdaMixer: A Fast-Converging Query-Based Object Detector", *IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2022, pp. 5364–5373.
6. Zong Z., Song G., Liu Y. "DETRs with Collaborative Hybrid Assignments Training", *IEEE/CVF International Conference on Computer Vision (ICCV)*, 2023, pp. 6725-6735.

Submitted 04.03.2024; revised 08.05.2024

**Information about the authors**

**Alexander I. Parshin** – Postgraduate Student, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: alexparshin20150@gmail.com

**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

**Mikhail N. Aralov** – Cand. Sc. (Technical), Senior Lecturer, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), Design Engineer, Scientific Research Institute of Electronic Technology (5 Starykh Bolshevikov str., Voronezh 394033, Russia) e-mail: aralow@mail.ru

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

## АЛГОРИТМ СЖАТИЯ РАСТРОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ БЕЗ ПОТЕРЬ

М.С. Войтенко, А.С. Войтенко, Ю.Н. Феденко, А.И. Антонов

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

**Аннотация:** рассматривается вопрос эффективного сжатия растровых изображений без потерь цифровых данных. Актуальность проведенного исследования обусловлена потребностью в эффективном снижении объема данных, что способствует экономии ресурсов хранения и экономии пропускной способности. Предложен новый алгоритм сжатия, который основывается на идее разбиения изображения на отдельные цветовые каналы и подсчета количества последовательных повторений одного и того же значения цвета в каждом канале. Описанный подход позволяет существенно уменьшить объем данных изображения, тем самым сэкономив пространство для хранения данных. Приводятся результаты экспериментов по сравнению предложенного алгоритма со стандартным алгоритмом сжатия PNG-изображений и результаты сжатия на основе последовательной записи цветовых каналов. Сравнение проводилось на примере растровых изображений без градиентных элементов. Содержится описание предложенного алгоритма, визуальное представление его работы, сравнительные таблицы подходов к организации данных изображений и графики, графики с данными экспериментов по сжатию растровых изображений: сравнение объема данных последовательной записи цветовых каналов на основе пиксельной сетки и отдельной записи по цветовым каналам

**Ключевые слова:** алгоритм сжатия, сжатие данных без потерь, разделение цветовых каналов, растровые изображения

### Введение

В современном мире вопрос эффективного сжатия цифровой информации становится все более актуальным. Отсутствие потерь цифровых данных при сжатии изображений играет ключевую роль во многих областях, включая медицинскую диагностику [1], цифровую фотографию и другие.

Сжатие позволяет уменьшать размер файла изображения, что увеличивает пропускную способность сети и экономит пространство для хранения данных, что в свою очередь снижает затраты на обслуживание, хранение и передачу данных [2].

В данной статье представлено описание нового алгоритма сжатия данных без потерь, основанного на разделении данных изображения по цветовым каналам [3], что позволяет достичь высокого уровня сжатия без ухудшения качества изображения.

### Описание алгоритма сжатия данных

Алгоритм сжатия растровых изображений работает следующим образом:

- определяется ширина, высота и количество цветовых каналов изображения;
- создается новый файл, в который про-

исходит запись 2 байт ширины и 2 байт высоты изображения;

— производится последовательное чтение значений цветовых каналов (каждый канал по отдельности) изображения для определения количества повторяющихся значений цвета;

— производится запись значений и количества их последовательных повторений в созданный файл;

— применяется дополнительный алгоритм сжатия поверх результирующих данных для большего сокращения объема информации.

Запись значений и повторений продолжается до тех пор, пока не будет обработан каждый цветовой канал и канал прозрачности, если таковой присутствует.

Визуальное представление хранимых данных об изображении приведено на рис. 1. Первые 4 байта отводятся под ширину и высоту, а остальной объем информации является сжатой записью данных о цветовых значениях в каналах.

Следует учесть, что при достижении количества повторений, равных 255 [4], происходит принудительная запись количества повторений. Следующее значение будет восприниматься как новое, отличающееся от предыдущего.

Также данный алгоритм имеет ограничение по ширине и высоте — максимальные значения не могут превышать 65535. Данное ограничение обусловлено использованием 2 байт под данные значения.

Ширина	Высота	Значение цвета	Кол-во повторений цвета	...
2 байта	2 байта	1 байт	1 байт	

Рис. 1. Принцип организации данных изображения в результирующем файле

Описанный подход к сжатию данных должен быть наиболее эффективен при работе с изображениями, которые не содержат градиентных [5] элементов в цветовых каналах. В противном случае объём данных, которые будут получены в результате, может либо не отличаться от исходного, либо иметь больший размер.

### Представление экспериментальных данных

В табл. 1 представлены результаты трех экспериментов по сжатию различных изображений алгоритмом, представленным в статье.

Таблица 1  
Результаты экспериментов по сжатию данных различных изображений

Эксперимент №	Оригинал, байт	Результат, байт	Разница, %
1	172731	134500	22,133
2	354035	288378	18,545
3	267829	216710	19,086

Оригиналы изображений имеют расширение PNG, которое использует свои механизмы сжатия. Полученный результат является сжатым изображением при помощи описанного в статье алгоритма сжатия, а также последующим применением алгоритма сжатия ZPAQ [6].

Табл. 1 содержит сравнение объема данных (в байтах) оригинальных и результирующих файлов всех трех экспериментов.

Отдельно были проведены эксперименты способа записи цветовых каналов. Результаты сравнения подходов к организации данных изображений приведены в табл. 2. Сравнивается организация записи цветовых каналов каждого пикселя по порядку (сохранение цветовых каналов в соседних байтах) без использования представленного в статье алгоритма сжатия, а также организация последовательной записи цветовых каналов (сохранение цветовых каналов по отдельности) с использованием представленного в статье алгоритма сжатия. Оба варианта записи были дополнительно сжаты алгоритмом ZPAQ [6].

Таблица 2

Результаты сравнения подходов к организации данных изображения с применением сжатия

Эксперимент №	По порядку, байт	По цветам, байт	Разница, %
1	142000	134500	5,282
2	292126	288378	1,283
3	222212	216710	2,476

За основу были взяты те же изображения формата PNG [7], что и в предыдущих экспериментах.

Данный способ сжатия данных может быть использован для хранения модулированных поляризации сигналов, которые представлены в виде небольших двоичных последовательностей [8].

Данный алгоритм может позволить сократить объем набора данных, занимаемых на диске и представленных в виде изображений, необходимый для обучения нейронной сети [9].

В качестве дополнительного алгоритма сжатия был выбран ZPAQ так как данный алгоритм обеспечивает очень высокую степень сжатия по сравнению с другими популярными алгоритмами [10].

### Заключение

В данной статье был представлен новый алгоритм сжатия данных без потерь на основе разделения изображения по цветовым каналам. Такое разделение позволило достичь более высокого уровня сжатия, сохраняя данные о цветовых каналах, что не приводит к ухудшению качества изображения.

Результаты проведенных экспериментов на растровых PNG-изображениях без градиентных элементов показали, что предложенный в статье алгоритм по разделению и сжатию цветовых каналов позволяет сильнее сократить объем данных, чем стандартный алгоритм сжатия PNG-изображений (DEFLATE) с последовательной записью цветовых каналов в каждом пикселе.

Также было произведено сравнение вари-

антов записи цветowych каналов. Предложенный в статье вариант записи цветowych каналов позволил сократить объем результирующего файла.

#### Литература

1. Cormac D. Fay, Liang Wu Critical importance of RGB color space specificity for colorimetric bio/chemical sensing: A comprehensive study // *Talanta*. 2024. № 266. pp. 1-10.
2. Субполосная аппроксимация изображений при сжатии объемов битовых представлений / Жилияков Е.Г., Коськин А.В., Лубков И.И. [и др.] // *Экономика. Информатика*. 2022. № 49. С. 607-615.
3. Савельева М.Г., Урбанович П.П. Метод стеганографического преобразования WEB-документов на основе растровой графики модели RGB // *Труды БГТУ*. 2022. № 2. С. 99-107.
4. Бондарь О.В., Чмутин А.М., Чмутин М.А. Алгоритм управления контрастом насыщенностей цифровых изображений и его программная реализация // *Инженерный вестник Дона*. 2020. № 5. URL: <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/N5y2020/6458>

(дата обращения: 10.04.2024).

5. Савельева М.Г., Урбанович П.П. Растривание WEB-документов и использование его характеристик для стеганографической защиты авторских прав на электронный контент // *Труды БГТУ*. 2023. №1. С. 54-63.

6. Mahoney M. ZPAQ: Incremental Journaling Backup Utility and Archiver. URL: <https://mattmahoney.net/dc/zpaq.html> (дата обращения: 10.02.2024).

7. Oswal S., Singh A., Kumari K. DEFLATE compression algorithm // *International Journal of Engineering Research and General Science*. 2016. Vol. 4. № 1. pp. 430-436.

8. Применение активной метаповерхности для кодирования при передаче данных / Е.А. Ищенко, Ю.Г. Пастернак, В.А. Пендюрин [и др.] // *Вестник Воронежского государственного технического университета*. 2023. № 5. С. 39-43.

9. Багиров М.Б. Метод повторной идентификации объектов в многокамерных системах с низким энергопотреблением с использованием иерархических нейронных сетей // *Труды НГТУ им. П.Е. Алексеева*. 2022. № 4. С. 7-19.

Поступила 22.02.2024; принята к публикации 08.05.2024

#### Информация об авторах

**Войтенко Максим Сергеевич** – аспирант, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: [voitenkom@yandex.ru](mailto:voitenkom@yandex.ru)

**Войтенко Анастасия Сергеевна** – студент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: [zabavonka@mail.ru](mailto:zabavonka@mail.ru)

**Феденко Юлия Николаевна** – студент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: [juliafedenko@yandex.ru](mailto:juliafedenko@yandex.ru)

**Антонов Артём Игоревич** – студент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: [artem.antonov.ar@yandex.ru](mailto:artem.antonov.ar@yandex.ru)

## LOSSLESS RASTER IMAGE COMPRESSION ALGORITHM

**M.S. Voitenko, A.S. Voitenko, Yu.N. Fedenko, A.I. Antonov**

**Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia**

**Abstract:** the article is devoted to the issue of efficient compression of raster images without loss of digital data. The relevance of the conducted research is due to the need for effective data compression, which contributes to saving storage resources and saving bandwidth. The paper proposes a new compression algorithm, which is based on the idea of splitting the image into separate color channels and counting the number of consecutive repetitions of the same color value in each channel. The described approach can significantly reduce the amount of image data, thus saving storage space. The paper also presents the results of experiments comparing the proposed algorithm with the standard PNG image compression algorithm and the results of compression based on sequential recording of color channels. The comparison was carried out on the example of raster images without gradient elements. The article contains a description of the proposed algorithm, visual representation of its operation, comparative tables of approaches to the organization of image data and graphics, graphs with the data of experiments on raster image compression: comparison of the data volume of sequential recording of color channels based on a pixel grid and separate recording by color channels

**Key words:** compression algorithm, lossless data compression, color channel separation, bitmap images

#### References

1. Cormac D. Fay, Liang Wu “Critical importance of RGB color space specificity for colorimetric bio/chemical sensing: A comprehensive study”, *Talanta*, 2024, no. 266, pp. 1-10.
2. Zhilyakov E.G., Koskin A.V., Lubkov I.I. et al. “Subband approximation of images when compressing the volume of bit representations”, *Economics. Computer science (Ekonomika. Informatika)*, 2022, no. 49, pp. 607-615.
3. Savelyeva M.G., Urbanovich P.P. “Method of stegano-graphic transformation of WEB documents based on raster graphics of the RGB model”, *Proc. of BSTU (Trudy BGTU)*, 2022, no. 2, pp. 99-107.

4. Bondar O.V., Chmutin A.M., Chmutin M.A. “Algorithm for controlling the saturation contrast of digital images and its software implementation”, *Engineering Bulletin of the Don (Inzhenernyy vestnik Dona)*, 2020, no. 5, available at: <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/N5y2020/6458> (accessed 04.10.2024).
5. Savelyeva M.G., Urbanovich P.P. “Rasterization of WEB documents and the use of its characteristics for steganographic protection of copyright in electronic content”, *Proc. of BSTU (Trudy BGTU)*, 2023, no. 1, pp. 54-63.
6. Mahoney M. “ZPAQ: Incremental Journaling Backup Utility and Archiver”, available at: <https://mattmahoney.net/dc/zpaq.html> (accessed 22.01.2024)
7. 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.
8. Ishchenko E.A., Pasternak Yu.G., Pendyurin V.A. et al. “Application of an active metasurface for coding during data transmission”, *The Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudartsvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2023, no. 5, pp. 39-43.
9. Bagirov M.B. “Method for re-identification of objects in multi-camera systems with low power consumption using hierarchical neural networks”, *Proc. of NSTU n.a. R.E. Alekseev (Trudy NGTU im. R.Ye. Alekseyeva)*, 2022, no. 4, pp. 7-19.

Submitted 22.02.2024; revised 08.05.2024

#### Information about the authors

**Maxim S. Voytenko** – ostgraduate student, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya, Voronezh 394006, Russia), e-mail: [voytenkom@yandex.ru](mailto:voytenkom@yandex.ru)  
**Anastasiya S. Voytenko** – Student, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya, Voronezh 394006, Russia), e-mail: [zabavonka@mail.ru](mailto:zabavonka@mail.ru)  
**Yuliya N. Fedenko** – Student, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya, Voronezh 394006, Russia), e-mail: [juliafedenko@yandex.ru](mailto:juliafedenko@yandex.ru)  
**Artem I. Antonov** – Student, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya, Voronezh 394006, Russia), e-mail: [artem.antonov.ar@yandex.ru](mailto:artem.antonov.ar@yandex.ru)

## АРХИТЕКТУРА СУБД, ИСПОЛЬЗУЮЩЕЙ МЕТАГРАФОВУЮ МОДЕЛЬ ДАННЫХ

Д.Р. Никольский, В.Ф. Барабанов, В.В. Сафронов, А.М. Нужный, В.Н. Черников

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. Рассматривается проблема эффективного моделирования данных в условиях их постоянного роста, представлены ограничения существующих графовых моделей, предложена архитектура СУБД с метаграфовой моделью данных. Описывается архитектура метаграфовой СУБД, включающая подсистемы пользовательского ввода-вывода, доступа к данным, взаимодействия с хранилищем данных и хранения объектов. 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. Рассмотрены специфические аспекты реализации, такие как управление атрибутами, оптимизация запросов и транзакционное управление. Освещены текущие достижения в разработке метаграфовой СУБД и планы на будущее, включая разработку прототипа хранилища и программного интерфейса, что позволит проводить дальнейшие исследования и разработку наиболее оптимальных моделей СУБД

**Ключевые слова:** графовые СУБД, метаграф, метаграфовая СУБД, архитектура СУБД

### Введение

В работе [1] предложен обзор основных игроков рынка графовых СУБД и предпосылки к созданию метаграфовой СУБД. Данная работа посвящена проектированию СУБД, использующей метаграфовую модель данных, в соответствии с определением метаграфа, данным в работах [2], [3] и [4].

Согласно этому определению, метаграф может содержать вершины, метавершины и ребра. Определение вершин в метаграфе соответствует обычным графовым структурам. Фрагмент метаграфа — это набор вершин, ребер, метавершин и метаребер, который заключен в атомарную сущность, добавляющую дополнительные свойства и связи, что придает понятию новые характеристики и увеличивает его уникальность по отношению к совокупности его составных элементов. Фрагмент метаграфа может быть отождествлен с метавершиной или метаребром, которому он соответствует. Таким образом, метавершина или метаребро включает в себя набор объектов метаграфа в виде сущности фрагмента. Ребро метаграфа может соединять вершины любого порядка — обычные вершины и метавершины, метавершины и метавершины, обычные вершины.

Различные способы решения задачи создания метаграфовой СУБД описаны в работах [5],

[6], [7] и [8]. Каждый из них описывает необходимость разработки специального приложения-прослойки, которое формирует пользовательское представление метаграфа на основе записей в базе данных (БД) с различными моделями данных 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 описанных недостатков.

### Описание модели данных

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

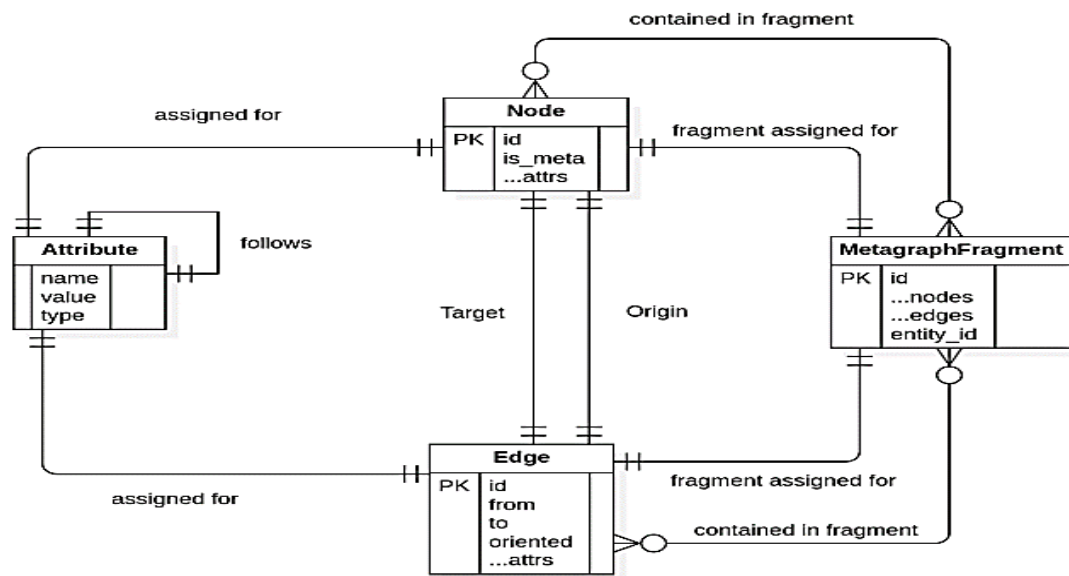


Рис. 1. Диаграмма «Сущность — Связь» разрабатываемой СУБД

Как видно, модель данных состоит из трех основных сущностей:

1. **Node** — это сущность, представляющая вершину в графе. В рамках используемой модели данных вершины и метавершины рассматриваются как равнозначные объекты, что позволяет их воспринимать как элементы одного класса. Сущность **Node** имеет уникальный синтетический первичный ключ, который обеспечивает её однозначную идентификацию. Также **Node** включает логический атрибут `is_meta`, который указывает на тип вершины — является ли она обычной вершиной или метавершиной. Кроме того, **Node** содержит набор атрибутов `attrs`, которые определяются пользователем и могут быть различны для каждой вершины.

2. **Edge** — это сущность, представляющая ребро в графе. Она имеет уникальный синтетический первичный ключ, который служит для её однозначной идентификации. Ключевые параметры `from` и `to` указывают на начальную и конечную вершины, которые соединяет данное ребро. Подобно вершинам, сущность **Edge** включает в себя набор атрибутов `attrs`.

3. **Attribute** — это сущность, которая представляет атрибут, ассоциированный с определённым объектом в графе. Атрибуты служат для описания разнообразных характеристик и свойств сущностей в предметной области, которая моделируется с помощью графовой структуры. Эти атрибуты могут включать в себя информацию о типе данных, значении и других параметрах, которые помогают более детально определить свойства вершин, рёбер или других элементов в графе.

У сущности **Attribute** имеется связь `follows`, которая указывает на то, что атрибуты могут быть организованы в виде двусвязного списка, где каждый элемент списка может ссылаться на предыдущий или последующий атрибут. Это связано с тем, что модель данных в разрабатываемой СУБД является бессхемной, то есть узлы и ребра не имеют заранее определённого, фиксированного набора атрибутов.

Бессхемная модель данных позволяет гибко работать с различными типами и структурами данных без необходимости предварительного определения схемы. Атрибуты, хранящиеся в форме двусвязного списка, обеспечивают удобный доступ и возможность эффективного добавления или удаления атрибутов, а также их поиска в оперативной памяти. Подобный подход к хранению атрибутов успешно используется в таких СУБД, как Neo4j [9], и позволяет оптимизировать использование памяти и ускорить процесс обработки данных.

**MetagraphFragment** — это сущность, которая представляет собой фрагмент метаграфа, отражающий структуру вложенности объектов друг в друга. Эта концепция соответствует определению фрагмента метаграфа и позволяет описать сложные иерархические связи внутри графовой структуры.

Сущность **MetagraphFragment** обладает синтетическим первичным ключом для уникальной идентификации каждого фрагмента. Она также содержит набор узлов и вершин, которые являются частью фрагмента, и поле `entity_id`, которое указывает на узел или ребро графа, с которым ассоциирован данный фрагмент.

мент. Это позволяет установить отношение «узел/ребро является фрагментом метаграфа».

Использование такого набора сущностей, включая `MetagraphFragment`, обеспечивает возможность эффективно работать с метаграфовыми структурами данных, что в свою очередь позволяет создавать сложные сетевые модели.

### Подсистемы СУБД

Архитектура разрабатываемой метаграфовой СУБД представлена следующей иерархией подсистем:

1. Подсистема пользовательского ввода-вывода предполагает наличие лексера и интерпретатора языка запросов или иного API (Application Program Interface — программный интерфейс приложения), которым пользователь запрашивает и манипулирует с данными, а также позволяет пользователю получить представление тех данных, которые он запрашивает.

2. Подсистема доступа к данным осуществляет контроль над логикой взаимодействия пользователя с сущностями, находящи-

мися в хранилище, обеспечивает конкурентный доступ к ним и определяет правила и алгоритмы, которые позволяют ими манипулировать.

3. Подсистема взаимодействия с хранилищем данных является промежуточным звеном между подсистемой, реализующей логику исполнения запросов пользователя и непосредственным хранилищем. Задача этой подсистемы — адаптация интерфейса хранилища сущностей для задач подсистемы доступа к данным. Наличие этой подсистемы позволяет расширять набор функций СУБД и делает систему независимой от реализации хранилища.

4. Подсистема хранения объектов обеспечивает непосредственно сохранение объектов в памяти, извлечение их из памяти и управление ими.

### Архитектура подсистемы хранения с метаграфовой моделью данных

Подсистема хранения объектов реализована следующим образом (рис. 2).

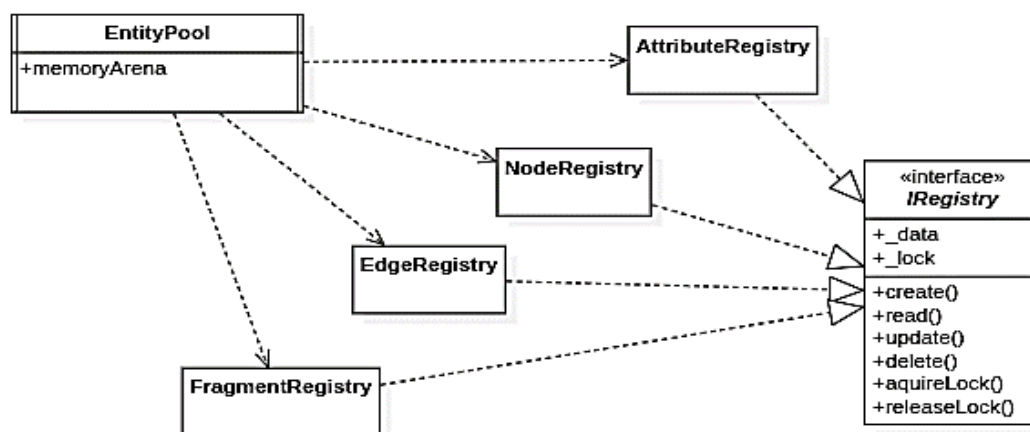


Рис. 2. Диаграмма классов подсистемы хранения объектов

Данную структуру классов стоит рассматривать, начиная с конца — от интерфейса `IRegistry`, переходя по связям зависимости к классу `EntityPool`.

Интерфейс `IRegistry` объявляет 4 базовых метода доступа к данным — `create()`, `read()`, `update()` и `delete()`. Каждый этот метод является атомарной операцией над данными соответствующего хранилища сущностей. Также `IRegistry` объявляет два атрибута — `_data`, в котором хранится индекс объектов в рамках соответствующего реестра, а также структура `_lock`, которая необходима для атомарной блокировки объектов при параллельной обработке транзак-

ций. Управление блокировкой объектов в базе данных осуществляется методами `acquireLock()` и `releaseLock()` реализаций интерфейса `IRegistry`.

Хранилище предполагает 4 реализации интерфейса `IRegistry`, по одному для каждой сущности на приведенной выше ER-диаграмме: `AttributeRegistry`, `NodeRegistry`, `EdgeRegistry` и `FragmentRegistry`. Задача каждого реестра — индексация объектов соответствующего типа в памяти СУБД и управление захватом блокировки объектов.

Хранилище представляет собой реализацию структурного шаблона проектирования “Фасад”. Класс `EntityPool` предоставляет ин-

терфейс, инкапсулирующий в себе логику управления данными каждой отдельной сущности и управления их взаимосвязями. Этот интерфейс дает вызывающей стороне возможность создавать, изменять, удалять и считывать вершины и ребра графа, а также включать и исключать вершины из метавершин.

Помимо индексов сущностей, необходимых для поддержания целостности данных и обеспечения параллельной обработки транзакций, данные хранятся как набор объектов, размещенных в оперативной памяти. Для этого класс `EntityPool` обладает атрибутом `memoryArena` — специальной структурой, которая управляет выделением памяти.

Объекты, описанные на ER-диаграмме на рис. 1, являются действительными данными в базе данных. Навигация по графу и выполнение графовых алгоритмов слоя доступа к данным происходят на основе пула объектов в `memoryArena`, обращаясь к индексам как к вспомогательному справочнику. В то же время индексы в классах, реализующих интерфейс `IRegistry`, хранят первичные ключи сущностей и указатели на объекты в `memoryArena` класса `EntityPool`.

Отдельно стоит рассмотреть хранение атрибутов. Так как модель предметной области, для которой используются метаграфы, часто является ненормированной относительно разнообразия сущностей и их атрибутов в ней, то нельзя представить атрибуты сущности (вершины или ребра) в виде структуры определенного вида. Вместо этого атрибуты для отдельного объекта хранятся в памяти как двусвязный список, что позволяет решить две задачи:

1. Однозначно определить весь набор атрибутов конкретного объекта;
2. Определить объект, который является сущностью для этих атрибутов.

Данный подход позволяет исключить возможные ограничения в схеме данных и упростить внесение изменений в нее. Кроме того, он упрощает задачу поиска сущностей по предикатам, основанным на атрибутах. Например, при поиске всех вершин, у которых численный атрибут `A` равен `10`, будет выполняться следующий алгоритм:

1. Будет осуществлен поиск среди всех атрибутов, тип которых равен «число», название равно «`A`», а значение — `10`.
2. Из множества этих атрибутов по указателям будут получены сущности, атрибутом которых будут являться найденные на шаге 1 объекты-атрибуты.

3. Из найденных на шаге 2 сущностей будут отсеяны те, которые не являются сущностями типа `Node`, а оставшиеся будут возвращены как результат работы функции поиска.

Исходя из соображений оптимизации, отсев сущностей по принадлежности к классу `Node` на шаге 3 алгоритма будет на самом деле осуществляться в момент получения этой сущности по указателю из объекта-атрибута на шаге 2, что приведет к итоговой асимптотической сложности алгоритма равной  $O(N)$  в худшем случае, где  $N$  — количество объектов-атрибутов в хранилище. Дальнейшая оптимизация этого алгоритма возможна при помощи введения индекса на основе сбалансированного дерева для объектов-атрибутов в хранилище.

Для оптимального управления исполнением алгоритмов предлагаемая структура СУБД вводит универсальный синтетический ключ `GraphID`, представляющий собой вектор из следующих значений:

1. поле `entityType` хранит в себе тип сущности ключа и отображает одно из возможных значений в 4-битной кодировке: `node`, `edge`, `attribute`, `fragment`;

2. поле `entityId` является псевдослучайным идентификатором объекта определенного типа. Это значение не является уникальным для всей базы данных на всех серверах, но уникально в рамках одного `entityType` и `machineId`;

3. `machineId` — идентификатор сервера СУБД, на котором хранятся физические данные об объекте.

Поле `machineId` является ключевым в парадигме распределенной работы разрабатываемой СУБД. Это значение, будучи частью первичного ключа каждого объекта в базе данных — однозначный указатель на конкретный сервер СУБД в кластере, на котором хранится физическая информация об объекте. Таким образом, если у ребра информация об узле-источнике находится на сервере 1, а информация о самом ребре — на сервере 2, то используя универсальный идентификатор `GraphID` можно указать в объекте ребра его в качестве ссылки, что позволит движку слоя доступа к данным обратиться к конкретному серверу в кластере. Это дает возможность хранить данные о разных сущностях независимо друг от друга, распределенно, на большом количестве серверов, и внедрить механизм масштабирования, не изменяя поведения слоя доступа к данным.

Используя идентификатор `GraphID` структура операций слоя доступа к данным может быть следующей (рис. 3).

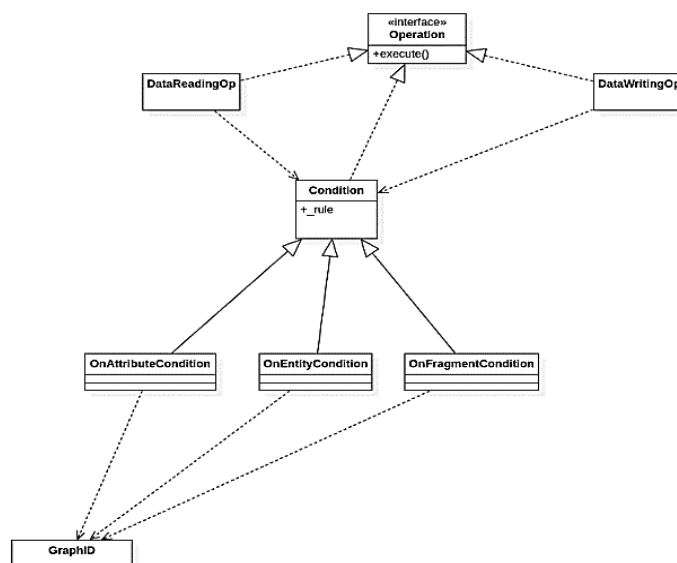


Рис. 3. Диаграмма классов операций структуры операций слоя доступа к данным

Применяя паттерн проектирования “Команда”, можно выделить несколько базовых классов-команд.

1. Команды, читающие данные (DataReadingOp).
2. Команды, записывающие данные (DataWritingOp).
3. Условия, на основе которых производится фильтрация выборки.

Используя GraphID, эти команды получают возможность быть выполненными на любом сервере из кластера и над любым объектом, которых хранится в СУБД.

### Заключение

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

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.

Будущие работы в направлении разработки метаграфовой СУБД включают в себя разработку прототипа хранилища метаграфа, реализацию API для взаимодействия с этой СУБД, внедрение персистентного хранения данных без ущерба производительности, а также поддержка транзакций, конкурентного доступа к данным и механизмов репликации и работы СУБД в распределенном режиме.

### Литература

1. Анализ графовых систем управления базами данных / Д.Р. Никольский, В.Ф. Барабанов, Н.И. Гребенникова, С.А. Коваленко, А.М. Нужный // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. 2023. Т. 19. № 6. С. 13-20.
2. 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.
3. 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. Vol. 1(100). PP. 83-99.
4. Terekhov V., Gapanyuk Y., Kanev A. Metagraph representation for overcoming limitations of existing knowledge bases // 28th Conference of Open Innovations Association (FRUCT). IEEE. 2021. PP. 458-464.
5. Storing Metagraph Model in Relational, Document-Oriented, and Graph Databases / V.M. Chernenkiy [et al.] // in Selected Papers of the XX International Conference on Data Analytics and Management in Data Intensive Domains. 2018. Vol. 2277. PP. 82-89.
6. The principles and the conceptual architecture of the metagraph storage system / V. M. Chernenkiy [et al.] // Data Analytics and Management in Data Intensive Domains: 20th International Conference. Communications in Computer and Information Science. 2019. Vol. 1003. PP. 73-87.
7. 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. Vol. 7. PP. 201-209.
8. Method of storing metagraph data model in PostgreSQL DBMS / I.A. Erokhin, N.S. Grunin, A.V. Molchanov, E.A. Belousov, Y.E. Gapanyuk // Artificial Intelligence in Management. Control, and Data Processing Systems, Proceedings of the All-Russian Scientific Conference IASU'22. 2022. Vol. 1. PP. 348-351.
9. Robinson I., Webber J., Eifrem E. Graph Databases. Second edition // O'Reilly Media. 2015. PP. 149-171.

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

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

**Сафронов Виталий Владимирович** – канд. техн. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: bvf@list.ru

**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

**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

THE ARCHITECTURE OF A DBMS USING A METAGRAPH DATA MODEL

D.R. Nikolskiy, V.F. Barabanov, V.V. Safronov, A.M. Nuzhnyj, V.N. Chernikov

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

**Abstract:** in today's information society, data processing has become an important tool for making informed decisions and achieving success in many areas of activity. There are different types of database management systems (DBMS) used to store data, each with its own unique features, benefits, and use cases. The problem of effective data modeling in conditions of constant growth is considered, the limitations of existing graph models are presented, and a DBMS architecture with a metagraph data model is proposed. The architecture of a metagraph DBMS is described, including subsystems for user input/output, data access, interaction with data storage, and object storage. The proposed metagraph data model and the DBMS developed on its basis will make it possible to fill the need for semantically complete and optimal modeling of complex processes and processing of large volumes of complex network data. Implementation-specific aspects such as attribute management, query optimization, and transaction management are covered. Current achievements in the development of a metagraph DBMS and plans for the future are highlighted, including the development of a prototype storage and software interface, which will allow further research and development of the most optimal DBMS models

**Key words:** graph DBMS, metagraph, metagraph DBMS, DBMS architecture

References

1. Nikolsky D.R., Barabanov V.F., Grebennikova N.I., Kovalenko S.A., Nuznyj A.M. "Analysis of graph database management systems", *The Bulletin of Voronezh State University of Engineering Technologies (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta inzhenernykh tekhnologiy)*, 2023, vol. 19, no. 6, pp. 13-20.
2. 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.
3. 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, vol. 1 (100), pp. 83 – 99.
4. Terekhov V., Gapanyuk Y., Kanev A. "Metagraph representation for overcoming limitations of existing knowledge bases", *28th Conference of Open Innovations Association (FRUCT). IEEE*, 2021, pp. 458-464.
5. 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*, 2018, vol. 2277, pp. 82-89.
6. 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. Communications in Computer and Information Science*, 2019, vol. 1003, pp. 73-87.
7. 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, vol. 7, pp. 201-209.
8. Erokhin I.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 IIASU'22*, 2022, vol. 1, pp. 348-351.
9. Robinson I., Webber J., Eifrem E. "Graph Databases", Second edition, O'Reilly Media, 2015, pp. 149 – 171.

Submitted 25.03.2024; revised 08.05.2024

Information about the authors

**Daniil R. Nikolskiy** – Postgraduate Student, Department of Automated and Computer Systems, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya St., Voronezh 394006, Russia), e-mail: nikolsky.dan@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-4940-9838>

**Vladimir F. Barabanov** – Dr. Sc. (Technical), Sciences, Head of the Department of Automated and Computing Systems, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya St., Voronezh 394006, Russia), e-mail: bvf@list.ru

**Vitaliy V. Safronov** – Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya St., Voronezh 394006, Russia), e-mail: vitolik@bk.ru

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

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

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОЛЯ В СИНХРОННОЙ МАШИНЕ С ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМ ВОЗБУЖДЕНИЕМ В ОБЛАСТИ АВТОКОЛЕБАНИЙ

К.Е. Кононенко, А.В. Кононенко, Кетима Саного

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

**Аннотация:** известно, что при увеличении интенсивности магнитного поля в воздушном зазоре синхронная машина с электромагнитным возбуждением может войти в режим автоколебаний разной степени интенсивности. Исследованию автоколебаний было посвящено большое количество работ, однако магнитное поле в этой области исследовано не было. За исходное направление исследования принято разделение областей работы синхронной машины на области устойчивой работы, области автоколебаний и сползания, когда синхронная машина переходит в асинхронный режим. Кроме конструкции машины, области устойчивости зависят от параметров как самой машины, так и режима. Наиболее влиятельными параметрами являются: активное сопротивление обмотки статора и ток в обмотке возбуждения. Ток в обмотке возбуждения определяет индукцию и напряженность магнитного поля, что, в свою очередь, влияет на электромагнитный момент вращения и способность машины работать устойчиво. Однако у синхронной машины с электромагнитным возбуждением есть особенность в работе: при увеличении тока в обмотке возбуждения сверх некоторого предела в ней начинают развиваться самопроизвольные автоколебания. Их амплитуда может увеличиваться до тех пор, пока синхронная машина либо будет продолжать работать с колебаниями определенной амплитуды и частоты, либо выпадет из синхронизма. Для исследования электромагнитного поля в режиме автоколебания наиболее подходит численный метод конечных элементов. С его помощью легко рассчитать амплитуду и частоту автоколебаний, а также электромагнитный момент в рассматриваемом режиме. Кроме того, становится известным уровень насыщения магнитной цепи машины в любой расчетной области. Метод конечных элементов позволяет сделать это наглядно, быстро и достаточно точно

**Ключевые слова:** синхронная машина, электромагнитное возбуждение, границы устойчивой работы, параметры схемы замещения, конечно-элементный анализ, электромагнитное поле, колебания низкой частоты, стробоскопический метод

### Введение

Наши многолетние исследования позволили определить области устойчивой и неустойчивой работы в синхронных двигателях с электромагнитным возбуждением. Другими словами, области устойчивой и неустойчивой работы оказалось возможным отделить друг от друга границами устойчивости в плоскости параметров, которыми обладает синхронная машина. Объем такой работы намного превышает размер самой большой статьи.

Здесь уместно вспомнить ставшую классической работу профессора А.А. Горева [1]. На ее основе и при помощи дальнейшего развития был проделан наш основной труд [2]. Таким образом, границы области автоколебаний становятся известными. Поэтому, когда ставится задача исследовать область автоколебаний, то все параметры ее есть. Для этого достаточно поднять данные прошлых испытаний и экспериментов. Если учесть, что такая база данных у нас есть, становится понятным ход рассуждений. Для рассматриваемого конкретного случая области автоколебаний строим геометрию синхронной машины. Например, в программе ме-

тода конечных элементов Maxwell 2D v12. При решении данной задачи не нужен обязательно трехмерный метод конечных элементов.

Внешний вид ротора синхронной машины с электромагнитным возбуждением показан на рис. 1.

Если на роторе нет успокоительной обмотки, автоколебания неизбежны. Их исследовали многие авторы, например [1, 2].



Рис. 1. Ротор четырехполюсного синхронного генератора СГР-4,5

Понятие о размерах синхронной машины дает очертание одного полюсного наконечника

с обмоткой (рис. 2). Явно выраженная форма полюсного наконечника побуждает разработчика учитывать особенности расчета электромагнитного поля в машине. Большое внимание данному вопросу уделил профессор А.В. Иванов-Смоленский [3]. Он же показал, по каким формулам Д.К. Максвелла правильно рассчитывать электромагнитный вращающий момент в электрической машине.

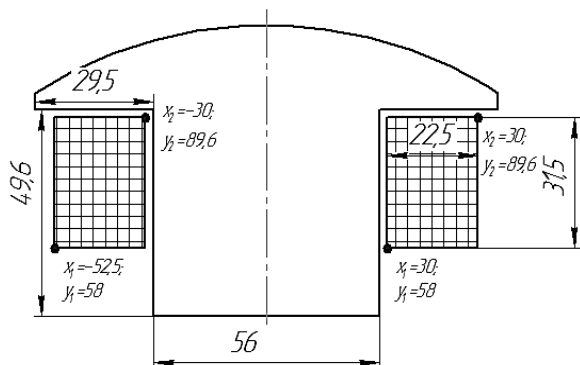


Рис. 2. Очертание одного полюсного наконечника с обмоткой (размеры в мм)

### Электромагнитное поле синхронной машины в области автоколебаний

Из методов расчета электромагнитного поля наиболее удачно применить численный метод конечных элементов [4, 5]. В этом случае, как и в других энергетических методах, непосредственно не интегрируются исходные дифференциальные уравнения, а исследуется энергетический функционал.

О правильности выполненных расчетов судят по его минимуму, в исследованиях на экстремум.

$$\text{rot} \bar{H} = \bar{j} + \frac{\partial \bar{D}}{\partial t}, \quad (1)$$

$$\text{rot} \bar{E} = -\frac{\partial \bar{B}}{\partial t}, \quad (2)$$

$$\text{div} \bar{D} = \rho, \quad (3)$$

$$\text{div} \bar{B} = 0. \quad (4)$$

$$\bar{D} = \epsilon \bar{E}, \quad \bar{B} = \mu \bar{H}, \quad \bar{j} = \gamma \bar{E}. \quad (5)$$

Дифференциальные уравнения электромагнитного поля, предложенные Д.К. Максвеллом, – это уравнения (1)–(4). Их еще дополняют выражениями, характеризующими среду (5).

При помощи специальной подстановки через векторный магнитный потенциал

$$\bar{B} = \text{rot} \bar{A}. \quad (6)$$

Такое решение позволяет записать энергетический функционал и его минимизировать.

Результатом является получение электромагнитного вращающего момента через тензоры натяжения в магнитном поле [3]

$$\bar{B} = \oint_S [\bar{r} \bar{T}_n] dS = \bar{q}_x M_x + \bar{q}_y M_y + \bar{q}_z M_z. \quad (7)$$

Компоненты тензора натяжений будут записаны в виде следующих соотношений

$$\begin{aligned} M_x &= \bar{q}_x \bar{M} = \oint_S (y T_{nz} - z T_{ny}) dS \\ M_y &= \bar{q}_y \bar{M} = \oint_S (z T_{nx} - x T_{nz}) dS \\ M_z &= \bar{q}_z \bar{M} = \oint_S (x T_{ny} - y T_{nx}) dS. \end{aligned} \quad (8)$$

Метод конечных элементов получил широкое распространение в расчетах электромагнитного поля в электрических машинах благодаря высокой точности получаемых результатов. На рис. 3 показано сечение исследуемого генератора.

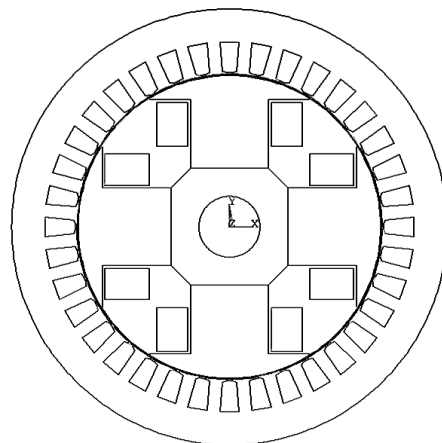


Рис. 3. Общий вид активных размеров исследуемого генератора

Чтобы быть уверенным в том, что машина работает в области автоколебательной неустойчивости, нужно внести в расчеты параметры, характеризующие синхронную машину, когда она работает в этом режиме. Важным параметром является ток в обмотке возбуждения. Как правило, синхронная машина будет работать в области автоколебательной неустойчивости в режиме перевозбуждения (когда ток в обмотке возбуждения повышается относительно нормального значения) [1, 2]. Результаты расчетов поля синхронной машины в области автоколебаний приведены на рис. 4 и 5.

В более привычном виде поле можно показать как кривую магнитной индукции на полюсном делении. Рис. 6 является иллюстрацией этого. По оси абсцисс отложим индукцию в Тл, умноженную на  $10^{-1}$ , а по оси ординат – развертку расточки синхронной машины, умноженную  $10^{-1}$  м.

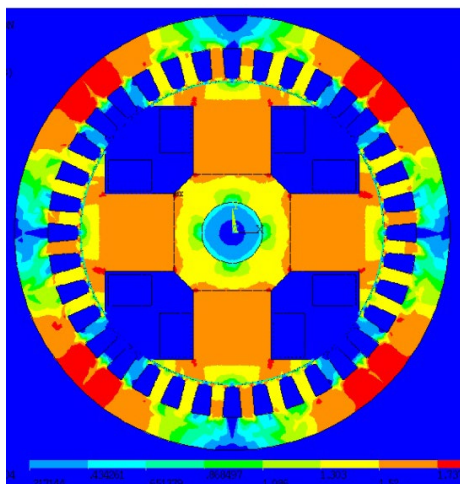


Рис. 4. Поле синхронной машины в области автоколебаний

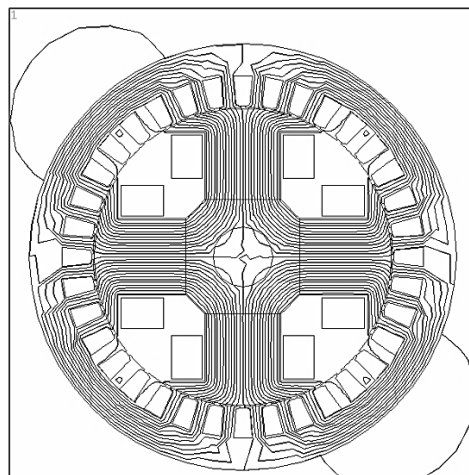


Рис. 5. Силовые линии поля в области автоколебаний

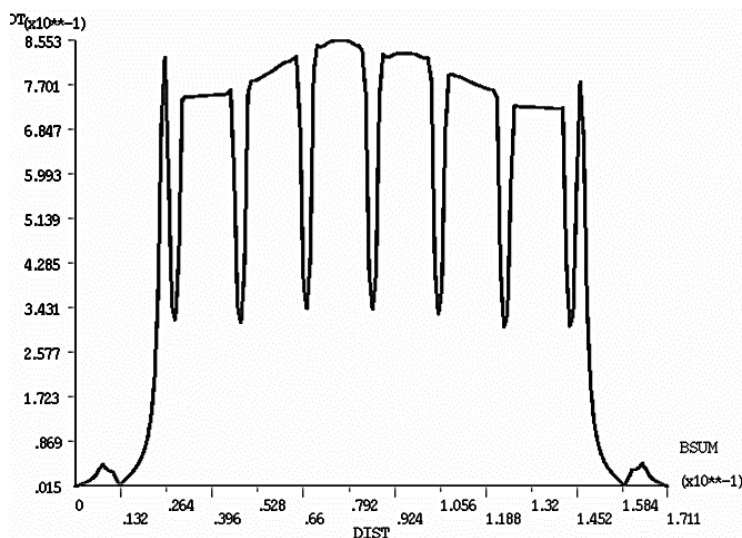


Рис. 6. Кривая магнитной индукции на полюсном делении синхронной машины в области автоколебаний

### Заключение

1. Предварительное исследование авторов дало возможность определить границы областей устойчивой и неустойчивой работы синхронной машины с электромагнитным возбуждением. Оно было опубликовано в пособии на эту тему [2]. В данной конструкции синхронной машины можно воспользоваться опытом проектирования асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором [6] и в полюсных наконечниках разместить короткозамкнутые обмотки.

2. Далее было исследовано поле именно в этих областях, что и является научной новизной. На рис. 3 показано поперечное сечение синхронной машины СГР-4,5. Ее геометрия, материалы и токи в обмотках возбуждения и якоря, которые создают электромагнитное поле, известны. Это дает возможность провести конечно-элементный анализ и рассчитать магнитное поле в режиме,

когда имеют место автоколебания скорости вращения ротора.

3. Подчеркнем еще раз: в области автоколебаний магнитное поле исследовано впервые, что стало возможным благодаря наложению предыдущих исследований на современные данные метода конечных элементов и было выполнено авторами статьи (рис. 3-6).

### Литература

1. Горев А.А. Переходные процессы синхронной машины. Л.: Наука, 1985. 502 с.
2. Кононенко А.В., Кононенко К.Е. Устойчивость работы и переходные процессы электрических машин переменного тока: учебное пособие. Воронеж: Изд-во ВГТУ, 2014. 180 с.
3. Иванов-Смоленский А.В. Электромагнитные силы и преобразование энергии в электрических машинах переменного тока: учебное пособие для вузов по спец. «Электромеханика». М.: Высшая шк., 1989. 312 с.
4. Сабонадьер Ж.-К., Кулон Ж.-Л. Метод конечных элементов и САПР. М.: Мир, 1989. 190 с.

5. Сильвестр П., Феррари Р. Метод конечных элементов для радиоинженеров и инженеров-электриков. М.: Мир, 1986. 229 с.

6. Кононенко К.Е., Кононенко А.В. Методика курсового проектирования асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором // Интеллектуальная электротехника. 2022. № 4 (20). С. 38-42.

Поступила 21.02.2024; принята к публикации 08.05.2024

#### Информация об авторах

**Кононенко Константин Евгеньевич** – д-р техн. наук, профессор, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: kekononenko@yandex.ru, ORCID: 0000-0002-8958-0499

**Кононенко Анастасия Валентиновна** – канд. техн. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: anastkononenko@yandex.ru, ORCID: 000-0001-9549-2519

**Саного Кетима** – студент кафедры электромеханических систем и электроснабжения, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: ketimasanogo@gmail.com, ORCID: 0009-0002-2676-0449

## RESEARCH OF THE FIELD IN A SYNCHRONOUS MACHINE WITH ELECTROMAGNETIC EXCITATION IN THE REGION OF SELF-OSCILLATIONS

**K.E. Kononenko, A.V. Kononenko, Ketima Sanogo**

**Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia**

**Abstract:** it is known that with an increase in the intensity of the magnetic field in the air gap, a synchronous machine with electromagnetic excitation can enter a mode of self-oscillations of varying degrees of intensity. Many works have been devoted to the study of self-oscillations, but the magnetic field in this area has not been studied. The initial direction of research is the division of areas of operation of a synchronous machine into areas of stable operation, areas of self-oscillation and creep when the synchronous machine goes into asynchronous mode. In addition to the design of the machine, the stability areas depend on the parameters of both the machine itself and the mode. The most influential parameters are: the active resistance of the stator winding and the current in the field winding. The current in the field winding determines the induction and strength of the magnetic field, which in turn affects the electromagnetic torque and the ability of the machine to operate stably. However, a synchronous machine with electromagnetic excitation has a peculiarity in its operation: when the current in the excitation winding increases beyond a certain limit, spontaneous self-oscillations begin to develop in it. Their amplitude can increase until the synchronous machine either continues to operate with oscillations of a certain amplitude and frequency, or falls out of synchronism. To study the electromagnetic field in the self-oscillation mode, the numerical finite element method is most suitable. With its help, it is easy to calculate the amplitude and frequency of self-oscillations, as well as the electromagnetic torque in the mode under consideration. In addition, the saturation level of the machine's magnetic circuit in any computational domain becomes known. The finite element method allows you to do this clearly, quickly and quite accurately

**Key words:** synchronous machine, electromagnetic excitation, boundaries of stable operation, parameters of the substitution circuit, finite element analysis, electromagnetic field, low frequency oscillations, stroboscopic method

#### References

1. Gorev A.A. "Transients of a synchronous machine" (Perekhodnyye protsessy sinkhronnoy mashiny"), Leningrad, Nauka, 1985, 502 p.
2. Kononenko A.V., Kononenko K.E. "Stability of operation and transients of alternating current electric machines" ("Ustoychivost' raboty i perekhodnyye protsessy elektricheskikh mashin peremennogo toka"), Voronezh, Izd-vo VGTU, 2014, 180 p.
3. Ivanov-Smolensky A.V. "Electromagnetic forces and energy conversion in alternating current electric machines: a textbook for universities: specialty "Electromechanics" ("Elektromagnitnyye sily i preobrazovaniye energii v elek-tricheskikh mashinakh peremennogo toka: uchebnoye posobiye dlya vuzov po spets. "Elektromekhanika"), Moscow, Vysshaya shkola, 1989, 312 p.
4. Sabbonadiere J.-C., Coulon J.-L. "Finite element method and CAD" ("Metod konechnykh elementov i SAPR"), Moscow, Mir, 1989, 190 p.
5. Silvestr P., Ferrari R. "Finite element method for radio and electrical engineers" ("Metod konechnykh elementov dlya radio-inzhenerov i inzhenerov-elektrikov"), Moscow, Mir, 1986, 229 p.
6. Kononenko K.E., Kononenko A.V. "Course design methodology for asynchronous motors with a squirrel-cage rotor", *Intelligent Electrical Engineering* ("Intellektual'naya elektrotehnika"), 2022, no. 4 (20), pp. 38-42.

Submitted 21.02.2024; revised 08.05.2024

#### Information about the authors

**Konstantin E. Kononenko** – Dr. Sc. (Technical), Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: kekononenko@yandex.ru, ORCID: 0000-0002-8958-0499,

**Anastasia V. Kononenko** – Cand Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: anastkononenko@yandex.ru, ORCID: 000-0001-9549-2519

**Ketima Sanogo** – Student, Department of Electromechanical Systems and Power Supply, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: ketimasanogo@gmail.com, ORCID: 0009-0002-2676-0449

## РАЗРАБОТКА УНИВЕРСАЛЬНОГО СЕРВИСА ДЛЯ ПРОСМОТРА СТУДЕНЧЕСКОГО РАСПИСАНИЯ РАЗЛИЧНЫХ УНИВЕРСИТЕТОВ

Д.Л. Сашенко, С.А. Олейникова

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

**Аннотация:** статья посвящена разработке онлайн-сервиса, предназначенного для просмотра студенческого расписания занятий. Актуальность разработки обусловлена возможностью просмотра расписания в любой момент времени как с мобильного, так и со стационарного устройства, а также оперативного реагирования на какие-либо изменения. Помимо этого, такие сервисы обычно обновляются в режиме реального времени, что позволяет студентам быть в курсе изменений или отмены занятий и помогает избежать пропуска занятий. Разработанное приложение включает в себя базу данных, клиентскую и серверную часть. В качестве клиентской части веб-сервиса будет использоваться веб-фреймворк Vue и его надстройка Quasar для более богатого пользовательского интерфейса, а также для реализации серверной части будет использоваться фреймворк Spring Boot и база данных PostgreSQL. В серверной части проекта реализуется получение файлов расписания, извлечение из них данных с последующей обработкой и сохранением в собственную базу данных, а также дальнейшая работа с данными, а именно, их получение и агрегация. Архитектура приложения будет изображена на UML и AIA диаграммах, которые будут показывать, каким образом пользователь взаимодействует с сервисом, а также архитектуру интеграции приложений. Новизна заключается в предоставлении пользователям возможности просмотра контента с любых устройств. Практическая значимость подтверждается внедрением приложения в деятельность Воронежского государственного технического университета

**Ключевые слова:** расписание занятий, онлайн-сервис, UML-диаграмма, AIA-диаграмма, PostgreSQL

### Введение

В современную эпоху к прикладным программам предъявляются требования, заключающиеся в удобстве её получения, оперативности реагирования на любые изменения, наглядности, актуальности, а также точности. Эти принципы и правила относятся к любой сфере и не менее важны для программных сервисов в сфере образования.

Одним из основных элементов жизни любого студента и его образовательного процесса является расписание занятий. Относительно него приходится строить дальнейший день, свои планы и готовиться к занятиям. Поэтому студенту важно знать актуальное расписание занятий и иметь возможность быстро его получить и понять. Различные университеты по-разному решают вопрос предоставления расписания, начиная с уже готовых онлайн-сервисов для его просмотра и заканчивая своим форматом отображения в виде различных файлов.

Данный проект нацелен на то, чтобы разработать универсальный онлайн-сервис для просмотра расписания различных университетов в удобном, интерактивном и понятном виде с гибкой возможностью расширения.

Актуальность данного проекта заключается в том, что студентам, их родителям, а также преподавателям необходима возможность находить расписание максимально быстро и тратить как можно меньше времени на его понимание. Помимо этого, следует отметить, что онлайн-сервис удобнее большинства существующих решений из-за своей расширяемости, способности одинаково отображаться на различных устройствах, масштабируемости, а также простоте в поиске данного решения пользователями.

В работе представлена архитектура приложения, описана клиентская и серверная часть, представлена спроектированная структура базы данных. В результате разработан онлайн сервис, внедренный в деятельность Воронежского государственного технического университета.

### Архитектура приложения

Чтобы описать архитектуру приложения были использованы такие диаграммы как UML и AIA. UML – это графическое представление модели системы или процесса с использованием стандартных символов и нотаций, определенных в универсальном языке моделирования. AIA диаграмма представляет собой инструмент для моделирования, который исполь-

зуется в области программирования и разработки программного обеспечения. AIA, или Alternatively Isolated Activity diagram, помогает организовать и представить последовательность выполнения операций или функций в программе или системе. При помощи данных диаграмм была описана архитектура проекта, интеграция программных модулей между собой, а также диаграмма использования приложения пользователями.

Помимо этого, в системе существует разделение работы с онлайн-сервисом на различные роли. Так, например, обычные пользователи могут найти расписание выбранного университета, указав интересующий их университет, учебную группу, настроив конкретную дату, если это необходимо, а также посмотреть дополнительную информацию по конкретному занятию.

Администраторы, в свою очередь, имеют доступ не только к просмотру расписания, но и к настройке автоматического обновления или ручного обновления расписания, изменение или создание настроек университета, добавление новых учебных групп, а также чтения информации об ошибках или обратной связи пользователей.

Для описания вариантов использования, была разработана UML-диаграмма, изображенная на рис. 1, которая описывает взаимодействие между действующими лицами с определенными ролями, а также онлайн-сервисом.

Как видно из UML-диаграммы, определенные действия могут выполнять как обычные пользователи, так и администраторы, в то время как действия направленные на работу с обновлением расписания, его созданием, а также получения обратной связи от пользователей, доступны только администратором онлайн-сервиса.

Разрабатываемый проект представляет собой клиент-серверное веб-приложение, в котором блок преобразования расписания в требуемый формат данных для последующего сохранения в базу данных, вынесен в отдельный сервис и связан с серверной частью посредством протокола HTTP/HTTPS при помощи REST API.

REST — архитектурный стиль взаимодействия компонентов распределённого приложения в сети. Другими словами, REST — это набор правил, описывающий, как программисту организовать написание кода серверного приложения, чтобы все системы легко

обменивались данными, и приложение можно было масштабировать.

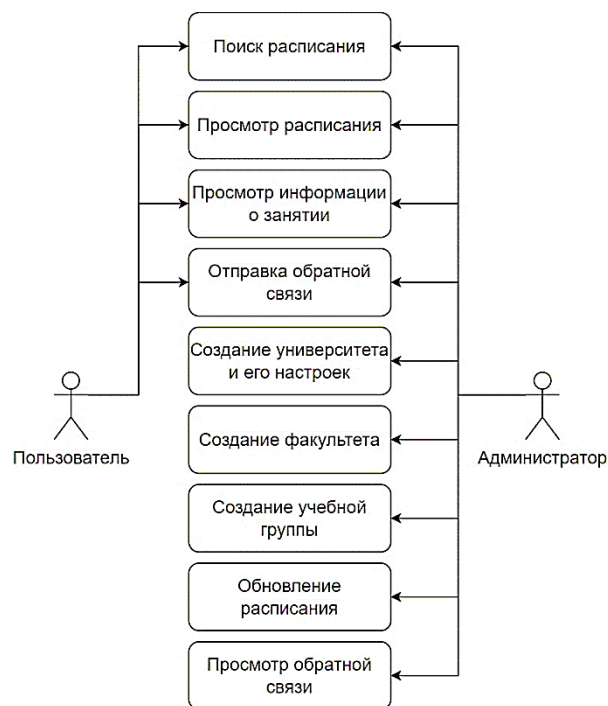


Рис. 1. Диаграмма использования

Также для быстрого просмотра информации о работе приложения, его статуса и последних ошибок была разработана специализированная библиотека, которая подключается ко всем модулям проекта и отправляет служебную информацию на другое серверное приложение через HTTP для их хранения, выборки и отправки в телеграмм администраторам системы через бота. Библиотека требует лишь настройки подключения к серверу, параметры безопасности, настройки для расширения предоставления служебной информации о работе модуля и всех его уровней (опционально), а также наименование модуля, которое в последствии используется для фильтрации в телеграмм-боте.

Так как разрабатываемый проект представляет собой несколько программных модулей, связанных между собой, также была создана AIA-диаграмма для визуализации последовательности операций, управления потоками данных и отображения переходов от одной активности к другой. AIA-диаграмма представлена на рис. 2.

Как видно из этого рисунка, модуль gistud-server при помощи JDBC-протокола обращается к базе данных. В основной базе данных сервера хранится информация об учебном

расписании, учебных группах, университетах, типах занятий, аудиторий, задачах на автома-

тическое обновление расписания, а также обратной связью пользователя.

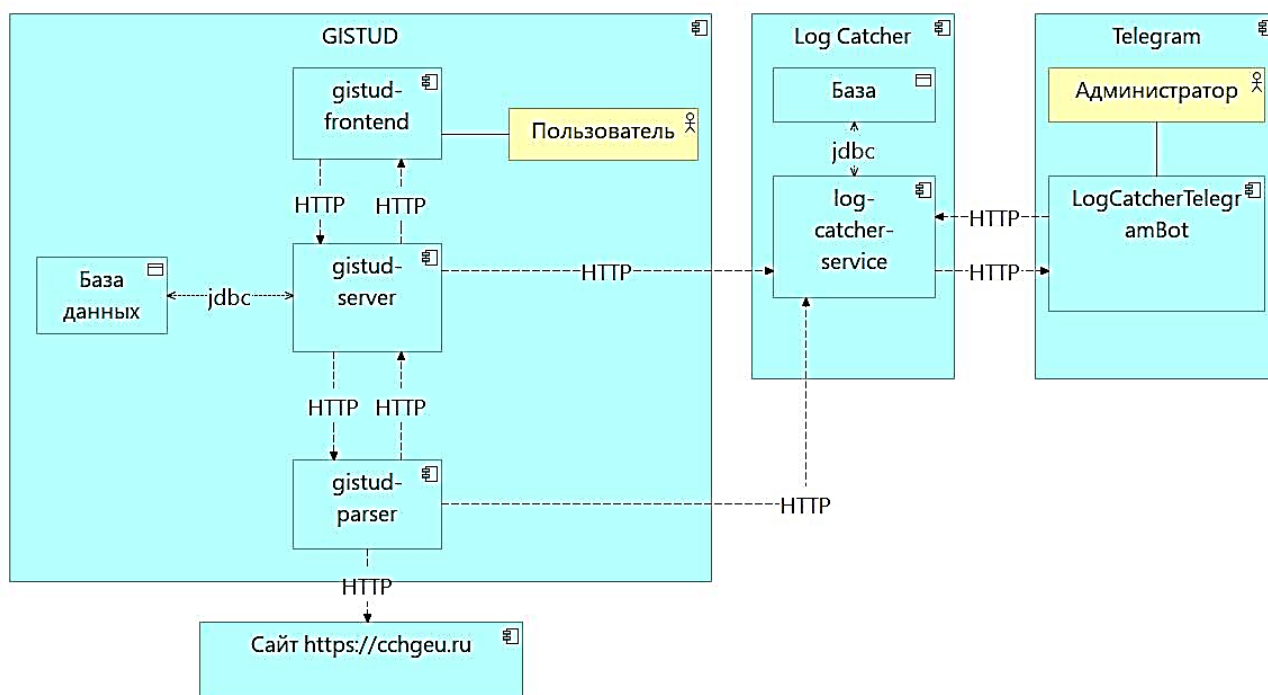


Рис. 2. AIA-диаграмма

В качестве базы данных была выбрана PostgreSQL [1]. Это реляционная база данных с открытым исходным кодом, которая предоставляет ряд следующих преимуществ:

- надежность и целостность данных;
- масштабируемость;
- расширяемость;
- поддержка стандартов;
- богатый набор встроенных функций;
- конкурентоспособная производительность.

Онлайн-сервис, направленный на несколько университетов, а также ежедневное использование должен использовать высокопроизводительную базу данных, которая может использоваться в среде клиент-сервер. В частности, именно этим обоснован выбор данной СУБД.

Структура разработанной базы данных, изображена на рис. 3. Среди основных сущностей, хранящихся в базе, следует выделить:

- university (информация об университетах, для которых возможно построение занятий);
- faculty (сведения о факультетах данного университета);

- studygroup (данные о студенческих группах, имеющих место в данном факультете);
- lesson (одна из основных сущностей, содержащих сведения о времени проведения данного занятия данного типа в данной группе);
- lesson\_type (информация о типах занятий: лекции, лабораторные или практические занятия);
- schedule\_update\_task (данные об обновлении расписания);
- schedule\_update\_task\_faculty (сущность для установки связи «многие ко многим» для сущностей faculty и schedule\_update\_task).

Другая группа таблиц (user, role, user\_role и refresh\_token) разработана для хранения сведений о пользователях, их ролях и обновлении токенов.

Для возможности хранения информации о новостях предусмотрены две сущности: news (новости) и news\_type (тип новости).

Кроме всех сущностей на рис. 3 приведены связи между ними, а также тип каждого поля (атрибута).

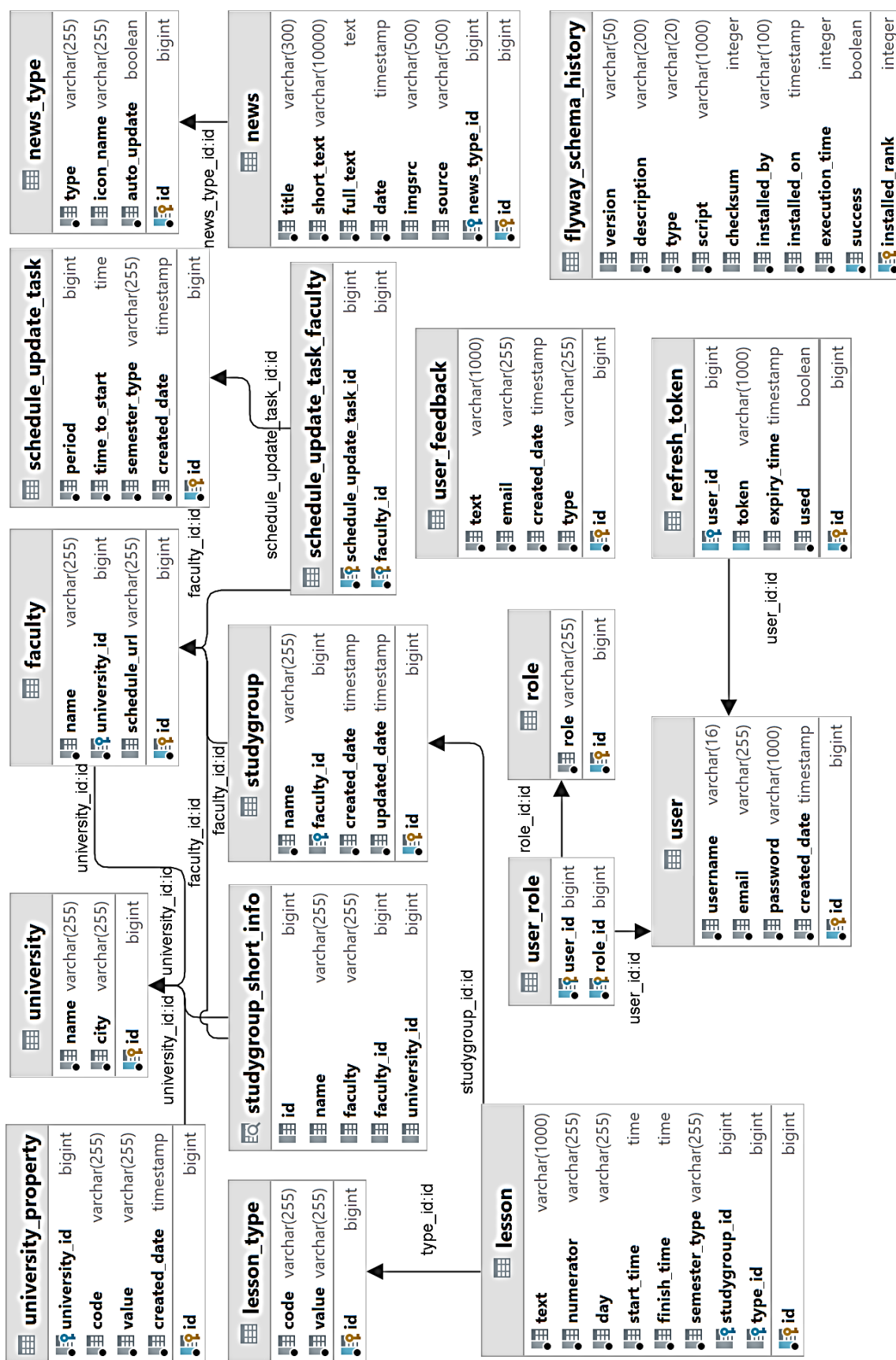


Рис. 3. Структура базы данных онлайн-сервиса расписания

## Разработка серверной части и модуля обработки расписания

Так как онлайн-сервис по просмотру расписания представляет собой клиент-серверное веб-приложение, то мы будем отделять клиентскую часть, то есть Frontend от серверной части – Backend.

В качестве фреймворка для разработки Backend части приложения, использовался фреймворк Spring Boot Framework [2]. Данный выбор обусловлен огромной кодовой базой, большим количеством модулей, которые предоставляют готовый функционал и решения для различных стандартных задач при разработке серверного приложения.

Рассмотрим самые популярные модули данного фреймворка.

– Spring MVC: данный модуль позволяет легко и быстро разрабатывать собственное REST API, используя стандартный механизм языка программирования Java – аннотации. При их помощи код становится лаконичным и понятным, а особенности реализации скрываются и реализуются в другом месте;

– Spring Data: модуль для работы с базой данных. При его помощи возможна как обычная работа с базой данных при помощи SQL запросов и протокола JDBC, так и работа с базой данных в парадигме сущностей и их связей между собой. Данный подход предполагает, что таблица базы данных представляет собой объект, где столбцы являются полями данного объекта, а внешние ключи – связанными сущностями;

– Spring Security: этот модуль отвечает за конфигурирование безопасности веб-сервера и предоставляет целый ряд вариантов реализации защиты удаленного веб-приложения. Это может быть как Basic авторизация, так и авторизация при помощи OAuth или JWT токенов. Так, например, в реализованном проекте используется авторизация при помощи JWT токенов с механизмом их обновления и инкапсуляции в них различных ролей, а также информации о пользователях;

– Spring Scheduling: при помощи этого модуля возможно планирование различных задач аналогичное планированию задач в Linux – CRON. Подобный функционал часто требуется при разработке проектов и позволяет разработчикам выполнять синхронизацию в определенное время или выносить часть логики в подобные задачи, чтобы разгрузить код.

Spring Boot Framework имеет ещё множество других модулей, которые предоставляют другой функционал и помогают разработчикам, однако при реализации онлайн-сервиса расписания, было достаточно вышеперечисленных.

Серверная часть проекта представляет собой микросервисную архитектуру, в которой определенная часть функционала выносится в отдельные модули, которые связаны между собой при помощи различных протоколов обмена - REST, SOAP, AMQ и другие [3]. Подобный подход помогает в масштабировании приложения, оптимизации разработки, а также экономит ресурсы сервера.

Таким образом, основная логика получения расписания, его обработки, группировки, а также получения из него дополнительной информации такой как тип занятия, расписание или подгруппа, происходит в микросервисе gistud-p2p. Данный модуль также представляет собой серверное веб-приложение, разработанное на базе Spring Boot Framework и предоставляющее своё REST API для получения расписания по коду университета. В основе работы данного модуля лежит объединение паттернов стратегия и поставщик. Основная идея заключается в том, что, когда внешний сервис пытается получить расписание выбранного университета, он передает его уникальный код, по которому поставщик ищет среди доступных ему стратегий получения расписания ту, которая соответствует переданному коду. После получения нужной стратегии, поставщик использует её для получения расписания при этом каждая стратегия приведена к общему интерфейсу, но может иметь собственную реализацию, что позволяет вести разработку и поддержку различных университетов независимо.

Другим микросервисом, входящим в общую экосистему проекта, является модуль gistud-server. Этот модуль отвечает за работу с базой данных, авторизацию пользователей, пагинацией, фильтрацией, многопоточное асинхронное планирование задач на автоматическое обновление расписания, а также обрабатывается на микросервис gistud-p2p для формирования расписания и сохранения его в базу данных.

Пример работы пользователя с расписанием изображен на диаграмме последовательности на рис. 4.

На рисунке изображен запрос пользователем расписания через модуль gistud-front, после чего происходит обращение к модулю gistud-server и получение данных из базы данных.

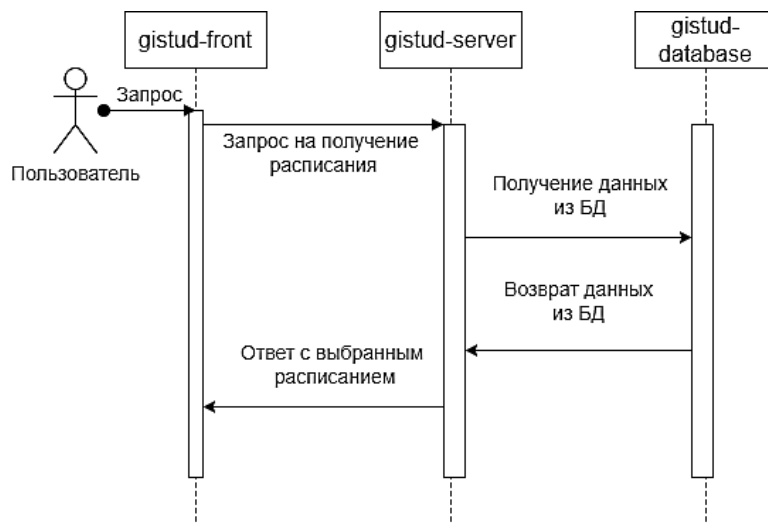


Рис. 4. Диаграмма последовательности получения расписания пользователем

Также существует возможность ручного обновления расписания администратором через специальную страницу, в которой выбирается университет и соответствующий факультет, а затем по нажатию кнопки происходит обновление или из загруженных файлов расписания, или происходит скачивание актуального расписания с сайта, ссылка на который сохранена в базе данных и привязана к факультету.

После нажатия на кнопку обновить расписание происходит обращение на модуль gistud-server, который делегирует обработку и получение расписания соответствующего уни-

верситета модулю gistud-parser и при этом не знает каким образом это происходит. В этом и заключается один из основных плюсов микросервисной архитектуры. Модуль gistud-parser выбирает соответствующую университету стратегию обработки, обращается на внешний ресурс для получения сырых данных, обрабатывает их до требуемого формата и возвращает на сервер, чтобы сохранить полученный результат в базу данных.

Пример запроса обновления расписания администратором изображен на диаграмме последовательности на рис. 5.

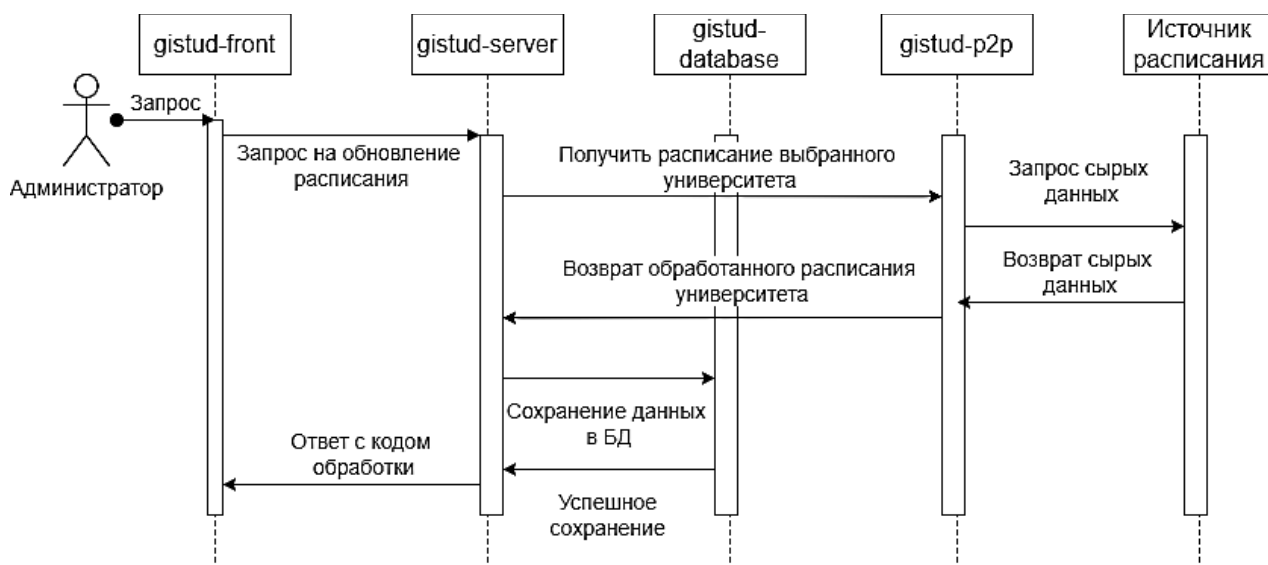


Рис. 5. Диаграмма последовательности для обновления расписания администратором

### Разработка клиентской части приложения

В качестве основного фреймворка для

реализации клиентской части был выбран фреймворк Vue.js [4, 5].

Vue.js — это JavaScript фреймворк для создания веб-интерфейсов с использованием

шаблона архитектуры MVVM (Model-View-ViewModel).

Поскольку Vue работает только на «уровне представления» и не используется для промежуточного программного обеспечения и бэкэнда, он может легко интегрироваться с другими проектами и библиотеками. Vue.js содержит широкую функциональность для уровня представлений и может использоваться для создания мощных одностраничных веб-приложений.

Функции Vue.js:

- реактивные интерфейсы;
- связывание данных;
- собственные директивы;
- шаблонный подход к созданию компонентов, который позволяет разделить файл на 3 зоны: html разметка, css стили, javascript логика;
- обработка и создание собственных событий;
- свои свойства, переходы, анимации и фильтры.

Также основная библиотека Vue.js очень маленькая (всего 17 кБ). Это гарантирует, что нагрузка на проект, реализованный с помощью Vue.js, минимальна, а сайт будет быстро загружаться.

Вместе с этим, существуют такие дополнительные модули, как `vueх` и `vue-router`.

`Vue-router` позволяет очень быстро задать по какому пути будет отображаться страница, какие параметры в неё можно передать и как их потом обработать и даже сделать ленивую загрузку страниц для большей эффективности.

`Vueх` позволяет создать глобальное хранилище данных и при этом обеспечить к нему атомарное обращение.

Помимо этого, для разработки более богатого пользовательского интерфейса, а также возможности портировать веб-приложение на различные платформы был выбран фреймворк `Quasar`.

`Quasar` — это лицензированный MIT фреймворк с открытым исходным кодом на базе `Vue.js`, который позволяет быстро создавать «отзывчивые» вебсайты/приложения в различных вариантах:

- SPA (Single Page App);
- SSR (Server-side Rendered App), а также опциональный клиент PWA;
- PWA (Progressive Web App)
- BEX (Browser Extention);
- Мобильные приложения (Android, iOS) через Cordova или Capacitor;

– Мультиплатформенные приложения для настольных компьютеров (с помощью `Electron`).

При этом данный фреймворк предоставляет большое количество уже готовых компонентов, `css` стилей/классов, собственных директив и хелперов, которые можно использовать для создания более красивого и «отзывчивого» пользовательского интерфейса.

В наше время любое веб-приложение принято разрабатывать адаптивно, чтобы иметь возможность отображать его как на компьютерах, так и в мобильных приложениях и именно поэтому веб-приложение для просмотра расписания должно быть одинаково удобно просматривать на всех платформах с возможностью дальнейшего расширения [6].

Для реализации адаптивной работы сайта были использованы стандарты верстки при помощи `col` и `row`, которые были внедрены и популяризированы фреймворком `Bootstrap`.

Идея данного подхода заключается в том, чтобы разделить страницу на 12 столбцов и строки, и при различном размере экрана занимать разное количество столбцов у каждого из блоков. В результате, независимо от расширения экрана, а также платформы пользователя, сайт будет выглядеть корректно и не иметь проблем с отображением собственного содержимого.

Фреймворк `Quasar` предоставляет ряд уже готовых решений для того, чтобы использовать данный подход на различных устройствах и размерах экрана.

Пример пользовательского интерфейса на мобильных платформах приведен на рис. 6.

### Практическое внедрение

Разработанный функционал веб-сервиса для получения расписания университетов в удобном и интерактивном виде также заинтересовал и официальных представителей Воронежского государственного технического университета. Целью разработки являлось создать программное обеспечение, которое позволяет просматривать расписание на информативных киосках или же терминалах, поэтому было принято использовать уже готовое, проверенное и протестированное решение.

Для поддержки работы терминала был разработан ряд функционала, добавлены дополнительные функции для администраторов терминалов, а также проведена работа с командой по интеграции данного решения в терминал.

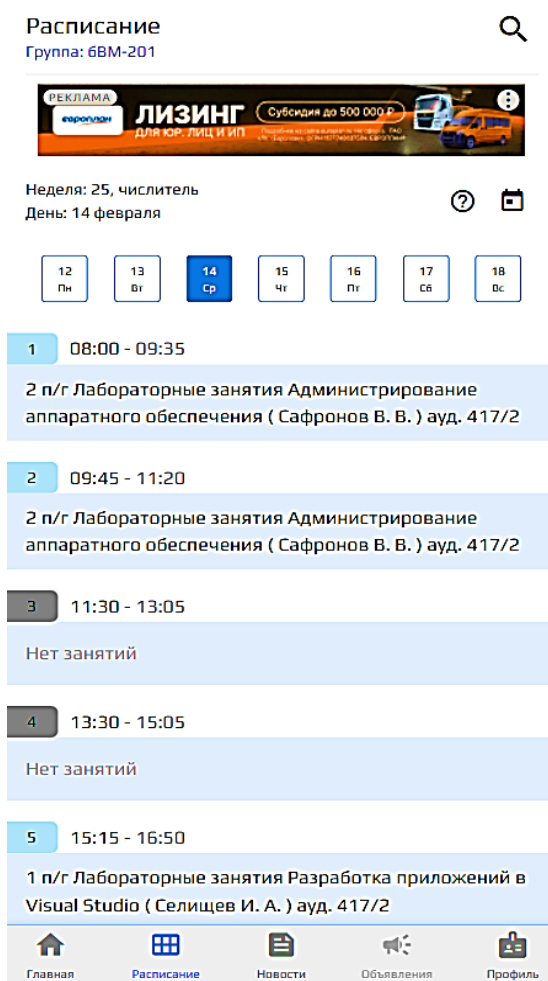


Рис. 6. Отображение расписания на компьютере

В результате данное программное решение было внедрено и использовано во 2 корпусе Воронежского государственного технического университета с возможностью дальнейшего расширения на другие корпуса и терминалы.

В целом, приложение может быть использовано в любом учебном заведении, сведения о котором будут добавлены в базу данных.

### Статистика использования

Разработанное программное решение было запущено 1 сентября 2021 года в Воронежском государственном техническом университете, и уже на протяжении 3 лет ежедневно работает и предоставляет расписание занятий для студентов.

Для проверки охвата аудитории, а также понимания своего целевого пользователя в данном проекте использовался сервис для сбора данных и статистики Яндекс Метрика.

В результате работы сервиса за последний год удалось собрать следующую статистику:

- количество просмотров страницы расписания превысило 124 тысячи;
  - количество новых посетителей было равно 4774 человек;
  - 1.3 дня проходило в среднем от предыдущего визита, что означает, что сервисом пользуются практически ежедневно;
  - процент отказа составил 17.4, что является высоким показателем и показывает, что пользователи чаще предпочитают остаться на выбранном сайте, а не выбрать другие аналоги.
- Результаты статистики представлены на рис. 7.

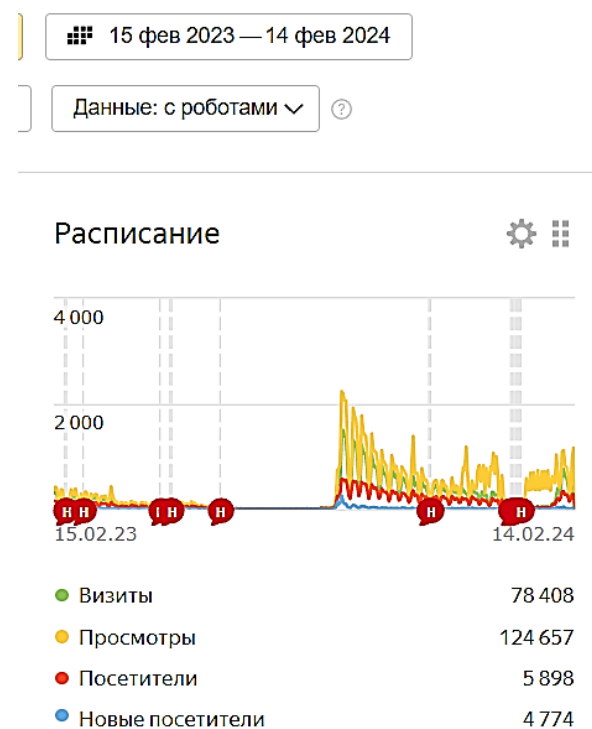


Рис. 7. Статистика работы сервиса

### Заключение

Целью работы являлась разработка сервиса, предназначенного для формирования расписания учебных занятий. В результате были решены следующие задачи:

- разработана архитектура сервиса, предназначенного для отображения расписания учебных занятий;
- спроектирована структура базы данных, которая хранит сведения обо всех необходимых для работы программы сущностях;
- реализовано приложение, включающее в себя front-end и back-end, отличительной особенностью которого является возможность работы как со стационарных, так и с мобильных устройств.

Приложение внедрено в деятельность Воронежского государственного технического университета.

#### Литература

1. Файли К. SQL/К. Файли: пер. с англ. М.: ДМК Пресс. 456 с.
2. Spring 5 для профессионалов: пер. с англ. / Ю. Козмина, Р. Харроп, К. Шефер, К. Хо. СПб.: ООО "Диалектика", 2019. 1120 с.
3. Хорстманн К. Java, Библиотека профессионала. Том 1. Основы. 11-е изд. Пер. с англ. СПб.: ООО "Диалектика", 2019. 864 с.

4. Java Concurrency на практике / Б. Гетц, Т. Пайерлс, Д. Блох, Д. Боубер, Д. Холмс, Д. Ли. СПб.: Питер, 2020. 464 с.

5. Хорстманн К. Java, Библиотека профессионала. Том 2. Расширенные средства программирования. 11-е изд. Пер. с англ. СПб.: ООО "Диалектика", 2020. 864 с.

6. Сидорова Е.В., Дмитриева Н.Г., Калинина Н.А. Решение задачи построения графа зависимостей программных модулей в системе Node.js // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2019. № 4(127). С. 44-52. DOI: 10.46960/1816-210X\_2019\_4\_44.

Поступила 04.03.2024; принята к публикации 08.05.2024

#### Информация об авторах

**Сашченко Дмитрий Леонидович** – студент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, д. 84), e-mail: sashchenkodmitrii@gmail.com

**Олейникова Светлана Александровна** – д-р техн. наук, профессор, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, д. 84), e-mail: s.a.oleynikova@gmail.com, ORCID: 0000-0002-0333-2313

## DESIGNING OF A UNIVERSAL SERVICE FOR VIEWING STUDENT SCHEDULES OF DIFFERENT UNIVERSITIES

D.L. Sashchenko, S.A. Oleinikova

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

**Abstract:** the article is devoted to the development of an online service designed to view student class schedules. The relevance of the development is due to the ability to view the schedule at any time from both a mobile and a stationary device, as well as promptly respond to any changes. In addition, such services are usually updated in real time, which allows students to be aware of class changes or cancellations and avoids missing classes. The developed application includes a database, client and server parts. The Vue web framework and its Quasar add-on will be used as the client part of the web service for a richer user interface, and the Spring Boot framework and PostgreSQL database will be used to implement the server part. The server part of the project implements receiving schedule files, extracting data from them with subsequent processing and saving into its own database, as well as further work with data, namely their receipt and aggregation. The application architecture will be depicted on UML and AIA diagrams, which will show how the user interacts with the service, as well as the application integration architecture. The novelty lies in providing users with the ability to view content from any device. The practical significance is confirmed by the implementation of the application in the activities of the Voronezh State Technical University

**Key words:** student timetable, online service, UML diagram, AIA diagram, PostgreSQL

#### References

1. Fiyali K. "SQL/K", trans. from Eng., Moscow, DMK Press, 456 p.
2. Kozmina Y., Harrop R., Schaefer K., Ho K. "Spring 5 for professionals" ("Spring 5 dlya professionalov"), trans. from Eng., St. Petersburg, Dialektika, 2019, 1120 p.
3. Horstmann K. "Java, Library of the professional" ("Java, biblioteka professionala"), vol. 1, Fundamentals, 11th ed., trans. from Eng., St. Petersburg, Dialektika, 2019, 864 p.
4. Goetz B., Peierls T., Bloch D., Boeber D., Holmes D., Lee D. "Java Concurrency in Practice" ("Java Concurrency na praktike"), St. Petersburg, Piter, 2020, 464 p.
5. Horstmann K. "Java, Library of the Professional" ("Java, Biblioteka professionala"), vol. 2, "Extended programming tools" ("Ras-shirennye sredstva programmirovaniya"), 11th ed., trans. from Eng., St. Petersburg, Dialektika, 2020, 864 p.
6. Sidorova E.V., Dmitrieva N.G., Kalinina N.A. "Solving the problem of constructing a dependency graph of software modules in the Node.js system", *Proc. of NNSTU n.a. R.E. Alekseev (Trudy NGTU im. R.E. Alekseeva)*, 2019, no. 4 (127), pp. 44-52. DOI: 10.46960/1816-210X\_2022\_2\_36. DOI: 10.46960/1816-210X\_2019\_4\_44.

Submitted 04.03.2024; revised 08.05.2024

#### Information about the authors

**Dmitry L. Sashchenko** – Student, Voronezh State Technical University, (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: sashchenkodmitrii@gmail.com

**Svetlana A. Oleinikova** – Dr. Sc. (Technical), Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: s.a.oleynikova@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0333-2313>

## СИСТЕМА ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ ТРАНСПОРТНЫМИ ПОТОКАМИ НА ПЕРЕКРЕСТКАХ СО СВЕТОФОРНЫМ РЕГУЛИРОВАНИЕМ

М.А. Стрижко, В.В. Червинский

Донецкий национальный технический университет, г. Донецк, Россия

**Аннотация:** предложена система интеллектуального управления транспортными потоками на перекрестках со светофорным регулированием в качестве одного из возможных решений проблемы транспортных задержек в условиях мегаполиса. Данное решение позволяет сократить периоды простоя автомобилей на красный свет, при отсутствии трафика в направлении с разрешенным движением за счет динамического изменения длительностей фаз регулирования на основании информации о параметрах транспортных потоков. Целью исследования является повышение эффективности проезда транспортных средств через перекрестки со светофорным регулированием. Предложенная система управления основана на нечеткой логике. Принцип её работы максимально приближен к действиям регулировщика. За счет использования технических средств обнаружения трафика существенно расширен объем информации о параметрах транспортного потока, что позволяет повысить качество управления. В статье описана структура предложенной системы управления, конфигурация аппарата нечеткой логики, обоснован выбор основных параметров и ограничений системы. Оценка качества управления разработанной системы произведена при помощи компьютерного моделирования работы светофорных объектов на участке улично-дорожной сети города. Результаты моделирования и сравнения разработанной системы с существующими системами управления транспортными потоками на перекрестках показали, что применение предложенной системы позволило повысить эффективность дорожного регулирования на 13 % и 39 % по сравнению с существующими системами «гибкого» и «жесткого» управления, соответственно. Предложенная система управления транспортными потоками демонстрирует наибольшую эффективность в условиях высокой динамики изменения интенсивности транспортных потоков на перекрестках, что достаточно распространено в современных мегаполисах

**Ключевые слова:** перекресток, транспортный поток, интеллектуальная система управления, нечеткая логика, светофорное регулирование

### Введение

Уровень автомобилизации в мегаполисах России и мира продолжает расти – увеличивается количество транспортных средств и объем перевозок, что приводит к возникновению заторов, снижению скорости движения, повышенному износу агрегатов транспортных средств и расходу топлива, загрязнению окружающей среды. Решением проблемы может быть расширение проезжей части, строительство новых дорог, однако в условиях исторически сложившейся городской застройки применение данных методов, как правило, затруднительно. Альтернативным методом является повышение качества управления транспортными потоками на перекрестках со светофорным регулированием. Интенсивность движения транспорта в городе характеризуется высокой динамикой: «пиковые» периоды чередуются с периодами спада в течение недели и суток; волнообразное прибытие транспортных средств на перекрестки имеет место и в течение цикла регулирования, что связано с режимом работы соседних светофорных объектов. Наиболее распространенное на сегодняшний день «жесткое» светофорное регулирование с постоянными дли-

тельностью фаз нередко приводит к ситуациям, когда транспортные средства простаивают в очереди на красный сигнал светофора при отсутствии потока в конфликтующем направлении. В связи с этим актуальной является разработка систем «гибкого» управления с учетом параметров потока, в том числе с применением методов интеллектуального управления.

Суть «гибкого» управления трафиком на перекрестке заключается в том, что длительность горения сигналов светофоров может изменяться, исходя из интенсивности транспортного потока в каждом направлении. Так, если в одном направлении интенсивность движения существенно выше, чем в остальных, транспортным средствам здесь будет предоставлено больше времени для проезда. В случае, если наиболее загруженным станет другое направление, или движение на перекрестке будет происходить с равной интенсивностью, система управления отреагирует на изменения, распределив длительность фаз регулирования в соответствующих пропорциях.

Исследованиям в данной области посвящено достаточно большое количество научных работ как отечественных, так и зарубежных авторов. Наиболее часто в литературе описываются системы управления, основанные на нейронных

сетях [1–3] и нечеткой логике [4–6]. Использование нейросетей для решения данной задачи показывает достаточно высокую эффективность, однако требует индивидуального обучения нейросети на каждом перекрестке, что при массовой реализации на городских перекрестках требует большого объема вычислительных ресурсов системы и ведет к повышению затрат. Системы управления на основе нечеткой логики являются более универсальными при повсеместном использовании и требуют лишь незначительной настройки на различных перекрестках при достаточно высоком качестве управления [7].

### Описание системы управления

Структурная схема системы интеллектуального управления транспортными потоками, предлагаемой в данной работе, приведена на рис. 1.

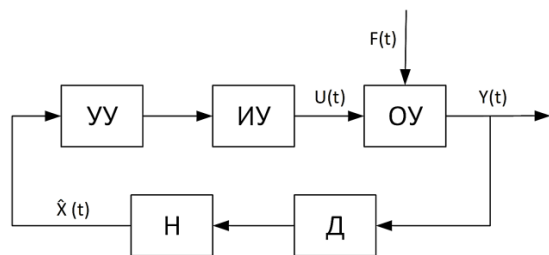


Рис. 1. Структурная схема системы интеллектуального управления транспортными потоками на перекрестке

На рис. 1 приняты следующие условные обозначения:

УУ – управляющее устройство;

ИУ – исполнительное устройство – комплекс светофоров на перекрестке;

ОУ – объект управления – городской перекресток со светофорным регулированием;

Д – детектор транспорта, необходимый для фиксации количества транспортных средств на подъездах к перекрестку;

Н – наблюдатель, необходимый для восстановления недостающих данных о состоянии объекта управления.

На схеме (рис. 1) обозначены следующие векторы.

$Y(t)$  – вектор выходных переменных. Состоит из переменных  $n_{ij}^k(t)$  и  $m_{ij}^k(t)$ , где  $n_{ij}^k(t)$  – количество транспортных средств, подъезжающих к перекрестку, на котором осуществляется управление, в направлении  $k$  по полосе  $i$  на участке  $j$ .  $m_{ij}^k(t)$  – количество транспортных средств, отъезжающих от вышестоящего перекрестка в направлении  $k$  по полосе  $i$  на участке  $j$ . Участок – часть полосы между перекрестками, длина которого выбрана по

определенным критериям учета транспорта. Количество направлений, полос движения и отслеживаемых участков зависит от конфигурации регулируемого перекрестка.

$\hat{X}(t)$  – вектор состояния, включающий в себя измеренные переменные вектора  $Y(t)$ , а также переменные, восстановленные при помощи наблюдателя – модуля прогноза. Таким образом, число контролируемых участков  $j$  может быть увеличено путем применения методов прогноза количества транспортных средств на данных участках.

$U(t)$  – вектор управления. Содержит переменные управления каждым сигналом каждого светофора на перекрестке  $\tau_l^i(t)$ . Буквенный индекс  $l$  обозначает цвет сигнала: к – красный; ж – желтый; з – зеленый; зл – зеленый для поворота налево; зп – зеленый для поворота направо. Индекс  $i$  обозначает номер светофора, которым осуществляется управление. Набор сигналов и количество светофоров определяется конфигурацией регулируемого перекрестка.

$F(t)$  – вектор возмущения. Состоит из переменных  $q_i(t)$  и  $l_i(t)$ , где  $q_i(t)$  – интенсивность движения транспортных средств в направлении  $i$  за пределами зоны обнаружения автомобилей вокруг перекрестка;  $l_i(t)$  – фаза регулирования вышестоящего светофорного объекта в направлении  $i$ .

Соответствие описанных переменных схеме перекрестка проиллюстрировано на рис. 2.

Принцип работы систем управления, основанных на нечеткой логике, похож на рассуждения человека [8]. Предположим, что движение на перекрестке регулирует сотрудник полиции. Его соображения могут быть следующими: ЕСЛИ на подъезде к перекрестку автомобилей с севера МАЛО И автомобилей с востока МНОГО, ТО пропускать поток с востока ДОЛЬШЕ.

Существующие системы управления транспортными потоками, основанные на нечеткой логике, предусматривают продление текущей фазы регулирования на величину, определяемую исходя из параметров транспортных потоков. Продление может происходить как однократно в течение цикла в достаточно широком диапазоне значений [9], так и многократно [10], определяя режим регулирования на некоторый период в будущем. Особенность данных систем состоит в том, что дальнейшие решения принимаются только по истечении времени продления фазы, установленного при прошлом решении. В случаях, если значения приращения времени достаточно большие, это может приводить к снижению качества управления.

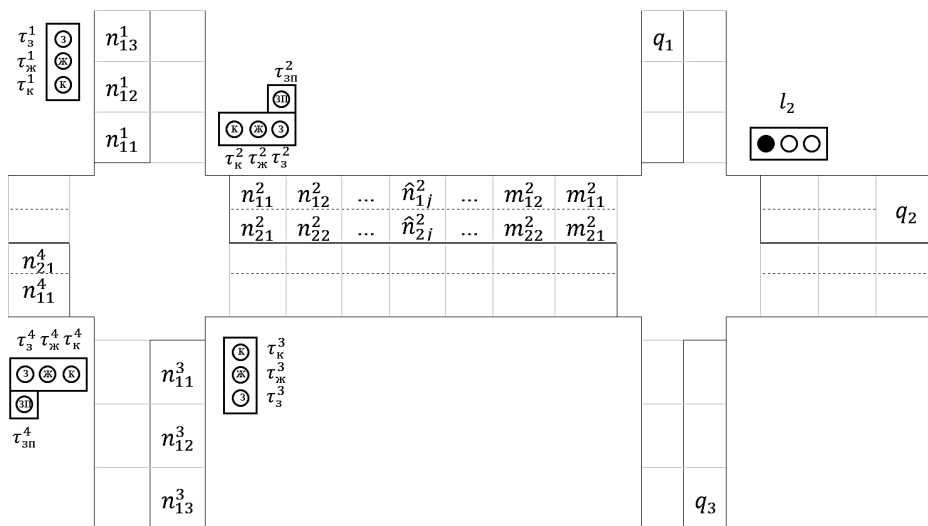


Рис. 2. Соответствие переменных системы управления схеме регулируемого перекрестка

Так как интеллектуальные системы управления транспортными потоками обычно направлены на воссоздание логики действий регулировщика, стоит отметить, что сотрудник полиции при работе не оперирует значениями времени в секундах или других единицах измерения, а принимает решение о смене фазы регулирования в каждый момент времени на основе информации, которая ограничена областью видимости человека в конкретных условиях. Принимая, что действия регулировщика являются наиболее гибким и эффективным управлением, для реализации максимально приближенного принципа работы, причем со значительным увеличением информативности оценки состояния транспортных потоков на подъездах к перекрестку, предлагается установить в качестве выходной переменной системы нечеткого вывода не длительность приращения разрешающей фазы регулирования в секундах, а целесообразность переключения сигнала в текущий момент времени.

В разработанной системе управления дороги, ведущие к регулируемому перекрестку,

предлагается разделить на участки и присваивать номер каждому участку по его удалению от перекрестка. На каждом участке посредством детекторов транспорта производится непрерывная фиксация количества автомобилей. Полученная информация о количестве автомобилей классифицируется категориями: МАЛО МАШИН (S), СРЕДНЕ МАШИН (M), МНОГО МАШИН (B).

Каждая входная нечеткая переменная системы – номер ближайшего участка, в котором находится каждая из категорий количества автомобилей на стороне разрешенного движения и на стороне скапливающейся очереди. Если какая-либо категория не зафиксирована в зоне отслеживания трафика, на соответствующий ей вход поступает условный номер 100 – то есть принимается, что данная категория находится на максимальном удалении от перекрестка.

Выходная нечеткая переменная системы – уровень целесообразности переключения сигнала в текущий момент времени.

Взаимосвязь входов и выходов системы нечеткого управления показана на рис. 3.

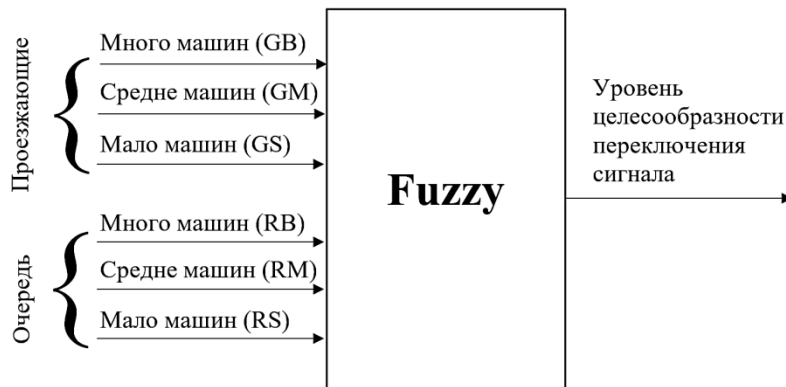


Рис. 3. Взаимосвязь входов и выходов аппарата нечеткой логики

Для транспортных средств, которые в данный момент движутся на зеленый свет, отслеживается номер ближайшего участка, в котором появляется каждая категория: GB (много машин); GM (средне машин); GS (мало машин).

Для транспортных средств, которым в данный момент горит красный свет, отслеживается номер ближайшего участка, в котором появляется каждая категория: RB (много машин); RM (средне машин); RS (мало машин).

Значение каждой входной переменной описывается тремя термами, которые определяют степень удаления каждой категории относительно перекрёстка: БЛИЗКО (С), СРЕДНЕ (М) и ДАЛЕКО (F).

Функции принадлежности входных переменных системы изображены на рис. 4.

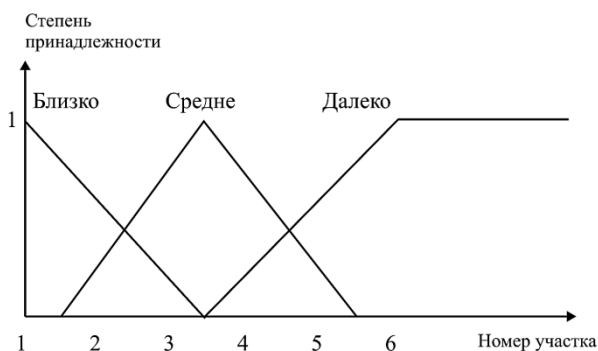


Рис. 4. Функции принадлежности входных переменных системы

Выходная переменная имеет пять термов, которые описывают уровень целесообразности переключения сигнала в текущий момент времени: НИЗКИЙ (L), СКОРЕЕ НИЗКИЙ (AL), СРЕДНИЙ (M), СКОРЕЕ ВЫСОКИЙ (АН), ВЫСОКИЙ (H). Функции принадлежности выходной переменной представлены на рис. 5.

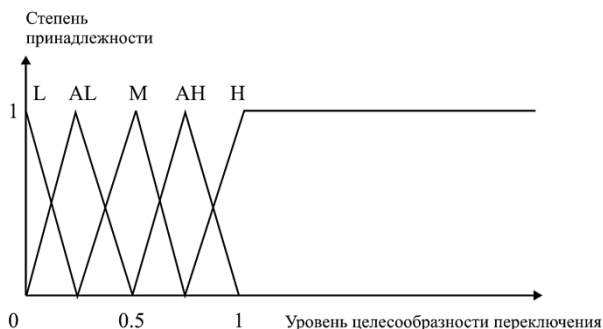


Рис. 5. Функции принадлежности выходной переменной системы

После дефаззификации выходной переменной переключение сигнала осуществляется

в том случае, если уровень целесообразности переключения превышает значение 0,5. Иначе продолжается текущая фаза регулирования.

Далее приведены примеры нечетких правил системы управления.

Если МНОГО МАШИН на зеленый БЛИЗКО и МАЛО МАШИН на зеленый ДАЛЕКО и СРЕДНЕ МАШИН на красный БЛИЗКО и МАЛО МАШИН на красный СРЕДНЕ, то целесообразность переключения СКОРЕЕ НИЗКАЯ (GB=C & GS=F & RM=C & RS=M → T=AL).

Если СРЕДНЕ МАШИН на зеленый ДАЛЕКО и МАЛО МАШИН на зеленый БЛИЗКО и МНОГО МАШИН на красный БЛИЗКО и МАЛО МАШИН на красный ДАЛЕКО, то целесообразность переключения ВЫСОКАЯ (GM=F & GS=C & RB=C & RS=F → T=H).

На практике обязательными являются ограничения минимальной и максимальной длительности фазы светофорного регулирования. Минимальная длительность фазы при наличии пешеходного перехода определяется по формуле (1) [11]. Максимальная длительность фазы должна составлять не более 120 с [12].

$$T = 5 + \frac{V_{\text{пш}}}{V_{\text{пш}}}, \quad (1)$$

где  $V_{\text{пш}}$  – ширина проезжей части в месте пешеходного перехода;  $V_{\text{пш}}$  – средняя скорость пешехода (принимается равной 1,3 м/с).

Таким образом, повторное переключение сигнала будет невозможно до истечения минимально допустимого времени, а если условия для переключения сигнала не возникают в течение 120 с, фаза регулирования сменится без учета ситуации на проезжей части.

Горизонт обнаружения трафика на подъездах к перекрестку предлагается определять таким образом, чтобы учесть все транспортные средства, движение которых будет прервано при переключении фазы регулирования на минимальную длительность. Исходя из этого, длина зоны обнаружения транспортных средств может быть вычислена по формуле (2).

$$l_{\text{обн.}} = t_{\text{min}} \cdot V, \quad (2)$$

где  $l_{\text{обн.}}$  – длина зоны обнаружения транспортных средств;  $t_{\text{min}}$  – минимальная длительность следующей фазы регулирования;  $V$  – ограниченная скорость на данном участке.

Что касается длины одного участка, то она должна быть достаточно большой, чтобы количество находящихся на нем легковых автомобилей



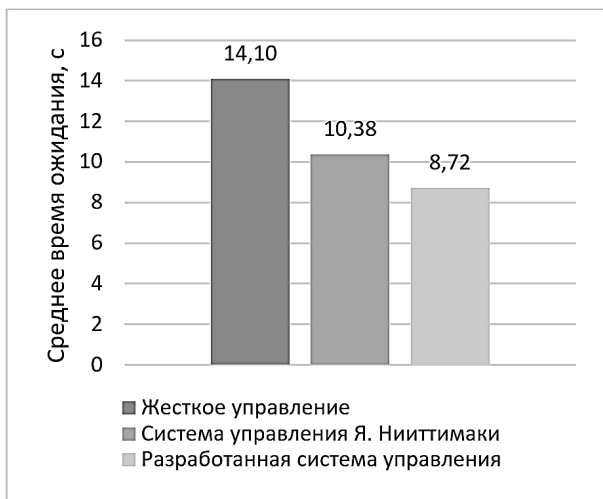


Рис. 7. Результаты сравнения систем управления по среднему времени ожидания

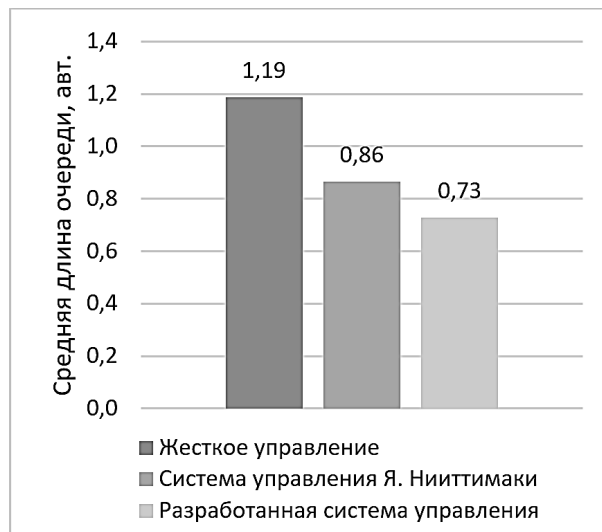


Рис. 8. Результаты сравнения систем управления по средней длине очереди

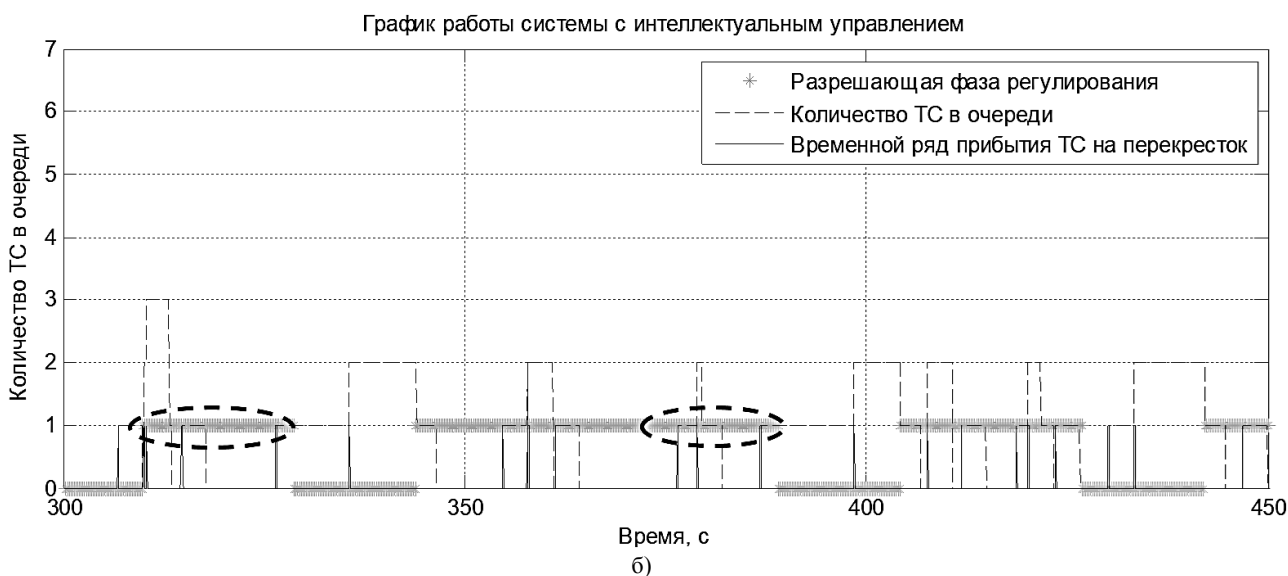
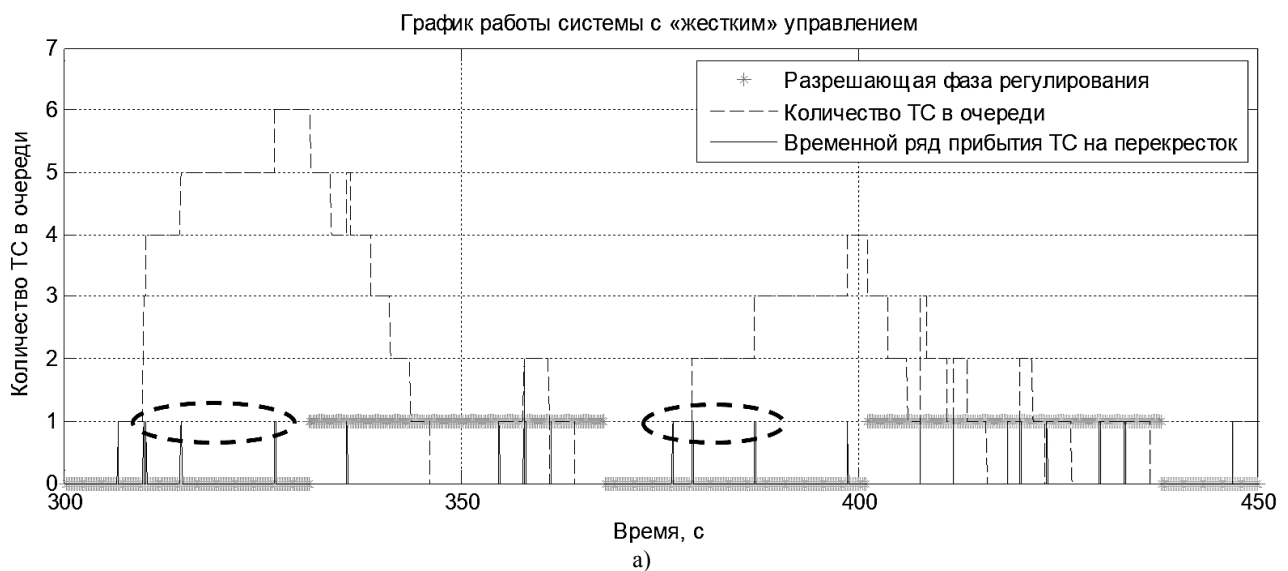


Рис. 9. Графики работы систем: а) с «жестким» управлением; б) с интеллектуальным управлением

### Заключение

1. Разработана структура системы интеллектуального управления транспортными потоками на перекрестках со светофорным регулированием. Принцип работы системы основан на применении нечеткой логики и приближен к действиям регулировщика. Современные технические средства обнаружения трафика позволяют увеличить объем информации о поступающих транспортных потоках по сравнению с возможностями человека, что способствует повышению качества управления.

2. Разработана конфигурация аппарата нечеткой логики, определены функции принадлежности нечетких переменных и нечеткие правила системы управления.

3. Определены основные ограничения системы, в частности, горизонт обнаружения транспортных средств на подъездах к перекрестку, минимальная и максимальная длительности фаз регулирования.

4. Проведено модельное исследование качества работы систем управления транспортными потоками, по результатам которого разработанная система продемонстрировала улучшение показателей качества в среднем на 39 % по сравнению с «жестким» управлением и на 13 % по сравнению с одной из существующих систем интеллектуального управления транспортными потоками.

### Литература

1. Тимофеева О.П., Мальшева Е.М., Соколова Ю.В. Проектирование интеллектуальной системы управления светофорами на основе нейронной сети // Современные проблемы науки и образования. 2014. № 6. С. 238-244.

2. Тимофеева О.П., Палицына С.С. Обучение нейронной сети интеллектуальной системы управления

городскими светофорами // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2016. № 1(112). С. 25-31.

3. Казарян Д.Э., Михалев В.А., Софронова Е.А. Нейросетевые подходы к управлению потоками транспорта // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2017. Т.18, №1. С. 97-106.

4. Fuzzy Logic in Traffic Engineering: A Review on Signal Control / M. Koukol, L. Zajickova, L. Marek, P. Tucek // Advanced Transportation Mathematical Modeling and Simulation. 2015. No. 2. PP. 97-110.

5. Тарасов О.В., Корнилов С.Н. Оптимизация режимов работы объектов светофорного регулирования методами нечеткой логики // Современные проблемы транспортного комплекса России. 2012. Т. 2. № 1. С. 139-143.

6. Бобырь М.В., Храпова Н. И., Ламонов М. А. Система управления интеллектуальным светофором на основе нечеткой логики // Известия Юго-Западного государственного университета. 2021. Т. 25. № 4. С. 162-176.

7. Intelligent Traffic Signal Synchronization Using Fuzzy Logic and Q-Learning / V. Iyer, R. Jadhav, U. Mavchi, J. Abraham // Proceedings of the 2016 International Conference on Computing, Analytics and Security Trends (CAST), Pune, India. 2016. No. 4. PP. 156-161.

8. Перат А. Нечеткое моделирование и управление. Пер. с англ. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2009. 798 с.

9. Azarshab M., Ghazanfari M., Heidarpoor F. An Intelligent Fuzzy Logic Based Traffic Controller // SRPH Journal of Fundamental Sciences and Technology. 2021. 3 (1). PP. 10-17.

10. Niittymäki J., Nevala R., Turunen E. Fuzzy Traffic Signal Control and a New Conference Method – Maximal Fuzzy Similarity // Proceedings of the 13th Mini-EURO Conference (Handling Uncertainty in the Analysis of Traffic and Transportation Systems) and the 9th Mtg. EURO Working Group on Transportation (Intermodality, Sustainability and Intelligent Transportation Systems). 2001. PP. 716-728.

11. ОДМ 218.4.005-2010 Рекомендации по обеспечению безопасности движения на автомобильных дорогах. М., 2011.

12. Рассоха В.И., Никитин Н.А., Савина Ю.Э. Сравнение эффективности алгоритмов расчёта режима работы светофорного объекта // Техничко-технологические проблемы сервиса. 2020. № 4(54). С. 44-49.

13. Niittymäki J., Kononen V. Traffic signal controller based on fuzzy logic // Proceedings of the IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics, Nashville, Tenn, USA. 2000. Vol. 5. PP. 3578-3581.

Поступила 04.03.2024; принята к публикации 08.05.2024

### Информация об авторах

**Стрижко Михаил Александрович** – аспирант, Донецкий национальный технический университет (283001, Россия, г. Донецк, ул. Артёма, 58), тел. +7 949 464-27-76, e-mail: strizhko.mihail@yandex.com, ORCID: 0009-0007-2702-5194

**Червинский Владимир Владимирович** – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры автоматизации и телекоммуникаций, Донецкий национальный технический университет (283001, Россия, г. Донецк, ул. Артёма, 58), e-mail: tscherwi@mail.ru

## INTELLIGENT TRAFFIC FLOW CONTROL SYSTEM AT INTERSECTIONS WITH TRAFFIC LIGHT REGULATION

M.A. Strizhko, V.V. Chervinskiy

Donetsk National Technical University, Donetsk, Russia

**Abstract:** the paper proposes a system of intelligent traffic flow control at intersections with traffic light regulation as one of the possible solutions to the problem of traffic delays in a megacity. This solution makes it possible to reduce the periods of idle time for cars at red light when there is no traffic in the direction of green light by dynamically changing the duration of the control phases based on information about the parameters of traffic flows. The purpose of the study is to increase the efficiency of vehicles passing through intersections with traffic light regulation. The proposed control system is based on fuzzy logic. The principle of its operation is similar to the actions of the police officer. Due to the use of technical means of traffic detection, the amount of information about the parameters of the traffic flow has been significantly expanded, which makes it possible to improve the quality of control. The article describes the structure of the proposed control system, the configuration of the fuzzy logic controller and the choice of the main parameters and limitations of the system. The assessment of the control quality of the developed system was carried out using computer simulation of traffic lights on a section of the city's road network. The results of modeling and comparing the developed system with existing traffic flow control systems at intersections showed that the application of the proposed system made it possible to increase the efficiency of road regulation by 13% and 39 % compared with existing "flexible" and "rigid" control systems, respectively. The proposed traffic flow control system demonstrates the greatest efficiency in conditions of high dynamics of changes in the intensity of traffic flows at intersections, which is quite common in modern megacities

**Key words:** intersection, traffic flow, intelligent control system, fuzzy logic, traffic light regulation

### References

1. Timofeeva O.P., Malysheva, Sokolova Yu.V. "Designing an intelligent traffic light control system based on a neural network", *Modern problems of science and education (Sovremennyye problemy nauki i obrazovaniya)*, 2014, no 6, pp. 238-244.
2. Timofeeva O.P., Palitsyna S.S. "Training of the neural network of the intelligent control system of urban traffic lights", *Proc. of the R.E. Alekseev NGTU (Trudy NGTU im. R.Ye. Alekseyeva)*, 2016, no. 1 (112), pp. 25-31.
3. Kazaryan D.E., Mikhalev V.A., Sofronova E.A. "Neural network approaches to traffic flow management", *The Bulletin of the Peoples' Friendship University of Russia. Series: Engineering Research (Vestnik Rossiyskogo universiteta druzhby narodov. Seriya: Inzhenernyye issledovaniya)*, 2017, vol. 18, no. 1, pp. 97-106.
4. Koukol M., Zajickova L., Marek L., Tucek P. "Fuzzy Logic in Traffic Engineering: A Review on Signal Control", *Advanced Transportation Mathematical Modeling and Simulation*, 2015, pp. 97-110.
5. Tarasov O.V., Kornilov S.N. "Optimization of modes of operation of traffic light control objects using fuzzy logic methods", *Modern problems of the transport complex of Russia (Sovremennyye problemy transportnogo kompleksa Rossii)*, 2012, vol. 2, no. 1, pp. 139-143.
6. Bobyr M.V., Khrapova N.I., Limonov M.A. "Intelligent traffic light control system based on fuzzy logic", *Proc. of the Southwestern State University (Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta)*, 2021, vol. 25, no. 4, pp. 162-176.
7. Iyer V., Jadhav R., Mavchi U., Abraham J. "Intelligent Traffic Signal Synchronization Using Fuzzy Logic and Q-Learning", *Proceedings of the 2016 International Conference on Computing, Analytics and Security Trends (CAST)*, Pune, India, 2016, pp. 156-161.
8. Pegat A. "Fuzzy modeling and control" ("Nechetkoye modelirovaniye i upravleniye"), trans. from Eng., Moscow, BINOM. Laboratoriya Znaniy, 2009, 798 p.
9. Azarshab M., Ghazanfari M., Heidarpour F. "An Intelligent Fuzzy Logic Based Traffic Controller", *SRPH Journal of Fundamental Sciences and Technology*, 2021, no. 3 (1), pp. 10-17.
10. Niittymäki J., Nevala R., Turunen E. "Fuzzy Traffic Signal Control and a New Conference Method – Maximal Fuzzy Similarity", *Proc. of the 13th Mini-EURO Conference (Handling Uncertainty in the Analysis of Traffic and Transportation Systems) and the 9th Mtg. EURO Working Group on Transportation (Intermodality, Sustainability and Intelligent Transportation Systems)*, 2001, pp. 716-728.
11. "ODM 218.4.005-2010 Recommendations on traffic safety on highways" ("ODM 218.4.005-2010 Rekomendatsii po obespecheniyu bezopasnosti dvizheniya na avtomobil'nykh dorogakh"), Moscow, 2011.
12. Rassokha, V.I. Nikitin N.A., Savina Yu.E. "Comparison of the efficiency of algorithms for calculating the operating mode of a traffic light object", *Technical and technological problems of service (Tekhniko-tehnologicheskiye problemy servisa)*, 2020, no. 4 (54), pp. 44-49.
13. Niittymäki J., Kononen V. "Traffic signal controller based on fuzzy logic", *Proc. of the IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics*, Nashville, Tenn, USA, 2000, vol. 5, pp. 3578-3581.

Submitted 04.03.2024; revised 08.05.2024

### Information about the authors

**Mikhail A. Strizhko** – Postgraduate Student, Donetsk National Technical University (58 Artema str., Donetsk 283001, Russia), tel. +7 949 464-27-76, e-mail: strizhko.mihail@yandex.com, ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-2702-5194>

**Vladimir V. Chervinskiy** – Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Department of Automation and Telecommunications, Donetsk National Technical University (58 Artema str., Donetsk 283001, Russia), e-mail: tscherwi@mail.ru

## БАЙЕСОВСКАЯ СЕТЬ ДОВЕРИЯ В СИСТЕМЕ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЯ ПРИ УПРАВЛЕНИИ БПЛА

В.А. Малиновкин<sup>1</sup>, О.С. Мордвинкина<sup>1</sup>, К.Н. Резников<sup>2</sup>, А.В. Барабанов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

<sup>2</sup>ООО «Киитай», г. Саратов, Россия

**Аннотация:** в современном мире спектр использования беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) расширяется. Разделяется контролируемое управление (через пульт управления) и бесконтрольное управление БПЛА. Задача автоматизации включает в себя исключение влияния человека из основного процесса. Таким образом, бесконтрольное управление БПЛА является актуальной задачей. Ранее были рассмотрены основные системы поддержки и принятия решений на основе машинного обучения, глубокого обучения, Байесовских сетей, теории игр. В результате сравнения был сделан выбор в пользу Байесовских сетей, так как в этом случае не требуется проведения предварительного обучения, достигается высокая скорость выполнения расчётов и реализуется возможность работы с разной входной информацией, влияющей на событие в точке. В текущей работе были проанализированы алгоритмы отыскания кратчайшего расстояния: алгоритм Флойда-Уоршелла, алгоритм Форда-Беллмана, алгоритм Дейкстры. Сравнительный анализ показал, что алгоритм Форда-Беллмана является оптимальным для решения задачи поиска кратчайшего пути в городской среде (количество ребер меньше, чем количество вершин, так как существование ребер ограничено знанием местности). Также было продемонстрировано использование Байесовских сетей доверия в системе поддержки принятия решений с применением d-разделения. Были сформулированы критерии оптимальности при выборе оптимального пути: наличие минимального расстояния между исходными точками, наличие наибольшего среднего коэффициента доверия

**Ключевые слова:** Байесовские сети, d-разделение, алгоритм Флойда-Уоршелла, алгоритм Дейкстры, алгоритм Форда-Беллмана

### Введение

В настоящее время управление беспилотными летательными аппаратами (БПЛА) подразделяется на контрольное управление и бесконтрольное. При бесконтрольном управлении решены ещё не все проблемы. Одной из них является проблема перестроения маршрута при движении БПЛА.

В предыдущей статье были рассмотрены основные системы принятия решения [1]. В результате сравнения был сделан выбор в пользу Байесовских сетей. На выбор повлияли такие характеристики как отсутствие необходимости в проведении предварительного обучения, высокая скорость выполнения расчётов и способность работать с разной входной информацией, влияющей на событие в точке.

Кроме этого была представлена схема процесса принятия решения на базе нескольких источников информации с интеграцией Байесовских сетей.

Процесс определения наиболее безопасного пути включает в себя такие этапы как: опре-

деления кратчайшего пути, пересчёт Байесовской сети доверия, определение нового пути.

### Методы нахождения кратчайшего пути

Для рассмотрения методов нахождения кратчайшего пути примем, что в графе  $n$  вершин и  $m$  ребер, все веса являются неотрицательными значениями, массив  $g[0 \dots n - 1][0 \dots n - 1]$  содержит веса ребер.

### Метод Флойда-Уоршелла

Анализируемый метод высчитывает дистанцию между вершинами за  $n^3$  количества операций [2].

Массив  $d[0 \dots n - 1][0 \dots n - 1]$  включает на  $i$ -й итерации искомое значение в соответствии с поставленной задачей с условием: в качестве промежуточной точки в пути используется вершина с номером меньше  $i - 1$ . Пусть на  $i$ -й операции необходимо изменить массив до  $i + 1$ , тогда для каждой пары вершин, при которых результат улучшается, необходимо взять в качестве промежуточной точки вершину  $i - 1$ .

Псевдокод метода представлен на рис. 1.

```

прочитать g // g[0 ... n - 1][0 ... n - 1] - массив, в
котором хранятся веса ребер, g[i][j] =
2000000000, если ребра между i и j нет
d = g
for i = 1 ... n + 1
  for j = 0 ... n - 1
    for k = 0 ... n - 1
      if d[j][k] > d[j][i - 1] + d[i - 1][k]
        d[j][k] = d[j][i - 1] + d[i - 1][k]
вывести d
    
```

Рис. 1. Псевдокод метода Флойда-Уоршелла

### Метод Форда-Беллмана

Анализируемый метод высчитывает дистанцию между вершинами за  $n \cdot m$  количества операций [3].

Массив  $d[0 \dots n - 1]$  включает на  $i$ -й итерации искомое значение в соответствии с поставленной задачей с условием: путь содержит меньше  $i$  ребер. Если таких вариантов до вершины  $j$  не найдено, то  $d[j]$  равно бесконечно большой константе. Пусть, на  $i$ -й операции обновляется массив  $d$ , то необходимо итерировать по каждому ребру с выборкой лучшего результата, улучшающий расстояние до вершин. Таким образом, искомая длина пути не больше  $n - 1$ , следовательно,  $d$  является искомой величиной после  $n$  операций.

### Метод Дейкстры

Анализируемый метод высчитывает дистанцию между вершинами за  $n^2$  количества операций [4].

Пусть существует массив  $m[0 \dots n - 1]$ , который заполняется значениями либо true (для отмеченных вершин), либо false для каждой итерации ( $i$ ),  $d[0 \dots n - 1]$ , который содержит кратчайшее расстояние по вершинам при условии, что вершина является отмеченной.

В первый момент времени отмечена исходная вершина (0),  $g[i]$  заполняется по следующим условиям:

- 1)  $x$ , если вершины 0 и  $i$  связаны;
- 2) сколь угодно бесконечная константа, если вершины 0 и  $i$  не связаны;
- 3) 0, если вершина  $i$  является исходной вершиной.

Задача сводится к нахождению вершины, которая имеет наименьшую величину в массиве  $d$  в каждом цикле по неотмеченным вершинам.

В графе, сформированном по точкам относительно городской среды, количество ребер

меньше, чем количество вершин, так как существование ребер ограничено знанием местности. Эти знания берутся из файла OpenStreetMap. Таким образом, наиболее подходящий алгоритм нахождения кратчайшего расстояния является алгоритм Форда-Беллмана.

### Применение Байесовской сети в системе принятия решений

Байесовская сеть представляет собой направленный ациклический граф, который имеет следующие свойства:

1) дискретные или непрерывные элементы множества случайных переменных  $X = \{X_1, X_2, \dots, X_n\}$  являются вершинами графа;

2) вершины графа  $X = \{X_1, X_2, \dots, X_n\}$  соединяются попарно ориентированными ребрами и описывают отношения условной независимости. Вершина  $A$  называется родителем  $B$ , если ребро направлено от этой вершины к  $B$ . Множество всех родителей вершины  $X_i, i = 1$  обозначается  $Parents_i$ ;

3) каждая вершина  $X_i, i = 1, \dots, n$  характеризуется распределением условных вероятностей  $P(X_i | Parents_i)$ , которое количественно оценивает влияние родителей на эту переменную.

Для задания байесовской сети для набора переменных  $X = \{X_1, X_2, \dots, X_n\}$  необходимо определить:

1) структуру сети  $C$ , которая отражает набор предположений об условной независимости набора переменных  $X$ ,

2) набор  $Y$  распределения вероятностей для каждой переменной из  $X$ .

Вместе эти компоненты определяют совместное распределение вероятности на наборе  $X$ . В общем виде совместное распределение вероятностей относительно  $X$  выглядит следующим образом: [5-6]

$$P(x_1, \dots, x_n) = \prod_{i=1}^n P(x_i | parents_i) \quad (1)$$

Простейший пример Байесовской сети угроз прохождения точки приведен на рис. 2.

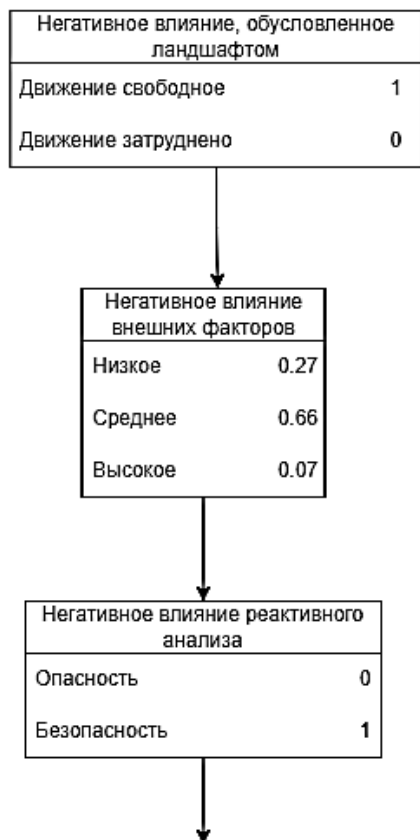


Рис. 2. Простейший пример Байесовской сети угроз прохождения точки

Из рис. 2 видно, что Байесовская сеть имеет сходящуюся связь. Два узла направленного графа  $x$  и  $y$  называются  $d$ -разделёнными [7], если для всякого пути из  $x$  в  $y$  (без учёта направления рёбер), существует такой промежуточный узел  $z$  (не совпадающий ни с  $x$ , ни с  $y$ ), что либо связь в пути в этом узле последовательная или расходящаяся, и узел  $z$  получил означивание, либо связь сходящаяся, и ни узел  $z$ , ни какой-либо из его потомков означивания не получил.

Каждый узел характеризует влияние каких-либо факторов на успешное прохождение точки. Таких влияний может быть сколько угодно, расположенных в порядке возрастания приоритета. По определению о  $d$ -разделимости, если в узле «Неактивное влияние реактивного анализа» произойдёт означивание, то вероятность родителя не учитывается, так как дочернее событие уже произошло.

На рис. 3 отображена схема определения каждого узла. Блок «Реактивный анализ системы обнаружения» представляет собой обработку информации из системы распознавания объектов на базе глубокого обучения.

Таким образом было продемонстрировано использование Байесовской сети при анализе информации из различных источников.

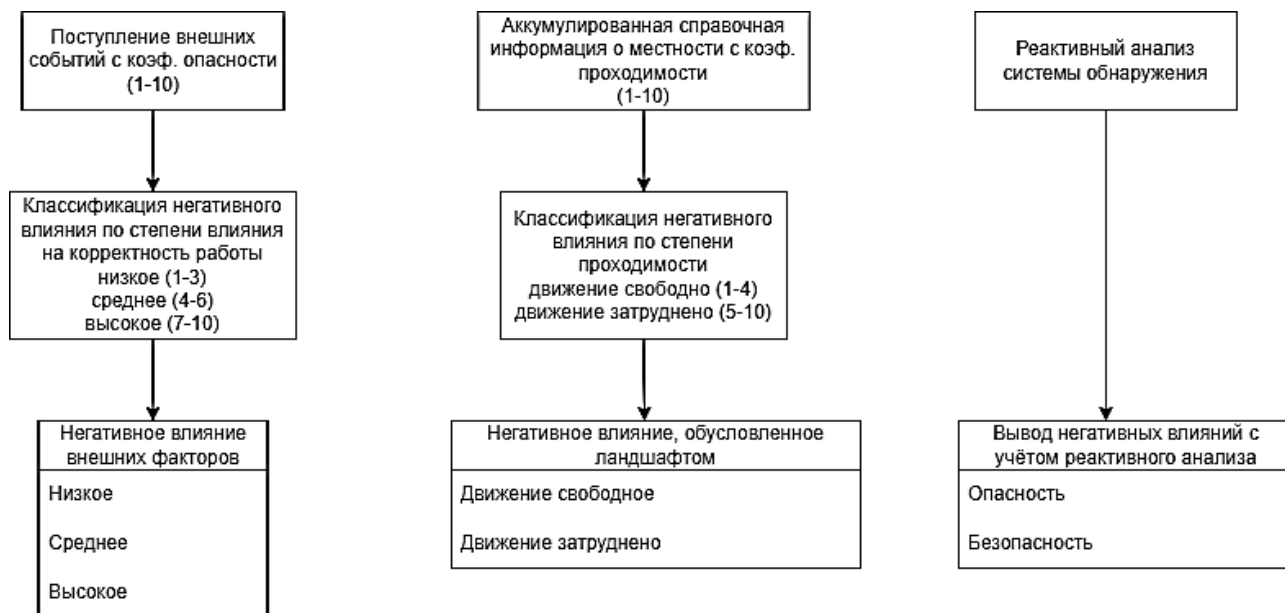


Рис. 3. Определение каждого узла

### Определение пути

При определении оптимального пути от точки до точки на финальный выбор влияет не только кратчайшее расстояние, но и показатели

Байесовской сети доверия. После этапа построения маршрутов определяется средняя величина Байесовской сети относительно каждого маршрута. В этом случае алгоритм дважды проходит точки графа в маршруте: для опреде-

ления кратчайшего расстояния, для определения средней величины доверия маршрута. Конечный результат берется тот, у которого средняя величина по Байесовской сети выше.

### Заключение

Были рассмотрены алгоритмы нахождения кратчайшего пути, представлен их псевдокод. В ходе сравнительного анализа выбор пал на алгоритм Форда-Беллмана, так как в графе, сформированном по точкам относительно городской среды, количество ребер меньше, чем количество вершин, так как существование ребер ограничено знанием местности.

Также был рассмотрен алгоритм определения оптимального пути с учётом критериев оптимальности: наличие минимального расстояния между исходными точками, наличие наибольшего среднего коэффициента доверия. Конечное определение пути зависит от среднего показателя Байесовской сети, которое просчитывается относительно каждого варианта прохождения маршрута от одной точки до другой.

Полученное решение носит унифицированный характер и в теории может быть применимо и к другим беспилотным объектам, так как проектирование такой системы строится по принципам SOLID, что является важным аспектом при реализации сложных систем. В рамках объекта внедрения – БПЛА были сформулированы факторы успешного прохождения точки при использовании Байесовской сети доверия [8].

В дальнейшем будут представлены результаты моделирования системы по перерасчёту коэффициента Байесовской сети доверия, оценена скорость выполнения алгоритма.

### Литература

1. Разработка структуры системы принятия решения при управлении БПЛА / В.А. Малиновкин, Н.В. Валуйских, В.Ф. Барабанов, М.Н. Аралов, А.В. Барабанов // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2023. Т. 19. № 6. С. 41-46.
2. Прихожий А.А., Карасик О.Н. Разнородный блочный алгоритм поиска кратчайших путей между всеми парами вершин графа // Системный анализ и прикладная информатика. 2017. № 3. С. 68-75.
3. Чертков А.А. Автоматизация выбора кратчайших маршрутов судов на основе модифицированного алгоритма Беллмана-Форда // Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова. 2017. Т. 9. № 5. С. 1113-1122.
4. Лебедев С.С., Новиков Ф.А. Необходимое и достаточное условие применимости алгоритма Дейкстры // Компьютерные инструменты в образовании. 2017. № 4. С. 5-13.
5. Bonafede C.E., Giudici P. Bayesian networks for enterprise risk assessment // Physica A: Statistical Mechanics and its Applications. 2007. Vol. 382. Issue 1. PP. 22–28. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.physa.2007.02.065> (дата обращения: 26.02.2024).
6. 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
7. Якобовский М.В. Инкрементный алгоритм декомпозиции графов // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. 2005. Вып. 1(28). С. 243-250.
8. Моисеев В.С. Основы теории эффективного применения беспилотных летательных аппаратов: монография. Казань: «Школа», 2015. 444 с.

Поступила 12.03.2024; принята к публикации 08.05.2024

### 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

**Мордвинкина Ольга Сергеевна** – магистрант, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: OIOrlovaS@yandex.ru

**Резников Константин Николаевич** - генеральный директор, ООО «Киинай» (410015, Россия, г. Саратов, ул. Фабричная, д. 1а), e-mail: volt-er@yandex.ru

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

## BAYESIAN NETWORK OF TRUST IN A DECISION MAKING SYSTEM WHEN CONTROLLING A UAV

V.A. Malinovkin<sup>1</sup>, O.S. Mordvinkina<sup>1</sup>, K.N. Reznikov<sup>2</sup>, A.V. Barabanov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

<sup>2</sup>“Kiinai” LLC, Saratov, Russia

**Abstract:** the range of unmanned aerial vehicles (UAVs) is expanding in today's world. A distinction is made between controlled control (via a control panel) and uncontrolled control of UAVs. The task of automation includes the exclusion of

human influence from the main process. Thus, uncontrolled control of UAVs is an actual task. Earlier, the main systems of support and decision making based on: machine learning, deep learning, Bayesian networks, game theory were considered. As a result of comparison the choice was made in favor of Bayesian networks, as in this case it is not required to carry out preliminary training, achieves high speed of calculations and realizes the possibility of working with different input information affecting the event at a point. In the current work we analyzed the following algorithms for finding the shortest distance: Floyd-Worshell algorithm, Ford-Bellman algorithm, Dijkstra algorithm. The comparative analysis showed that the Ford-Bellman algorithm is optimal for solving the problem of finding the shortest path in an urban environment (the number of edges is less than the number of vertices, since the existence of edges is limited by knowledge of the terrain). The use of Bayesian trust networks in a decision support system using d-separation has also been demonstrated. Optimality criteria for choosing the optimal path were formulated: presence of the minimum distance between the initial points, presence of the largest average confidence coefficient

**Key words:** Bayesian networks, d-partitioning, Floyd-Warshell algorithm, Dijkstra algorithm, Ford-Bellman algorithm

#### References

1. Malinovkin V.A., Valuyskikh N.V., Barabanov V.F., Aralov M.N., Barabanov A.V. "Development of the structure of a decision-making system for UAV control", *The Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2023, vol. 19, no. 6, pp. 41-46.
2. Prikhozhy A.A., Karasik O.N. "Heterogeneous block algorithm for finding the shortest paths between all pairs of graph vertices", *System Analysis and Applied Informatics (Sistemnyy analiz i prikladnaya informatika)*, 2017, no. 3, pp. 68-75.
3. Chertkov A.A. Automation of selection of the shortest routes of ships on the basis of the modified Bellman-Ford algorithm - Journal "Bulletin of Admiral S.O. Makarov State University of Maritime Research and Development", Vol. 9, No. 5, St. Petersburg, FGBOU VO "Admiral S.O. Makarov State University of Maritime Research and Development", 2017, pp. 1113-1122.
4. Chertkov A.A. "Automation of the selection of the shortest ship routes based on the modified Bellman-Ford algorithm", *The Bulletin of the State University of Maritime and River Fleet n. a. Admiral S.O. Makarov (Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova)*, 2017, vol. 9, no. 5, pp. 1113-1122.
5. 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. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.physa.2007.02.065> (accessed on 26.02.2013).
6. 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.
7. Yakobovsky M.V. "Incremental algorithm for graph decomposition", *The Bulletin of Nizhny Novgorod University n.a. N.I. Lobachevsky (Vestnik Nizhegorodskogo universiteta im. N.I. Lobachevskogo)*, 2005, vol. 1 (28), pp. 243-250.
8. 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.

Submitted 12.03.2024; revised 08.05.2024

#### 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

**Olga S. Mordvinkina** – Master's Student, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: OIOrlovaS@yandex.ru

**Konstantin N. Reznikov** – General Director, "Kiinai" LLC (1a Fabrichnaya str., Saratov 410015, Russia), e-mail: volt-er@yandex.ru

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

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЛОСКОГО ДВИЖЕНИЯ ДВУХМОТОРНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА ЛЕГЧЕ ВОЗДУХА

В.Б. Фурсов<sup>1</sup>, Ю.В. Писаревский<sup>2</sup>, Ж.А. Ген<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Закрытое акционерное общество «МЭЛ», г. Воронеж, Россия

<sup>2</sup>Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

**Аннотация:** рассматривается моделирование плоского движения беспилотного летательного аппарата дискообразной формы с положительной плавучестью. Перспективные летательные аппараты такого типа имеют на поверхности оболочки солнечные батареи и допускают применение бестопливной энергетической установки, что обеспечивает работоспособность аппарата на высотах 20000-22000 метров. Летательные аппараты, имеющие возможность работы в режиме зависания в определённой точке пространства при длительном полётном времени, допускают применение только электрических силовых установок. Теоретически длительность полётного времени определяется временем безотказной работы аккумуляторных батарей. Одними из существенных недостатков, органически присущих дирижаблям, являются высокая парусность и низкая манёвренность. Дискообразная форма летательного аппарата удачно сочетает высокие энергетические возможности, обеспечиваемые солнечной батареей, сниженную парусность и допускает повышение манёвренности аппарата. Однако известно, что летательные аппараты такой формы крайне неустойчивы в полёте и при воздействии ветровой нагрузки. Электрическая силовая установка отличается особо ценным качеством – хорошей управляемостью. Бесщёточные двигатели постоянного тока идеально подходят для работы на больших высотах при температурах окружающей среды -50 °С. Для управления двигателями используются современные системы управления и навигации, которые стабилизируют принципиально неустойчивый полет. Для оценки манёвренности дирижабля необходимо выполнить моделирование плоского движения летательного аппарата по заданной траектории. Управление движением по заданной траектории в ручном режиме достаточно сложная задача. Но и в автоматическом режиме полет по заданной траектории имеет определённые ограничения по скорости: чем больше скорость, тем менее управляем аппарат, в отличие от самолета. В данном случае принципы построения системы регулирования, используемые и в квадрокоптерах, при некоторой систематической ошибке дают вполне приемлемые траектории полета. Приведены результаты моделирования плоского движения летательного аппарата по заданной траектории

**Ключевые слова:** моделирование, плоское движение, управление движением по заданной траектории, беспилотный летательный аппарат

### Введение

В настоящее время особый интерес вызывают летательные аппараты легче воздуха малых размеров. Сверхлегкие материалы, миниатюрная электроника, микродвигатели дают возможность подняться в небо дирижаблям, которые обладают новыми техническими характеристиками. Небольшие аппараты с современными системами управления и навигации представляют в перспективе значительный коммерческий интерес. Эти летательные аппараты имеют несравненно больший потенциал в области беспосадочного пребывания в воздухе по сравнению с беспилотными летательными аппаратами (БЛА) других типов.

Наиболее существенные преимущества: более высокая надёжность и безопасность, неограниченное полётное время (кроме износа оболочки); возможность использования альтернативных источников энергии.

Одними из существенных недостатков, органически присущих дирижаблям, являются высокая парусность и низкая манёвренность. Для оценки этого качества необходимо выполнить моделирование плоского движения летательного аппарата по заданной траектории. При этом большое значение имеет форма дирижабля.

Форма летательного аппарата в виде эллипсоида вращения с двумя симметрично расположенными винтами (рис. 1) имеет сниженную парусность и допускает повышение манёвренности аппарата.

Для изменения направления движения такому дирижаблю достаточно повернуться вокруг собственной оси симметрии без крена за счёт изменения тяги винтов.

Беспилотный летательный аппарат находится в уравновешенном состоянии и не совершает вертикального перемещения.

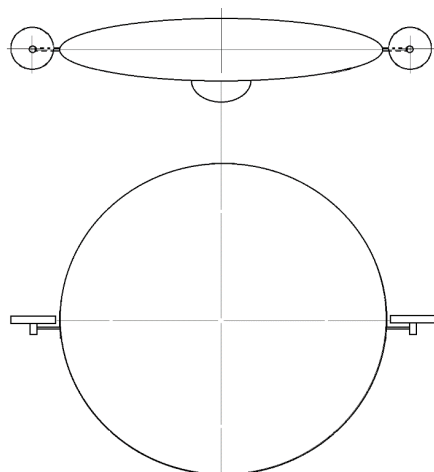


Рис. 1. Схема аппарата

### Уравнения полета

Два винта левый и правый создают тягу

$$F_n = k_n \omega_n^2; \quad F_l = k_l \omega_l^2,$$

где  $k$  – аэродинамический коэффициент винта;  
 $\omega$  – угловая скорость винта.

Суммарная тяга

$$F_T = F_n + F_l = k_n \omega_n^2 + k_l \omega_l^2.$$

Движение центра масс БЛА определяется уравнениями:

$$m \frac{dv_x}{dt} + F_T \cos \varphi = -\frac{C_p S}{2} |\vec{v}| v_x;$$

$$m \frac{dv_y}{dt} + F_T \sin \varphi = -\frac{C_p S}{2} |\vec{v}| v_y,$$

где  $m$  – масса аппарата;

$v$  – скорость по координатам  $x$  и  $y$ ;

$\varphi$  – угол поворота аппарата вокруг центра масс;

$C$  – аэродинамический коэффициент сопротивления воздуха;

$\rho$  – плотность воздуха;

$S$  – площадь сечения аппарата.

Вращение аппарата

$$J_T \frac{d^2 \varphi}{dt^2} = (F_n - F_l) R,$$

где  $J_T$  – момент инерции аппарата относительно

центра масс;

$R$  – радиус приложения сил  $F$ .

Два уравнения связывают положение центра масс со скоростями:

$$\frac{dx}{dt} = v_x; \quad \frac{dy}{dt} = v_y.$$

При этом в качестве тяговых двигателей применяются бесколлекторные двигатели постоянного тока.

Для упрощения уравнений без существенных ошибок используем двигатели постоянного тока (ДПТ); при этом добавляются 4 уравнения ДПТ:

$$J_n \frac{d\omega_n}{dt} = K_n i_n - a\omega_n^2;$$

$$L_n \frac{di_n}{dt} + R_n i_n + K_n \omega_n = U_n;$$

$$J_l \frac{d\omega_l}{dt} = K_l i_l - a\omega_l^2;$$

$$L_l \frac{di_l}{dt} + R_l i_l + K_l \omega_l = U_l,$$

где  $J$  – момент инерции двигателя с винтом;

$\omega$  – угловая скорость ДПТ;

$i$  – ток якоря ДПТ;

$K$  – конструктивный коэффициент каждого двигателя;

$R$  – активное сопротивление обмотки;

$a$  – моментный аэродинамический коэффициент винта;

$U$  – напряжение питания двигателя.

Для управления двигателями используется следящая система по углу поворота. Уравнения следящей системы опустим.

Полет аппарата по заданной траектории имеет определённые ограничения по скорости: чем больше скорость, тем менее управляем аппарат, в отличие от самолета. У квадрокоптера аналогичные ограничения.

Для аппарата диаметром 1 м и массой 110 г при скорости 20 км/ч траектория поворота составляет более десяти метров, однако при определенном сигнале управления радиус поворота значительно уменьшается (рис. 2.)

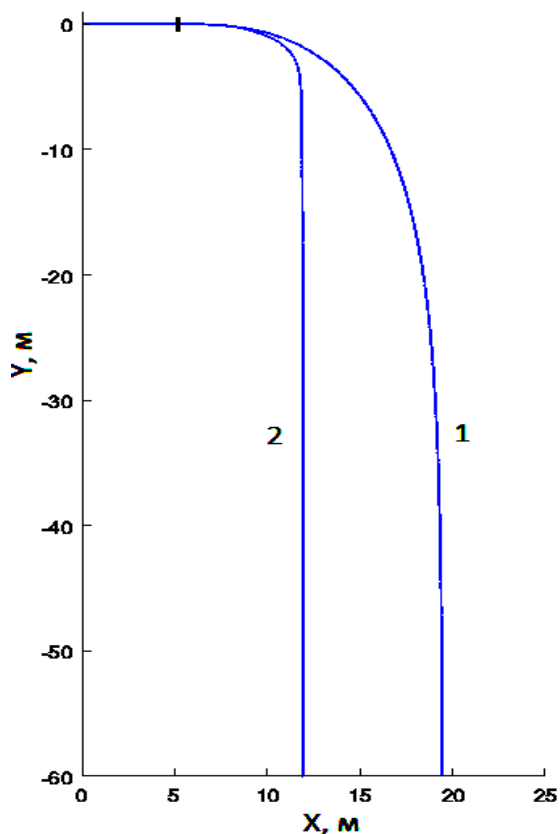


Рис. 2. Траектория летательного аппарата: 1 - простой поворот на 90°; 2 - поворот на 90° при специальном сигнале управления; вертикальная черта - начало поворота

На рис. 3 сигналы управления углом  $\varphi$  и изменение скорости аппарата при повороте.

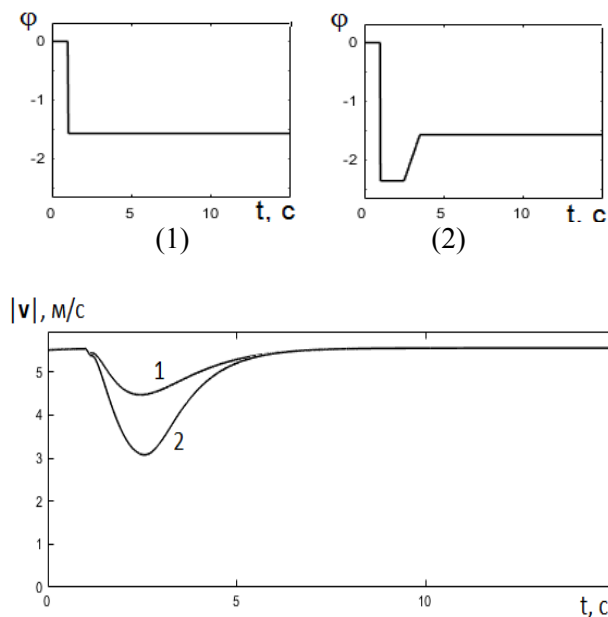


Рис. 3. Сигналы управления 1 и 2 и изменение скорости при повороте при этих сигналах

### Полет по заданной траектории

Полет по заданной траектории в ручном режиме весьма сложная и даже мало осуществимая задача. Современные системы навигации, которые используют бортовые датчики глобального позиционирования (GPS/ГЛОНАСС) и инерциальной навигации, позволяют при некоторой систематической ошибке иметь непрерывные значения координат при перемещении, а, следовательно, скорости и ускорения. Последние особенно зашумлены и для приемлемого результата применяют фильтры Калмана [1]. Как и при управлении квадрокоптером управляющий сигнал складывается из ошибки по координатам, ошибки по скоростям и ошибки по ускорениям [2]. Измерение угла поворота аппарата привязывается к любому приемлемому по точности электронному компасу. Математическая модель БЛА представлена на рис. 4.

Сигналы управления  $Q$  по осям  $x$  и  $y$  включают в себя разности координаты задания (индекс  $z$ ) и координаты обратной связи (индекс  $oc$ ) датчика положения, умноженные на соответствующий коэффициент  $K$ ; аналогично по остальным переменным скорости и ускорения:

$$Q_x = K_{x1}(x_z - x_{oc}) + K_{x2}(\dot{x}_z - \dot{x}_{oc}) + K_{x3}(\ddot{x}_z - \ddot{x}_{oc});$$

$$Q_y = K_{y1}(y_z - y_{oc}) + K_{y2}(\dot{y}_z - \dot{y}_{oc}) + K_{y3}(\ddot{y}_z - \ddot{y}_{oc}).$$

Для работы тяговых двигателей эти сигналы из декартовых координат переводятся в полярные координаты. Формируются сигналы поворота на угол рыскания и полная тяга. На основе этих данных определяются тяговые усилия по координатам  $F_x$  и  $F_y$ . Они необходимы для работы математической модели БЛА.

На рис. 5 приведены результаты моделирования по двум траекториям полета окружность и фигура Лиссажу на скорости 2.5 м/с. Следует отметить, что установившееся движение по окружности практически сливается с заданной траекторией, а в фигуре Лиссажу есть заметные отклонения (занос аппарата), связанные с малым радиусом поворота.

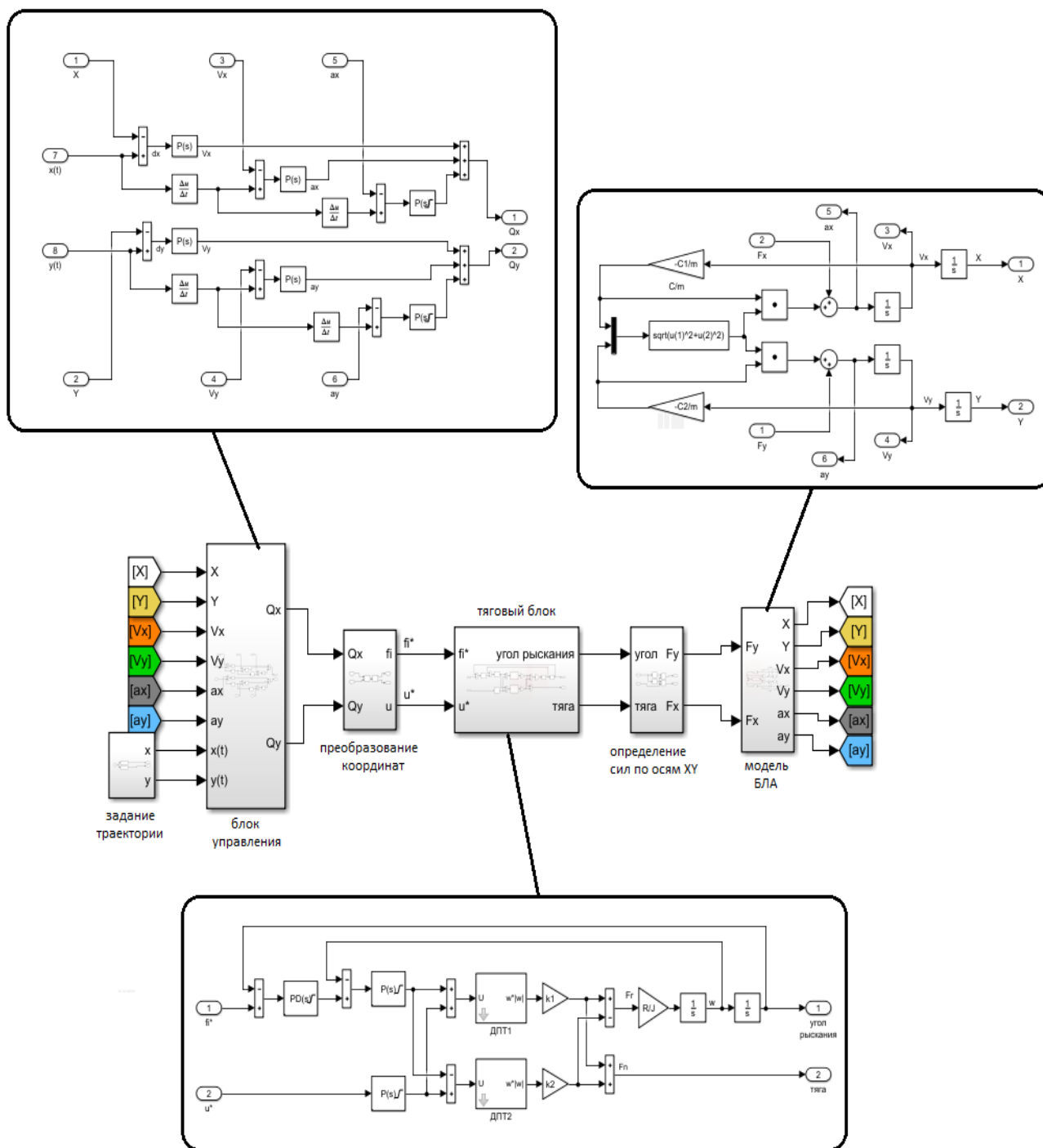


Рис. 4. Модель БЛА для полета по заданной траектории

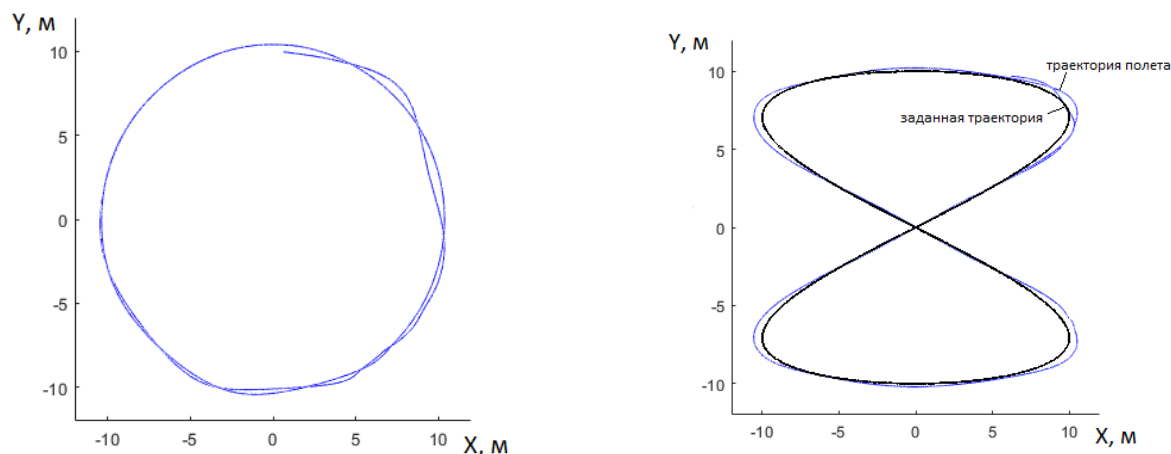


Рис. 5. Траектории полета БЛА: окружность, фигура Лиссажу

Увеличение скорости аппарата несколько увеличивает ошибку при круговом движении и возрастает боковой занос при пролете по траектории Лиссажу, однако есть предельные значения скоростей, когда движение по заданной траектории становится неудовлетворительным. В данном случае рассматривается только плоское движение без использования планирующих свойств диска-эллипсоида. Такое движение несравнимо сложнее рассмотренного и должно исследоваться в специальных программах по моделированию аэродинамики полета. Однако, на низких скоростях, когда подъемная сила крыла незначительная, плоское движение аппарата мало отличается от сложного планирующего и, можно предположить, что управляемость будет даже хуже рассмотренного из-за расположения тяговых винтов. Система регулирования для планирующего полета по сложности выполняемых функций сравнима с полетом самолета, вернее, летающего крыла.

Моделирование плоского движения летательного аппарата легче воздуха необходимо для оценки его маневренности. Результаты моделирования, представленные на рис. 5, показывают, что летательный аппарат дискообразной формы обладает достаточной степенью маневренности, но, как и любой летательный аппарат, имеет ограничения по крутизне траектории движения.

### Заключение

1. Рассмотрено моделирование плоского движения беспилотного летательного аппарата дискообразной формы с положительной плавучестью.
2. Представлены результаты моделирования по двум траекториям полета окружность и фигура Лиссажу на скорости 2.5 м/с.
3. Показаны перспективы применения летательных аппаратов с электрической силовой установкой, обеспечивающей высокую степень управляемости и достаточную степень маневренности, при соблюдении ограничений по крутизне траектории движения и скорости полета.

### Литература

1. Использование фильтра Калмана в системе управления траекторным движением квадрокоптера / С.А. Белоконов [и др.] // Автометрия. 2013. Т. 49. № 6. С. 14-24.
2. Шавин М.Ю. Управляемая динамика квадрокоптера с поворотными роторами // Инженерный журнал: наука и инновации. 2018. Т. 76. № 4. URL: <https://engjournal.ru/articles/1755/1755.pdf> (дата обращения: 23.04.2024)

Поступила 19.03.2024; принята к публикации 08.05.2024

### Информация об авторах

**Фурсов Владимир Борисович** – канд. техн. наук, старший научный сотрудник, ЗАО «МЭЛ» (394006, Россия, г. Воронеж, ул. Красноармейская, 52Д, оф. 405), тел.: +7 (910) 245-19-96, e-mail: fvb273@inbox.ru

**Писаревский Юрий Валентинович** – канд. техн. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), тел.: +7 (473) 243-77-12, e-mail: 2732558@mail.ru

**Ген Жанна Александровна** – старший преподаватель, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), тел.: +7 (473) 243-77-20, e-mail: jeannagen@mail.ru

## FLAT MOTION SIMULATION OF A TWIN-ENGINE LIGHTER-AIR FLIGHT VEHICLE

V.B. Fursov<sup>1</sup>, Yu.V. Pisarevsky<sup>2</sup>, Zh.A. Gen<sup>2</sup>

<sup>1</sup> “MEL” CJSC, Voronezh, Russia

<sup>2</sup>Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

**Abstract:** the article discusses the modeling of the plane motion of a disc-shaped unmanned aerial vehicle with positive buoyancy. Perspective aircraft of this type have solar panels on the surface of the shell and allow the use of a fuel-free power plant, which ensures the operation of the device at altitudes of 20,000 - 22,000 meters. The flying devices that have the ability to operate in hovering mode at a certain point in space during a long flight time allow the use of only electric power plants. Theoretically, the duration of the flight time is determined by the uptime of the batteries. One of the significant disadvantages inherent in airships is high windage and low maneuverability. The disc-shaped shape of the aircraft successfully combines the high energy capabilities provided by the solar battery, reduced windage and allows for increased maneuverability of the device. However, it is known that flying devices of this shape are extremely unstable in flight and exposed to wind loads. The electric power plant has a particularly valuable quality - good controllability. Brushless DC motors are ideal for operation at high altitudes at ambient temperatures as low as 50°C. To control the engines, modern control and navigation systems are used, which stabilize the fundamentally unstable flight. To assess the maneuverability of an airship, it is necessary to simulate the plane motion of the aircraft along a given trajectory. Controlling movement along a given trajectory in manual mode is a rather difficult task. But even in automatic mode, flight along a given trajectory has certain speed restrictions: the higher the speed the less controllable the device, unlike an airplane. In this case, the principles of constructing a control system also used in quadcopters with some systematic error give quite acceptable flight trajectories. The results of modeling the plane motion of an aircraft along a given trajectory are presented

**Key words:** modeling, plane motion, motion control along a given trajectory, unmanned aerial vehicle

### References

1. S.A. Belokon, Yu.N. Zolotukhin, K.Yu. Kotov, A.S. Maltsev, A.A. Nesterov, V.Ya. Pivkin, M.A. Sobolev, M.N. Filippov, Jan A.P. “Using the Kalman filter in a quadcopter trajectory control system”, *Autometry (Avtometriya)*, November 2013, vol. 49 no. 6, pp. 14-24.

2. Shavin M.Yu. “Controllable dynamics of a quadcopter with rotating rotors”, *Engineering Journal: Science and Innovation (Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii)*, 2018, vol. 76, no. 4, URL: <https://engjournal.ru/articles/1755/1755.pdf> (дата обращения: 23.04.2024)

Submitted 19.03.2024; revised 08.05.2024

### Information about the authors

**Vladimir B. Fursov** – Cand. Sc. (Technical), Senior Researcher, MEL CJSC (52D Krasnoarmeyskaya str., Voronezh 394006, Russia), tel.: +7 (910) 245-19-96, e-mail: fvb273@inbox.ru

**Yuri V. Pisarevsky** – Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), tel.: +7 (473) 2437712, e-mail: 2732558@mail.ru.

**Zhanna A. Gen** – senior lecturer, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), tel.: +7 (473) 2437720, e-mail: jeannagen@mail.ru

## ЭНЕРГИЧНЫЕ МЕТОДЫ И ПРОТОКОЛЫ РЕПЛИКАЦИИ В РАСПРЕДЕЛЕННЫХ СИСТЕМАХ И СРЕДАХ

А.Д. Данилов, М.О. Саввин, А.Е. Карачевцев

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

**Анотация:** значительное увеличение объемов данных, генерируемых различными устройствами, датчиками, приложениями и пользователями веб-сервисов и социальных сетей, привело к возникновению задачи перехода к новой архитектуре хранения и обработки данных. Существующие централизованные локальные решения стали неэффективными, а дальнейшее увеличение вычислительных мощностей требовало значительных финансовых вложений. К тому же возникшая необходимость хранения исходных «сырых» данных еще сильнее увеличила потребность в дисковом пространстве. Решение такой проблемы основывается на применении распределенных архитектур, контролируемых специальными системами распределенного хранения и обработки данных. Узлы в таких системах могут состоять из простых компонентов, не всегда обладающих высокой надежностью и отказоустойчивостью. В данной статье авторы показали, что в таких условиях на первый план выходят согласованность данных и устойчивость системы к отказам. Проведенный в статье анализ современных методов и протоколов репликации в распределенных средах показал, что репликация данных является ключевой стратегией для обеспечения надежности и доступности информации в системах, где данные хранятся и обрабатываются на нескольких узлах. Рассмотрена классификация протоколов репликации по двум категориям: стратегии обновления и способу распространения обновлений. В заключение сделан вывод о том, что централизованные подходы к репликации с энергичным распространением обновлений являются на сегодня незаменимым механизмом повышения эффективности функционирования высоконагруженных и распределенных систем

**Ключевые слова:** репликация данных, распределенные вычисления, программно-технические средства, управление транзакциями

### Введение

Репликация в компьютерных системах – это процесс создания и поддержания копий данных, объектов или системных ресурсов в различных точках сети или на разных узлах системы [1]. Основная цель репликации – обеспечить доступность данных, повысить отказоустойчивость и улучшить производительность системы.

В контексте баз данных репликация может использоваться для создания и хранения дубликатов базы данных на нескольких серверах или узлах. Эти дубликаты, или реплики, могут быть размещены в различных физических местах, что позволяет улучшить доступность данных и справляться с ситуациями отказа в работе одного из серверов. Репликация применяется в таких СУБД и фреймворках как MySQL [2], GreenPlum, Apache Hadoop [3,4] и другие.

Проблемой на сегодняшний день является то, что существующие централизованные локальные решения для приведенных выше и многих других СУБД стали неэффективными и требуют значительного увеличения вычислительных ресурсов.

При этом необходимо обеспечивать согласованность данных и устойчивость системы к отказам. Решение такой проблемы и рассмотрено в данной статье.

### Анализ механизма репликации в распределенных системах

Обозначим некоторые из преимуществ использования механизма репликации [5]:

– отказоустойчивость. Репликация позволяет создавать несколько копий данных на различных узлах системы. Если один из узлов выходит из строя или испытывает проблемы, другие реплики могут продолжать обслуживать запросы, обеспечивая непрерывную работу системы;

– улучшение производительности. Распределение запросов между репликами позволяет распараллеливать обработку данных. Это может существенно увеличить пропускную способность системы и снизить задержки при выполнении операций;

– локальный доступ к данным. Реплика может быть размещена ближе к конечным пользователям или в районе, где часто запрашиваемые данные используются чаще всего. Это позволяет сократить время доступа к данным и улучшить отклик системы;

– балансировка нагрузки. Репликация позволяет равномерно распределить нагрузку между различными узлами системы, что помогает избежать перегрузок и обеспечивает более эффективное использование ресурсов.

Однако помимо явных преимуществ, репликация имеет определенные недостатки, свя-

занные в первую очередь с особенностями реализации, распространения реплик, и самое главное, синхронизацией копий. У каждого логического блока данных  $M$  должно существовать заранее определенное число физических копий  $M_1, M_2, \dots, M_n$ , с которыми взаимодействуют клиенты в процессе работы с системой.

При этом, с точки зрения пользователя, все должно выглядеть как взаимодействие с единой версией данных, в которой будут отражены все выполняемые преобразования. В зависимости от правил согласования и обновления данных, можно определить различные подходы к репликации.

Например, могут быть определены конкретные правила существования главной копии, которая обновляется первой и обрабатывает большую часть входящих запросов, может быть выбран один из вариантов распространения обновлений (энергичный или ленивый), определяющий в какой момент изменяются копии, непосредственно не участвовавшие в операции пользователя.

Для определения согласованности данных могут быть применены различные критерии, например, предложенный специально для распределённых систем с репликацией One Copy Serializability (или 1SR [6]). Критерий 1SR является одним из наивысших критериев согласованности реплик в распределённых системах, который гарантирует, что выполнение транзакций на различных копиях данных будет эквивалентно выполнению этих же транзакций на единственной копии.

Другими словами, если бы все транзакции выполнялись последовательно на одной копии данных, результат был бы таким же, как если бы они выполнялись в параллель на разных копиях. В итоге, такой подход позволяет обеспечить согласованность данных в результате внесения обновлений в распределённых системах с репликацией.

Однако больший интерес для нас будут представлять методы и стратегии обновления данных в распределённой среде. Как говорилось выше, протоколы репликации можно разделить на энергичные и ленивые по способу распространения обновлений:

– энергичное распространение обновлений [7, 8]. При таком подходе изменения применяются ко всем репликам в рамках транзакции, и, после ее завершения, все копии будут иметь одно и то же значение. Энергичное распространение обычно гарантирует соблюдение критерия взаимной согласованности, и все реплики в конце обновления идентичны и могут

быть прочитаны без риска возникновения аномалий. Однако такой подход требует выполнения операции записи на всех репликах блока данных (протокол read-one/write-all). Энергичные методы имеют явные преимущества в виде гарантий согласованности и простоты восстановления и распространения данных, но не лишены недостатков, которые объясняются необходимостью обновления всех копий в рамках транзакции. Это приводит к тому, что время выполнения пользовательского запроса будет ограничено возможностями самой медленной машины из тех, которые содержат нужные данные, а также существует риск «зависания» транзакции, в случае, если одна или несколько реплик не отвечают по причине отказа;

– ленивое распространение обновлений. Ключевым отличием от энергичных подходов является обновление только одной реплики в рамках транзакции, после чего она может быть зафиксирована. Распространение на другие узлы происходит асинхронно при помощи транзакций актуализации, содержащих последовательность обновлений завершённой транзакции. Как итог, время ответа на запрос будет значительно меньшим, чем в случае с энергичными методами, но возникает риск несогласованности реплик. Это возможно в том случае, если данные одновременно используются пользователями, расположенными на «крайних» узлах сети. В случае обновления локальной (близкой) копии одним пользователем, изменения могут не успеть распространиться до локальной копии второго пользователя. А, так как транзакция завершена, ничего не мешает ему прочитать и обновить свою копию, в которой еще не отражены произошедшие изменения.

### **Классификация по стратегии распространения обновлений**

В случае если изменения применяются к одной главной копии, а затем распространяются на другие, такой метод распространения является централизованным. Имеется главный узел, в котором непосредственно размещена главная копия, остальные же узлы считаются подчиненными.

Централизованные методы имеют два ключевых преимущества. Во-первых, применение изменений схоже с ленивым распространением обновлений и требует обновления только данных в главной копии.

Во-вторых, присутствие главной обновляемой копии дает уверенность в том, что всегда существует хотя бы одна версия данных, кото-

рая является актуальной и полноценной. Основным недостатком же является повышенная нагрузка на главный узел, который может стать узким местом в системе.

Другим вариантом распространения являются распределенные методы, в которых обновления применяются поочередно сначала к локальной копии, в которой было вызвано обновление, а затем к остальным узлам. Это поз-

воляет распределить нагрузку по сети и повысить эффективность приложений, но порождает риск возникновения несогласованности данных, особенно в случае с ленивыми методами распространения, так как они не используют алгоритмы управления конкурентностью.

Проведенная классификация образует четыре возможные комбинации (табл. 1).

Таблица 1

Классификация протоколов репликации по стратегии и методу распространения обновлений

	Энергичное распространение обновлений	Ленивое распространение обновлений
Централизованные методы	Энергичные централизованные протоколы	Ленивые централизованные протоколы
Распределенные методы	Энергичные распределенные протоколы	Ленивые распределенные протоколы

### Энергичные централизованные протоколы

Сконцентрируемся на энергичных протоколах и их преимуществах перед ленивым распространением обновлений. Исходя из классификации, мы уже можем предположить, что в данном случае операции над данными будут выполняться, в большинстве своем, на главном узле, а транзакция не фиксируется до момента завершения обновления данных на всех подчиненных узлах [9, 10].

Простейший случай – когда имеется главный узел, содержащий главную копию данных, о котором знают все клиентские приложения. В

таком случае все глобальные транзакции обновления передаются непосредственно на главный узел. В главном узле любая операция чтения блока данных  $R(x)$  превращается в операцию чтения главной копии и предварительно захватывает блокировку чтения. Подобным образом, операция записи  $W(x)$  преобразуется в операцию обновления главной копии с предварительной блокировкой записи. После этого главный узел рассылает на подчиненные узлы список произведённых операций, которые должны быть выполнены в том же самом порядке, во избежание конфликтов (рис. 1).

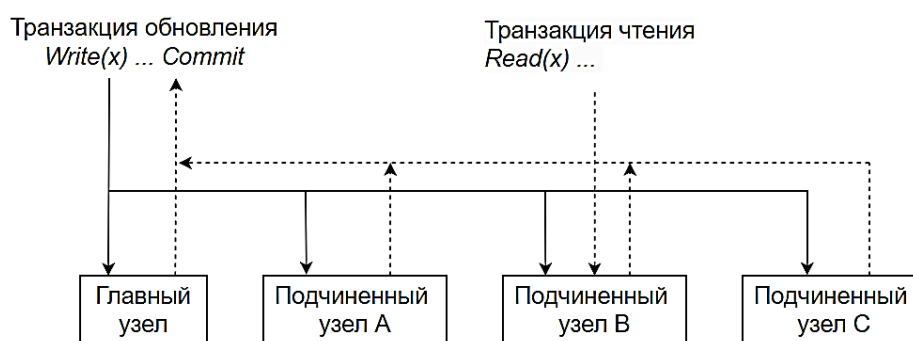


Рис. 1. Порядок выполнения операций в энергичных централизованных протоколах

В случае с централизованными протоколами, операции чтения могут выполняться клиентами практически без ограничений. Такая операция может передаваться на любой узел, и в случае с подчиненными узлами, необходимо запросить блокировку чтения от главного узла. После этого данные могут быть прочитаны ли-

бо на нем, либо на локальном узле клиента, если на нем были произведены все произошедшие ранее обновления. Это позволяет снизить нагрузку на главный узел.

При этом такая архитектура исключает локальные конфликты записи, так как любая запись происходит на главном узле. Другим пре-

имуществом является относительная простота реализации протокола такого вида

### Энергичные распределенные протоколы

В распределенном случае обновления данных могут инициироваться на любом узле. Если

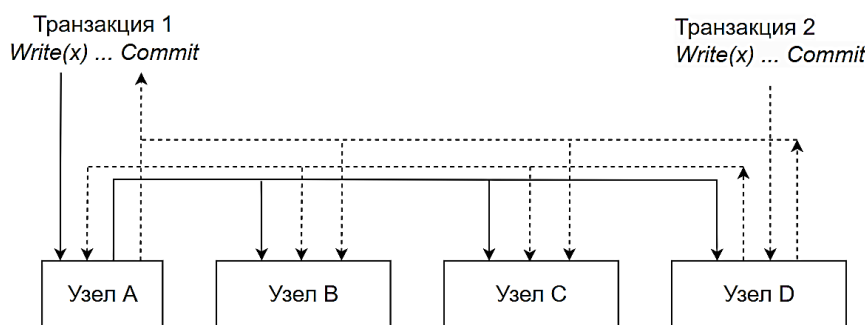


Рис. 2. Порядок выполнения операций в энергичных распределенных протоколах

Так как изменения, подобающе энергичному распространению, фиксируются в рамках транзакции, то процесс чтения в данном протоколе так же прост, как и в централизованном варианте. Проблему составляют только операции обновления, которые могут вызывать конфликтные ситуации.

Для решения таких ситуаций необходимо, чтобы операции записи выполнялись в одинаковом порядке на всех узлах сети, дабы гарантировать согласованность данных. Соответственно, данный протокол выполняет чтение в любой копии и запись во всех копиях в рамках транзакции.

### Заключение

Приведенный в статье анализ показал, что в высоконагруженных и распределенных системах, где данные хранятся и обрабатываются на нескольких узлах, репликация данных является ключевой стратегией для обеспечения надежности и доступности информации.

Применение такого подхода реализует архитектурные решения, позволяющие наиболее эффективно и экономно использовать имеющиеся вычислительные мощности.

Также, за счет создания нескольких копий данных на различных узлах системы и распараллеливания обработки, повышается отказоустойчивость системы, сокращается время доступа к данным, улучшается отклик системы, увеличивается пропускная способность информационных каналов.

ли необходимые данные присутствуют локально, то они изменяются, а затем обновления распространяются на другие реплики в рамках текущей транзакции. Если данные отсутствуют – то запрос переадресуется на другой подходящий узел, который берет на себя выполнение (рис. 2).

### Литература

1. Understanding replication in databases and distributed systems / M. Wiesmann, F. Pedone, A. Schiper, B. Kemme, and G. Alonso // Proceedings. 20th International Conference on, 2000. PP. 464-474.
2. Truica C., Boicea A., Radulescu F. Asynchronous Replication in Microsoft SQL Server, PostgreSQL and MySQL // The 2013 International Conference on Cyber Science and Engineering, 2013. PP. 50-55.
3. Jayalakshmi D., Srinivasan R. An Analytical Model for HDFS Replication Pipeline based on Queuing Theory // International Journal of Applied Engineering Research. 2017. Vol. 12. PP. 15158-15168.
4. Abeam E., Khafagy M., Omara F. A Hadoop Distributed File Systems Replication Approach // Journal of Applied Science. 2022. Vol. 35. PP. 156-174.
5. Singh A., Suryavanshi R. Comparative Study of Concurrency and Replica control protocols in Distributed Environment // Int. J. Appl. Eng. Res (IJAER). 2019. Vol. 14 (2). PP. 329-334.
6. Yadav D., Butler M. Rigorous Design of Fault-Tolerant Transactions for Replicated Database Systems Using Event B // Lecture Notes in Computer Science. 2006 Vol. 4157. PP 343-363.
7. Soe M., Cho Y. Reliable Loan Information System Using Eager Replication // International journal of Advances in Scientific Research and Engineering, 2020. PP. 101-106.
8. Hegazi M., Saini D., Zia K. Moving from Heterogeneous Data Source to Big Data: Interoperability and Integration Issues // International Journal of Advanced Computer Science and Applications, 2019. PP. 207-212.
9. Терехов Д.В., Данилов А.Д., Кравец О.Я. Управление потоками данных в гетерогенных информационных системах специального назначения. Математическое и программное обеспечение. Воронеж, 2021. 156 с.
10. Данилов А.Д., Терехов Д.В. Специфика управления интерактивными компонентами и обновлением информационной системы реального времени // Информационные технологии моделирования и управления. 2021. Т. 125. № 3. С. 223-234.

**Информация об авторах**

**Данилов Александр Дмитриевич** – д-р техн. наук, профессор, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, д. 84), e-mail: danilov-ad@yandex.ru

**Саввин Максим Олегович** – аспирант, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, д. 84), e-mail: savvin.mo@yandex.ru

**Карачевцев Александр Евгеньевич** – аспирант, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, д. 84), e-mail: alex.carachevtsev@gmail.com

**ROBUST REPLICATION METHODS AND PROTOCOLS IN DISTRIBUTED SYSTEMS AND ENVIRONMENTS**

**A.D. Danilov, M.O. Savvin, A.E. Karachevtsev**

**Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia**

**Abstract:** the volume of data generated by different devices, sensors, applications, and users of web services and social networks has significantly increased. This increase has prompted the need to transition to a new architecture for storing and processing data. The existing centralized local solutions have become inefficient, and further increase in computing power required significant financial investments. In addition, the need to store the original "raw" data has further increased the need for disk space. The solution to this problem is based on the use of distributed architectures controlled by special distributed data storage and processing systems. Nodes in such systems may consist of simple components that do not always have high reliability and fault tolerance. In this article, the authors have shown that in such conditions, data consistency and system resilience to failures come to the fore. The analysis of modern replication methods and protocols in distributed environments conducted in the article showed that data replication is a key strategy for ensuring the reliability and availability of information in systems where data is stored and processed on multiple nodes. The classification of replication protocols into two categories is considered: the update strategy and the method of distributing updates. In the end, it is concluded that centralized approaches to replication with eager distribution of updates are currently an indispensable mechanism for improving the efficiency of highly loaded and distributed systems.

**Key words:** data replication, distributed computing, software and hardware, transaction management.

**References**

1. Wiesmann M., Pedone F., Schiper A., Kemme B., Alonso G. "Understanding replication in databases and distributed systems, in Distributed Computing Systems", *Proc. of the 20th International Conference*, 2000, pp. 464-474.
2. Truica C., Boicea A., Radulescu F. "Asynchronous Replication in Microsoft SQL Server, PostgreSQL and MySQL", *The 2013 International Conference on Cyber Science and Engineering*, 2013, pp. 50-55.
3. Jayalakshmi D., Srinivasan R. "An Analytical Model for HDFS Replication Pipeline based on Queuing Theory", *International Journal of Applied Engineering Research*, vol. 12, pp. 15158-15168.
4. Abeam E., Khafagy M., Omara F. "A Hadoop Distributed File Systems Replication Approach", *Journal of Applied Science*, vol. 35, pp. 156-174.
5. Singh A., Suryavanshi R. "Comparative Study of Concurrency and Replica control protocols in Distributed Environment", *Int. J. Appl. Eng. Res. (IJAER)*, 2019, vol. 14 (2), pp. 329-334.
6. Yadav D., Butler M. "Rigorous design of fault-tolerant transactions for replicated database systems using event B", *Lecture Notes in Computer Science*, vol. 4157, pp. 343-363.
7. Soe M., Cho Y. "Reliable Lending Information System Using Eager Replication", *International Journal of Advances in Scientific Research and Engineering*, 2020, pp. 101-106.
8. Hegazi M., Saini D., Zia K. "Moving from Heterogeneous Data Source to Big Data: Interoperability and Integration Challenges", *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, 2019, pp. 207-212.
9. Terekhov D.V., Danilov A.D., Kravets O.Ya. "Management of data flows in heterogeneous information systems for special purposes. Mathematical and software" ("Upravleniye potokami dannykh v geterogennykh informatsionnykh sistemakh spetsial'nogo naznacheniya. Matematicheskoye i programmnoye obespecheniye"), Voronezh, 2021. 156 p.
10. Danilov A.D., Terekhov D.V. "Specifics of managing interactive components and updates of a real-time information system", *Information technologies for modeling and management (Informatsionnyye tekhnologii modelirovaniya i upravleniya)*, 2021, vol. 125, no. 3, pp. 223-234.

Submitted 26.02.2024; revised 08.05.2024

**Information about the authors**

**Alexander D. Danilov** – Dr. Sc. (Technical), Professor, Voronezh State Technical University (84, 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: danilov-ad@yandex.ru

**Maksim O. Savvin** - Postgraduate Student, Voronezh State Technical University (84, 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: savvin.mo@yandex.ru

**Alexander E. Karachevtsev** - Postgraduate Student, Voronezh State Technical University (84, 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: alex.carachevtsev@gmail.com

**СПОСОБЫ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ  
ЛИНЕЙНО-ЧАСТОТНО-МОДУЛИРОВАННЫХ СИГНАЛОВ****Л.А. Сенаторов****Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова,  
г. Ижевск, Россия**

**Аннотация:** исследуются различные подходы к передаче данных с использованием линейно-частотно-модулированных (ЛЧМ) сигналов. Целью работы является исследование способов модуляции и демодуляции ЛЧМ сигналов для выбора наиболее подходящего для случая передачи данных по радиоканалу. Исследованы два основных подхода – передача отдельных битов и передача групп бит для дополнительного расширения спектра. При рассмотрении этих подходов в работе исследуются четыре способа передачи данных с использованием ЛЧМ сигналов: обработка при помощи согласованных фильтров, обработка посредством корреляционного метода, обработка с помощью анализа параметров аналитического сигнала, а также метод поиска разрыва фазы передаваемого сигнала. Для каждого из рассмотренных методов составлена и изучена имитационная модель в MatlabR2018b. Исследование моделей позволило выявить основные преимущества и недостатки применения каждого из способов. Отдельно рассматривается способ формирования ЛЧМ сигнала по спектру с помощью обратного преобразования Фурье с помощью фаз Ньюмана. Наиболее перспективным для использования в системах радиосвязи был признан метод модуляции ЛЧМ сигнала при помощи разрыва фазы. В зависимости от выбранного алгоритма поиска разрыва фазы данный способ может проигрывать в скорости обработки, однако за счет своей алгоритмической простоты и хорошей помехоустойчивости он может успешно применяться в реальных системах связи.

**Ключевые слова:** ЛЧМ, Matlab, обработка сигналов, модуляция, демодуляция

**Введение**

При проектировании радиопередающих устройств помимо параметров линии связи также учитываются электромагнитная совместимость, помехоустойчивость и иные факторы [1-3].

Широкополосные сигналы, в частности ЛЧМ, активно применяются в радиолокации. Кроме того, актуальной проблемой радиотехники является их применение для передачи информации [4,5].

Данная работа является продолжением прошлых исследований авторов на эту тему [6]. Целью настоящей статьи является изучение способов передачи данных с помощью ЛЧМ сигналов и выбор наиболее пригодного для использования в системах радиосвязи.

Для этого были решены следующие задачи:

1. Исследованы некоторые известные способы получения ЛЧМ сигнала для последующей передачи по радиоканалу и обработке на приемной стороне;

2. Составлены имитационные модели систем передачи для каждого предложенного способа;

3. Определены достоинства и недостатки каждого из способов обработки ЛЧМ сигнала.

**Подходы к передаче информации  
с помощью ЛЧМ сигналов**

Существует два подхода передачи информации посредством ЛЧМ сигналов - передача отдельных битов или передача сообщения, состоящего из группы бит, что эквивалентно дополнительному расширению спектра.

В случае передачи отдельных битов формируются два ЛЧМ сигнала с отличающимися параметрами для передачи символов "0" и "1". В качестве такого параметра может использоваться, например, направление изменения частоты ЛЧМ сигнала. Выходной сигнал зависит от передаваемой информационной последовательности и, в зависимости от выбранных параметров, способ формирования сигнала может быть похож на классические частотную или же фазовую модуляции.

Демодуляция принятого сигнала осуществляется за счет измерения параметров и сравнения на решающем устройстве. Далее в работе будут рассмотрены некоторые из способов различения сигналов.

При необходимости способ может быть усовершенствован за счет добавления к нему новых ЛЧМ сигналов, соответствующим различным комбинациям нулей и единиц. Например, если сигнал имеет длинную преамбулу, то модулировать ее по описанной выше схеме было бы нерационально. Для этого можно добавить третий сигнал той же длительности, но с отличающейся скоростью возрастания частоты.

Передачу данных группами можно рассматривать как пример подобного улучшения. В таком случае информационный поток разбивается на группы по N бит. Каждая группа будет преобразована в кодовое слово, размерность которого зависит от требований к скорости передачи данных реальным устройством и числом разрешенных комбинаций. Величина кодового слова определяет сдвиг частоты ЛЧМ

сигнала. За счет сдвига в модулированном ЛЧМ сигнале происходит "разрыв" фазы.

Демодуляция такого сигнала на приемной стороне сводится к определению разрыва фазы и соответствующего ему номера отсчета.

Таким образом, различные способы передачи информации посредством ЛЧМ сигнала будут относиться к одному из описанных подходов. Рассмотрим некоторые из них подробнее.

### Способы передачи данных с помощью ЛЧМ сигналов

Способ первый - обработка ЛЧМ сигнала с помощью согласованных фильтров.

Исследуемая система связи приведена на рис. 1.

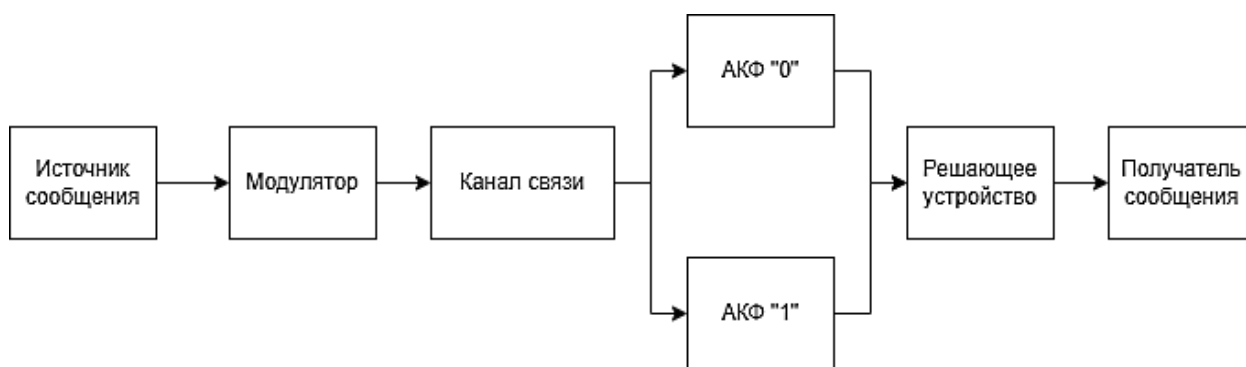


Рис. 1. Способ обработки ЛЧМ сигнала с помощью согласованных фильтров

Источник сообщения формирует входные данные в виде двоичного потока бит. Модулятор преобразует символ в соответствующий ему ЛЧМ сигнал: передаче "0" соответствует ЛЧМ сигнал с восходящей частотой, а "1" - с нисходящей.

Сигнал проходит через канал связи, в котором подвергается воздействию внешних помех, и поступает на приемник. Приемник состоит из двух согласованных фильтров и решающего устройства. В качестве согласованных фильтров применяются автокорреляционные функции (АКФ), настроенные на прием "0" и "1". Отклики АКФ представляют собой степени схожести принятого сигнала с опорными.

Решающее устройство анализирует отклики АКФ и принимает решение о принятом символе по наибольшему из них.

Недостатком предложенного способа являются повышенные требования к техническим характеристикам используемого микроконтроллера. С технической точки зрения, опе-

рация корреляции представляет собой поэлементное произведение двух сигналов с нормировкой на количество отсчетов согласно формуле (1):

$$r_{1,2} = \frac{1}{N} * \sum_0^{N-1} x_1[n] * x_2[n], \quad (1)$$

где N - количество отсчетов,  $x_1$ ,  $x_2$  - элементы первого и второго сигнала, соответственно.

За счет большого количества умножений и делений операция корреляции накладывает повышенные требования к количеству логических ячеек управляющего устройства.

Предложенную модель при желании можно расширить на большее количество сигналов. Например, для случая динамической группировки от 1 до 7 бит, всего понадобится 128 сигналов. Приемная сторона будет иметь АКФ, поочередно "сравнивающий" принятый сигнал с опорными и записывающий результат в буфер. Решающее устройство в таком случае

должно найти максимальный отклик среди результатов буфера. Увеличение количества используемых сигналов приводит к уменьшению различий между отдельными сигналами, из-за чего возрастают требования к качеству фильтрации помех и точности подбора пороговых значений.

Способ второй - обработка ЛЧМ сигнала корреляционным методом.

Способ похож на первый, однако отличия заключаются в способе обработки ЛЧМ сигнала на приемной стороне.

На приемной стороне сигнал дублируется, оба дубликата попадают на коррелятор. Первый сигнал умножается на эталонный сигнал, соответствующий "1", второй - на сигнал, соот-

ветствующий "0". Результирующие сигналы подвергаются трапецевидному численному интегрированию, после чего находится их разница. Результатом операций являются отклики двух корреляционных функций.

Решающее устройство вычитает из отклика "1" отклик "0" и сравнивает полученное значение с пороговым (threshold). Пороговое напряжение принято равным 0, так как вероятность появления символов равновероятна. В случае, если значение больше нуля, принимается решение о том, что был принят сигнал "1". В противном случае принятый сигнал определяется как "0".

Описанный способ обработки проиллюстрирован на рис. 2.

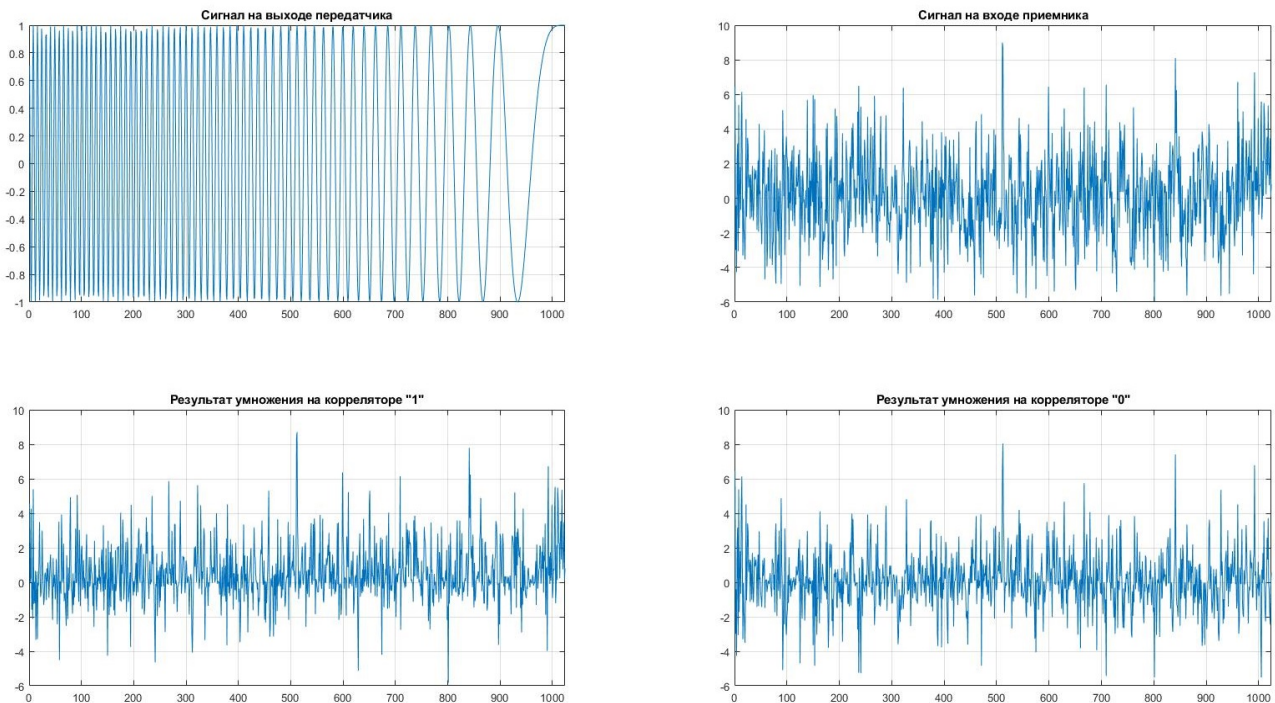


Рис. 2. Обработка ЛЧМ сигнала корреляционным методом

На рис. 2 передатчик сформировал сигнал "1" (нисходящий ЛЧМ, левый верхний график). В результате прохождения через канал связи, в котором действуют помехи с отношением сигнал/шум (ОСШ) - 10 дБ на приемник поступает сигнал, изображенный на правом верхнем графике.

В результате обработки полученного сигнала приемник получает отклики корреляционных функций. При сравнении принятого сигнала с эталонной "1" отклик составил 558,8783, при сравнении с "0" отклик составил 108,1791. Решающее устройство сравнивает разницу откликов с пороговым значением. Так как разни-

ца больше нуля, то принимается решение о том, что был получен сигнал "1".

Предложенный способ лучше всего работает с двоичным сигналом, если группировать биты, то требуется тщательный подбор уровней пороговых напряжений. Увеличение числа пороговых уровней может привести к дополнительным ошибкам из-за помех в канале связи.

Операции умножения и интегрирования требуют много вычислительных ресурсов устройства, что также накладывает повышенные требования к характеристикам микроконтроллеров.

Способ третий - обработка ЛЧМ сигнала методом анализа параметров аналитического сигнала.

Аналитические сигналы широко применяются при цифровой обработке. Они представляют собой набор комплексных отсчетов, которые позволяют оценить амплитуду, фазу, девиацию частоты сигнала. Отслеживая изменение частоты во времени, возможно осуществлять демодуляцию ЛЧМ сигнала.

Аналитический сигнал может быть получен при помощи преобразования Гильберта. Сформируем модулированный ЛЧМ по правилам, описанным в предыдущих двух способах (передаче "1" соответствует нисходящий, а "0" восходящий ЛЧМ сигналы) и исследуем его с помощью аналитического сигнала. Отклик фильтра Гильберта показан на рис. 3.

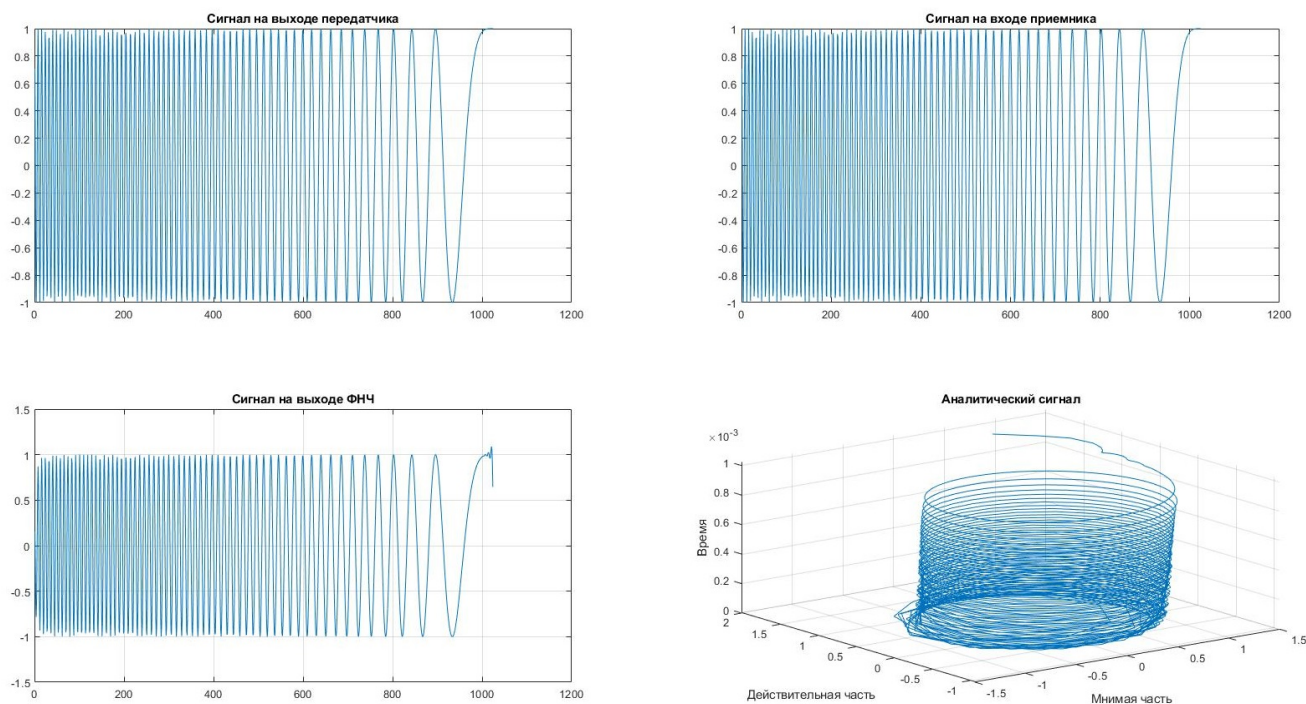


Рис. 3. Обработка ЛЧМ сигнала при помощи анализа аналитического сигнала

Передатчик сформировал сигнал "1", изображенный на левом верхнем графике. Для более наглядной демонстрации принципов анализа, полученный ЛЧМ передается по идеальному каналу связи без воздействия шумов. В результате передачи на входе приемника (правый верхний график) и на выходе входного фильтра нижних частот (левый нижний график) сигналы практически идентичны исходному. Обработка на фильтре Гильберта позволяет получить синфазную и квадратурную составляющие. Комплексное представление такого сигнала показано на правом нижнем графике. Из него можно заметить, что сигнал изменяется по спиралевидной траектории. Сигнал "1" нисходящий, его аналитический сигнал также является нисходящим. Сравнивая значения первого и последнего отсчетов действительной части можно

определить направление изменения частоты и соответствующий ему символ.

Предложенный способ может использоваться и в случае передачи бит группами. Для этого необходимо каждой группе бит назначить собственный уникальный закон изменения частоты. При демодуляции необходимо вычислить скорость изменения частоты за единицу времени и на основании вычисленной скорости принять решение о принятом символе. Наилучший способ изменения параметров сигнала должен быть определен экспериментально.

Предложенный способ чувствителен к шумам в канале связи и требует качественной фильтрации на входе приемника перед обработкой, иначе анализ результирующего комплексного сигнала будет затруднен. Данное явление продемонстрировано на рис. 4.

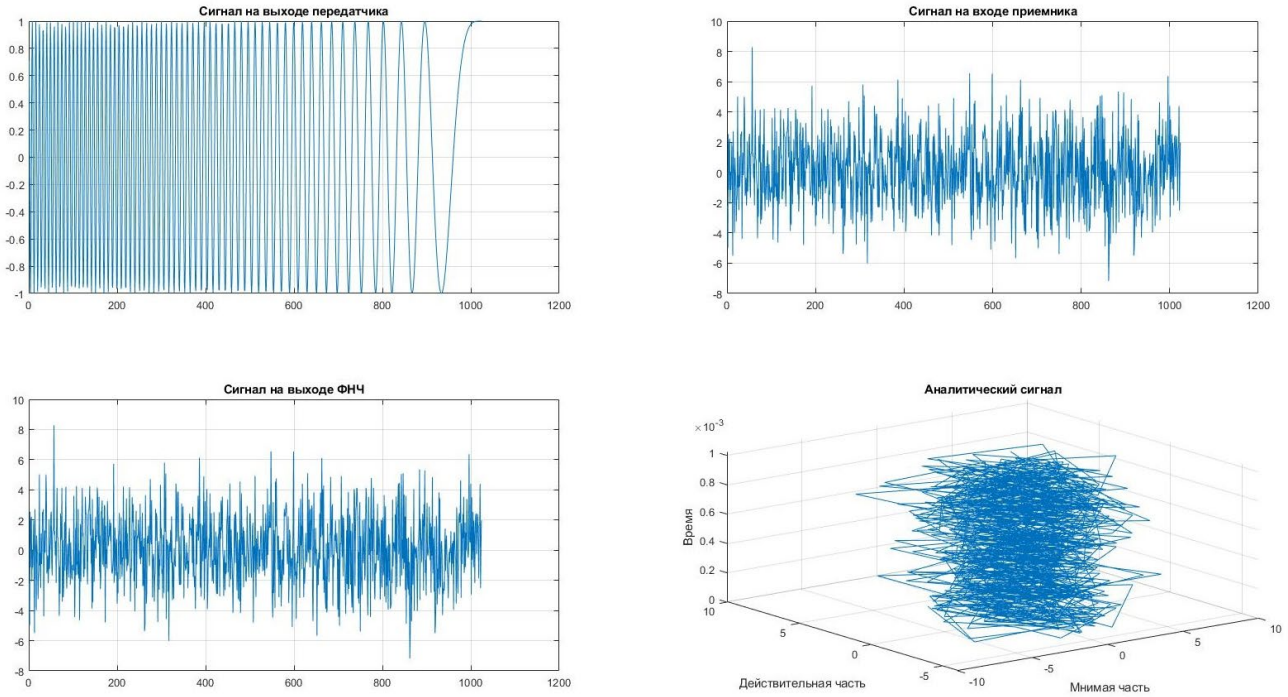


Рис. 4. Обработка ЛЧМ сигнала при помощи анализа аналитического сигнала (недостаточная фильтрация полученного сигнала)

На рис. 4 с сигналом "1" происходят преобразования, аналогичные преобразованиям на рис. 3. Однако в этот раз сигнал при передаче подвергается воздействию шумов с ОСШ -10 дБ, а на входе приемника установлен фильтр нижних частот с некорректно подобранными частотами среза и задержания.

В результате комплексный аналитический сигнал более не является спиралевидным. График представляет собой ломаную кривую с хаотично изменяющимися параметрами, что вли-

яет на способность безошибочного определения принятого символа. При передаче без шумов моделирование позволяло безошибочно определить направление изменения частоты. В случае некачественной фильтрации минимально возможная измеренная вероятность ошибки составила 0,59.

Способ четвертый - обработка ЛЧМ сигнала с помощью поиска разрыва фазы.

Исследуемая система связи показана на рис. 5.



Рис. 5. Обработка ЛЧМ сигнала с помощью разрыва фазы

Источник сообщения формирует входные данные в виде двоичного потока бит, которые затем конвертируются в десятичное кодовое слово. Модуляция ЛЧМ сигнала осуществляется сдвигом части ЛЧМ сигнала из конца в начало. Номер отсчета, с которого начинается сдвиг, может быть вычислен согласно формуле (2):

$$shift = \frac{(KC * f_s)}{BW}, \quad (2)$$

где  $KC$  - кодовое слово;  $f_s$  - частота дискретизации, Гц;  $BW$  - ширина полосы сигнала, Гц.

Частота дискретизации и ширина полосы сигнала заранее известны, поэтому номер отсчета зависит только от полученного кодового слова. Заметим, что частоту дискретизации и ширину полосы необходимо выбирать таким образом, чтобы номер отсчета был целым числом, меньшим, чем количество отсчетов в сигнале.

Модулированный сигнал претерпевает изменения в канале связи и попадает на прием-

ник, где должен быть обработан. Сначала сигнал попадает на гетеродин, в котором за счет умножения принятого сигнала на сигнал, обратный исходному немодулированному ЛЧМ сигналу, осуществляется перенос на нулевую частоту.

Результирующий сигнал передается на блок быстрого преобразования Фурье (БПФ) для получения частотных компонент. Для

определения переданного символа по этим компонентам необходимо найти отсчет, соответствующий максимальному отклику БПФ.

После вычисления номера отсчета, его индекс передается на решающее устройство. Решающее устройство сравнивает индекс с базой сигнала и определяет принятое кодовое слово. Изменения, происходящие с сигналом при обработке, проиллюстрированы на рис. 6.

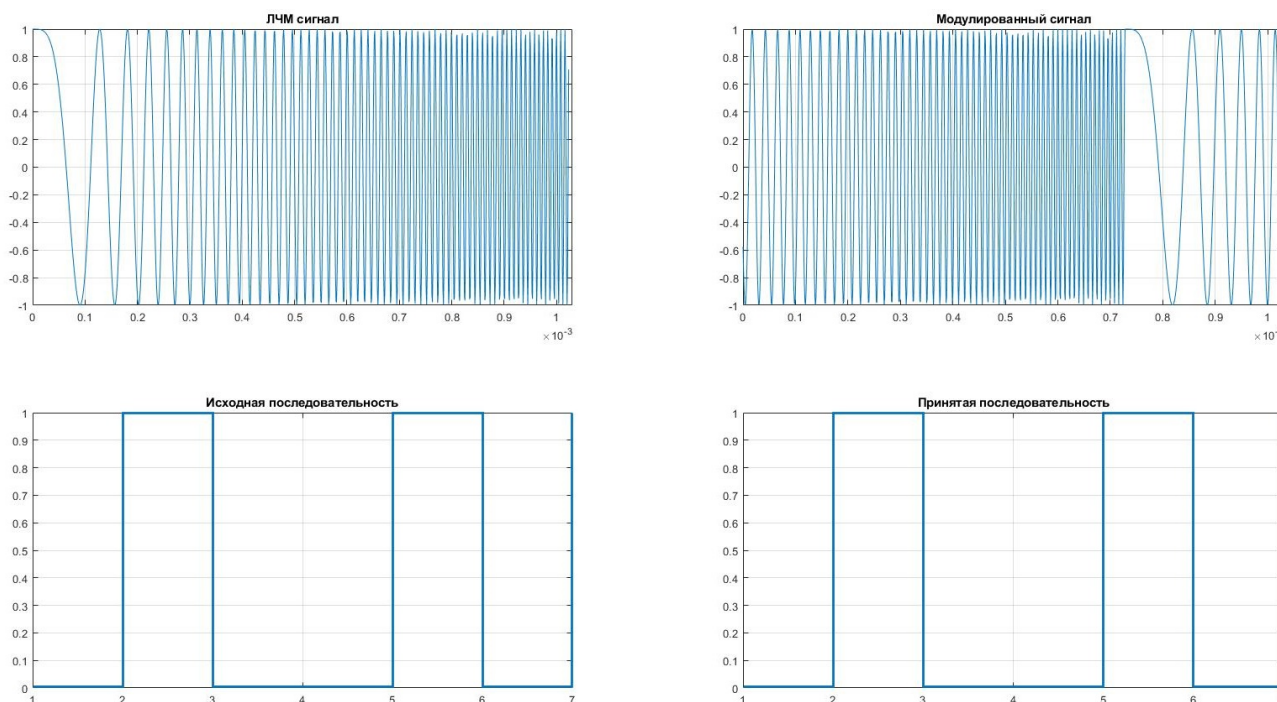


Рис. 6. Модуляция ЛЧМ сигнала с помощью разрыва фазы

Быстродействие модели можно повысить за счет модификации методики поиска разрыва. Номер сдвигаемого отсчета лежит на отрезке  $[0:2^N-1]$ , где  $N$  - количество группируемых в кодовое слово бит, причем  $(2^N-1)$  меньше, чем количество отсчетов в сигнале. Это означает, что разрыв должен находиться на одном из отсчетов на отрезке  $[0: 2^N]$  и обработка оставшихся отсчетов не имеет смысла.

Подобный способ модуляции и демодуляции ЛЧМ сигнала применяется в технологии LoRa. В реальных устройствах модуляция ЛЧМ сигнала осуществляется за счет сдвига в законе изменения частоты сигнала.

Закон изменения частоты в течение передачи символа определяется формулой (3):

$$\tau = \frac{2^{SF}}{BW}, \quad (3)$$

где  $\tau$  - длительность символа, с;  $SF$  - коэффициент расширения спектра.

Передачики LoRa в России могут работать с полосой 125 кГц. Коэффициент расширения спектра может быть равен 7...12. Таким образом, можно считать, что всего доступно 6 режимов передачи. Параметры режимов передачи представлены в табл. 1. Соответствующие каждому режиму законы изменения частоты сигналов изображены на рис. 7.

Таблица 1  
Скорость изменения частоты ЛЧМ сигнала для различных режимов работы протокола LoRa

SF	BW, кГц	Длительность символа, с	Предельные скорости передачи, бит/с
7	125	0,001	3417,97 - 6835,94
8		0,002	1953,13 - 3906,25
9		0,0041	1098,63 - 2197,27
10		0,0082	610,35 - 1220,7
11		0,0164	335,69 - 671,39
12		0,0328	183,11 - 366,21

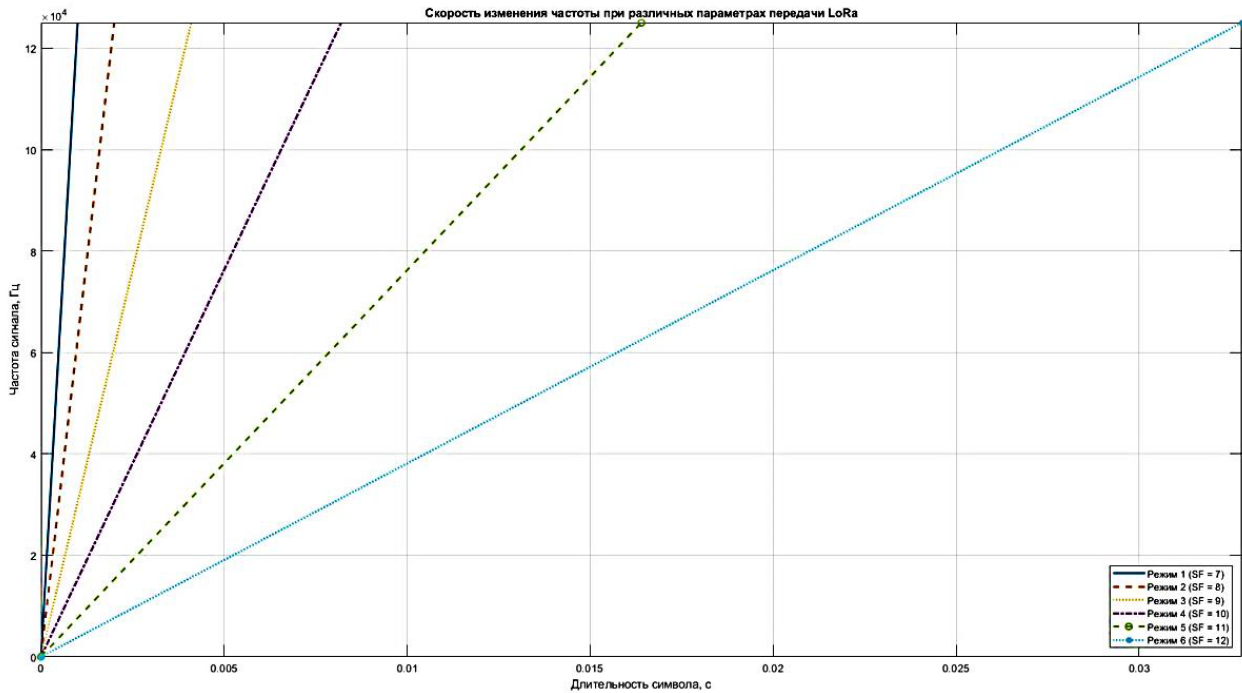


Рис. 7. Скорость изменения частоты ЛЧМ сигнала для различных режимов работы протокола LoRa

Стоит отметить, что существует еще один способ формирования ЛЧМ сигнала, подробно рассмотренный в работах [7, 8]. Способ подразумевает формирование ЛЧМ сигнала по спектру с помощью обратного преобразования Фурье. Спектр формируется с помощью фаз Ньюмана. Данный метод похож на формирование сигналов OFDM и может быть пригоден для решения задачи модернизации существующей системы передачи OFDM-сигналов.

### Заключение

Были исследованы четыре способа передачи данных при помощи ЛЧМ сигнала. Каждый из них обладает рядом преимуществ и недостатков. Для использования в системах связи наибольший интерес представляет метод модуляции и демодуляции при помощи разрыва фазы сигнала. Были выделены следующие достоинства способа:

1) алгоритм модуляции и демодуляции несложный, достаточно легко может быть реализован в реальном устройстве. Особое внимание при разработке стоит уделять блоку БПФ, так как его структура оказывает значительное влияние на требования к используемым микроконтроллерам, а также скорость обработки принятого сигнала.

2) среди рассмотренных способов, метод модуляции при помощи разрыва фазы сигнала наименее подвержен искажениям от помех в

канале связи. Сигнал ЛЧМ с таким видом модуляции может быть передан с высокой степенью достоверности при ОСШ близком к 0 дБ или менее [6].

В пользу данного способа также говорит успешное его применение в технологии LoRa. Отметим при этом, что данная технология предназначена для низкоскоростного обмена данными между устройствами, необходимо определить, пригоден ли способ для передачи данных в каналах связи со скоростями 9,6 - 19,2 кбит/с.

Предложенные в статье положения имеют значение для использования в практике разработки радиотехнических систем специального назначения. Полученные результаты могут быть использованы в качестве теоретического материала для студентов технических направлений, обучающихся по специальностям «Радиотехника» и «Проектирование радиоэлектронных устройств», или при выполнении ОКР и НИОКР.

### Литература

1. Апурин А.А. Система передачи информации с повышенной структурной скрытностью сигналов // ПЕРСПЕКТИВА-2019. Материалы VIII Всероссийской молодежной школы-семинара по проблемам информационной безопасности. Таганрог: "Лукоморье", 2019. С. 271-275.
2. Тихонов С.С., Кудрявцев А.М., Дворников С.В. Энергетическая скрытность сигналов ППРЧ, сформиро-

ванных в базисах функций сплайн-характеров // Информатика и космос. 2017. №2. С. 35-41.

3. Saarnisaari, Harri, Vartiainen, Johanna. Signal detection with spectrum windows // *Heliyon*. 2022. No.8. PP. 1-8.

4. Михайлов Р.Л. Описательные модели систем спутниковой связи как космического эшелона телекоммуникационных систем специального назначения. Монография. СПб: Научные технологии, 2019. 150 с.

5. Новожилов О.П. Схемотехника радиоприемных устройств. 2-е изд. М.: Юрайт, 2021. 257 с.

6. Сенаторов Л. А., Хворенков В. В., Савельев А. В. Оценка влияния параметров сложных сигналов на степень энергетической скрытности // Вестник Ижевского государственного технического университета имени М. Т. Калашникова. 2022. Т. 25. № 3. С. 62–73.

7. Fazel K., Kaiser S. Multi-carrier and spread spectrum systems: from OFDM and MC-CDMA to LTE and WiMAX. 2nd ed., 2008. PP. 174-187.

8. Rohling H. OFDM Concepts for Future Communication Systems. Springer-Verlag. Berlin, Heidelberg, 2011. PP. 125-134.

Поступила 31.01.2024; принята к публикации 07.05.2024

#### Информация об авторе

**Сенаторов Лев Алексеевич** – аспирант, Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова (426069, Россия, г. Ижевск, ул. Студенческая, д. 7), e-mail: lev.senatoroff@yandex.ru

## METHODS OF DATA TRANSMISSION USING LINEAR FREQUENCY MODULATED SIGNALS

L. A. Senatorov

Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk, Russia

**Abstract:** various approaches to data transmission using linear frequency modulated (chirp) signals are studied. The purpose of the work is to study methods of modulation and demodulation of chirp signals to select the most suitable one for the case of data transmission over a radio channel. The author has explored two main approaches - the transmission of individual bits and the transmission of groups of bits for additional spectrum expansion. When considering these approaches, the work examines four methods of transmitting data using chirp signals: processing using matched filters, processing using the correlation method, processing using analysis of the parameters of the analytical signal, as well as a method for searching for a phase break in the transmitted signal. For each of the considered methods, a simulation model was compiled and studied in Matlab R2018b. The study of models made it possible to identify the main advantages and disadvantages of using each method. Separately, we consider the method of generating a chirp signal from the spectrum using the inverse Fourier transform using Newman phases. The method of modulating a chirp signal using a phase break was recognized as the most promising for use in radio communication systems. Depending on the chosen algorithm for searching for a phase break, this method may lose in processing speed, however, due to its algorithmic simplicity and good noise immunity, it can be successfully used in real communication systems

**Key words:** chirp signals, Matlab, signal processing, signal modulation, signal demodulation

#### References

1. Apurin A.A. "Information transmission system with increased structural signal secrecy", *PERSPEKTIVA-2019*, Materials of the VIII All-Russian Youth School-Seminar on Information Security Issues, Taganrog, Lukomorye, 2019 pp. 271-275.

2. Tikhonov S.S., Kudryavtsev A.M., Dvornikov S.V. "Energy concealment of the signals of FHSS formed in the bases of spline-characters functions", *Information and Space (Informatcia i cosmos)*, 2017, no. 2, pp. 35-41.

3. Saarnisaari Harri, Vartiainen Johanna "Signal detection with spectrum windows", *Heliyon*, 2022, no. 8, pp. 1-8.

4. Mihaylov R.L. "Descriptive models of satellite communication systems as a space echelon of telecommunication systems for special purposes" ("Opisatel'nyye modeli sistem sputnikovoy svyazi kak kosmicheskogo eshelona telekommunikatsionnykh sistem spetsial'nogo naznacheniya"), monograph, Saint Petersburg, Naukoyemkie tehnologii, 2019, 150 p.

5. Novozhylov O.P. "Circuitry of radio receivers" ("Skhemotekhnika radiopriyemnykh ustroystv", 2nd ed., Moscow, Yurait, 2021, 257 p.

6. Senatorov L.A., Khvorenkov V.V., Savelyev A.V. "Assessment of Complex Signal Parameters Effect on the Energy Concealment Degree", *The Bulletin of Kalashnikov Izhevsk State Technical University (Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova)*, 2022, vol. 25, no. 3, pp. 62-73.

7. Fazel K., Kaiser S. "Multi-carrier and spread spectrum systems", *OFDM and MC-CDMA to LTE and WiMAX*, 2nd ed., 2008, pp. 174-187.

8. Rohling H. "OFDM Concepts for Future Communication Systems", *Springer-Verlag Berlin Heidelberg*, 2011, pp. 125-134.

Submitted 31.01.2024; revised 07.05.2024

#### Information about the author

**Lev A. Senatorov** - Postgraduate Student, Kalashnikov Izhevsk State Technical University (7 Studencheskaya str., Izhevsk 426069, Russia), e-mail: lev.senatoroff@yandex.ru

## ДИЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ АНТЕННА ВЫТЕКАЮЩЕЙ ВОЛНЫ С ПОПЕРЕЧНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ

А.В. Останков, Д.Ю. Крюков

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

**Аннотация:** антенны вытекающей волны получили широкое распространение, благодаря относительно простой конструкции, малым поперечным размерам, высокому коэффициенту полезного действия. Диэлектрические периодические антенны вытекающей волны, преобразующие замедленную поверхностную волну диэлектрического волновода в пространственную излучаемую волну с помощью периодической решётки, при одностороннем возбуждении используются в режиме наклонного излучения. Вместе с тем в ряде случаев предпочтителен режим поперечного излучения. Однако реализация такого режима сопряжена с катастрофическим ухудшением излучательной способности из-за брэгговской дифракции. В работе рассмотрены способы устранения эффекта нормали. Применительно к антенне с излучающим раскрывом в виде планарного диэлектрического волновода, нагруженного периодической гребёнчатой решёткой, реализован способ введения на периоде дополнительной канавки на удалении четверти длины волны от основной канавки. Установлено, что при появлении на периоде дополнительной канавки, эквивалентной по размерам основной канавке, приращение излучательной способности антенны не столь существенно. Предложены два варианта увеличения коэффициента полезного действия антенны с модифицированным раскрывом за счёт оптимизации положения дополнительной канавки относительно основной или подбора глубины дополнительной канавки. Установлено, что приращение излучательной способности и эффективности излучения антенны вытекающей волны при оптимизации глубины дополнительных канавок выше, чем в случае подбора расстояния между дополнительными и основными канавками. Результаты получены на основе электродинамического моделирования, реализованного на основе авторской проекционной модели, получившей широкое признание

**Ключевые слова:** диэлектрическая антенна, гребёнчатая решётка, канавка, режим поперечного излучения, излучательная способность, коэффициент полезного действия

### Введение

Антенны вытекающей волны (АВВ) появились в середине XX века. Именно тогда была создана АВВ в виде прямоугольного волновода с продольной щелью, перпендикулярной линиям поверхностного тока и обладающей длиной, значительно превышающей длину излучаемой волны [1]. С тех пор эта область антенной техники устойчиво развивалась.

Существующие к настоящему времени конструкции АВВ можно разделить на два вида: однородные и периодические [2,3]. У первого вида АВВ распределительно-излучающая система в виде частично закрытой линии передачи содержит поддерживающую быструю волну однородную продольную направляющую структуру или периодическую решётку с периодом, много меньшим длины излучаемой волны, которые способны переизлучать основную моду линии передачи [3-7]. Излучение такой АВВ создаётся в направлении «вперед» от нормали к раскрыву – по направлению передачи быстрой волны в линии [4,8]. В основу периодической АВВ положена передающая линия с

замедленной основной модой или пространственной гармоникой, возникающей в процессе рассеяния волны возбуждения на периодической решётке распределительно-излучающей системы [9-14]. При этом направление излучения, как правило, соответствует отклонению от нормали «назад», т.е. противоположно распространению волны возбуждения.

За последние десятилетия создано большое число низкопрофильных конструкций периодических АВВ, отличающихся, прежде всего, простотой исполнения (например, [15-19]). АВВ являются перспективными направленными антеннами для коротковолновой части сантиметровых волн, а также миллиметровых и субмиллиметровых волн [20-23], поскольку, помимо высокой направленности, они способны гарантировать коэффициент полезного действия (КПД), превышающий (90 - 95) %.

В основу типовой конструкции периодической АВВ положена линия передачи, чаще всего, открытого типа, включающая периодическую (квазипериодическую) решётку – систему неоднородностей на пути следования волны возбуждения. Система неоднородностей с периодом, соизмеримым с длиной волны излучения, обеспечивает пространственное

преобразование замедленной волны возбуждения, поддерживаемой линией, в излучаемую волну. Реализация направляющей структуры в виде диэлектрического волновода является одним из предпочтительных вариантов для создания АВВ [8-11,13,15,16,18,19,22]. Заметим, что ещё более низкопрофильным вариантом конструктивного исполнения линии передачи является ныне весьма распространенная структура в виде SIW (substrate integrated waveguide) [24-27]. Однако реализация линии по SIW-технологии приводит к дополнительным тепловым потерям в диэлектрике и проводящих стенках, ограничению уровня излучаемой мощности, а также сопровождается усилением частотной зависимости углового положения главного лепестка диаграммы направленности (ДН), что является недостатком АВВ с фиксированным в пространстве направлением излучения. Использование в АВВ передающей линии вида HMSIW (half-mode SIW) [28-32] позволяет снизить тепловые потери, при этом сохраняется повышенная зависимость от частоты направления максимального излучения. В АВВ с поверхностной псевдоплазмон-поляритонной волной используется волновод, реализованный на основе метаматериала [33-35]. Являясь компактными и низкопрофильными, отдельные варианты реализации таких АВВ характеризуются относительно высоким КПД и возможностью частотного сканирования ДН.

Решётка неоднородностей вблизи или на поверхности диэлектрического волновода может быть выполнена в виде продольных или поперечных проводящих лент [3,8,11,16,19], канавок в волноводе или проводящем экране прямоугольного или другого профиля, а также сквозных отверстий [8,10,11,13,15,18,22] и т.д. Каждая из указанных неоднородностей линии передачи обладает своими преимуществами и недостатками. Проводящие ленты могут быть выполнены с использованием технологий обработки фольгированных диэлектрических материалов. Однако из-за их расположения непосредственно на поверхности диэлектрического волновода тепловые потери в АВВ могут возрастать. В решётках из канавок в диэлектрическом волноводе или металлическом экране, выведенном на периферию поля поверхностной волны, этот недостаток не так серьёзен. Однако техническая реализация канавок требует операций высокоточной механической обработки, что усложняет изготовление излучающей системы АВВ, особенно на крайневых частотах.

Возбуждение распределительно-излучающей системы периодической АВВ может быть односторонним, двухсторонним и центральным [18,36,37]. Преимущество односторонней схемы возбуждения заключается в простоте её конструкции. Чем сложнее схема питания излучающего раскрыва, тем больше потери в АВВ на сверхвысоких и крайневых частотах [8]. При двухстороннем возбуждении распределительно-излучающей системы диэлектрической АВВ из-за возрастания уровня бокового излучения требуется применение специальных мер [38]. Схема с возбуждением из центра предполагает наличие электромагнитного затенения в центре излучающего раскрыва, что также ухудшает направленные свойства АВВ [18,39].

Односторонняя схема возбуждения излучающего раскрыва АВВ предполагает использование режима наклонного излучения, при котором направление максимального излучения отклонено от нормали к раскрыву на  $10-20^\circ$ . Действительно, при излучении строго в поперечном направлении (по нормали к раскрыву), наблюдается эффект нормали, обусловленный брэгговской дифракцией [8,9,37,40]. Проявление эффекта заключается в значительном увеличении амплитуды отражённой волны в линии передачи. В результате происходит частичная или полная компенсация волны возбуждения отраженной от раскрыва волной и излучательная способность АВВ значительно падает. В тоже время режим работы периодической АВВ с излучением по нормали во многих случаях предпочтителен, например, в антеннах с фиксированным направлением излучения при реализации радиорелейных линий прямой видимости, радиолучевых периметральных охранных систем, в антеннах со сканированием ДН – для устранения разрыва сектора сканирования при поперечном излучении.

В связи с необходимостью устранения (ослабления) дифракции Брэгга (эффекта нормали) разработано несколько способов применительно к периодическим АВВ с односторонним возбуждением распределительно-излучающей системы. Самым простым способом ослабления эффекта нормали является метод, при котором строгая периодичность распределительно-излучающей системы АВВ устраняется за счёт продольной вариации ключевого геометрического параметра неоднородности [41-42].

Другой способ повышения излучательной способности (коэффициента полезного действия, КПД) АВВ при одностороннем возбуж-

дении заключается в разбиении (фрагментации) решётки неоднородностей на идентичные под-решётки и численной оптимизации расстояния между ними [43-46].

Третий способ, применимый к периодическим АБВ на основе SIW- и HMSIW-структур, заключается в использовании композитных право- и левосторонних структур [29,31,47-49]. Он предполагает предварительную оптимизацию (настройку) по частоте дисперсионной характеристики элементарной ячейки с неоднородностью в пределах периода, например, в виде двойного комплементарного кольцевого резонатора с прорезью [29].

При четвертом способе на расстоянии четверти длины волны в линии передачи от основной неоднородности периода решётки реализуется дополнительная неоднородность, как правило, эквивалентная по размерам основной [16, 23,50-52]. Вследствие этого в режиме брэгговской дифракции волна, отражённая от совокупности дополнительных неоднородностей, окажется противофазной волне, отражённой от решётки основных неоднородностей. Будучи противофазными, отражённые волны частично или полностью компенсируют друг друга. В результате излучательная способность АБВ в направлении нормали к излучающему раскрыву может существенно возрасть.

Цель работы – применительно к режиму поперечного излучения подтвердить возможность значительного увеличения коэффициента полезного действия диэлектрической периодической АБВ с односторонним возбуждением излучающего раскрыва (рис. 1) в виде планарного диэлектрического волновода (поз. 1), нагруженного гребёнчатой решёткой с канавками (поз. 2), за счёт введения на периоде решётки дополнительной канавки.

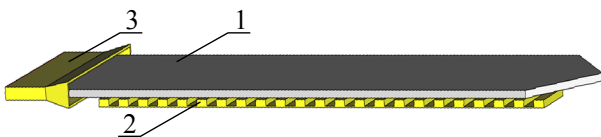


Рис. 1

**Постановка и метод решения задачи**

Электродинамическая схема рассматриваемой диэлектрической периодической АБВ показана на рис. 1, а модельная геометрия излучающего раскрыва в поперечном сечении – на рис. 2.

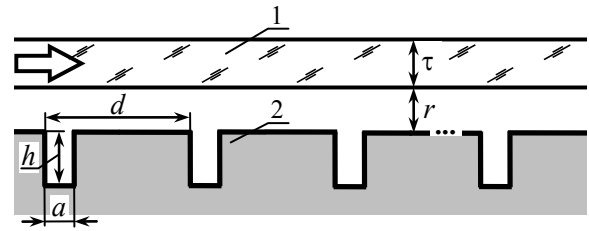


Рис. 2

Излучающий раскрыв антенны содержит планарный диэлектрический волновод (поз. 1). Материал волновода обладает относительной диэлектрической проницаемостью  $\epsilon_r$ . На фиксированном расстоянии  $r$  от волновода толщиной  $\tau$  размещена гребёнчатая решётка с периодом  $d$ , включающая  $N$  одинаковых прямоугольных канавок шириной  $a$  и глубиной  $h$ . В режиме излучения для возбуждения диэлектрического волновода Е-волной низшего типа используется рупорно-линзовое устройство (поз. 3). Ширина излучающего раскрыва (диэлектрического волновода и гребёнчатой решётки) составляет несколько длин волн.

Из теории и практики периодических АБВ известно [9,37,53,54], что наиболее эффективное излучение вертикально-поляризованных радиоволн обеспечивается расположенным в горизонтальной плоскости раскрывом с канавками шириной, меньшей половины длины замедленной волны Е-типа ( $\lambda_B/2$ ), поддерживаемой диэлектрическим волноводом и возбуждающей решётку. Пусть ширина основной канавки меньше  $1/4$  длины замедленной волны ( $\lambda_B/4$ ), тогда дополнительную канавку (рис. 3), идентичную основной, удаётся разместить в пределах периода на расстоянии  $\lambda_B/4$  от основной канавки. Необходимо заметить, что на величину замедления, отличающую  $\lambda_B$  от длины излучаемой волны  $\lambda_0$ , оказывают влияние параметры  $\tau$  и  $\epsilon_r$  планарного диэлектрического волновода, величина зазора  $r$  между волноводом и гребёнчатой решёткой. Кроме того, при сильной связи диэлектрического волновода с решёткой на величину замедления могут влиять и геометрические размеры канавок [37,54,55]. Из теории периодических АБВ известно, что направление максимального излучения определяется порядком пространственной гармоники спектра рассеяния ( $n = -1$ ), периодом, а также соотношением между  $\lambda_0$  и  $\lambda_B$  [8,9,37]:

$$\sin\Theta_m = \frac{\lambda_0}{\lambda_B} + n \cdot \frac{\lambda_0}{d} \tag{1}$$

Тогда длину замедленной волны возбуждения  $\lambda_B$  можно оценить как период решётки, при котором исходная конфигурация раскрыва (рис. 2) обеспечивает излучение строго в поперечном направлении ( $\Theta_m = 0$ ).

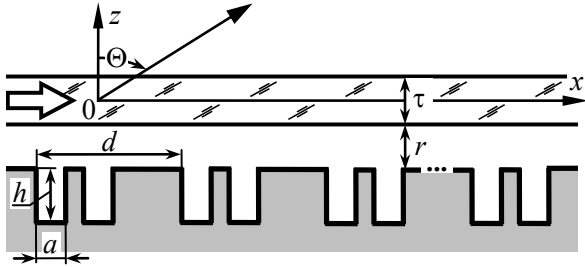


Рис. 3

Для анализа диэлектрической периодической АБВ целесообразно воспользоваться одним из известных вычислительных алгоритмов, разработанных на основе проекционных методов электродинамики с учётом геометрии распределительно-излучающей системы. Эффективные и достаточно точные вычислительные алгоритмы для анализа и синтеза диэлектрической АБВ с гребёчатой решёткой созданы относительно недавно [56,57]. В отличие от коммерческих пакетов электромагнитного 3D моделирования они обладают открытым кодом, адаптированы под конкретную геометрию в 2D пространстве, что приводит к значительному сокращению времени на анализ и синтез АБВ.

Для реализации цели работы использована авторская проекционная модель, в основу которой положено решение задачи рассеяния замедленной собственной E-волны планарного диэлектрического волновода на совокупности прямоугольных канавок в проводящем экране [37,57-60]. Следует заметить, что модель не учитывает конечные размеры распределительно-излучающей системы АБВ в направлении регулярности канавок, потери мощности в материалах волновода и решётки, а также предполагает идеальные условия возбуждения раскрыва. Несмотря на указанные ограничения, модель обеспечивает анализ диэлектрических периодических АБВ, достоверность которого подтверждена сравнением с результатами строгого электродинамического 3D-моделирования и экспериментальными данными [37,58,61].

Согласно ключевым положениям модели расчёт амплитудной ДН диэлектрической АБВ (рис. 3) в плоскости E следует производить как:

$$f(\Theta) = \sqrt{\pi k_0 W_0} \cdot |A(k_0 \sin \Theta)| \cdot \cos \Theta, \quad (2)$$

где  $k_0 = 2\pi/\lambda_0$ ,  $W_0 = 120\pi$ ;  $\Theta$  – угол наблюдения;  $A(\beta)$  – пространственная плотность рассеянного поля над излучающим раскрывом.

Поле над раскрывом  $A(\beta)$ , в свою очередь, представляет собой линейную комбинацию интенсивности  $D_m^{(k)}$  мод в канавках:

$$A(\beta) = \frac{j/2\pi}{\mu(\beta)\gamma(\beta)} \sum_{k=1}^N \sum_{m=0}^{M-1} D_m^{(k)} \zeta_m \sin(\zeta_m h_k) I_m^{(k)}(\beta), \quad (3)$$

где  $j$  – мнимая единица;  $h_k$  – глубина канавки с номером  $k$ ;  $m$ ,  $M$  – порядок моды и число мод;

$$\gamma(\beta) = \sqrt{k_0^2 - \beta^2}; \quad \zeta_m = \sqrt{k_0^2 - (m\pi/a)^2} \quad [62];$$

$$I_m^{(k)}(\beta) = \frac{a}{2} e^{-j(\beta x_k + \frac{m\pi}{2})} \left( \text{sinc} \frac{\beta a + m\pi}{2} + (-1)^m \text{sinc} \frac{\beta a - m\pi}{2} \right),$$

Интенсивности мод  $D_m^{(k)}$ , поддерживаемых канавками, определяются на основе решения системы линейных уравнений:

$$\sum_{k=1}^N \sum_{m=0}^{M-1} D_m^{(k)} \left[ \zeta_m \sin(\zeta_m h_k) \sigma_{m,s}^{(k,q)} + j \frac{a}{2} \Delta_k^q \Delta_m^s (1 + \Delta_s^0) \cos(\zeta_m h_k) \right] = j H_0 J_s^{*(q)}(\beta_0), \quad q = \overline{1, N}, s = \overline{0, M-1}, \quad (4)$$

где  $\sigma_{m,s}^{(k,q)}$  – коэффициенты связи канавок:

$$\sigma_{m,s}^{(k,q)} = \frac{1}{j2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \Gamma_{m,s}^{(k,q)}(\beta) d\beta, \quad (5)$$

где  $\Gamma_{m,s}^{(k,q)}(\beta) = \frac{j\nu(\beta)}{\mu(\beta)\gamma(\beta)} I_m^{(k)}(\beta) J_s^{*(q)}(\beta)$ ;

$\beta_0$  – корень уравнения:

$$1 - \frac{j}{2} \text{tg}(\eta_0 \tau) \left( \frac{\gamma_0 \epsilon_\tau}{\eta_0} [1 - e^{j2\gamma_0 r}] + \frac{\eta_0}{\gamma_0 \epsilon_\tau} [1 + e^{j2\gamma_0 r}] \right) = 0; \quad (6)$$

$$\gamma_0 = \sqrt{k_0^2 - \beta_0^2}; \quad \eta_0 = \sqrt{k_0^2 \epsilon_\tau - \beta_0^2};$$

$H_0$  – коэффициент нормировки [37,58,59];  $\text{sinc}(x) = \sin x/x$ ;  $\Delta_s^i$  – дельта Кронекера;

$$\left\{ \begin{array}{l} \nu(\beta) \\ \mu(\beta) \end{array} \right\} = \cos[\eta(\beta)\tau] e^{-j\gamma(\beta)r} \times \left[ 1 - \frac{j}{2} \text{tg}[\eta(\beta)\tau] \times \left( \frac{\gamma(\beta)\epsilon_\tau}{\eta(\beta)} [1 \pm e^{j2\gamma(\beta)r}] + \frac{\eta(\beta)}{\gamma(\beta)\epsilon_\tau} [1 \mp e^{j2\gamma(\beta)r}] \right) \right];$$

$$\eta(\beta) = \sqrt{k_0^2 \epsilon_\tau - \beta^2}.$$

Основным показателем, характеризующим излучательную способность диэлектрической АВВ, является КПД, рассчитываемый как отношение излучаемой антенной мощности к подводимой к раскрытию мощности:

$$\eta = (1/P_0) \cdot \int_{-\pi/2}^{+\pi/2} F^2(\Theta) d\Theta, \quad (7)$$

где  $P_0$  – мощность замедленной волны возбуждения; при расчёте коэффициента  $H_0$  согласно [37,58,59] мощность  $P_0$  равна единице;

$F(\Theta)$  – нормированная ДН:

$$F(\Theta) = f(\Theta) / f(\Theta_m). \quad (8)$$

Для сравнения диэлектрической АВВ с исходной и модифицированной геометрией раскрытия помимо КПД разумно использовать:

- ширину  $\Delta\Theta_{0.5}$  диаграммы направленно-сти по половинной мощности;
- максимальный уровень бокового излучения [63]:

$$\xi_m = \max F(\Theta) \text{ при } \Theta \neq \Theta_m; \quad (9)$$

— коэффициент использования площади (КИП) излучающего раскрытия без учёта направленности в  $H$ -плоскости [37,58,60]:

$$v = \lambda_0 \cdot F^2(\Theta_m) / (P_0 \cdot \eta \cdot L), \quad (10)$$

где  $L$  – длина излучающей системы;  
— эффективность излучения:

$$\Xi_m = \eta \cdot v; \quad (11)$$

— коэффициент отражения (по полю) от излучающего раскрытия  $k_{\leftarrow}$ ; соотношение, его определяющее можно найти в [37,58,38].

### Результаты и их обсуждение

Пусть в качестве материала диэлектрического волновода использован полистирол с  $\epsilon_r = 2.56$ . Ширина канавок решётки взята равной  $a = 0.2 \cdot d$ . Глубину канавок исходной конфигурации излучающего раскрытия (рис. 2) целесообразно оценить согласно [9]:

$$h \leq (2q+1) \frac{\lambda_0}{4} + a \cdot \frac{2}{\pi} \cdot \text{Insin} \left( \frac{\pi a}{2d} \right), \quad q=0,1,\dots \quad (12)$$

Если  $a = 0.2 \cdot d$ ,  $d \approx \lambda_0$ , то  $h \leq 0.18 \lambda_0$ , то есть, например,  $h = 0.16 \lambda_0$ .

Считая, что при неоптимизированном экспоненциальном амплитудном распределении в раскрытии АВВ ширина ДН составляет  $(3-4)^\circ$ , тогда число основных канавок гребёночной решётки не должно превышать 20-ти ( $N=20$ ).

Отношение периода решётки к длине волны ( $d/\lambda_0$ ) при излучении на  $(-1)$ -й пространственной гармонике имеет смысл взять равным 0.8. Используя описанную выше математическую модель, несложно рассчитать ДН антенны и её вторичные показатели для разных значений расстояния между волноводом и решёткой и толщины волновода. Значения параметров раскрытия, обеспечивающие близкий к максимальному КПД:  $\tau = 0.22 \cdot d$ ,  $r = 0.4 \cdot \lambda_0$ . На рис. 4 приведена расчётная нормированная логарифмическая ДН диэлектрической АВВ применительно к указанным выше параметрам диэлектрического волновода и гребёночной решётки.

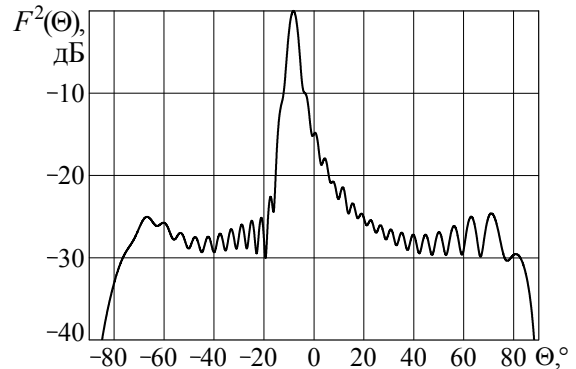


Рис. 4

Анализ ДН позволяет определить КПД  $\eta = 98.3 \%$  и вторичные показатели АВВ:  $\Theta_m = -8.2^\circ$ ,  $2\Theta_{0.5} = 3.8^\circ$ ,  $\xi_m = -14.8$  дБ. Эффективность излучения составляет при этом  $\Xi_m = 67.3 \%$ . Не слишком внушительная эффективность обусловлена недостаточной величиной КИП раскрытия ( $v = 0.68$ ), которая связана с формой амплитудного распределения в раскрытии, не оптимальной в отношении КИП. Заметим, что увеличить КИП (и эффективность) можно, используя, например, глубинное профилирование гребёночной решётки (изменяя глубину канавок в продольном направлении) [58-61,64]. В рамках исследования будем полагать, что коррекция формы амплитудного распределения является второстепенной задачей, и акцентируем внимание на КПД, который в режиме наклонного излучения составил относи-

тельно большую величину 98.3 %. Коэффициент отражения волны возбуждения  $k_{\leftarrow}$  от решётки при этом менее 1 %.

Последовательно увеличивая значение периода решётки до величины, при которой максимум ДН совпадёт с направлением поперечного излучения:  $\Theta_m = 0^\circ$ . Для указанных выше параметров геометрии раскрыва период окажется равным  $d = 0.9 \cdot \lambda_0$ . На рис. 5 приведена расчётная ДН антенны в режиме поперечного излучения с исходной (немодифицированной) конфигурацией раскрыва.

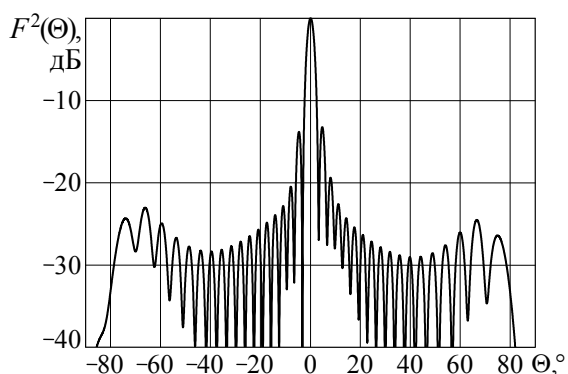


Рис. 5

Визуальный анализ ДН на рис. 5 говорит о том, что в режиме поперечного излучения амплитудное распределение в раскрыве выровнялось. Действительно, ширина ДН уменьшилась до  $2\Theta_{0.5} = 2.9^\circ$ , максимальный уровень боковых лепестков составляет  $\xi_m = -13.4$  дБ, расчётное значение КИП —  $\nu = 0.92$ . Однако КПД диэлектрической АВВ составляет всего  $\eta = 20.6$  % за счёт значительного отражения —  $k_{\leftarrow} = 69.2$  %.

Модификация конфигурации излучающего раскрыва диэлектрической АВВ за счёт введения на периоде дополнительной канавки (в пределах раскрыва — 20-ти дополнительных канавок), смещённой относительно основной канавки на четверть длины волны возбуждения, приводит к увеличению КПД. Однако моделирование диэлектрической АВВ с модифицированным раскрывом свидетельствует о том, что в случае идентичности дополнительных канавок основным канавкам по ширине и глубине эффект увеличения излучательной способности (устранения дифракции Брэгга) оказывается не столь значительным. Действительно, если глубина и ширина дополнительных канавок в точности равны размерам основных канавок решётки, то КПД диэлектрической АВВ составляет  $\eta = 76.5$  %. Конечно, такая величина КПД

превосходит КПД антенны без дополнительных канавок в 3.7 раза (на 55.9 %), однако, он всё же меньше величины, соответствующей режиму наклонного излучения, практически в 1.3 раза (на 21.8 %). Очевидно, это связано с тем, что дополнительные и основные канавки, размещённые на расстоянии четверти длины замедленной волны возбуждения, обладают сильной взаимной электродинамической связью, приводящей к тому, что электрические параметры основной и дополнительной систем неоднородностей оказываются не эквивалентными.

Для уточнения этого обстоятельства и выяснения оптимальных размеров дополнительных канавок выполнено исследование, в ходе которого ДН диэлектрической АВВ и её показатели фиксировались при изменении глубины дополнительных канавок. В табл. 1 приведены основные показатели АВВ для разных значений глубины дополнительных канавок  $h_d$  при условии их смещения от основных канавок на четверть длины замедленной волны возбуждения.

Таблица 1

$h_d/\lambda_0$	$\eta, \%$	$k_{\leftarrow}, \%$	$\xi_m, \text{дБ}$	$\nu$	$\Xi, \%$
0.08	90.4	7.4	-10.2	0.74	67.1
0.10	98.3	1.0	-15.0	0.64	62.5
0.12	97.1	2.8	-5.9	0.47	45.9
0.14	83.4	17.2	-2.8	0.41	33.6
0.16	76.5	22.3	-8.1	0.57	43.2
0.18	72.8	24.7	-12.7	0.62	44.7

Из табл. 1, в частности, следует, что оптимальная глубина дополнительных канавок, расположенных по соседству с основными канавками, составляет  $0.1 \cdot \lambda_0$  или  $0.625 \cdot h$ , где  $h$  — глубина основных канавок. При этом диэлектрическая АВВ обладает КПД, равным  $\eta = 98.3$  %. Максимальный уровень боковых лепестков ДН составляет  $\xi_m = -15$  дБ, эффективность излучения —  $\Xi_m = 62.5$  %. Нормированная ДН диэлектрической АВВ для указанной глубины дополнительных канавок показана на рис. 6.

Для оптимизации конструкции раскрыва диэлектрической АВВ в режиме поперечного излучения, видимо, может быть предпринята попытка вариации смещения дополнительной системы канавок относительно основной системы. В табл. 2 приведены полученные в ходе моделирования основные показатели диэлектрической АВВ с системой дополнительных канавок, эквивалентной по размерам основной, но смещённой относительно основной системы

на величину  $\ell_d$ , несколько большую или меньшую четверти длины волны возбуждения.

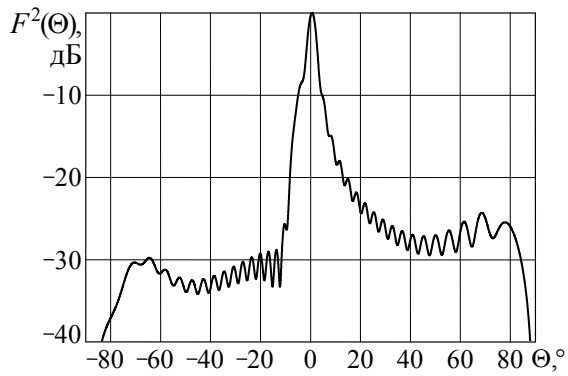


Рис. 6

Таблица 2

$\ell_d/\lambda_0$	$\eta, \%$	$k_{\leftarrow}, \%$	$\xi_m, \text{дБ}$	$\nu$	$\Xi, \%$
0.24	75.0	24.0	-7.2	0.53	39.7
0.26	76.8	22.1	-8.5	0.57	43.8
0.27	76.5	22.4	-10.8	0.58	44.6
0.28	75.8	23.0	-11.3	0.59	45.0

Из табл. 2 следует, что излучательная способность диэлектрической АВВ слабо зависит от величины добавочного смещения между системами канавок. В частности, смещение на  $0.27 \cdot \lambda_0$  позволяет увеличить КПД, но всего на 0.3 %. Однако коррекция смещения, видимо, может быть использована как дополнительный инструмент для увеличения излучательной способности АВВ после оптимизации глубины дополнительных канавок.

В табл. 3 приведены полученные основные показатели диэлектрической АВВ с системой дополнительных канавок глубиной  $0.1 \cdot \lambda_0$ , смещённых относительно основной системы канавок на величину  $\ell_d$ .

Таблица 3

$\ell_d/\lambda_0$	$\eta, \%$	$k_{\leftarrow}, \%$	$\xi_m, \text{дБ}$	$\nu$	$\Xi, \%$
0.24	96.5	2.5	-15.3	0.66	63.7
0.26	99.3	0.3	-17.8	0.61	61.0
0.27	99.5	0.2	-17.6	0.59	59.1
0.28	99.0	0.8	-17.4	0.58	57.0
0.29	98.0	1.9	-19.5	0.56	54.8
0.24	96.5	2.5	-15.3	0.66	63.7

Анализ данных табл. 3 показывает, что оптимальный разнос системы дополнительных канавок глубиной  $0.1 \cdot \lambda_0$  относительно периодической решётки основных канавок глубиной

$0.16 \cdot \lambda_0$  составляет величину, равную  $0.27 \cdot \lambda_0$ . Соответствующие показатели диэлектрической АВВ приведены в табл. 3. Диаграмма направленности диэлектрической АВВ для  $\ell_d = 0.27 \cdot \lambda_0$  показана на рис. 7.

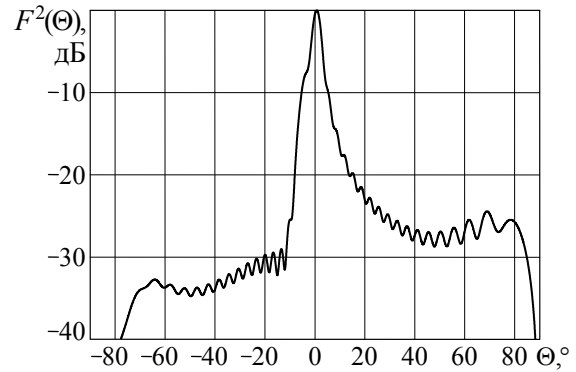


Рис. 7

Сравнение ДН, показанных на рис. 6 и 7, свидетельствует об их схожести, однако, диэлектрическая АВВ с ДН, приведенной на рис. 7, обладает большей на 1.5 % излучательной способностью (КПД) и меньшим на 2.6 дБ максимальным уровнем боковых лепестков ДН.

### Заключение

Таким образом, применительно к режиму поперечного излучения подтверждена возможность значительного увеличения коэффициента полезного действия диэлектрической периодической АВВ с односторонним возбуждением излучающего раскрыва в виде планарного диэлектрического волновода, нагруженного гребёчатой решёткой с прямоугольными канавками, за счёт введения на периоде дополнительной канавки и оптимизации её глубины и положения. Установлено, что приращение излучательной способности и эффективности излучения АВВ при оптимизации глубины дополнительных канавок выше, чем в случае подбора расстояния между дополнительными и основными канавками.

### Литература

1. Hansen W.W. Radiating electromagnetic waveguide. Patent. 1940. U.S. Patent No. 2.402.622.
2. Jackson D.R., Caloz C., Itoh T. Leaky-wave antennas // Proceedings of the IEEE. 2012. Vol. 100. No. 7. PP. 2194-2206.
3. The fundamental of leaky wave antenna / M. Mohsen, M. Isa, A. Isa et al. // Journal of Telecommunication, Electronic and Computer Engineering. 2018. No. 10. PP. 119-127.
4. Уолтер К. Антенны бегущей волны / Пер. с англ. под ред. А.Ф. Чаплина. М.: Энергия, 1970. 448 с.

5. Zehentner J., Machac J., Zablouil P. Low profile slotted flat waveguide leaky wave antenna // *IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest*. 2006. PP. 1303-1306.
6. Mallahzadeh A., Mohammad-Ali-Nezhad S. Long slot ridged SIW leaky wave antenna design using transverse equivalent technique // *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 2014. Vol. 62. No. 11. PP. 5445-5452.
7. Калюшин В.А., Нгуен К.Т., Фролова Е.В. Синтез и анализ антенны вытекающей волны с полупрозрачной стенкой из металлических цилиндров // *Радиотехника и электроника*. 2020. Т. 65. № 3. С. 250-256.
8. Банков С.Е. Антенные решетки с последовательным питанием. М.: Физматлит, 2013. 416 с.
9. Шестопапов В.П. Физические основы миллиметровой и субмиллиметровой техники. Т. 1. Открытые структуры. Киев: Наукова думка, 1985. 216 с.
10. Плоские дифракционные СВЧ-антенны с фиксированной ориентацией линейной поляризации / А.И. Климов, К.Б. Меркулов, А.В. Останков и др. // *Приборы и техника эксперимента*. 1999. Т. 42. № 6. С. 136.
11. Евдокимов А.П. Антенны дифракционного излучения // *Физические основы приборостроения*. 2013. Т. 2. № 1(6). С. 108-125.
12. Leaky-wave antennas based on noncutoff substrate integrated waveguide supporting beam scanning from backward to forward / Y.L. Lyu, X.X. Liu, P.Y. Wang et al. // *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 2016. Vol. 64. No. 6. PP. 2155-2164.
13. Prasad C.S., Biswas A. Dielectric image line-based leaky-wave antenna for wide range of beam scanning through broadside // *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 2017. Vol. 65. No. 8. PP. 4311-4315.
14. Антенны дифракционного излучения на базе желобковой линии передачи / А.П. Евдокимов, В.З. Мазур, К.Ю. Сиренко, Ю.К. Сиренко // *Физические основы приборостроения*. 2018. Т. 7. № 1(27). С. 24-36.
15. Salman A.O. On the antenna efficiencies for the dielectric leaky-wave antennas with a sinusoidal metallic diffraction grating coupled from the broad and the narrow face of the dielectric // *Microwave and Optical Technology Letters*, 2011. Vol. 53. No. 9. PP. 2030-2034.
16. Классен В.И., Седельников Ю.Е. Антенны Ка диапазона для перспективных средств телекоммуникаций. Часть 1. Печатные антенны // *Научно-технический вестник Поволжья*. 2013. № 6. С. 326-330.
17. Высокотехнологичная антенна вытекающей волны на основе дифракционной решетки с периодической гребенчатой структурой / Д.Ю. Крюков, А.В. Останков, Ю.Г. Пастернак, В.И. Юдин // *Вестник Воронежского государственного технического университета*. 2015. Т. 11. № 6. С. 80-83.
18. Седельников Ю.Е., Олейник Е.Ю., Шаабан М. Линейные антенные решетки КВЧ диапазона на диэлектрических волноводах // *Журнал радиотехники*. 2018. № 8. С. 8.
19. High gain millimeter wave leaky wave antennas with low side lobe level of the radiation pattern / Yu.B. Nechaev, A.I. Klimov, A.V. Kuznetsov, M.A. Galuza // *Journal of Physics: Conference Series*. 2019. Vol. 1279. PP. 012010.
20. Munawar H.S. Applications of leaky-wave antennas: A review // *International Journal of Wireless and Microwave Technologies*. 2020. Vol. 10. No. 3. PP. 56-62.
21. Leaky-wave antennas for 5G/B5G mobile communication systems: A survey / Y. He, J. Jiang, L. Zhang et al. // *ZTE Communications*. 2020. Vol. 18. No. 3. PP. 3-11.
22. Квазифрактальная двухдиапазонная антенна вытекающей волны / В.И. Винников, А.В. Останков, Ю.Г. Пастернак и др. // *Вестник Воронежского государственного технического университета*. 2009. Т. 5. № 9. С. 64-67.
23. Monticone F., Alù A. Leaky-wave theory, techniques, and applications: From microwaves to visible frequencies // *Proceedings of the IEEE*. 2015. Vol. 103. No. 5. PP. 793-821.
24. Liu J., Jackson D.R., Long Y. Substrate integrated waveguide (SIW) leaky-wave antenna with transverse slots // *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 2011. Vol. 60. No. 1. PP. 20-29.
25. Review of substrate integrated waveguide circuits for beam-forming networks working in X-band / G. Venanzoni, D. Mencarelli, A. Morini et al. // *Applied Sciences*. 2019. No. 9. PP. 1003.
26. Останков А.В., Хрипунов Е.Г. Рупорная SIW-антенна со специальным копланарным переходом и диэлектрической линзой для питания планарной антенны вытекающей волны // *Радиостроение*. 2020. № 2. С. 1-26.
27. Conformal high gain aperture antenna based on leaky-wave array for CubeSat communication / X. Li, L. Wang, G. Goussetis, J. Wang // *2020 International Symposium on Antennas and Propagation*. Osaka, 2021. PP. 499-500.
28. Half-mode substrate integrated waveguide (HMSIW) leaky-wave antenna for millimeter-wave applications / J. Xu, W. Hong, H. Tang et al. // *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*. 2008. No. 7. PP. 85-88.
29. Компактная антенна вытекающей волны со сканированием диаграммы направленности на основе композитных право- и левосторонних структур / С.А. Антипов, Ю.Е. Калинин, А.В. Останков и др. // *Радиотехника*. 2021. Т. 85. № 6. С. 34-39.
30. Fixed frequency beam-scanning HMSIW-based leaky-wave antenna composed of circular slots in V-shape configuration / N. Javanbakht, R.E. Amaya, J. Shaker, B. Syrett // *IEEE Access*. 2021. Vol. 9. PP. 52891-52901.
31. Ostankov A., Khripunov E., Kashkarov V. A compact nonuniform composite right/left-handed leaky-wave scanning antenna with elliptical polarization for X-band application // *Progress In Electromagnetics Research C*. 2021. Vol. 114. PP. 43-56.
32. Polarization-flexible and frequency-scanning leaky-wave HMSIW antenna for vehicular applications / A. Chen, X. Fu, W. Jiang, K. An // *Electronics*. 2022. Vol. 11. No. 13. PP. 2103.
33. A single-beam full-space scanning leaky-wave antenna with high-efficiency based on spoof surface plasmon polaritons / H. Jiang, X. Cao, L. Jidi et al. // *IET Microwaves, Antennas & Propagation*. 2022. Vol. 16. No. 9. PP. 602-609.
34. Zhang Q., Zhang Q., Chen Y. High-efficiency circularly polarised leaky-wave antenna fed by spoof surface plasmon polaritons // *IET Microwaves, Antennas & Propagation*. 2018. No. 12. PP. 1639-1644.
35. Single-side-scanning surface waveguide leaky-wave antenna using spoof surface plasmon excitation / S. Ge, Q. Zhang, C.Y. Chiu et al. // *IEEE Access*. 2018. Vol. 6. PP. 66020-66029.
36. Плоская дифракционная СВЧ-антенна с электронно-управляемой поляризационной чувствительностью / А.И. Климов, К.Б. Меркулов, А.В. Останков и др. // *Приборы и техника эксперимента*. 1999. № 6. С. 137.
37. Останков А.В., Антипов С.А., Калинин Ю.Е. Анализ и синтез раскрыва антенн дифракционного излучения, построенных на основе квазипериодических гребенчатых решеток. Воронеж: ВГТУ, 2016. 181 с.

38. Останков А.В. Оптимизация антенны дифракционного излучения, реализованной по интерферометрической схеме // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2010. Т. 6. № 11. С. 51-54.
39. Климов А.И. Разработка и исследование плоских дифракционных антенн СВЧ и КВЧ диапазонов с электрически управляемыми характеристиками. Воронеж: Научная книга, 2010. 117 с.
40. Вендик О.Г., Парнес М.Д. Антенны с электронным движением луча. Введение в теорию / под ред. Л.Д. Бахраха. М.: Радиотехника, 2001. 250 с.
41. A promising Ka band leaky-wave antenna based on a periodic structure of non-identical irregularities // M.N. Shaaban, M.H.E. Ali, M.S. Yasseen et al. // 17.08.2022. Preprint available at Research Square. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-1844027/v1>.
42. Останков А.В. Дифракционная антенна вытекающей волны с нестандартной реализацией излучающего раскрыва // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2010. Т. 6. № 8. С. 17-26.
43. Антенные решётки спутниковых мобильных телекоммуникационных систем / Е.В. Овчинникова, Э.В. Гаджиев, С.Г. Кондратьева и др. // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. 2021. Т. 182. № 3. С. 39-54.
44. The segmented implementation of a diffraction radiation antenna aperture / A.V. Ostanokov, A.I. Ryabchunov, O.V. Chernoyarov et al. // Microwave & Telecommunication Technology: мат. докл. 25-ой Междунар. Крымской конф. Севастополь: ФГАОУ ВО «СГУ», 2015. Рр. 479-480.
45. Алгоритм проектирования фазированных антенных решеток для спутниковых систем связи / Р.Ю. Чириков, Р. Росса, В.Х. Багманов, А.Х. Султанов // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. 2013. Т. 17. № 4(57). С. 159-166.
46. Рябчунов А.И., Хрипунов Е.Г., Останков А.В. Вычислительные эксперименты по исследованию возможности устранения дифракции Брэгга в диэлектрической антенне вытекающей волны // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. 2017. Т. 5. № 7-2(33-2). С. 256-260.
47. Caloz C., Itoh T. Novel microwave devices and structures based on the transmission line approach of metamaterials // IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest. 2003. Vol. 1. PP. 195-198
48. Caloz C., Itoh, T., Rennings A. CRLH metamaterial leaky-wave and resonant antennas // IEEE Antennas and Propagation Magazine. 2008. Vol. 50. No. 5. PP. 25-39.
49. Composite right/left-handed based compact and high gain leaky-wave antenna using complementary spiral resonator on HMSIW for Ku band applications / A. Sarkar, M. Adhikary, A. Sharma et al. // IET Microwaves, Antennas & Propagation. 2018. Vol. 12. No. 8. PP. 1310-1315.
50. Planar leaky-wave antenna at 6 GHz / H. Aziz, M. Moubadir, N.A. Touhami, A. Farkhsi // Procedia Manufacturing. 2018. Vol. 22. PP. 527-532.
51. Калошин В.А., Калиничев В.И. Линейная волновоодно-щелевая антенная решетка со 180-градусным сектором частотного сканирования // Радиотехника и электроника. 2019. Т. 64. № 7. С. 678-683.
52. Пастернак Ю.Г. Математическое моделирование, оптимизация и автоматизированное проектирование дифракционных и вибраторных мобильных антенных решеток. Воронеж: ВГТУ, 1999. 257 с.
53. Кравченко В.Ф., Сиренко К.Ю., Сиренко Ю.К. Преобразование и излучение электромагнитных волн открытыми резонансными структурами. Моделирование и анализ переходных и установившихся процессов. М.: Физматлит, 2011. 316 с.
54. Резонансные свойства системы планарный диэлектрический волновод - гребенка / В.В. Крыжановский, С.В. Крыжановский, С.А. Стешенко, О.В. Чистякова // Радиофизика и электроника. 2008. Т. 13. № 3. С. 481-488.
55. Останков А.В., Кирпичева И.А., Рябчунов А.И. Угловая дисперсия антенны дифракционного излучения // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2015. Т. 11. № 4. С. 76-79.
56. Стешенко С.А., Кириленко А.А. Строгая двумерная модель эффекта преобразования поверхностных волн в объемные // Радиофизика и электроника. 2005. Т. 10. № 1. С. 30-38.
57. Останков А.В. Математическая модель дифракции волны на конечной металлодиэлектрической гребенке для проектирования антенн вытекающей волны // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2009. Т. 5. № 7. С. 89-91.
58. Ostanokov A.V., Antipov S.A., Razinkin K.A. Optimization of directional and energetic properties of diffraction antenna // Global Journal of Pure and Applied Mathematics. 2016. Vol. 12. No. 4. PP. 3845-3864.
59. Останков А.В. Анализ и оптимизация дифракционной антенны поверхностной волны // Антенны. 2010. № 9(160). С. 44-53.
60. Останков А.В. Синтез излучающего гребенчатого раскрыва антенны вытекающей волны // Радиотехника. 2012. № 2. С. 38-44.
61. Крюков Д.Ю., Останков А.В. Оптимизация характеристик антенны дифракционного излучения за счет глубинного профилирования одномерной квазипериодической гребенчатой решетки // Радиолокация, навигация, связь: сб. докл. 23-й междунар. науч.-техн. конф. Воронеж, 2017. Т. 3. С. 1054-1060.
62. Одномодовое приближение в задаче синтеза диэлектрической антенны вытекающей волны / А.В. Останков, С.А. Останков, Г.В. Литвинов и др. // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2022. Т. 18. № 4. С. 77-85.
63. Хансен Р.С. Фазированные антенные решетки. М.: Техносфера, 2012. 560 с.
64. Стешенко С.А. Синтез антенны вытекающих волн по заданному распределению поля на апертуре // Радиофизика и радиоастрономия. 2013. Т. 18. № 4. С. 373-380.

Поступила 26.02.2024; принята к публикации 07.05.2024

#### Информация об авторах

**Останков Александр Витальевич** – д-р техн. наук, доцент, заведующий кафедрой радиотехники, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: avostankov@mail.ru  
**Крюков Дмитрий Юрьевич** – аспирант, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: kryukovdy@bk.ru

## DIELECTRIC LEAKY-WAVE ANTENNA WITH TRANSVERSE RADIATION

A.V. Ostankov, D.Yu. Kryukov

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

**Abstract:** leaky-wave antennas have become widespread due to their relatively simple designs small transverse dimensions and high efficiency. Dielectric periodic leaky-wave antennas which convert the slow surface wave of a dielectric waveguide into a spatial radiated wave using a periodic grating are used in oblique radiation mode when excited on one side. However, in some cases the transverse radiation mode is preferable. However, the implementation of such a regime is associated with a catastrophic deterioration in emissivity due to Bragg diffraction. The paper discusses ways to eliminate the normal effect. In relation to an antenna with a radiating aperture in the form of a planar dielectric waveguide loaded with a periodic comb grating, a method has been implemented for introducing an additional groove on a period at a distance of a quarter of the wavelength from the main groove. It has been established that when an additional groove appears during the period, equivalent in size to the main groove, the increase in the emissivity of the antenna is not so significant. Two options have been proposed for increasing the efficiency of an antenna with a modified aperture by optimizing the position of the additional groove relative to the main one or selecting the depth of the additional groove. It has been established that the increment in emissivity and radiation efficiency of the leaky-wave antenna when optimizing the depth of additional grooves is higher than in the case of selecting the distance between the additional and main grooves. The results are obtained on the basis of electrodynamic modeling, implemented on the basis of the author's projection model, which has received wide recognition

**Key words:** dielectric antenna, comb grating, groove, transverse mode of electromagnetic radiation, emissivity, efficiency

### References

1. Hansen W.W. "Radiating electromagnetic waveguide", U.S. Patent no. 2.402.622, 1940,
2. Jackson D.R., Caloz C., Itoh T. "Leaky-wave antennas", *Proceedings of the IEEE*, 2012, vol. 100, no. 7, pp. 2194-2206.
3. Mohsen M., Isa M., Isa A., Zin M., Saat S., Zakaria Z., Ibrahim I., Abu M., Ahmad A., Abdulhameed M. "The fundamental of leaky wave antenna", *Journal of Telecommunication, Electronic and Computer Engineering*, 2018, no. 10, pp. 119-127.
4. Walter K. "Traveling wave antennas" ("Antenny begushchey volny"), trans. from Eng., ed. by A.F. Chaplin, Moscow, Energy, 1970, 448 p.
5. Zehentner J., Machac J., Zablouil P. "Low profile slotted flat waveguide leaky wave antenna", *IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest*, 2006, pp. 1303-1306.
6. Mallahzadeh A., Mohammad-Ali-Nezhad S. "Long slot ridged SIW leaky wave antenna design using transverse equivalent technique", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2014, vol. 62, no. 11, pp. 5445-5452.
7. Kaloshin V.A., Nguyen K.T., Frolova E.V. "Synthesis and analysis of a leaky wave antenna with a semitransparent wall of metal cylinders", *Radioengineering and Electronics (Radiotekhnika i elektronika)*, 2020, vol. 65, no. 3, pp. 250-256.
8. Bankov S.E. "Antenna arrays with serial feed" ("Antennyye reshetki s posledovatel'nym pitaniyem"), Moscow, Fizmatlit, 2013, 416 p.
9. Shestopalov V.P. "Physical foundations of the millimeter and submillimeter waves technique. Vol. 1. Open structures" ("Fizicheskie osnovy millimetrovoy i submillimetrovoy tekhniki. T. 1. Otkrytye struktury"), Kiev, Naukova Dumka, 1985, 216 p.
10. Klimov A.I., Merkulov K.B., Ostankov A.V., Pasternak Yu.G., Yudin V.I. "Planar diffraction microwave antennas with a fixed orientation of the linear polarization", *Instruments and Experimental Technique (Pribory i tekhnika eksperimenta)*, 1999, vol. 42, no. 6, pp. 136.
11. Yevdokymov A.P. "Diffraction radiation antennas", *Physical Bases of Instrumentation (Fizicheskiye osnovy priborostroyeniya)*, 2013, vol. 2, no. 1(6), pp. 108-125.
12. Lyu Y.L., Liu X.X., Wang P.Y., Erni D., Wu Q., Wang C., Kim N.-Y., Meng F.-Y. "Leaky-wave antennas based on noncutoff substrate integrated waveguide supporting beam scanning from backward to forward", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2016, vol. 64, no. 6, pp. 2155-2164.
13. Prasad C.S., Biswas A. "Dielectric image line-based leaky-wave antenna for wide range of beam scanning through broadside", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2017, vol. 65, no. 8, pp. 4311-4315.
14. Yevdokymov A.P., Mazur V.Z., Sirenko K.Yu., Sirenko Yu.K. "Diffraction radiation antennas based on trough transmission lines", *Physical Bases of Instrumentation (Fizicheskiye osnovy priborostroyeniya)*, 2018, vol. 7, no. 1(27), pp. 24-36.
15. Salman A.O. "On the antenna efficiencies for the dielectric leaky-wave antennas with a sinusoidal metallic diffraction grating coupled from the broad and the narrow face of the dielectric", *Microwave and Optical Technology Letters*, 2011, vol. 53, no. 9, pp. 2030-2034.
16. Klassen V.I., Sedelnikov Yu.E. "Ka band antennas for promising means of telecommunication. Part 1. Printed antennas" // *Scientific and Technical Volga Region Bulletin (Nauchno-tekhnicheskij vestnik Povolzh'ya)*, 2013, no. 6, pp. 326-330.
17. Kryukov D.Yu., Ostankov A.V., Pasternak Yu.G., Yudin V.I. "Highly technological (hi-tech) antenna leaky wave diffraction grating with a periodic comb", *Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2015, vol. 11, no. 6, pp. 80-83.
18. Sedelnikov Yu.E., Oleinik E.Yu., Shaaban M. "Linear antenna arrays of EHF range on dielectric waveguides", *Journal of Radio Electronics (Zhurnal radioelektroniki)*, 2018, no. 8, pp. 8.
19. Nechaev Yu.B., Klimov A.I., Kuznetsov A.V., Galuza M.A. "High gain millimeter wave leaky wave antennas with low side lobe level of the radiation pattern", *Journal of Physics: Conference Series*, 2019, vol. 1279, pp. 012010.

20. Munawar H.S. "Applications of leaky-wave antennas: A review", *International Journal of Wireless and Microwave Technologies*, 2020, vol. 10, no. 3, pp. 56-62.
21. He Y., Jiang J., Zhang L., Li W., Wong S.-W., Deng W., Chi B. "Leaky-wave antennas for 5G/B5G mobile communication systems: A survey", *ZTE Communications*, 2020, vol. 18, no. 3, pp. 3-11.
22. Vinnikov V.I., Ostankov A.V., Pasternak Yu.G., Popov I.V. "Quasi-fractal dual-band leaky wave antenna", *Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2009, vol. 5, no. 9, pp. 64-67.
23. Monticone F., Alù A. "Leaky-wave theory, techniques, and applications: From microwaves to visible frequencies", *Proceedings of the IEEE*, 2015, vol. 103, no. 5, pp. 793-821.
24. Liu J., Jackson D.R., Long Y. "Substrate integrated waveguide (SIW) leaky-wave antenna with transverse slots", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2011, vol. 60, no. 1, pp. 20-29.
25. Venanzoni G., Mencarelli D., Morini A., Farina M., Prudenzi F. "Review of substrate integrated waveguide circuits for beam-forming networks working in X-band", *Applied Sciences*, 2019, no. 9, pp. 1003.
26. Ostankov A.V., E.G. Khripunov "Horn SIW-antenna with a special coplanar junction and dielectric lens for feeding of the planar leaky-wave antenna", *Radio Engineering (Radiostroyeniye)*, 2020, no. 2, pp. 1-26.
27. Li X., Wang L., Goussetis G., Wang J. "Conformal high gain aperture antenna based on leaky-wave array for CubeSat communication", *2020 International Symposium on Antennas and Propagation*, Osaka, 2021, pp. 499-500.
28. Xu J., Hong W., Tang H., Kuai Z., Wu K. "Half-mode substrate integrated waveguide (HMSIW) leaky-wave antenna for millimeter-wave applications", *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2008, no. 7, pp. 85-88.
29. Antipov S.A., Kalinin Yu.E., Ostankov A.V., Khripunov E.G., Dachian S.Yu. "A compact composite right/left-handed leaky wave scanning antenna", *Radioengineering (Radiotekhnika)*, 2021, vol. 85, no. 6, pp. 34-39.
30. Javanbakht N., Amaya R.E., Shaker J., Syrett B. "Fixed frequency beam-scanning HMSIW-based leaky-wave antenna composed of circular slots in V-shape configuration", *IEEE Access*, 2021, vol. 9, pp. 52891-52901.
31. Ostankov A., Khripunov E., Kashkarov V. "A compact nonuniform composite right/left-handed leaky-wave scanning antenna with elliptical polarization for X-band application", *Progress In Electromagnetics Research C*, 2021, vol. 114, pp. 43-56.
32. Chen A., Fu X., Jiang W., An K. "Polarization-flexible and frequency-scanning leaky-wave HMSIW antenna for vehicular applications", *Electronics*, 2022, vol. 11, no. 13, pp. 2103.
33. Jiang H., Cao X., Jidi L., Yang H., Gao J. "A single-beam full-space scanning leaky-wave antenna with high-efficiency based on spoof surface plasmon polaritons", *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, 2022, vol. 16, no. 9, pp. 602-609.
34. Zhang Q., Zhang Q., Chen Y. "High-efficiency circularly polarised leaky-wave antenna fed by spoof surface plasmon polaritons", *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, 2018, no. 12, pp. 1639-1644.
35. Ge S., Zhang Q., Chiu C.Y., Chen Y., Murch R.D. "Single-side-scanning surface waveguide leaky-wave antenna using spoof surface plasmon excitation", *IEEE Access*, 2018, vol. 6, pp. 66020-66029.
36. Klimov A.I., Merkulov K.B., Ostankov A.V., Pasternak Yu.G., Youdin V.I. "Planar diffraction microwave antenna with electronically controlled polarizing sensitivity", *Instruments and Experimental Technique (Pribory i tekhnika eksperimenta)*, 1999, no. 6, p. 137.
37. Ostankov A.V., Antipov S.A., Kalinin Yu.E. "The analysis and synthesis of the aperture of diffraction radiation antennas based on quasiperiodic comb arrays" ("Analiz i sintez raskryva antenn difrakcionnogo izlucheniya, postroyenykh na osnove kvaziperiodicheskikh grebenchatykh reshetok"), Voronezh State Technical University, 2016, 181 p.
38. Ostankov A.V. "Optimization of the antenna of diffraction radiation realised on the interferometric scheme", *The Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2010, vol. 6, no. 11, pp. 51-54.
39. Klimov A.I. "Development and research of flat diffractive antennas of the microwave and EHF ranges with electrically controlled characteristics" ("Razrabotka i issledovaniye ploskikh difraktsionnykh antenn SVCH i KVCH diapazonov s elektricheskimi upravlyayemyimi kharakteristikami"). Voronezh: Scientific book, 2010, 117 p.
40. Vendik O.G., Parnes M.D. "Antennas with electronic beam motion. Introduction to theory" ("Antenny s elektronnyim dvizheniyem luchy. Vvedeniye v teoriyu"), Ed. L.D. Bakhrakh, Moscow, Radioengineering, 2001, 250 p.
41. Shaaban M.N., Ali M.H.E., Yasseen M.S., Nasybullin A.R., Sedelnikov Yu.E. "A promising Ka band leaky-wave antenna based on a periodic structure of non-identical irregularities", *17.08.2022. Preprint available at Research Square. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-1844027/v1>*.
42. Ostankov A.V. "The diffraction leaky-wave antenna with off-gauge implementation of the aperture", *The Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2010, vol. 6, no. 8, pp. 17-26.
43. Ovchinnikova E.V., Gadzhiev E.V., Kondratieva S.G., Polandov A.L., Shmachilin P.A., Sokov M.A., Volkov O.A. "Antenna arrays for satellite mobile telecommunication systems", *Electromechanical Matters. VNIEM Studies (Voprosy elektromekhaniki. Trudy VNIEM)*, 2021, vol. 182, no. 3, pp. 39-54.
44. Ostankov A.V., Ryabchunov A.I., Chernoyarov O.V., Salmikova A.V. "The segmented implementation of a diffraction radiation antenna aperture", *Microwave & Telecommunication Technology: mat. report 25th Int. Crimean Conf*, Sevastopol, FSAEIHE "SSU", 2015, pp. 479-480.
45. Chirikov R.Yu., Rocca P., Bagmanov V.Kh., Sultanov A.Kh. "Algorithm for designing phased array antennas for satellite communication systems", *Vestnik UGATU (Vestnik Ufimskogo gosudarstvennogo aviatsionnogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2013, vol. 17, no. 4(57), pp. 159-166.
46. Ryabchunov A.I., Khripunov E.G., Ostankov A.V. "Computing experiments on research of possibility of elimination of diffraction of the Bragg in the dielectric leaky-wave antenna", *Current Directions of Scientific Research of the XXI Century: Theory and Practice (Aktual'nye napravleniya nauchnykh issledovaniy XXI veka: Teoriya i praktika)*, 2017, vol. 5, no. 7-2 (33-2), pp. 256-260.
47. Caloz C., Itoh T. "Novel microwave devices and structures based on the transmission line approach of meta-materials", *IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest*, 2003, vol. 1, pp. 195-198.

48. Caloz C., Itoh, T., Rennings A. "CRLH metamaterial leaky-wave and resonant antennas", *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 2008, vol. 50, no. 5, pp. 25-39.
49. Sarkar A., Adhikary M., Sharma A., Biswas A., Akhtar M.J., Hu Z. "Composite right/left-handed based compact and high gain leaky-wave antenna using complementary spiral resonator on HMSIW for Ku band applications", *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, 2018, vol. 12, no. 8, pp. 1310-1315.
50. Aziz H., Moubadir M., Touhami N.A., Farkhsi A. "Planar leaky-wave antenna at 6 GHz", *Procedia Manufacturing*, 2018, vol. 22, pp. 527-532.
51. Kaloshin V.A., Kalinichev V.I. "Waveguide-linear antenna array with a 180° frequency scanning sector", *Radioengineering (Radiotekhnika)*, 2019, vol. 64, no. 7, pp. 678-683.
52. Pasternak Yu.G. "Mathematical modeling, optimization and automated design of diffraction and vibrator mobile antenna arrays" ("Matematicheskoye modelirovaniye, optimizatsiya i avtomatizirovannoye proyektirovaniye difraktsionnykh i vibratornykh mobil'nykh anten'nykh reshetok"), Voronezh, VSTU, 1999. 257 p.
53. Kravchenko V.F., Sirenko Yu.K., Sirenko K.Yu. "Convert and radiation of electromagnetic waves open resonant structures. Modeling and analysis of transition and established processes" ("Preobrazovaniye i izlucheniye elektromagnitnykh voln otkrytymi rezonansnymi strukturami. Modelirovaniye i analiz perekhodnykh i ustanovivshikhsya protsessov"), Moscow, Fizmatlit, 2011. 316 p.
54. Kryzhanovsky V.V., Kryzhanovsky S.V., Steshenko S.A., Chistyakova O.V. "Resonant properties of the planar dielectric waveguide - comb system", *Radiophysics and Radioastronomy (Radiofizika i radioastronomiya)*, 2008, vol. 13, no. 3, pp. 481-488.
55. Ostankov A.V., Kirpicheva I.A., Ryabchunov A.I. "The angular dispersion of antenna with diffraction radiation", *Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2015, vol. 11, no. 4, pp. 76-79.
56. Steshenko S.A., Kirilenko A.A. "The accurate two-dimensional model of the effect of the surface waves transformation into the spatial modes", *Radiophysics and Radioastronomy (Radiofizika i radioastronomiya)*, 2005, vol. 10, no. 1, pp. 30-38.
57. Ostankov A.V. "Mathematical model of wave diffraction by a finite metal-dielectric comb for designing leaky wave antennas", *Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2009, vol. 5, no. 7, pp. 89-91.
58. Ostankov A.V., Antipov S.A., Razinkin K.A. "Optimization of directional and energetic properties of diffraction antenna", *Global Journal of Pure and Applied Mathematics*, 2016, vol. 12, no. 4, pp. 3845-3864.
59. Ostankov A.V. "The analysis and optimization of a diffraction antenna of surface wave", *Antennas (Antenny)*, 2010, no. 9 (160), pp. 44-53.
60. Ostankov A.V. "Synthesis of comb-like aperture of the antenna leaky wave", *Radioengineering (Radiotekhnika)*, 2012, no. 2, pp. 38-44.
61. Kryukov D.Yu., Ostankov A.V. "Optimization of characteristics antenna of the diffraction radiation by a method of depth profiling one-dimensional quasi-periodic grating comb", *Proc. of the XXIII Int. Sci. and Tech. Conf.: Radio Location, Navigation, Communications*, 2017, vol. 3, pp. 1054-1060.
62. Ostankov A.V., Ostankov S.A., Litvinov G.V., Dachian S.Yu., Shchetinin N.N. "Single-mode approximation in the problem of the dielectric leaky wave antenna synthesis", *The Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2022, vol. 18, no. 4, pp. 77-85.
63. Hansen R.S. "Phased antenna arrays" ("Fazirovannyye anten'nyye reshetki"), Moscow, Technosfera, 2012. 560 p.
64. Steshenko S.A. "Synthesis of a leaky-wave antenna for a given field distribution at an aperture", *Radiophysics and Radioastronomy (Radiofizika i radioastronomiya)*, 2013, vol. 18, no. 4, pp. 373-380.

Submitted 26.02.2024; revised 07.05.2024

#### Information about the authors

**Aleksandr V. Ostankov** - Dr. Sc. (Technical), Associate Professor, Head of the Department of Radio Engineering, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya, Voronezh 394006, Russia), e-mail: avostankov@mail.ru  
**Dmitry Yu. Kryukov** - Postgraduate Student, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya, Voronezh 394006, Russia), e-mail: kryukovy@bk.ru

**КОМПЛЕКСНОЕ СРАВНЕНИЕ УСТРОЙСТВ УПРАВЛЕНИЯ В СИСТЕМАХ  
ТЕЛЕКОДОВОЙ И РЕЧЕВОЙ СВЯЗИ****Я.С. Мотылёва<sup>1,2</sup>, Ю.Г. Хренова<sup>1,2</sup>, В.З. Циколия<sup>1,2</sup>, А.Ю. Чернышев<sup>1</sup>****<sup>1</sup>Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия****<sup>2</sup>АО «Концерн «Созвездие», г. Воронеж, Россия**

**Аннотация:** рассмотрены особенности управления в системах телекодовой и речевой связи. Выявлены определённые требования к скорости и объёму передачи данных в современной аппаратуре. Рассмотрены методы, применяющиеся для проверки целостности и подлинности данных. Для практической реализации был выбран алгоритм MD5, так как он является одним из самых распространённых. Поставлена задача выбора программируемых устройств для решения конкретных задач. Для оценки быстродействия занимаемых ресурсов взято функциональное устройство и протестировано на различных программируемых устройствах, для каждого из которых был написан код на соответствующих языках программирования. Исходя из результатов тестирования, можно сделать вывод, что использование программируемых пользователем вентильных матриц позволяет при меньшей тактовой частоте успешно выполнять несколько параллельных задач наряду с популярными микроконтроллерами, что говорит о возможном уменьшении стоимости систем телекодовой и речевой связи. Использование процессоров цифровой обработки сигналов оправдано только для решения узкоспециализированных задач, связанных с цифровой обработкой аналоговых сигналов и систем управления в реальном времени

**Ключевые слова:** программируемые устройства управления, микропроцессоры, программируемые пользователем вентильные матрицы (ППВМ)

**Введение**

В настоящее время в устройствах реального времени получили наибольшее распространение такие интегральные схемы, как микропроцессоры и программируемые пользователем вентильные матрицы (ППВМ).

Помимо времени загрузки, невозможность использования архитектуры персональных электронно-вычислительных машин (ПЭВМ) продиктована отсутствием драйверов для большинства микроэлектронных устройств для аппаратуры спецназначения, а также тем, что к данной аппаратуре предъявляются повышенные требования к надёжности, устойчивости к механическим и климатическим воздействиям и стойкости к воздействию спецфакторов.

**Постановка задачи**

В связи с возросшими требованиями к скорости и объёму передачи данных в современной аппаратуре связи возникла необходимость в программируемых устройствах управления, задающих функционал изделия, обеспечивающих работу всех внешних и

внутренних интерфейсов, и полное управление всеми специализированными периферийными устройствами.

Одним из основных принципов построения систем связи является достоверность передачи данных. Её обеспечение требует комплексного подхода, который включает в себя применение шифрования, методов проверки целостности информации, аутентификации, управления доступом, физической безопасности и резервирования. Использование методов хеширования и цифровых подписей позволяет подтвердить целостность и подлинность данных в процессе их передачи. Проверка целостности информации помогает обнаружить внесенные изменения в данные и их повреждения.

Существует множество алгоритмов хеширования, каждый из которых имеет свои особенности, применение и уровень безопасности. Наиболее широко используемыми алгоритмами являются:

1. MD5 (Message-Digest Algorithm 5)
  - один из первых и наиболее распространённых алгоритмов хеширования.
  - хэш-функция MD5 создает 128-битный хеш, который часто используется для проверки целостности данных.
2. SHA (Secure Hash Algorithm)
  - семейство алгоритмов, таких как SHA-1, SHA-256, SHA-384, SHA-512 и другие.

- наиболее известные и широко применяемые алгоритмы в современных системах безопасности и криптографии.

### 3. CRC32 (Cyclic Redundancy Check)

- хеш-функция, используемая для проверки целостности данных.

- часто используется в цифровых сетях, аппаратных устройствах и программном обеспечении для обнаружения ошибок при передаче данных.

### 4. Whirlpool

- алгоритм семейства хеш-функций, обеспечивающий высокий уровень безопасности.

- обладает длиной хеша до 512 бит, что обеспечивает надежное хеширование данных.

### 5. Blake2

- современный алгоритм хеширования, обеспечивающий высокую скорость и эффективность.

- используется в различных криптографических задачах, включая цифровые подписи, аутентификацию и проверку целостности данных.

### 6. RIPEMD (RACE Integrity Primitives Evaluation Message Digest)

- семейство хеш-функций, разработанных для замены MD4 и MD5.

- обеспечивают различные уровни безопасности и длины хеша для разнообразных криптографических задач.

### 7. Skein

- современный алгоритм хеширования, разработанный для конкурса по созданию функции хеширования SHA-3.

- имеет высокую стойкость к криптоанализу и поддерживает гибкую настройку длины хеша.

## Практическая реализация

Один из самых распространённых алгоритмов MD5 (MessageDigest 5) представлен на рис. 1.

В данном алгоритме присутствует последовательность из пяти шагов. [1]

На первом шаге добавляем бит «1» к концу последовательности информации. Затем заполняем битами «0». Длина (исходное сообщение + биты заполнения) =  $512 * i - 64$  где  $i = 1, 2, 3 \dots$

Второй шаг – добавляем бит длины в выходные данные первого шага таким образом, чтобы общее количество битов было идеально кратно 512. Проще говоря, здесь мы добавляем

64-бит в качестве бита длины в вывод первого шага, т.е. Вывод первого шага =  $512 * n - 64$ . Биты длины = 64. После сложения обоих мы получим  $512 * n$ , т.е. точное число, кратное 512.

Третий шаг. Используем четыре переменные размером 32 бита, которые инициализируются начальными значениями в шестнадцатеричном виде. Эти переменные будут хранить результаты промежуточных вычислений.

Четвёртый шаг, называемый "Вычисление в цикле", состоит из четырех раундов, в которых сохраняются значения, полученные после применения операций к предыдущим блокам. После выполнения всех операций, результаты двух последних циклов суммируются.

В итоге, на пятом шаге, мы получаем результат вычислений, который находится в буфере, и это является хешем. Если просматривать этот хеш побайтово, начиная с младшего байта первой переменной и заканчивая старшим байтом последней переменной, мы получим MD5-хеш. [2]

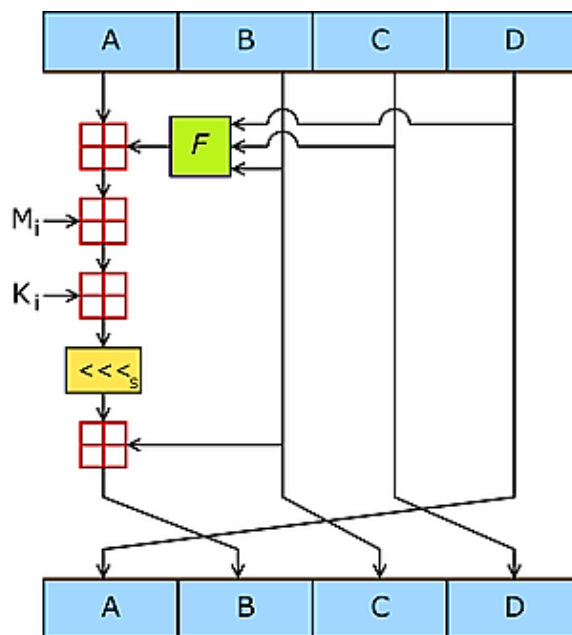


Рис. 1. Структура алгоритма MD5

Для этого были выбраны 3 микросхемы промышленного исполнения одного ценового диапазона: ППВМ XC6SLX45-2CG324I фирмы Xilinx, процессор цифровой обработки сигналов TMS320C6418ZTSA500 фирмы Texas Instruments и двухъядерный микроконтроллер с архитектурой ARM Cortex-A9 MCIMX6DP6AVT8AA-ND фирмы NXP [3].

XC6SLX45-2CSG324I является одной из мощных ПЛИС из семейства Spartan-6, кото-

рое известно своей высокой производительностью и низким энергопотреблением. Она обладает различными возможностями производительности и подходит для приложений связи с высокой пропускной способностью, таких как центры обработки данных, телекоммуникации и сетевое оборудование. Она также поддерживает мультигигабитные рабочие скорости приемопередатчиков.

TMS320C6418 основан на архитектуре Veloci TI второго поколения, которая поддерживает очень длинные слова инструкций (VLIW). Это позволяет снизить стоимость разработки телекоммуникационных приложений, программных радиосистем, систем цифрового наземного телевизионного вещания и систем вещательных спутников/коммуникационных спутников. Центральный процессор C6418 обладает гибкостью операций высокопроизводительных контроллеров и вычислительными возможностями матричных процессоров.

Микроконтроллер MCIMX6DP6AVT8AAND оснащен улучшенной версией связки ядер ARM Cortex-A9, производства Freescalequad, позволяющей работать на частоте до 1 ГГц. Он также включает в себя улучшенные 2D и 3D графические процессоры, обработку видео с разрешением 1080p и интегрированное управление энергопотреблением. Каждый процессор имеет 64-разрядный интерфейс памяти DDR3/DDR3L/LPDDR2 и различные другие интерфейсы для подключения периферийных устройств, таких как WLAN, Bluetooth, GPS, жесткий диск, дисплеи и камера.

Данный алгоритм был описан на языке VHDL для реализации на ППВМ, на языке C++ для реализации на микроконтроллере с архитектурой ARM и процессоре цифровой обработки сигналов и откомпилирован в соответствующих программных средах.

Результаты тестирования в базисе трех выбранных микросхем приведены в табл. 1.

Таблица 1

## Результаты тестирования

Обозначение микросхемы	Тактовая частота, МГц	Процент занятых вычислительных ресурсов	Время на подсчет хеша 1 Мб данных, мс
XC6SLX452C G324I	53	36	14,9
TMS320C64 18ZTSA500	500	100	368,7
MCIMX6DP 6AVT8AAND	852	50*	16,8

\* Для реализации проекта использовалось только одно из двух ядер микроконтроллера MCIMX6DP6AVT8AAND

## Заключение

Использование ППВМ позволяет при меньшей тактовой частоте успешно выполнять несколько параллельных задач наряду с популярными микроконтроллерами, а использование достаточно дорогих процессоров цифровой обработки сигналов оправдано только для решения узкоспециализированных задач. Так происходит, потому что процессоры, как правило, ориентированы на последовательное выполнение инструкций, в то время как ППВМ могут обрабатывать несколько задач одновременно.

## Литература

1. Rivest R. The MD5 Message-Digest Algorithm: The MD5 Message-Digest Algorithm. Request for Comments. Internet Engineering Task Force, 1992. 21 p.
2. Энциклопедия сетевых протоколов. URL: <https://www.protocols.ru/WP/wpcontent/uploads/2014/02/rfc1321.pdf> (дата обращения: 10.11.2023).
3. Электронные компоненты. URL: [https://www.digikey.com/products/en/integrated-circuits-32](https://www.digikey.com/products/en/integrated-circuits/32) (дата обращения: 09.11.2023).

Поступила 21.02.2024; принята к публикации 08.05.2024

## Информация об авторах

**Мотылёва Яна Сергеевна** – магистрант, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84); специалист, АО «Концерн «Созвездие» (394018, Россия, г. Воронеж, ул. Плехановская, д. 14), тел. 8(926)109-23-95, e-mail: yanabelokopytina@yandex.ru

**Хренова Юлия Геннадьевна** – магистрант, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84); инженер, АО «Концерн «Созвездие» (394018, Россия, г. Воронеж, ул. Плехановская, д. 14), тел. 8 (920) 449-95-49, e-mail: ykhrenova32@gmail.com

**Циколия Владислав Заурович** – магистрант, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84); конструктор, АО «Концерн «Созвездие» (394018, Россия, г. Воронеж, ул. Плехановская, д. 14), тел. 8(920) 542-93-24, e-mail: vlad.zikoliy@yandex.ru

**Чернышев Антон Юрьевич** – ассистент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), тел. 8 (908) 133-63-86, e-mail: chernyshev.antog@yandex.ru

## COMPREHENSIVE COMPARISON OF CONTROL DEVICES IN TELECODE AND VOICE COMMUNICATION SYSTEMS

Ya.S. Motyleva<sup>1,2</sup>, Yu.G. Khrenova<sup>1,2</sup>, V.Z. Tsikolia<sup>1,2</sup>, A.Yu. Chernyshev<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

<sup>2</sup>JSC “Concern “Sozvezdie”, Voronezh, Russia

**Abstract:** the features of control in telecode and voice communication systems are considered. Certain requirements for the speed and volume of data transfer in modern equipment have been identified. Methods used to verify the integrity and authenticity of data are considered. For practical implementation, the MD5 algorithm was chosen since it is one of the most common. The task was set to select programmable devices to solve specific problems. To assess the performance of occupied resources, a functional device was taken and tested on various programmable devices, for each of which code was written in the corresponding programming languages. Based on the test results, we can conclude that the use of user-programmable gate arrays makes it possible to successfully perform several parallel tasks at a lower clock frequency along with popular microcontrollers, which indicates a possible reduction in the cost of telecode and voice communication systems. The use of digital signal processors is justified only for solving highly specialized problems associated with digital processing of analog signals and real-time control systems

**Key words:** programmable control devices, microprocessors, user-programmable valve matrices (UPVCs)

### References

1. Rivest R. “The MD5 Message-Digest Algorithm: The MD5 Message-Digest Algorithm”, *Request for Comments. Internet Engineering Task Force*, 1992, 21 p.
2. “Encyclopedia of Network Protocols”, available at: <https://www.protocols.ru/WP/wp-content/uploads/2014/02/rfc1321.pdf>
3. “Electronic components”, available at: <https://www.digikey.com/products/en/integrated-circuits-ics/32> (accessed 11.09.2023).

Submitted 21.02.2024; revised 08.05.2024

### Information about the authors

**Yana S. Motyleva** – Master’s Student, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Ocyabrya str., Voronezh 394026, Russia); Specialist, JSC “Concern “Sozvezdie” (14 Plekhanovskaya str., Voronezh 394018, Russia), e-mail: yanabeloopytina@yandex.ru

**Vladislav Z. Tsikolia** – Master’s Student, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Ocyabrya str., Voronezh 394026, Russia); Designer, JSC “Concern “Sozvezdie” (14 Plekhanovskaya str., Voronezh 394018, Russia), tel.: 8 (920) 542-93-24, e-mail: vlad.zikoliy@yandex.ru

**Yulia G. Khrenova** – Master’s Student, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Ocyabrya str., Voronezh 394026, Russia); Engineer, JSC “Concern “Sozvezdie” (14 Plekhanovskaya str., Voronezh 394018, Russia), tel.: 8 (920) 449-95-49, e-mail: ykhrenova32@gmail.com

**Anton Yu. Chernyshev** – Assistant, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Ocyabrya str., Voronezh 394026, Russia), tel.: 8 (908) 133-63-86, e-mail: chernyshev.antog@yandex.ru

## СОВМЕСТНАЯ АРХИТЕКТУРА ВОСХОДЯЩЕЙ ЛИНИИ СВЯЗИ МАССИВНЫХ СИСТЕМ МИМО И OFDM-РАДАРА

О.Н. Чирков, А.В. Башкиров, Ю.М. Пшеницина

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

**Аннотация:** предлагается совместная архитектура восходящей линии связи массивных систем МИМО (Multiple Input Multiple Output – множественный вход и множественный выход) и OFDM-радара (Orthogonal Frequency-Division Multiplexing — ортогональное мультиплексирование с частотным разделением каналов) с использованием одних и тех же аппаратных средств и частотно-временных ресурсов. Рассматриваются восходящая линия связи и радиолокационное зондирование ближнего радиуса действия, когда на базовую станцию (БС) поступают данные от пользовательского оборудования и одновременно радиолокационные сигналы от целей. Сигнал, принимаемый каждой антенной БС, состоит из радиолокационных сигналов и данных канала связи, которые необходимо отдельно обрабатывать для обнаружения и передачи данных. Обнаружение сигнала достигается за счет использования разнесения каналов между пользовательским оборудованием и целями, как в массовых системах связи МИМО. Сигнал от пользователя обнаруживается и демодулируется, затем вычитается из принятых сигналов для получения радиолокационных данных. Для радара используется радиолокационная обработка на основе символов, поскольку она обеспечивает существенный выигрыш в обработке, а эффективность его обнаружения не зависит от формы передаваемого радиолокационного сигнала. Таким образом, получается двухфункциональная массивная система радиолокационной связи OFDM по восходящей линии связи МИМО. Кроме того, рассматривается анализ собственные помех, которые возникают между одновременно работающими передающей и радарной антеннами (т.е. в полнодуплексном режиме). Исследование показывает, что возможно разработать архитектуру передатчика, которая может удовлетворительно взаимодействовать с несколькими абонентами одновременно с использованием частотно-временных ресурсов при радарном зондировании окружающей среды передачи данных без существенного увеличения стоимости или сложности системы

**Ключевые слова:** сигнал, система, восходящая линия связи, базовая станция, пропускная способность, радиолокация, разнесение каналов, МИМО, OFDM

### Введение

Растущее число подключенных мобильных устройств и требования к их обслуживанию привели к тому, что сети мобильной связи стали поддерживать дополнительные функции и сервисы. В то же время технологии радиозондирования также требуются в некоторых коммерческих и промышленных приложениях. Например, автономное вождение и интеллектуальные транспортные системы, обнаружение беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) [1]. Эти приложения нуждаются в надежной коммуникационной инфраструктуре для безопасной и бесперебойной работы, и, следовательно, ожидается, что они также будут подключены к будущим мобильным сетям. Предполагается, что архитектуры мобильных сетей 6G будут обеспечивать радарное зондирование наряду со связью, особенно для интеллектуальных транспортных средств, беспилотных летательных аппаратов, локализации и промышленной автоматизации.

В нескольких исследованиях предложены различные методы для обеспечения функционирования двухфункциональных платформ радара и связи, использующих одни и те же частотно-временные ресурсы на одной платформе. Радиолокационное зондирование и связь могут совместно выполняться БС или точкой доступа (ТД) с использованием одного и того же аппаратного обеспечения для эффективного использования ограниченных частотных ресурсов и повышения энергоэффективности системы [2].

Совместная передача сигнала радара наряду с передачей по нисходящей линии связи была широко исследована, и предложены различные методы.

В [3] рассмотрен импульсный радар дальнего действия с нисходящей и восходящей линиями связи. В другом подходе, предложенном в [4], передаваемые сигналы используются для обнаружения во время восходящей линии связи. Эти сигналы отражаются целями и улавливаются БС для оценки параметров цели. Однако эта модель обнаружения восходящей линии связи имеет ограниченные возможности, поскольку задержка сигналов связана с расстоянием до

пользовательского оборудования, которое неизвестно, а выходная мощность ограничена.

Помехи от радара на восходящей линии связи массивных MIMO-систем были исследованы в [5], где авторы считают, что радар дальнего действия передает форму сигнала, в то время как БС массивных MIMO принимают сигналы восходящей линии связи от пользователя на той же частоте. Была проанализирована пропускная способность связи, однако обнаружение радара не рассматривалось, поскольку это исследование было сосредоточено только на влиянии радиолокационных помех на восходящую линию связи MIMO.

Таким образом, совместный прием радиолокационных сигналов и данных связи по восходящей линии является актуальной задачей.

В данном исследовании представлена совместная платформа массивной радиолокационной связи MIMO [6], где радар работает одновременно с нисходящей линией связи, используя те же частотные ресурсы. Основной подход решения заключается в том, чтобы заставить радар MIMO формировать свой зондирующий сигнал в нулевом пространстве канала радиолокационной связи с помехами. Предложена форма сигнала радара OFDM. Она используется в массивных системах MIMO для

увеличения эффективности использования частотного спектра. OFDM разбивает широкий канал на множество узких подканалов, каждый из которых передается отдельным символом. Это позволяет повысить эффективность использования частотного спектра и уменьшить межсимвольные помехи и интерференцию между сигналами. В статье рассмотрен метод предварительного кодирования для двухфункциональной платформы MIMO OFDM. Системы MIMO и OFDM передают соответствующие сигналы, при этом занимая всю доступную полосу пропускания с перекрывающимися поднесущими.

### Архитектура базовой станции/точки доступа

Предложена новая архитектура передатчика для массивных систем MIMO, которая оценивает помехи от больших антенных решеток. Архитектура может использоваться для БС сотовых сетей или в точках доступа автомобильных систем для коммуникации нескольких абонентов, при этом всенаправленно излучая сигнал для радиолокационного обнаружения. На рис. 1 приведен принцип работы предложенной архитектуры.

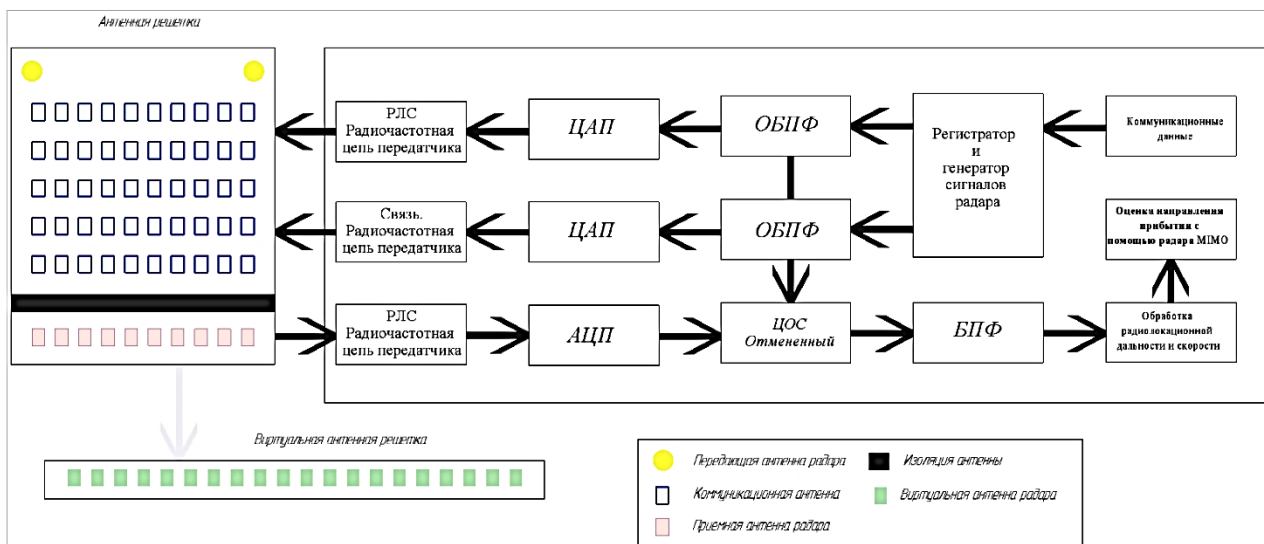


Рис. 1. Структурная схема архитектуры БС

Сначала вычисляются формы радиолокационного сигнала и матрицы прекодера связи, к ним добавляется циклический префикс, и вычисляется обратное быстрое преобразование Фурье (ОБПФ) этих сигналов перед их передачей в антенны через цифро-аналоговые преобразователи и радиочастотные цепи передатчи-

ка. На стороне приемника (радара) отраженные сигналы, полученные приемными антеннами, преобразуются в сигналы основной полосы частот через аналого-цифровой преобразователь (АЦП), вычисляется быстрое преобразование Фурье (БПФ) этих сигналов и удаляется циклический префикс. Цифровой пода-

витель оценивает собственные помехи от передающих антенн и устраняет их перед процессом БПФ [7]. После чего оцениваются профили дальности, скорости и угла поражения целей. Архитектура БС состоит из антенной решетки, пусть в нее входят  $M$ -антенных элементов для массивной связи по восходящей/нисходящей линии связи ММО [8].  $P$ -антенн для передачи ортогональных сигналов радара ММО и решетки однородных линейных антенн с  $Q$ -антеннами для приема отраженных сигналов. Расстояние между двумя соседними приемными антеннами радара или двумя соседними антеннами связи равно:

$$d_Q = \frac{\lambda}{2}. \quad (1)$$

Расстояние между двумя соседними передающими антеннами радара равно:

$$(Q - 1)d_Q. \quad (2)$$

В начале каждого блока когерентности требуется только оценка импульсной характеристики восходящей линии связи, что обусловлено взаимностью каналов в восходящем

и нисходящем направлениях. Операции связи и радара синхронизированы таким образом, что передающие антенны радара излучают сигнал, в то время как приемные антенны работают для приема эхо-сигналов от целей во время нисходящей линии связи. Все передающие и приемные антенны радара могут использоваться для связи по восходящей линии связи для увеличения пропускной способности. Возможно выполнить обнаружение цели во время восходящей линии связи, используя последовательное подавление помех. В то время как символы нисходящей линии связи должны передаваться исключительно в передатчиках, сигналы радара могут быть обнаружены БС после отражения от цели. Предполагается, что излучаемый радаром сигнал должен быть более мощный, чем сигналы связи, для достижения удовлетворительной точности обнаружения.

### Выбор модели радара

На рис. 2 приведены виды моделей радара. Рассмотрим подробнее каждую из них.

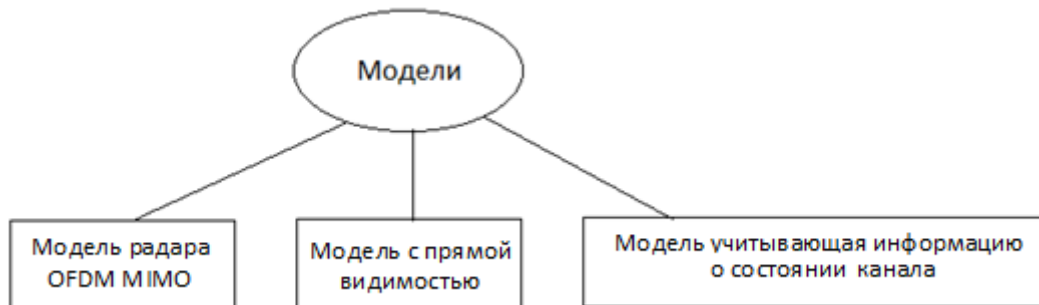


Рис. 2. Модели радара

Модель радара OFDM MIMO (Orthogonal Frequency Division Multiplexing Multiple Input Multiple Output) — это математическая модель, которая используется для описания работы технологии OFDM и MIMO. Используется радиолокационная обработка OFDM на основе символов модуляции, поскольку она обеспечивает более высокое отношение пика к боковому лепестку по сравнению с радиолокационной обработкой на основе корреляции в радарах OFDM. Модель радара учитывает все особенности процесса, включая передачу и прием сигнала, обработку данных и определение расстояния до цели. Она позволяет оценить качество работы, определить наилучшие параметры

передачи данных и улучшить точность измерения расстояния до цели.

Модель с прямой видимостью между антеннами (Direct Link Model) — это математическая модель, которая используется для описания передачи сигнала между двумя антеннами без учета влияния препятствий на пути сигнала. Она широко используется в беспроводных сетях для оценки качества связи и определения наилучших параметров передачи данных. Модель прямой видимости основана на предположении, что сигнал передается от одной антенны к другой без изменений и потерь. Она учитывает только затухание сигнала, которое происходит из-за расстояния между антеннами и влия-

ния окружающей среды. Для оценки качества связи с помощью данной модели используются различные параметры, такие как уровень шума, затухание сигнала и задержка. Эти параметры позволяют определить наилучшие параметры передачи данных и улучшить качество связи. Однако, модель прямой видимости имеет свои ограничения и не учитывает влияние препятствий на пути сигнала. В реальных условиях передачи сигнала могут возникать различные помехи, такие как отражения, преломления и дифракции, которые могут существенно влиять на качество связи.

CSI (Channel State Information) — это математическая модель, учитывающая информацию о состоянии канала, которая используется в беспроводных сетях для определения качества связи между передатчиком и приемником. Она позволяет оценить параметры канала, такие как уровень шума, затухание сигнала и задержку, что помогает определить наилучшую скорость передачи данных и улучшить качество связи. Оценка CSI происходит путем измерения.

Для выбора модели радара понадобится знания о характеристиках, представленных на рис. 3. Результатом проведенной работы будет являться модель радара.



Рис. 3. Алгоритм проектирования радара

Оптимальная форма радиолокационного сигнала при максимизации пропускной способности канала связи может быть разработана путем минимизации расстояния между симво-

лами в тракте связи и радиолокационными помехами, принимаемыми пользователем.

Мощность передачи является одним из ключевых параметров, влияющих на качество связи в беспроводных сетях. Она определяет дальность, скорость передачи данных и надежность связи. Однако, высокая мощность может привести к перегрузке сети и ухудшению качества связи.

CSI — это информация о состоянии канала связи, которая используется для оптимизации передачи данных. Идеальный CSI-приемник точно знает состояние канала связи и может корректировать мощность передачи соответствующим образом. Знание о канале передачи позволяет улучшить качество связи и повысить скорость сигнала, который передается по каналу, включая его изменений на приемнике. Изменения могут быть вызваны различными факторами, такими как наличие препятствий на пути сигнала или изменение расстояния между передатчиком и приемником при движении относительно друг друга. Для оценки состояния канала используются различные методы, включая измерение мощности сигнала, анализ спектра и корреляционный анализ. Оценка CSI может быть выполнена как на стороне передатчика, так и на стороне приемника.

Для реализации двухфункциональной архитектура массивной системы связи MIMO- и OFDM-радарной системы вводим прекодер (рис. 1), который использует эти предсказанные радиолокационные помехи (информацию о состоянии канала связи) и интерполирует их на принимаемые символы на пользовательском оборудовании. Этот способ не требует определенного формирования луча радара, обеспечивает большую гибкость радара, так что могут излучаться всенаправленные или направленно ориентированные радиолокационные сигналы.

### Заключение

В работе представлена двухфункциональная архитектура массивной системы связи MIMO и OFDM-радара. Было показано, что помехи, создаваемые радаром, могут быть использованы для оценки канала. Кроме того, представлен алгоритм проектирования формы сигнала радара OFDM для максимального увеличения пропускной способности сети связи. Исследование показывает, что возможно разработать архитектуру передатчика, которая может удовлетворительно взаимодействовать с несколькими абонентами одновременно с ис-

пользованием частотно-временных ресурсов при радарном зондировании окружающей среды передачи данных без существенного увеличения стоимости или сложности системы. Предлагаемая архитектура может быть использована в автомобильных или сотовых сетях с использованием одного и того же аппаратного обеспечения и одних и тех же частотно-временных ресурсов.

#### Литература

1. Multi-mode SDR radar platform for small air-vehicle drone detection / Y. Kwag, I. Woo, H. Kwak, Y. Jung // in 2016 CIE International Conference on Radar (RADAR). Oct. 2016. PP. 1-4.
2. Joint radar-communication strategies for autonomous vehicles: Combining two key automotive technologies / D. Ma, N. Shlezinger, T. Huang, Y. Liu, Y. C. Eldar // IEEE Signal Processing Magazine. July 2020. Vol. 37. PP. 85-97.
3. Joint radar and communication design: Applications, state-of-the-art, and the road ahead / F. Liu, C. Masouros,

A.P. Petropulu, H. Griths, L. Hanzo // IEEE Transactions on Communications. June 2020. Vol. 68. PP. 3834-3862.

4. Framework for a perceptive mobile network using joint communication and radar sensing / M.L. Rahman, J.A. Zhang, X. Huang, Y.J. Guo, R.W. Heath // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. June 2020. Vol. 56. PP. 1926-1941.

5. D'Andrea C., Buzzi S., Lops M. Communications and radar coexistence in the massive MIMO regime: Uplink analysis // IEEE Transactions on Wireless Communications. Jan. 2020. Vol. 19. PP. 19-33.

6. 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.

7. Чирков О.Н. Методы оценки канала связи с пространственной модуляцией на основе корреляции // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2021. Т. 17. № 4. С. 106-110.

8. Чирков О.Н. Математическая модель взвешенной оценки канала радиосвязи для многоантенных OFDM-систем // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2019. Т. 15. № 4. С. 49-54.

Поступила 29.02.2024; принята к публикации 08.05.2024

#### Информация об авторах

**Чирков Олег Николаевич** – старший преподаватель, Воронежский государственный технический университет (390006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: chir\_oleg@mail.ru, ORCID: 0000-0003-2250-2100

**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: 0000-0003-0939-722X

**Пшеницина Юлия Михайловна** – студент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: julea2002@gmail.com

## JOINT UPLINK ARCHITECTURE OF MASSIVE MIMO AND OFDM RADAR SYSTEMS

O.N. Chirkov, A.V. Bashkirov, Yu.M. Pshenitsyna

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

**Abstract:** the article proposes a joint uplink architecture of massive MIMO and OFDM radar systems using the same hardware and time-frequency resources. An uplink and short-range radar sensing are considered, when data from user equipment is received at the BS base station, and at the same time radar signals from targets. The signal received by each BS antenna consists of radar signals and communication channel data, which must be processed separately for detection and data transmission. Signal detection is achieved by using channel separation between user equipment and targets, as in mass MIMO communication systems. The signal from the user is detected and demodulated, then subtracted from the received signals to obtain radar data. Symbol-based radar processing is used for the radar, since it provides a significant gain in processing, and the effectiveness of its detection does not depend on the shape of the transmitted radar signal. Thus, a two-functional massive OFDM radar communication system is obtained over the MIMO uplink. In addition, the analysis of intrinsic interference that occurs between simultaneously operating transmitting and radar antennas (i.e. in full-duplex mode) is considered. The study shows that it is possible to develop a transmitter architecture that can satisfactorily interact with several subscribers simultaneously using time-frequency resources for radar sensing of the data transmission environment without significantly increasing the cost or complexity of the system

**Key words:** signal, system, uplink, base station, bandwidth, radar, channel diversity, MIMO, OFDM

#### References

1. Kwag Y., Woo I., Kwak H., Jung Y., “Multi-mode SDR radar platform for small air-vehicle drone detection,” 2016 CIE International Conference on Radar (RADAR), Oct 2016, pp. 1–4.
2. Ma D., Shlezinger N., Huang T., Liu Y., Eldar Y.C., “Joint radar-communication strategies for autonomous vehicles: Combining two key automotive technologies,” *IEEE Signal Processing Magazine*, July 2020, vol. 37, pp. 85–97.

3. Liu F., Masouros C., Petropulu A.P., Griffiths H., Hanzo L., “Joint radar and communication design: Applications, state-of-the-art, and the road ahead,” *IEEE Transactions on Communications*, June 2020, vol. 68, pp. 3834–3862.
4. Rahman M.L., Zhang J.A., Huang X., Guo Y.J., Heath R.W., “Framework for a perceptive mobile network using joint communication and radar sensing,” *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, June 2020, vol. 56, pp. 1926–1941.
5. D'Andrea C., Buzzi S., Lops M., “Communications and radar coherence in the massive MIMO regime: Uplink analysis,” *IEEE Transactions on Wireless Communications*, Jan 2020, vol. 19, pp. 19-33.
6. 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.
7. Chirkov O.N. “Methods of estimating a communication channel with spatial modulation based on correlation”, *The Bulletin of the Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2021, vol. 17, no. 4, pp. 106-110.
8. Chirkov O. N. “Mathematical model of weighted evaluation of a radio communication channel for multi-antenna OFDM systems”, *The Bulletin of the Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2019, vol. 15, no. 4, pp. 49-54.

Submitted 29.02.2024; revised 08.05.2024

#### Information about the authors

**Oleg N. Chirkov** - Senior Lecturer, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Ocyabrya str., Voronezh 394026, Russia), e-mail: chir\_oleg@mail.ru, ORCID: 0000-0003-2250-2100

**Alexey V. Bashkirov** – Dr. Sc. (Technical), Vice-Rector for Science and Innovation, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Ocyabrya str., Voronezh 394026, Russia), e-mail: fabi7@mail.ru, ORCID: 0000-0003-0939-722X

**Yulia M. Pshenitsina** – Student, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Ocyabrya str., Voronezh 394026, Russia), e-mail: julea2002@gmail.com

## МЕТОДИКА ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЦИФРОВЫХ СФ-БЛОКОВ ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ

И.Р. Чекалдин<sup>1,2</sup>, А.В. Русанов<sup>1,2</sup>, В.А. Смерек<sup>2</sup>, А.И. Сукачев<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

<sup>2</sup> АО «Научно-исследовательский институт электронной техники», г. Воронеж, Россия

**Аннотация:** рассмотрены основные этапы разработки цифровых сложно-функциональных (СФ/ИР) блоков в составе сверхбольших интегральных схем (СБИС) и систем на кристалле (СНК). Обозначены основные преимущества концепции проектирования интегральных микросхем (ИМС) с применением стандартных ячеек (standard cells) и СФ-блоков, а также сформулированы основные цели применения данной концепции. Определено место СФ-блоков в маршруте проектирования СНК на примере спиралевидного маршрута, на основе которого выделена иерархия приоритетности некоторых этапов проектирования заказных СФ-блоков. Рассмотрены аспекты стандартизации в проектировании на уровне моделей во избежание конфликтных ситуаций при размещении и подключении ячеек. Проанализирован состав итоговых топологических, схематических файлов описания, необходимый и достаточный для поставки разработанного блока заказчику и последующего его применения в маршруте проектирования коммерческого изделия. Приведены способы защиты коммерческой информации при передаче файлов топологии на предприятия по производству кристаллов ИМС. Программные возможности (проведение верификации, синтез цифровых автоматов, проектирование топологии с использованием средств автоматизации) при проектировании СФ-блоков были описаны в рамках функциональных возможностей программных средств, предоставляемых компаниями Cadence, Mentor Graphics, Synopsys. Кратко затронуты компетентные действия заказчика СФ-блока после получения им необходимых файлов моделирования, топологии, описания и документации

**Ключевые слова:** цифровые СФ-блоки, интегральные микросхемы, Verilog, маршрут проектирования, лицензия GPL/LGPL, СФ-блоки

### Введение

За последнее время, несмотря на стремительное развитие средств проектирования, уменьшение участия разработчика в процессе создания коммерческих устройств микроэлектроники не происходит. Более того — наличие определённых сформированных компетенций в разработке, например, аналоговой схемотехники, незаменимы до сих пор. Системы автоматизированного проектирования (САПР) лишь помогают сократить время на разработку, верификацию и моделирование изделий. Кроме вышесказанного, по оценке из [1], подобная «классическая» методика проектирования современных СБИС влечёт за собой огромные временные трудозатраты, что неприемлемо с точки зрения реализации коммерческих проектов.

Снижение трудоёмкости и стоимости проектирования — одна из важнейших задач микроэлектроники, одним из основных путей решения которой стало создание библиотек СФ-блоков [2].

Чёткого и структурированного алгоритма проектирования СФ-блоков разработано не

было. Дизайнеры вынуждены прибегать к отлаженной стратегии, применяемой только на конкретных предприятиях, от чего высока вероятность конфликтов при передаче информации как заказчику СФ-блока, так и fabless [3] — предприятию. Вследствие чего необходимо установить оптимальный порядок действий при проектировании, которого может придерживаться разработчик, комбинируя его с различными обязательными, либо уже отлаженными приёмами проектирования. Главной задачей при формировании алгоритма была гибкость, и при этом сохранение классических (стандартных) процедур.

### Классификация СФ-блоков

Классифицировать СФ-блоки принято следующим образом.

Hard-IP — сложно-функциональный блок, представленный в виде топологии, разработанной для определённого технологического процесса [4]. Типичными представителями Hard-IP блоков являются: цифро-аналоговые (ЦАП) и аналого-цифровые (АЦП) преобразователи, фильтры на переключаемых конденсаторах, операционные усилители, блоки фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ) и т.д.

Soft-IP — сложно-функциональный блок, представленный в виде описания на синтезируемом подмножестве языка описания аппаратуры или списка соединений базовых логических элементов [4]. Зачастую в качестве Soft-IP блоков выступают цифровые ядра, преобразователи кодов, различные арифметико-логические устройства (АЛУ), интерфейсы обмена данными и др. Подобные СФ-блоки составляются на языках описания аппаратуры (Verilog, VHDL, System Verilog), и могут быть синтезированы с помощью САПР как на уровне регистровых передач (RTL), так и на уровне топологии, на разных предприятиях.

Configurable-IP — сложно-функциональный блок, имеющий в своём составе регулярные структуры однотипных ячеек. Представителями данного класса являются массивы памяти, многоядерные системы, макроячейки программируемых логических интегральных схем (ПЛИС) и другие. Данный класс является частичным объединением Hard-IP (за счёт жёсткой привязки к техпроцессу) и Soft-IP (за счёт предоставления гибкой подстройки под проектные задачи заказчиком).

Foundation-IP — сложно-функциональный блок, являющийся элементом библиотеки стандартных цифровых компонентов. К таким компонентам относятся логические элементы, триггеры, мультиплексоры, буферы с тремя состояниями и другие. Библиотеки компонентов в рамках одного техпроцесса разрабатывают под определённые требования (быстродействие, площадь на кристалле, рабочая температура, радиационная стойкость). Простота использования, а также функциональность таких СФ-блоков в библиотеках позволяет применять их наиболее универсально по сравнению с другими, и на их основе создавать полноценные Soft-IP и Configurable-IP блоки. Иногда для Foundation-IP достаточно только поведенческого описания на уровне языка описания аппаратуры.

Verification-IP — сложно-функциональный блок, являющийся структурным элементом тестового окружения и предназначенный для проверки и подтверждения правильности работы микросхемы [4]. Подобные блоки необходимы для того, чтобы заказчик смог удостовериться в правильности функционирования объекта заказа. Для Hard-IP и Soft-IP блоков, а точнее для их Verilog-описания, такие блоки называются «testbench».

Для микросхем программируемой логики также существует понятие Firm-IP [2] (или firm-ядер). Такие блоки нацелены на оптимизацию быстродействия и имеют более жёсткую привязку топологии к техпроцессу, чем ячейки типа Foundation-IP и Soft-IP.

Иная классификация СФ-блоков может быть проведена по параметрам, существенно влияющим на функционирование данного блока, вплоть до критериев качества и точности соответствия заявленным характеристикам (степени их отклонения от заданного значения).

### Общие этапы проектирования цифровых СФ-блоков

Сложно-функциональные блоки типа Soft-IP имеют, по сравнению с Foundation-IP, следующие отличия:

- большую площадь, занимаемую на кристалле;
- меньшее быстродействие;
- более высокую сложность функционирования.

Кроме того, стандартные ячейки цифровых библиотек делятся на комбинационные и последовательностные [2]. В итоге можно сделать вывод, что основные этапы проектирования для двух вышеупомянутых классов схожи между собой, хоть и отличаются масштабами оценки тех или иных параметров.

В настоящее время наиболее популярной методологией проектирования СНК является спиралевидная [1], в которой маршрут проектирования разбит на несколько параллельных ответвлений, а именно:

- разработка тестового окружения для разрабатываемого СФ-блока;
- разработка поведенческой модели;
- логический синтез;
- физический синтез;

В процессе реализации каждого из ответвления разработчики взаимодействуют между собой по промежуточным этапам разработки (сравнение результатов тестирования, предварительная оценка площади на кристалле и т.д.) [5].

Из этой методологии целесообразно рассмотреть общие основные этапы проектирования цифровых СФ-блоков. Данные этапы для наглядности были сведены в последовательность на рис. 1.

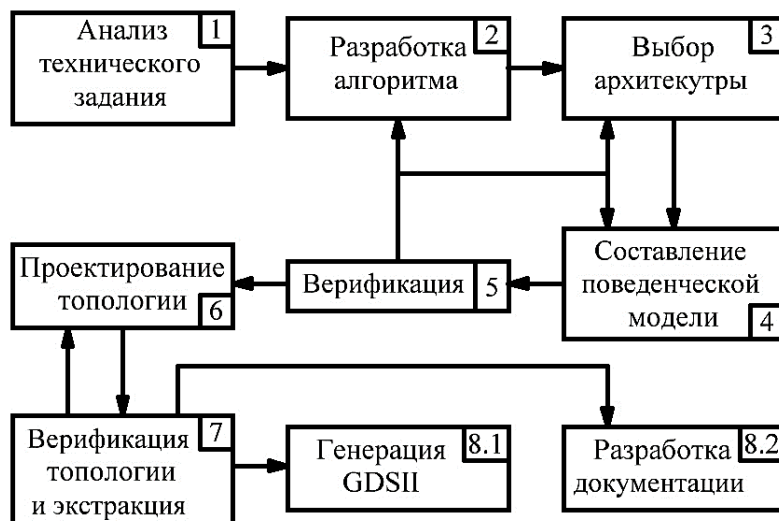


Рис. 1. Этапы проектирования цифровых СФ-блоков

1. Первым обобщённым этапом в проектировании цифрового СФ-блока является анализ требований, предъявляемых к СФ-блоку.

На данном этапе блок рассматривается с точки зрения конечного продукта, будучи заданным в составе более сложного СФ-блока или СНК. Исходными данными для выполнения этапа являются:

- функциональность блока;
- потребление;
- быстродействие;
- занимаемая площадь на кристалле.

Данный этап привязан к технологическому процессу, реализуемому на фабрике, а потому, на основе параметров используемой библиотеки PDK (process design kit), стоит определить возможность реализации требуемых параметров СФ-блока.

2. Разработка алгоритма работы СФ-блока.

В зависимости от назначения блока разработчику необходимо заложить в его модель работы требуемый функционал.

Применение САПР существенно облегчит выполнение поставленной выше задачи. Для этого подходят Cadence SPW, а также Synopsys CoCentric System Studio.

3. Определение применяемой архитектуры для СФ-блока.

Наиболее популярными «макроблоками» для интеграции в СФ-блок являются процессорные ядра. Однако это решение одновременно является самым сложным и дорогим.

Поэтому в случае возможного простого обхода применения ядер стоит обращать внимание на самостоятельно спроектированные контроллеры других подблоков и цифровые автоматы.

На данном этапе итоговый алгоритм работы распределяется по секторам выполняемых задач, тем самым формируя структурную схему СФ-блока.

4. Составление поведенческой модели с помощью языков описания аппаратуры.

С применением языков описания Verilog или VHDL, составляется описание СФ-блока в виде RTL-модели. Выполняется она на основе структурной схемы. Логика работы каждого из подблоков в структурной схеме должна соотноситься с цифровыми схмотехническими решениями, иначе итоговая модель после синтеза будет значительно более избыточна на уровне RTL, чем могла бы быть.

Для ячеек типа Foundation-IP поведенческая модель представляет собой модуль, имеющий входы и выходы, а также заложенную в него логику работы. На основе результатов моделирования в схмотехническом симуляторе (или AMS — Analog Mixed Signals симуляторе), может быть проведена характеристика модели с помощью возможных наборов характеристик *spesragam* и *specify* (для Verilog). Для такого вида анализа необходимо схмотехническое представление ячейки, представленное на рис. 2. Пример поведенческой модели ячейки представлен на рис. 3.

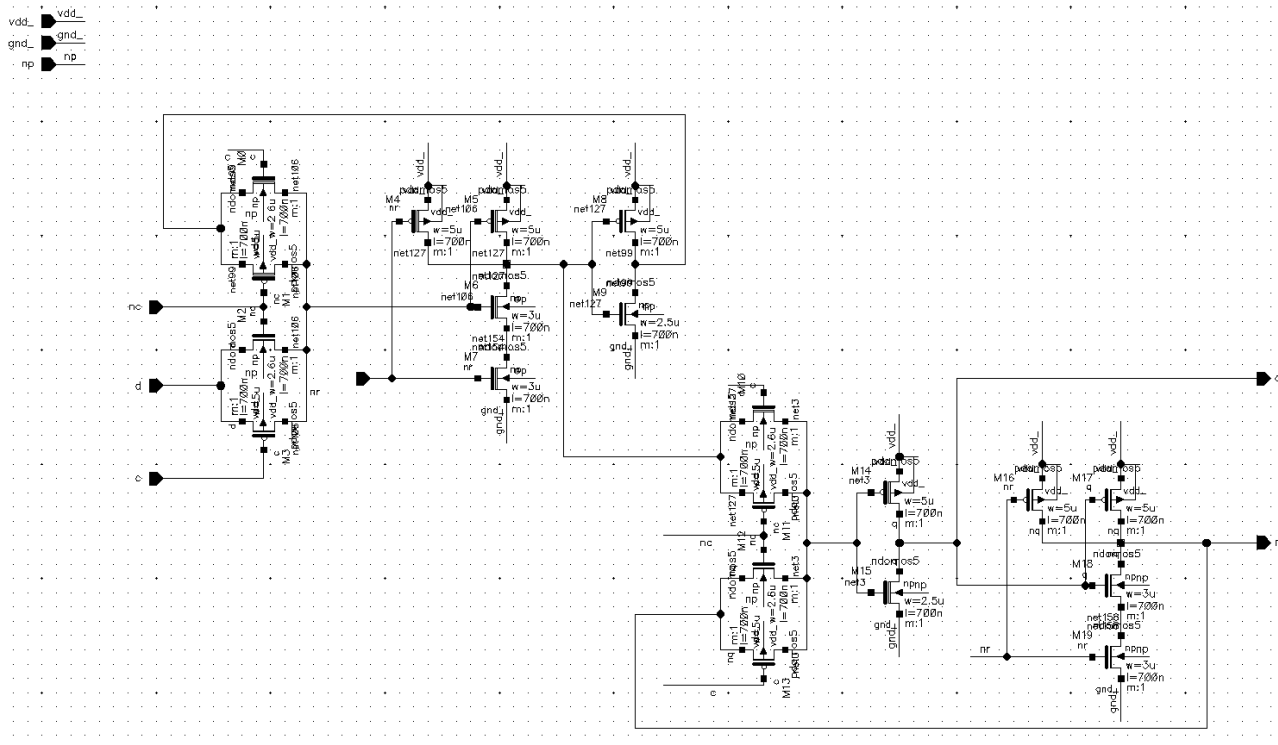


Рис. 2. Схематехническое представление Foundation-IP блока типа «D-триггер» в Cadence Virtuoso

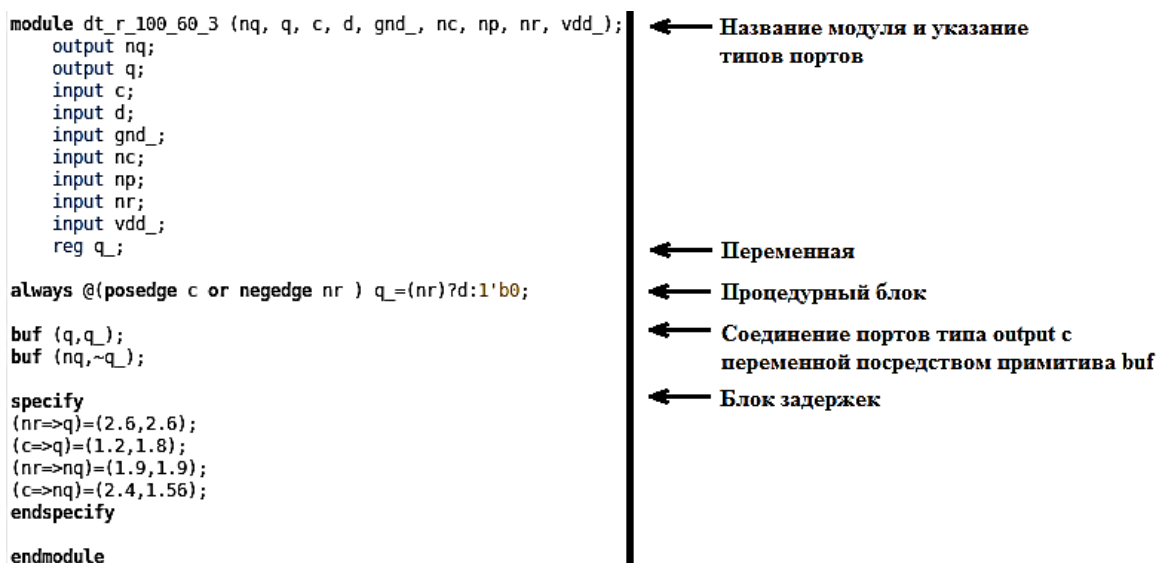


Рис. 3. Verilog-описание модуля типа «D-триггер»

Если в составе разрабатываемого СФ-блока планируется использование сторонних СФ-блоков, то следует использовать комплектное Verilog(VHDL)-описание, поставляемое вместе с покупным СФ-блоком.

Итоговая поведенческая модель для Soft-IP будет составлена в виде списка соединений (netlist) блоков структурной схемы, общий результат работы которых будет отражён в функционале разрабатываемого СФ-блока.

Иерархический подход к разработке подобных модулей существенно сокращает время проектирования, так как отслеживание ошибок в проектировании сводится к анализу не всего СФ-блока целиком, а его функциональных частей, алгоритмически которые были заложены на этапе 2.

При применении интегрированных в СФ-блок ядер необходимо разработать программные средства управления ядром, в зависимости

от его типа, назначения, системы команд, и множества других характеристик.

5. Верификация поведенческой модели.

Данный этап выполняется в цифровых либо цифро-аналоговых средах моделирования. Основной целью является определение несоответствия разрабатываемого СФ-блока техническим требованиям. В случае обнаружения несоответствия требуется доработать поведенческую модель блока, пока не будут соблюдены требуемые функциональные возможности. Если доработка поведенческой модели не позволяет обеспечить технические требования, то может потребоваться возврат на этап выбора архитектуры или разработки алгоритма.

Сборку полной модели, основанной на множестве подблоков, можно выполнить с помощью инструмента Innovus, а цифровое моделирование провести в среде NCVerilog либо

ModelSim, предварительно создав полноценное тестовое окружение.

Также, в случае проектирования библиотечных ячеек, необходимо провести аналоговое моделирование с целью измерения задержек переключения, длительностей фронтов и др. Результаты моделирования используются в процессе разработки более сложных блоков. Эти результаты позволяют определить задержки распространения сигнала внутри СФ-блока, представленного в виде списка соединений, определить критические пути распространения сигнала и оценить быстродействие.

Результат аналогового моделирования в среде Cadence ADE L представлен на рис. 4. Результаты вычисления требуемых задержек распространения сигналов с помощью встроенных средств вывода результатов ADE Cadence представлены на рис. 5.

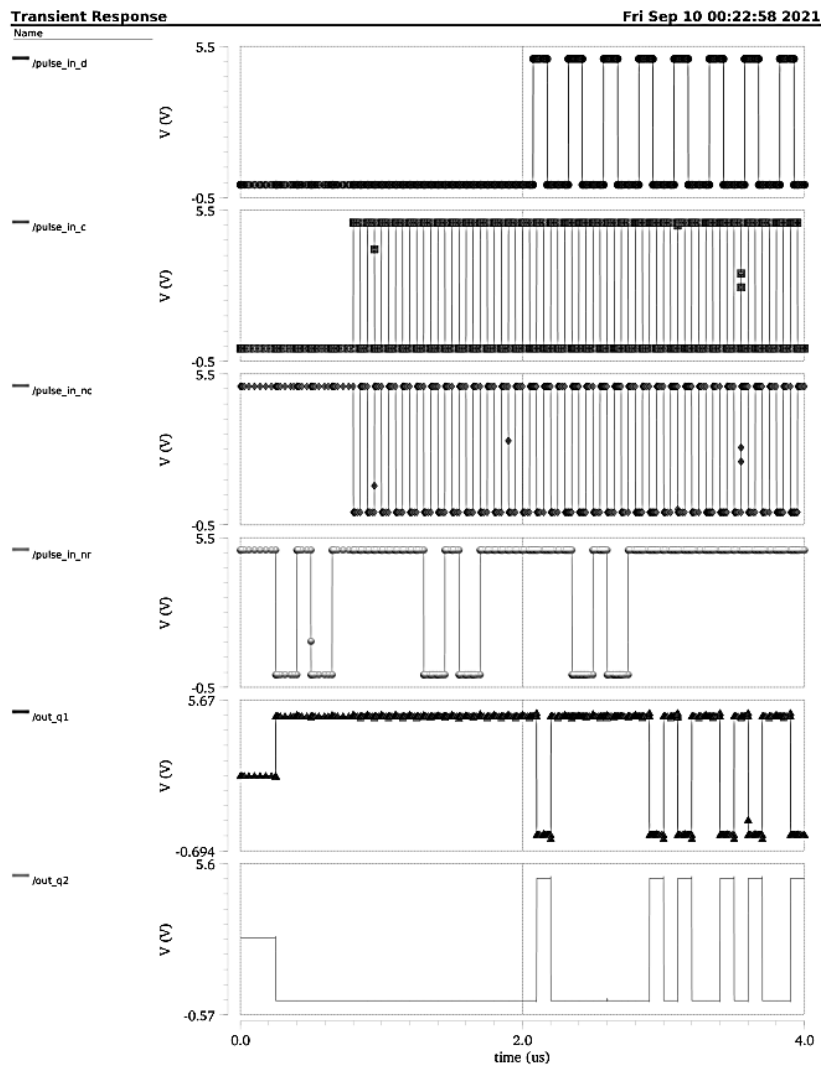


Рис. 4. Временные диаграммы аналогового моделирования ячейки типа «D-триггер»

Outputs					
	Name/Signal/Expr	Value	Plot	Save	Save Options
14	tpHL_c_q1	345p	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
15	tpLH_c_q1	296.3p	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
16	tpHL_c_q2	246.7p	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
17	tpLH_c_q2	224.6p	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
18	tr20_q1	63.72p	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
19	tf20_q1	83.5p	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
20	tr20_tf20_q1	-19.78p	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
21	tr20_tf20_q1_percent	-26.87	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
22	tr20_q2	89.88p	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
23	tf20_q2	92.42p	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
24	tr20_tf20_q2	-28.7p	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
25	tr20_tf20_q2_percent	-2.784	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	

Рис. 5. Результаты измерения задержек ячейки типа «D-триггер»

Данный этап является финальным, относящимся к «логическому синтезу». После этого необходимо провести контроль всех технических параметров. Дальнейшая разработка СФ-блока ведётся сугубо в поле «физического синтеза», а обнаружение ошибок в топологии по причине ошибок «логического» характера может обходиться очень дорого как с точки зрения времени, так и с материальной.

#### 6. Проектирование топологии СФ-блока.

Данный этап может выполняться как вручную, самим разработчиком, так и при помощи автоматического размещения элементов специализированным трассировщиком.

Использование автоматических средств расстановки следует применять на однотипные массивы компонентов либо на размещение компонентов внутри сложно-функциональных блоков, схемотехника которых не чувствительна к размещению. Автотрассировка может быть выполнена в среде Synopsys IC Compiler.

Ручное проектирование топологии целесообразно применять к Hard-IP блокам в составе разрабатываемого, для их оптимального размещения.

При проектировании топологии должны применяться различные методики, минимизирующие влияние дестабилизирующих факторов (температурного градиента, механических напряжений, влияние соседних блоков через паразитные связи).

Качественный подход к проектированию топологии минимизирует риск критических неисправностей при первой реализации схемы на кристалле.

#### 7. Верификация топологии СФ-блока.

На этом ключевом, но не завершающем этапе проектирование СФ-блока проводится ряд проверок. Необходимо провести проверку

соблюдения проектных норм (Design rule check, DRC), заложенных в технологическом процессе, извлечение электрической схемы из топологии и её сравнение с исходным схематическим представлением (Layout vs Schematic, LVS), а также экстракция паразитных параметров. Последнее может быть выполнено в среде Calibre xRC [6]. На данном этапе есть возможность исправить ошибки, связанные с технологическим несоответствием разработанной топологии, а также – с влиянием паразитных связей внутри СФ-блока.

### 8. Финальные этапы разработки

#### 8.1. Генерация GDSII.

На одном из финальных этапов по топологии СФ-блока генерируется вывод управляющей информации в формате GDSII. Данный формат служит для передачи топологии разработанного СФ-блока на производство. По файлу данного типа создаются фотошаблоны для процесса фотолитографии.

#### 8.2. Разработка документации.

Параллельно с генерацией GDSII производится оформление документации на разрабатываемый СФ-блок. Документация даёт полное представление об устройстве СФ-блока, его основных составных частях, принципе работы и особенностях эксплуатации.

### Маркетинговая составляющая процесса разработки СФ-блоков

В зависимости от типа Soft-IP, различают:

- свободное предоставление информации о модели поведения, тестовом окружении, документации и компиляторах;

- закодированный список соединений с невозможностью чтения содержимого заказчиком.

Последнее применяется чаще всего для сохранения коммерческой тайны и удешевления итогового передаваемого СФ-блока. Также существует дополнительное программное ограничение использования зашифрованных моделей — на период тестирования и внедрения блока.

Шифрование данных об исходном коде и компиляторах поддерживается пакетом программных средств Cadence [7].

Синтезированная топология СФ-блока заказчику также недоступна, из соображений предотвращения реинжинеринга.

Помимо заказчика и разработчика с моделью СФ-блока взаимодействует фабрика. Закрывая договор с заказчиком, фабрика предоставляет ряд лицензионных соглашений про-

дукции на выбор, которые гарантируют коммерческую сохранность передаваемой информации.

Основные варианты лицензирования:

- применение данного СФ-блока однократно, в конкретном проекте;
- многократное применение блока в проекте;
- многократное применение СФ-блока в разных проектах.

При лицензировании завод-изготовитель вносит СФ-блок в свой реестр и контролирует поступающие проекты на повторную реализацию этого же блока.

Также стоит отметить возможность получить в распоряжение как аналоговый, так и цифровой СФ-блок из открытых источников. Например, ресурс [8] предоставляет доступ к некоммерческим и коммерческим решениям в области СФ-блоков и библиотек стандартных ячеек под лицензиями GPL и LGPL.

После получения необходимой информации об СФ-блоке, заказчику следует:

- выполнить синтез Soft-IP блока под выбранный техпроцесс. Провести моделирование полученного СФ-блока с помощью комплектов Verifcation-IP средств, а также средств верификации, разработанных самостоятельно. Убедиться в соответствии заявленных характеристик. В случае несоответствия обратиться к разработчику СФ-блока;
- провести сопряжение СФ-блока с потенциальными ячейками и блоками для возможной идентификации конфликтного взаимодействия.
- интегрировать СФ-блок в разрабатываемое устройство на его основе. Провести полный цикл моделирования и отладки, экстракцию паразитных параметров и верификацию. Убедиться в работоспособности устройства.

### Заключение

Применение в проектах СФ-блоков позволяет существенно сократить время разработки и выхода готовых устройств микроэлектроники на рынок. Кроме того, с заимствованием отлаженного функционального блока

существенно сокращаются затраты материальных средств на разработку функционально схожего СФ-блока.

Многие современные предприятия по производству изделий микроэлектроники поддерживают т.н. fabless — модели проектирования и производства. Такая модель позволяет ещё сильнее уменьшить порог входа разработчиков, занимающихся выпуском СФ-блоков и не имеющих собственных производств, а в итоге — ускоряется разработка устройства потенциального заказчика выпущенного СФ-блока. Модель взаимодействия «разработчик-фабрика-заказчик» является весьма перспективной для каждой из сторон, и с годами рынок заказных СФ-блоков стремительно увеличивается.

В статье рассмотрены основные аспекты и этапы проектирования, являющиеся общими для Soft-IP, Foundation-IP блоков и СНК. На примере стандартной ячейки из цифровой библиотеки данные этапы были наглядно продемонстрированы. Краткость достаточных элементов методологии проектирования, а также возможности фабрик, позволяют быстро выйти на рынок полупроводникового дизайна, в том числе малым коммерческим организациям.

### Литература

1. Евтушенко Н., Немудров В., Сырцов И. Методология проектирования систем на кристалле. Основные принципы, методы, программные средства // ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес 6/2003. С. 7-11.
2. Угрюмов Е.П. Цифровая схемотехника: учеб. пособие для вузов. 3-е изд., перераб. и доп. СПб.: БХВ-Петербург, 2010. 816 с.
3. George S. Hurtarte, Evert A. Wolsheimer, Lisa M. Tafoya. Understanding fabless IC technology. Newnes, 2007. 273 p.
4. ГОСТ Р 70916–2023 Блоки сложно-функциональные. Термины и определения. М., 2023, 12 с.
5. Бухтеев А. Методы и средства проектирования систем на кристалле // EDA Expert. Апрель, 2003. Т. 4 (77). С. 4-14.
6. Хромов С.С., Зайцев А.А. Экстракция параметров паразитных элементов в системе Calibre xRC для посттопологического моделирования матричных мультиплекторов // Прикладная физика. 2011. № 4. С. 72-75.
7. Cadence Analog Design Environment User Guide. Product Version 5.1, 2006, 690 p.
8. OpenCores. URL: [www.opencores.org](http://www.opencores.org) (дата обращения 28.02.2024)

Поступила 13.03.2024; принята к публикации 13.05.2024

### Информация об авторах

**Чекалкин Илья Русланович** – студент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84); инженер-конструктор, АО «Научно-исследовательский институт электронной техники» (394033, Россия, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 5), e-mail: [iliachek@gmail.com](mailto:iliachek@gmail.com)

**Русанов Александр Валерьевич** – канд. техн. наук, ассистент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84); инженер-конструктор 1 категории, АО «Научно-исследовательский институт электронной техники» (394033, Россия, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 5), e-mail: ralval@rambler.ru  
**Смерек Владимир Андреевич** – начальник отдела, АО «Научно-исследовательский институт электронной техники» (394033, Россия, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 5), e-mail: smerek@niiet.ru  
**Сукачев Александр Игоревич** – старший преподаватель, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: mag.dip@yandex.ru

## DESIGN METHODOLOGY FOR DIGITAL IP-BLOCKS OF INTEGRATED CIRCUITS

I.R. Chekaldin<sup>1,2</sup>, A.V. Rusanov<sup>1,2</sup>, V.A. Smerek<sup>2</sup>, A.I. Sukachev<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

<sup>2</sup> Research Institute of Electronic Technology, Voronezh, Russia

**Abstract:** this paper considers the main stages of the development of complex-functional digital IP-blocks as part of ultra-large integrated circuits (ULSI) and systems on chip (SoC). Formulated the main advantages and disadvantages of the integrated circuits (IC) design concept using standard cells and IP-blocks are outlined, and the main objectives of the application of this concept. The place of IP-blocks in the SoC design route is determined, on basis of which the hierarchy of priority of some stages of the design of custom IP-blocks is highlighted. Some aspects of standardization in design at the model level are considered in order to avoid conflict situations when placing and connecting cells. The composition of the final topological, circuit design and description files is analyzed, which is necessary and sufficient for the delivery of the developed block to the customer, and its subsequent application in the design route. The methods of protecting commercial information when transferring topology files to enterprises producing IC crystals are given. Software capabilities (verification, synthesis of digital automata, topology design using automation tools) in the design of IP-blocks were described within the framework of the functionality of software tools provided by Cadence, Mentor Graphics, Synopsis. The relevant actions of the IP-block customer after receiving the necessary modeling, topology, description and documentation files are briefly touched

**Key words:** digital IP-blocks, integrated circuit, Verilog, design methodology, license GPL/LGPL, complex-functional blocks

### References

1. Evtushenko N., Evtushenko V., Syrtsov I. “Methodology of designing systems on chip. Basic principles, methods, software tools”, *ELECTRONICS: Science, Technology, Business (ELECTRONICA: Nauka, Tekhnologiya, Bisnes)*, 2003, no. 6, pp. 7-11.
2. Ugryumov E.P. “Digital circuitry: textbook for universities” (“Tsifrovaya skhemotekhnika: ucheb. posobiye dlya vuzov”), 3rd ed., rev. and add., St. Petersburg: BHV-Peterburg, 2010, 816 p.
3. George S. Hurtarte, Evert A. Wolsheimer, Lisa M. Tafoya. “Understanding fabless IC technology”, *Newnes*, 2007, 273 p., ISBN 978-0-7506-7944-2.
4. GOST R 70916–2023 “Complex-functional blocks. Terms and definitions” (“Blokhi slozhnofunktsional'nyye. Terminy i opredeleniya”), Moscow, 2023, 12 p.
5. Bukhteev A. “Methods and tools for designing systems on a chip”, *EDA Expert*, April 2003, vol. 4 (77), pp. 4-14.
6. Khromov S.S., Zaitsev A.A. “Extraction of parameters of parasitic elements in the Caliber xRC system for post-topological modeling of matrix multiplexers”, *Applied Physics (Prikladnaya fizika)*, 2011, no. 4, pp. 72-75.
7. “Cadence Analog Design Environment User Guide. Product Version 5.1”, 2006, 690p.
8. OpenCores, available at: [www.opencores.org](http://www.opencores.org) (accessed 28.02.2024)

Submitted 13.03.2024; revised 13.05.2024

### Information about the authors

**Ilya R. Chekaldin** – Student, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), Design Engineer, JSC Research Institute of Electronic Technology (5 St. Bolshevnikov str., Voronezh 394033 Russia), e-mail: ili-achek@gmail.com

**Alexander V. Rusanov** – Cand. Sc. (Technical), Assistant, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), 1st cat. Design Engineer, JSC Research Institute of Electronic Technology (5 St. Bolshevnikov str., Voronezh 394033 Russia), e-mail: ralval@rambler.ru

**Vladimir A. Smerek** – Head of the design department, JSC Research Institute of Electronic Technology (5 St. Bolshevnikov str., Voronezh 394033 Russia), e-mail: smerek@niiet.ru

**Alexander I. Sukachev** – Senior Lecturer, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: mag.dip@yandex.ru

## РАЗРАБОТКА АППАРАТНОЙ ЧАСТИ КОМПЛЕКСА ОПТИЧЕСКОЙ ДЕФЕКТОВКИ ТОПОЛОГИИ ЭЛЕКТРОННЫХ КОМПОНЕНТОВ

М.А. Ромашенко, Д.В. Васильченко

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

**Аннотация:** рассматривается один из этапов проекта по разработке, изготовлению и тестированию опытного образца программно-аппаратного комплекса оптической дефектовки топологии электронных компонентов. Сформулирована проблема, обосновывающая необходимость создания подобного комплекса оптической инспекции, а также сложности, возникающие при интеграции в существующий технологический процесс. Поставлена задача данного этапа, заключающаяся в выборе комплектующих для создания аппаратной части системы, определении подхода к их интеграции в существующую конструкцию инспекционного оптического прибора, а также разработке принципов автоматизированного управления перемещением предметного столика. Проведен выбор используемого аппаратного обеспечения, обосновано применение промышленного инспекционного микроскопа Nexcore NX1000 и цифровой камеры Daheng imaging MER2-2000-19U3C в контексте дальнейшего использования как системы машинного зрения. Представлена разработанная структурная схема программно-аппаратного комплекса оптической дефектовки топологии электронных компонентов, с учетом применения нейросетевых алгоритмов для автоматизации процесса выходного оптического неразрушающего контроля. Описана предлагаемая система автоматизированного перемещения предметного столика микроскопа, приведена ее функциональная схема и предложен вариант технической реализации. Указаны основные требования к компонентам системы автоматизированного перемещения, а также способ ее интеграции в инспекционный микроскоп Nexcore NX1000

**Ключевые слова:** электронный компонент, машинное зрение, дефектоскопия, оптическая инспекция, неразрушающий контроль

**Благодарности:** работа выполнена при финансовой поддержке Федерального государственного бюджетного учреждения «Фонд содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере» в рамках конкурса Старт-23-1 (очередь II) (договор №5049ГС1/89569 от 24.10.2023)

### Введение

Дефекты в кристаллах электронных компонентов, таких как микросхемы, транзисторы, диоды и др. могут приводить к существенному снижению их производительности, увеличению уровня брака и снижению надежности. Это подчеркивает важность тщательного контроля качества и разработки технологий дефектовки для минимизации вероятности прохождения бракованных изделий на последующие этапы в процессе производства [1].

Одним из распространенных методов контроля качества является оптическая инспекция, широко применяемая в различных сферах производства на высокодинамичных производственных линиях. Так авторами в [2] продемонстрировано успешное применение метода визуального контроля качества в процесс производства печатных плат. Оптическая дефектовка топологии полупроводниковых кристаллов на завершающем этапе производства перед разрезанием является обязательной процедурой,

направленной на обеспечение качества и надежности конечных микроэлектронных изделий. Этот процесс включает в себя детальный визуальный осмотр кристаллов для выявления и классификации различных дефектов, которые могут возникнуть на разных этапах производства.

Используя оптический микроскоп, специалисты осматривают полупроводниковую пластину на предмет дефектов. Процедура включает в себя поиск трещин, сколов, царапин, иных поверхностных дефектов, а также дефектов, связанных с самим процессом изготовления кристаллов, таких как неоднородности и включения. Очевидными недостатками ручной оптической дефектовки являются субъективная оценка оператора, низкая скорость дефектовки, вероятность ошибки вследствие усталости, высокие затраты на труд и т.п.

Автоматизация процесса оптической дефектовки полупроводниковых кристаллов может улучшить качество и эффективность производства. Но при этом ряд проблем связанных с человеческим фактором все равно остается нерешенными. Принципиально новым качественным подходом является обработка полученных

автоматизированным способом данных при помощи машинного зрения и алгоритмов обработки изображений. Применение подобных автоматизированных решений для оптической инспекции улучшает точность обнаружения дефектов и повышает эффективность процессов контроля качества, снижая зависимость от человеческого фактора и увеличивая скорость производства. [3, 4].

### Постановка задачи

Решаемая проблема заключается в низкой автоматизации процесса выходного контроля при выпуске изделий микроэлектроники и, как следствие, снижении эффективности производства из-за отсутствия оперативной корректировки параметров технологических процессов являющихся причинами брака.

Целью выполняемого проекта является разработка опытного образца программно-аппаратного комплекса (ПАК) дефектовки топологии электронных компонентов и модулей, позволяющего проводить выходной оптический контроль качества изделий с применением системы искусственного интеллекта.

В проекте решаются научно-технические задачи создания аппаратной части комплекса дефектовки (система перемещения предметного столика инспекционного оптического прибора, цифровая камера высокого разрешения), а также разработки программного обеспечения управления ПАК и математической обработки оптических снимков inspectируемых изделий.

На текущем этапе выполнения проекта требовалось создание опытного образца аппаратной части. Таким образом, постановка задачи формулировалась как выбор комплектующих для создания аппаратной части системы, определение подхода к их интеграции в существующую конструкцию инспекционного оптического прибора, а также разработка принципов автоматизированного управления перемещением предметного столика. Решение данной задачи приведено далее.

### Выбор аппаратного обеспечения

В качестве аппаратного обеспечения разрабатываемой системы был выбран промышленный инспекционный микроскоп Nexcore NX1000 (№2844, поверка до 24.05.24) представленный на рис 1. Данный промышленный прибор оптического контроля имеет технические характеристики [5], которые полностью удовлетворяет требованиям, заложенным в ТЗ на разрабатываемый программно-аппаратный

комплекс оптической дефектовки топологии электронных компонентов.

В качестве фотокамеры для передачи изображения на персональный компьютер была выбрана цифровая камера от компании Daheng imaging MER2-2000-19U3C (рис. 2). Данная цифровая фотокамера имеет технические характеристики [6], которые полностью обеспечивают требования, указанные в ТЗ на разрабатываемый программно-аппаратный комплекс оптической дефектовки топологии электронных компонентов.

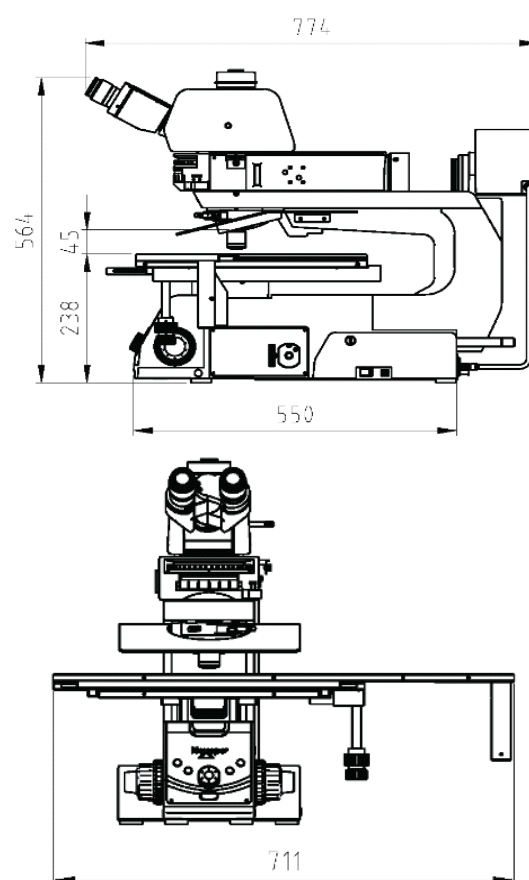


Рис. 1. Чертеж общего вида микроскопа Nexcore NX1000



Рис. 2. Общий внешний вид цифровой фотокамеры MER2-2000-19U3C

Для корректного исполнения программных модулей автоматизированного сбора, обработки и анализа изображений при выявлении дефектов в полупроводниковых кристаллах должен использоваться персональный компьютер со следующими техническими характеристиками:

- тип / марка процессора: не хуже Intel Core i5-12600K или AMD Ryzen 5 5600;
- тип и объем оперативной памяти: DDR4 (3200 МГц) не менее 16 Гб;
- тип видеокарты: не хуже RTX Nvidia 3060Ti 8 Гб.
- тип операционной системы: Windows 10 или Ubuntu 20.04.

Настройка связи между микроскопом с установленной на него фотокамерой и ПК осуществляется с использованием интерфейсов, поддерживаемых операционной системой. Разрабатываемые программные модули используют стандартные протоколы управления и обмена данными.

Для удобства работы оператора с комплек-

сом должен быть предусмотрен интуитивно понятный графический пользовательский интерфейс (GUI), позволяющий контролировать процесс инспекции, просматривать изображения и проводить анализ.

Созданные алгоритмы машинного обучения и компьютерного зрения должны быть исполнены в форме программных модулей, реализованы на языке программирования Python с использованием стандартных библиотек (OpenCV, numpy, PyQt). При этом GUI является центральным классом разрабатываемого программного обеспечения, через который осуществляется автоматизированный сбор, обработка и анализ изображений для выявления дефектов в полупроводниковых кристаллах.

### Структурная схема ПАК

Разработанная структурная схема программно-аппаратного комплекса оптической дефектовки топологии электронных компонентов представлена на рис. 3.

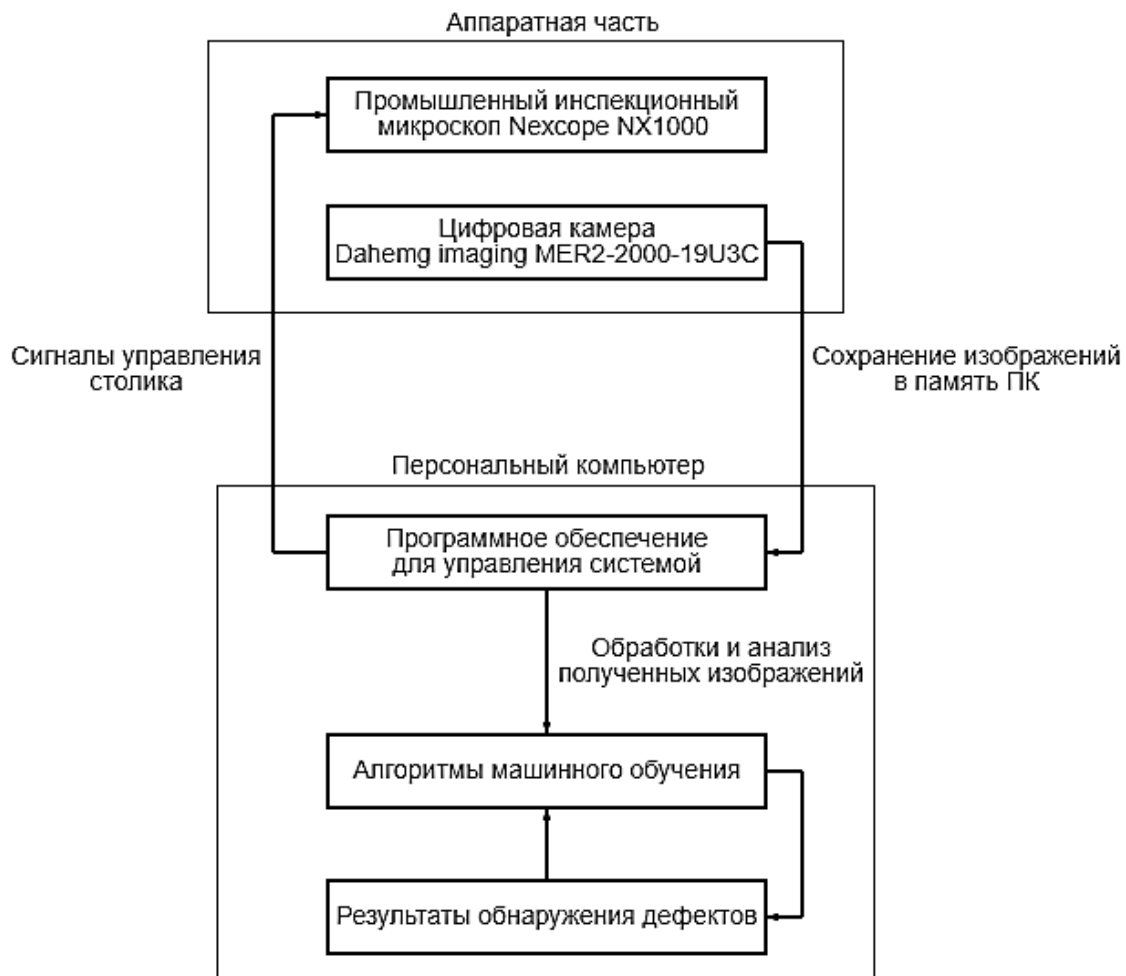


Рис. 3. Структурная схема программно-аппаратного комплекса

Инспекционный микроскоп формирует оптические изображения полупроводниковых кристаллов. Затем эти изображения при помощи цифровой камеры, закрепленной на микроскопе, оцифровываются и передаются на персональный компьютер. Кроме того ПК подключен к системе управления предметным столиком микроскопа для его автоматизированного перемещения.

Алгоритмы машинного обучения, реализованные в виде программных модулей, обрабатывают и анализируют изображения полупроводниковых кристаллов для обнаружения дефектов. Результаты анализа и процесса обнаружения дефектов выводятся в пользовательский интерфейс.

После обработки текущего участка полупроводниковой пластины ПК отправляет управляющие сигналы в систему управления моторизованным столиком микроскопа и в цифровую камеру.

#### **Система автоматизированного перемещения**

Автоматизированное управление перемещением столика инспекционного микроскопа осуществляется путем изменения положения механической ручки управления с винтом наводки микроскопа.

Винт наводки и ручка управления подвижным предметным столиком показана на рис. 4 и состоит из двух подвижных осей, которые осуществляют движение стола по осям X, Y через ременную передачу.

Для достижения точного перемещения окуляра микроскопа по столу с точностью до 0,01 мм были проанализированы две основные механические приводные системы: ременная передача и винтовая передача. Процесс выбора был основан на оценке нескольких критических факторов, включая точность, надежность, скорость, стоимость и простоту внедрения.



Рис. 4. Общий вид ручки управления предметным столиком прибора оптического контроля

Система ременного привода была выбрана как наилучший вариант, поскольку оптимально сочетает требования к эксплуатации и необходимость точного перемещения предметного столика промышленный прибор оптического контроля. Ее преимущества в скорости, экономичности и бесшумности работы в сочетании с возможностями повышающими точность, делают ее наиболее подходящей для данного применения. Решение о выборе системы ременного привода отражает сбалансированный учет эксплуатационных характеристик, эффективности и экономических факторов, что делает ее предпочтительным решением для достижения желаемого уровня точности и операционной эффективности в задачах позиционирования при решении задач дефектовки микронных изделий.

#### **Функциональная схема системы автоматизированного перемещения**

Разработанная функциональная схема системы основана на интеграции шаговых двигателей оснащенных редуктором 1:60, ременной передачей и системой управления, по аналогии с системой, используемой в 3D-принтерах (рис. 5). Выбор и конфигурация этих компонентов обоснованы требованиями к точности, обеспечивая при этом бесперебойную и эффективную работу.

Для реализации программного управления используется комбинация на базе контроллера ATmega и прошивки Marlin. Для управления микроконтроллером в разрабатываемом ПО используется универсальный протокол формирования команд – G-Code. Такой подход позволяет упростить разработку ПО верхнего уровня для взаимодействия с пользователем.

В качестве шагового двигателя со встроенным редуктором был выбран PL57WG76-60 с коэффициентом редукции 1:60. Использование редуктора 1:60 повышает разрешающую способность и крутящий момент шагового двигателя. Повышенное разрешение, получаемое благодаря передаточному числу редуктора, позволяет системе выполнять точную регулировку положения предметного столика. Микрошаговые драйверы шаговых двигателей позволяют разделить каждый шаг шагового двигателя на еще более мелкие приращения. Эта возможность микрошага значительно повышает разрешающую способность системы позиционирования и позволяет достичь целевой точности в 0,01 мм.

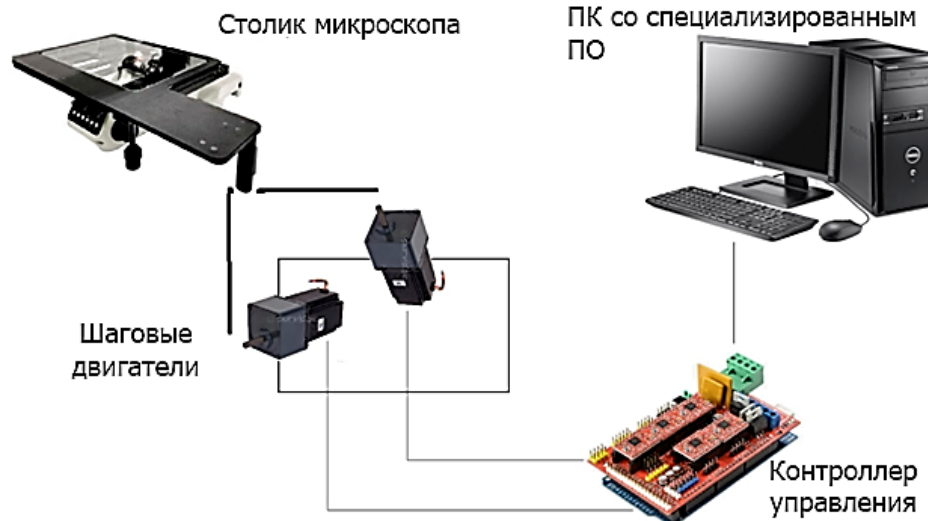


Рис. 5. Функциональная схема системы автоматизированного перемещения

Использование высококачественной ременной передачи обеспечивает минимальный люфт и растяжение, что важно для поддержания точности с течением времени. Кроме того, система ременного привода обеспечивает более гибкую компоновку системы управления движением, учитывающую пространственные ограничения установки микроскопа без ущерба для производительности.

Система автоматизированного перемещения устанавливается на место стандартной рукоятки и позволяет перемещать испытуемый образец вдоль осей X и Y перед окуляром оптического прибора.

### Заключение

В рамках проекта по разработке, изготовлению и тестированию опытного образца программно-аппаратного комплекса оптической дефектовки топологии электронных компонентов выполнялся этап работ связанный с разработкой методик управления, сканирования, передачи и обработки данных оптической инспекции.

В результате проведенной работы в части поставленной задачи были получены следующие результаты. Произведен выбор комплектующих для создания аппаратной части системы. Выбранные составные части отвечают требованиям по точности позиционирования и качеству данных (изображений кристаллов) для их последующей обработки с использованием нейросетевых алгоритмов. На основании подобранного аппаратного обеспечения разра-

ботана функциональная схема системы автоматизированного управления перемещением предметного столика микроскопа. Система управления позволяет автоматически производить необходимые действия по перемещению изделия под окуляром микроскопа, путём подачи команд от программного обеспечения, установленного на ПК, на систему управления.

### Литература

1. Пасынков В. В., Чиркин Л. К. Полупроводниковые приборы: учебное пособие. 9-е изд., стер. СПб.: Издательство «Лань», 2021. 480 с.
2. Ромашенко М. А., Васильченко Д. В., Пухов Д. А. Автоматизированная система визуального контроля поверхностных дефектов печатных плат // Радиолокация, навигация, связь: сборник трудов XXVIII Международной научно-технической конференции, посвященной памяти Б.Я. Осипова. В 6-ти томах. Воронеж, 27–29 сентября 2022 года. Том 1. Воронеж: ВГУ, 2022. С. 298-303.
3. Проведение дефектовки печатных модулей с использованием нейронных сетей / М. А. Ромашенко, Д. В. Васильченко, Д. А. Пухов, С. Ю. Белецкая // Радиотехника. 2022. Т. 86. № 7. С. 44-49. DOI 10.18127/j00338486-202207-08.
4. Ромашенко М. А., Васильченко Д. В., Пухов Д. А. Использование нейросетевых алгоритмов для визуального контроля топологии печатных плат // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2022. Т. 18. № 3. С. 78-82. DOI 10.36622/VSTU.2022.18.3.010.
5. Техническое описание микроскопа Nexcore NX1000. URL: <https://www.mding.com.tw/pic/NX1000-1.pdf> (дата обращения: 15.02.2024).
6. Техническое описание цифровой фотокамеры MER2-2000-19U3C. URL: <https://en.daheng-imaging.com/show-106-1999-1.html> (дата обращения: 21.02.2024).

Информация об авторах

**Ромашенко Михаил Александрович** – д-р техн. наук, профессор, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: kivr@vorstu.ru, ORCID: 0000-0001-5629-6056

**Васильченко Дмитрий Владимирович** – аспирант, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: kivr@vorstu.ru, ORCID: 0000-0003-1045-0841

**DEVELOPMENT HARDWARE FOR OPTICAL DEFECT INSPECTION SYSTEM  
TOPOLOGY OF ELECTRONIC COMPONENTS**

**M.A. Romashchenko, D.V. Vasilchenko**

**Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia**

**Abstract:** the article discusses one of the stages of a project aimed at developing, manufacturing, and testing a prototype of a software-hardware complex for optical defect inspection of electronic component topology. The problem justifying the need for such an optical inspection complex is formulated. The task for this stage involves selecting hardware and determining the approach for its integration with software modules, as well as developing principles for automated control of the movement of the inspection microscope's stage. The selection of the hardware used is conducted and the application of the industrial inspection microscope Nexcope NX1000 and the digital camera Dahemg imaging MER2-2000-19U3C is justified. The designed structural scheme of the software-hardware complex for optical defect inspection of electronic components is presented. The proposed system for automated movement of the microscope stage is described, and its functional diagram is provided. The main requirements for the components of the automated movement system, as well as the method of its integration into the inspection microscope Nexcope NX1000, are specified. The work was carried out with financial support from the Federal State Budgetary Institution "Foundation for Assistance to Small Innovative Enterprises in Science and Technology" within the framework of the Start-23-1 competition (Queue II) (contract No. 5049GS1/89569 dated 24.10.2023)

**Key words:** electronic component, machine vision, defectoscopy, optical inspection, non-destructive testing

**Acknowledgments:** the work was carried out with the financial support of the Federal State Budgetary Institution "Fund for Assistance to the Development of Small Enterprises in the Scientific and Technical Sphere" within the framework of the Start-23-1 competition (Phase II) (contract No. 5049GS1/89569 dated 10/24/2023)

**References**

1. Pasyukov V.V., Chirkin L.K. "Semiconductor devices: textbook. 9th ed." ("Poluprovodnikovyye pribory: uchebnoye posobiye. 9-ye izd"), St. Petersburg: Izdatelstvo Lan, 2021, 480 p.
2. Romashchenko M.A., Vasilchenko D.V., Pukhov D.A. "Automated System for Visual Inspection of Surface Defects in Printed Circuit Boards", *Radar, Navigation, Communication (Radiolokatsiya, navigatsiya, svyaz')*, Proc. of the XXVIII International Scientific and Technical Conference dedicated to the memory of B.Ya. Osipov, in 6 vol., Voronezh, September 27-29, 2022, vol. 1, Voronezh, Voronezh State University, 2022, pp. 298-303.
3. Romashchenko M.A., Vasilchenko D.V., Pukhov D.A., Beletskaya S.Yu. "Conducting Defect Inspection of Printed Modules Using Neural Networks", *Radio Engineering (Radiotekhnika)*, 2022, vol. 86, no. 7, pp. 44-49. DOI 10.18127/j00338486-202207-08. – EDN QFGRGL.
4. Romashchenko M.A. Vasilchenko D.V., Pukhov D.A. "Use of Neural Network Algorithms for Visual Inspection of Printed Circuit Board Topology", *The Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2022, vol. 18, no. 3, pp. 78-82. DOI 10.36622/VSTU.2022.18.3.010. – EDN JAGRCQ.
5. "Technical description of the Nexcope NX1000 microscope", available at: <https://www.mding.com.tw/pic/NX1000-1.pdf> (accessed 02.15.2024).
6. "Technical description of the digital camera MER2-2000-19U3C", available at: <https://en.daheng-imaging.com/show-106-1999-1.html> (accessed 02.21.2024).

Submitted 29.03.2024; revised 08.05.2024

**Information about the authors**

**Mikhail A. Romashchenko** – Dr. Sc. (Technical), Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: kivr@vorstu.ru, ORCID: 0000-0001-5629-6056

**Dmitriy V. Vasilchenko** - Postgraduate Student, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: kivr@vorstu.ru, ORCID: 0000-0003-1045-0841

## ВОЗМОЖНОСТИ ОСЛАБЛЕНИЯ ОСНОВНОГО ЛЕПЕСТКА ОТРАЖЕННОЙ ВОЛНЫ ПОСРЕДСТВОМ СПИРАЛЕВИДНОЙ ТРЕУГОЛЬНОЙ МЕТАСТРУКТУРЫ

Н.А. Болдырев, И.Ш. Фитаев, М.М. Падалинский, Д.А. Полетаев, А.С. Мазинов

Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского, г. Симферополь, Россия

**Аннотация:** представлены метаструктуры в виде незамкнутых спиралевидных треугольников, а также их дифракционные характеристики, а именно, диаграммы рассеяния, распределение электрического поля и тока по поверхности образцов. Данный вид структуры позволяет получить ряд практически важных характеристик, труднодостижимых при использовании обычных ослабляющих покрытий. Такие свойства достигаются, благодаря изменению направления распространения электромагнитной волны при ее отражении от поверхности объекта, а также за счет деструктивной интерференции отраженной волны от специально спроектированных резонаторов, расположенных на поверхности образца. Таким образом, вышеописанные структуры могут формировать отрицательные диэлектрические и магнитные проницаемости в определенной полосе частот, в нашем случае составляющей диапазон 16-25 ГГц. Проводится компьютерное моделирование воздействия электромагнитного поля указанного диапазона на представленные образцы в пакете программ CST Studio. Затем производилось сравнение полученных данных с результатами экспериментальных исследований. На основании полученных данных можно сделать выводы, что представленная структура обладает высокими показателями ослабления основного лепестка отраженной электромагнитной волны. Таким образом, данное свойство делает возможной дальнейшую разработку частотно-селективных поверхностей, в основе которых будет лежать вышеописанное метапокрытие

**Ключевые слова:** ослабление отражения, диаграмма рассеивания, сантиметровый диапазон, частотные зависимости

### Введение

Метаструктуры, как правило, являются искусственно созданными материалами, состоящие из большого количества оптических «наноантенн» (резонаторов), каждая из которых при контакте со сверхвысокочастотным излучением реагирует определенным образом [1], которые невозможно найти в природе из-за их уникальных свойств. Они делятся на несколько категорий в зависимости от их характеристик. Например, материалы с отрицательными значениями  $\epsilon$  и  $\mu$ , которые приводят к таким свойствам, как отрицательный показатель преломления и левостороннее распространение волн в микроволновом диапазоне [2]. Впервые профессор В. Веселаго предложил теорию о материалах с отрицательным показателем преломления в 1967 году [3]. Они называются двойными отрицательными материалами. Существует еще одна классификация метаструктур, называемых «Electromagnetic Band Gap» (EBG), которые представляют собой периодические металлические структуры, диэлектрики и их комбинации. Такие элементы препятствуют распространению электромагнитных

волн в широком диапазоне частот при любом угле падения и разных поляризациях.

В современных информационных системах метаструктуры (МС) находят применения в антенных системах, улучшая характеристики поглощающих элементов, в качестве поглотителей в микроволновом диапазоне, а также применяются для экранирования электронных блоков и устройствах на базе стелс-технологий [4, 5]. В настоящее время разработаны метаструктуры, предназначенные для работы в терагерцовом (ТГц), инфракрасном и видимом диапазонах и обладающие многими интересными свойствами [6], привлекающими исследователей. Например, отрицательный показатель преломления, отрицательная диэлектрическая проницаемость, обратные доплеровские эффекты, идеальное поглощение и так далее [7, 8].

Широкое распространение получили поглотители электромагнитного импульса (ЭМИ) на базе МС, а также рассеиватели, так как они считаются наиболее практичными, обладают компактным размером, низкой стоимостью, просты в изготовлении и имеют множество применений [9-11].

### Постановка задачи

Ослабляющие покрытия используются для снижения уровня отраженной электромагнит-

ной энергии от поверхности объекта. Это может быть необходимо для защиты объектов от электромагнитного излучения, для уменьшения радиолокационной заметности.

Рассеивающие покрытия работают за счет изменения направления распространения электромагнитной волны при ее отражении от поверхности объекта, за счет деструктивной интерференции отраженной волны от специальных расположенных на поверхности объекта структур. Одним из примеров рассеивающих покрытий являются вышеописанные МС, состоящие из проводящих полосковых резонаторов. Такие структуры могут формировать отрицательные диэлектрические и магнитные проницаемости в определенной полосе частот, что и приводит к деструктивной интерференции отраженной волны.

Взаимодействие электромагнитных волн с метаструктурами является достаточно сложным процессом, и его понимание, а также способы преобразования падающего излучения, несомненно, дадут ключ к построению определенного рода материалов, позволяющих в достаточной степени ослабить или усилить сигнал на заданной частоте. Ранее авторами настоящей статьи было апробировано преобразование электромагнитных волн (ЭМ-волн) на простейших резонансных структурах, выполненных в виде четвертьволновых полосковых линий (медных проводников) на диэлектрике [12-14].

В настоящей статье предпринята попытка расширения частотного диапазона за счет последовательно-параллельного соединения изученных ранее резонаторов, а также проводится оценка влияния металлического зеркала, расположенного за плоскостью метаструктуры. Применяемые методы: компьютерное моделирование в пакете CST Studio и проведение натурального эксперимента [15].

### Расчетные структуры

В настоящей статье представлены МС, представляющие собой экспериментальные структуры в виде незамкнутых спиралевидных треугольников (рис. 1). Образцы являются сборной матрицей, состоящей из отдельных ячеек, на которых расположены резонаторы, которые, в свою очередь, размещены на подложке FR-4, толщиной 1,5 мм. Толщина прямоугольных резонаторов из меди составляла 16 мкм.

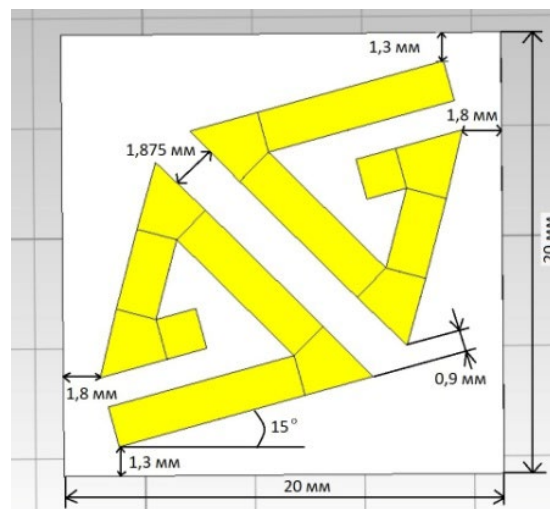


Рис. 1. Метаструктура «треугольники»

Геометрические параметры данных треугольников напрямую связаны с длиной волны падающего излучения. В представленной работе размеры структуры рассчитывались для частоты 18 ГГц ( $\lambda = 16,66$  мм). Стороны фигуры кратны  $\lambda$ : малое основание равно  $\lambda/8$ , левая боковая сторона равна  $\lambda/4$ , правая –  $\lambda/2$ ; толщина фигуры также составляет  $\lambda/8$ . Такие размеры позволяют добиться лучшей широкополосности, чем у простых метаструктур, у которых размер резонатора равен только  $\lambda/4$  и не изменяется. Исследования производились в частотном диапазоне от 16 до 25 ГГц. Такой выбор обусловлен нашими предположениями, что подобная структура помимо основного пика на частоте 18 ГГц будет обладать более высокочастотными побочными пиками.

### Результаты моделирования

Моделирование производилось в пакете программ CST Studio с применением «Вычислителя во временной области» (Time domain solver), а именно: открытое пространство в качестве граничных условий, волна – плоская с углом падения  $90^\circ$ , расстояние от источника излучения до структуры – 90 мм.

На рис. 2 представлены результаты моделирования: распределение электрического тока на поверхности для структур с металлическим зеркалом позади и без него на различных частотах. На рис. 3 представлены частотная характеристика, а также диаграммы рассеяния.

Наличие резонансов может быть объяснено распределением поверхностного тока и электрического поля, как показано на рис. 2. А именно, наибольшая плотность тока наблю-

дается в местах перегибов структуры, а на образце с металлической пластиной – небольшой ток между соседними резонаторами. Электрическое поле распространяется по поверхности резонаторов равномерно, но при добавлении зеркала появляются локальные максимумы под

резонаторами и на середине структуры. Отметим, что также при добавлении металлической пластины под поверхность структуры значения I и E значительно вырастают в силу увеличения отражения от зеркала.

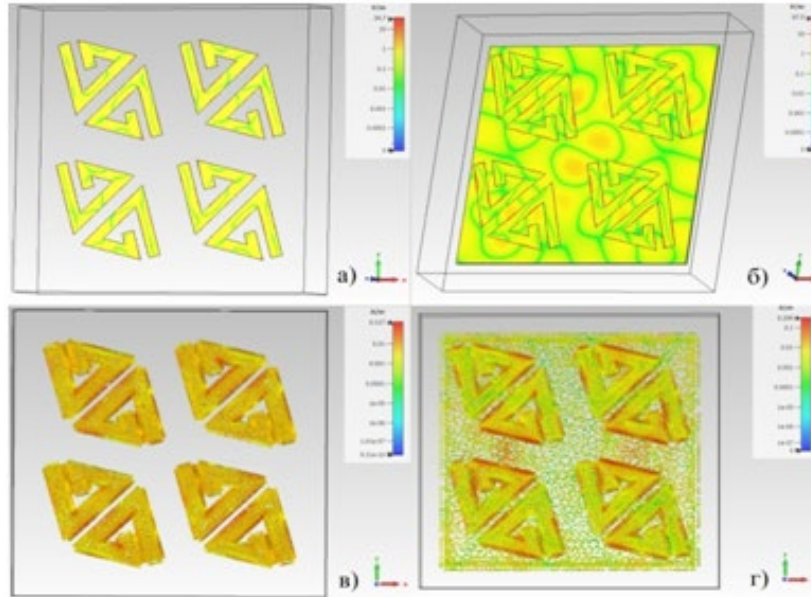


Рис. 2. Распределение электрического поля (а – без зеркала, б – с зеркалом) и тока (в – без зеркала, г – с зеркалом) по поверхности структуры на частоте 20 ГГц

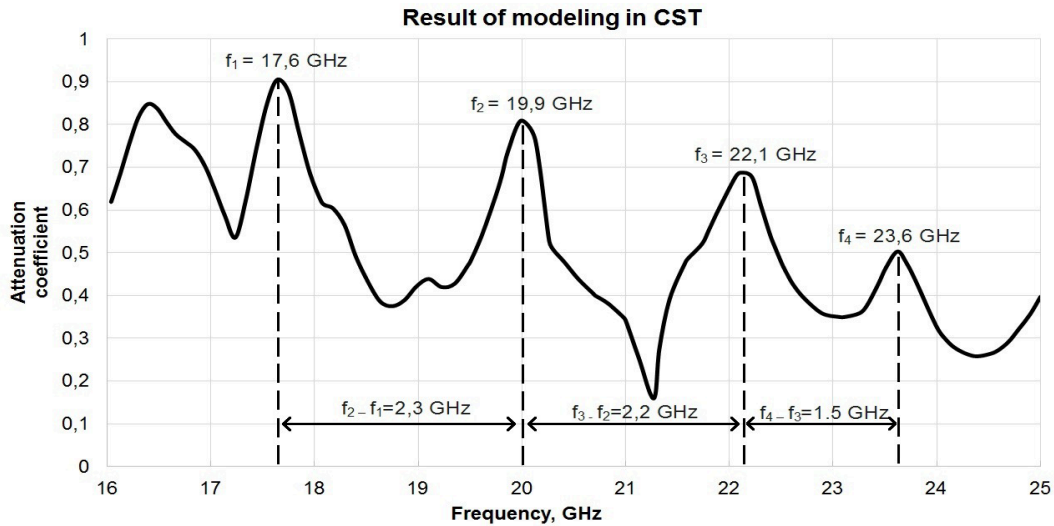


Рис. 3. Частотная характеристика МС

Частотная характеристика (рис. 3), рассчитанная численным методом, показывает, что пики поглощения находятся на следующих частотах: 16,4; 17,6; 19,99; 22,1; 23,6 ГГц. Основным же является пик на 17,6 ГГц с показателем поглощения, составляющим 90 %. Его ширина (на уровне 3 дБ) составляет около 0,8 ГГц. Остальные пики – побочные.

Показания для метаструктуры «треугольники» снимались в трех точках: 17,6; 20 и 21,3 ГГц, так как эти частоты соответствуют максимуму поглощения, усредненному значению и минимуму поглощения, соответственно.

Моделирование данной МС на указанных частотах показало, что во всем диапазоне структура имеет высокие показатели ослабления и заметно снижает нормальную составля-

ющую отраженной волны по сравнению с металлическим зеркалом, особенно на резонансной частоте (17,6 ГГц). Помимо этого, также имеет хорошие показатели амплитуды и ширины боковых лепестков, которые варьируются в зависимости от частоты.

### Постановка эксперимента

Для получения экспериментальных диаграмм рассеяния был использован метод бистатического измерения зависимости мощности отраженного излучения от угла отклонения приемной антенны относительно излучающей антенны. В установке для получения диаграмм рассеяния (рис. 4) использовались две пирамидальные рупорные антенны П6-40 с апертурой  $625 \text{ mm}^2$ . К выходу одной из них был подключен синтезатор частот G7M-40, к выходу другой антенны подключался измеритель мощности PLS-26, фиксирующий уровень принимаемой мощности, причем измеритель мощности подключался напрямую к приемной антенне без соединительных кабелей и располагался на вращающейся диэлектрической штанге. Это позволило избежать перегибов кабеля и минимизировать влияние вращения штанги на измерение. Шаг вращения измерительной антенны составлял  $5^\circ$ .

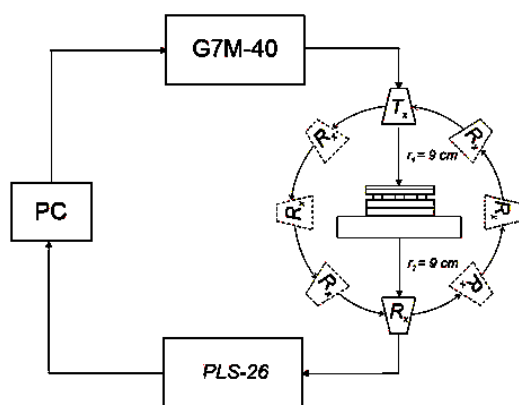


Рис. 4. Схема экспериментальной установки

Сви́пирование по частоте излучения проводилось в диапазоне от 16 до 25 ГГц с шагом  $0,1 \text{ ГГц}$ . Исследуемая структура располагалась на диэлектрическом держателе на расстоянии более десяти длин волн от минимальной частоты диапазона от излучателя до МС.

Для поиска максимального ослабления отраженной волны были проведены исследования итоговой составной поверхности МС «тре-

угольные спирали», состоящей из сложенных стопкой МС «треугольники». В ходе исследования были изучены их частотные зависимости и диаграммы рассеяния.

Для определения коэффициента прохождения  $T$ , приемная антенна фиксировалась под углом в  $180^\circ$  относительно излучающей антенны. Первоначально проводилось измерение мощности для свободного пространства между антеннами, после чего на пути электромагнитной волны размещалась исследуемая МС. Для определения коэффициента отражения приемная антенна фиксировалась параллельно излучающей антенны таким образом, что угол между ними составлял  $0^\circ$ . За эталон отражения бралось металлическое зеркало толщиной  $0,6 \text{ мм}$ , расположенное нормально к падающей волне. После чего на это же зеркало располагалась исследуемая МС и фиксировалась отраженная мощность. Показатель ослабления определялся из предыдущих двух коэффициентов, то есть являлся, в физическом смысле, упрощенным коэффициентом потерь в измеряемой плоскости. Формулы для получения коэффициентов представлены ниже:

$$T = \frac{E_{\text{прош}}}{E_{\text{пад}}}, \quad (1)$$

$$R = \frac{R_{\text{отр}}}{R_{\text{зеркала}}}, \quad (2)$$

$$A = 1 - (T + R). \quad (3)$$

Из полученных характеристик видно, что представленная МС обладает выраженным пиком поглощения на частоте  $17,6 \text{ ГГц}$ . Ширина данного пика составляет  $900 \text{ МГц}$ . Но, помимо этого, она обладает и двумя побочными пиками.

Сравнительный график по модельным и экспериментальным данным представлен на рис. 5. Из рисунка видно, что характеристики качественно совпадают. Различия обусловлены приближенным подходом при проведении численного моделирования.

### Анализ и обсуждение результатов

Из сравнительного графика (рис. 5) видно, что экспериментально полученные результаты обладают схожими характерными максимумами рассеивания. Основной пик на  $17,6 \text{ ГГц}$  совпадает по форме с численными расчетами, однако отличается по уровню. Следующий пик ( $20 \text{ ГГц}$ ) проявляется после характерного для обоих графиков падения коэффициента. Схо-

жая ситуация происходит и на резонансе около 22,1 ГГц, однако, этот побочный пик явно представлен в полученных результатах.

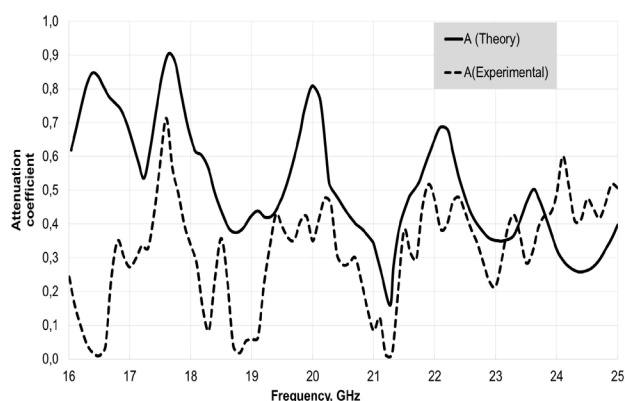


Рис. 5. Сравнение модельных и экспериментальных характеристик

Из этого можно заключить, что полученные экспериментальные графики с определенной точностью повторяют модельно полученные зависимости на основных резонансных частотах. Единственное их несовпадение заключается в резонансном пике на частоте 16,4 ГГц, где модельный и экспериментальный результат показывают противоположные результаты. Экспериментально эта частота соответствует минимальному значению коэффициента рассеивания, в то время, когда модельные ре-

зультаты указывают на резонанс с высоким значением поглощения. С высокой долей вероятности данное расхождение связано с возбуждением частотных, а также пространственных мод, а также погрешностями измерений.

Для более тщательного рассмотрения зависимости диаграмм в динамике нами были выбраны три характерные точки на частотной характеристике: максимум ослабления (17,6 ГГц), минимум ослабления (21,3 ГГц) и промежуточное значение (20 ГГц), диаграммы построены на рис. 6-8, соответственно.

Из полученных диаграмм (рис. 6-8) можно установить, что на основной резонансной частоте анализируемая МС значительно ослабляет отраженную волну относительно обычного металлического зеркала. Можно подчеркнуть значительное ослабление основного лепестка отраженной волны, а также появление боковых лепестков на  $20^\circ$  и  $45^\circ$ . Ослабление объясняется деструктивной интерференцией на элементах матрицы и перераспределением электромагнитной волны на поверхности МС.

Полученные на частоте первого побочного пика данные, представлены на диаграмме (рис. 7). Из графика можно увидеть, что ослабление отраженной от структуры волны уменьшилось, что соответствует полученным показателям поглощения на представленных частотных характеристиках.

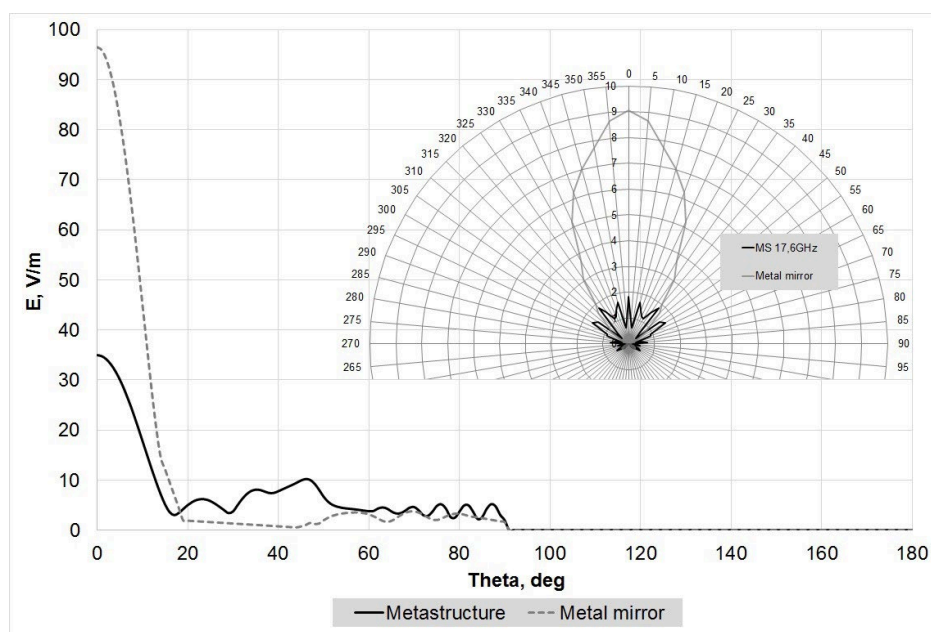


Рис. 6. Диаграммы обратного рассеяния на резонансной частоте 17,6 ГГц

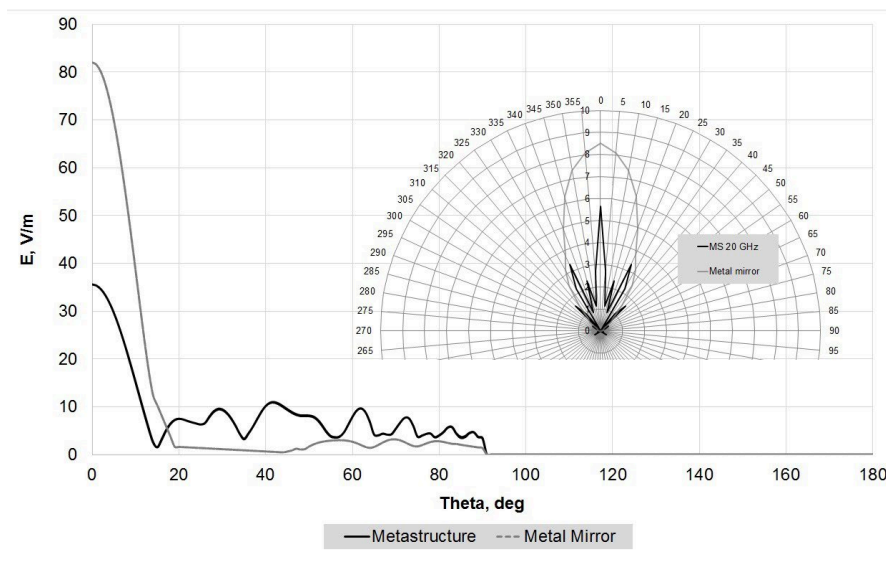


Рис. 7. Диаграммы обратного рассеяния 20 ГГц

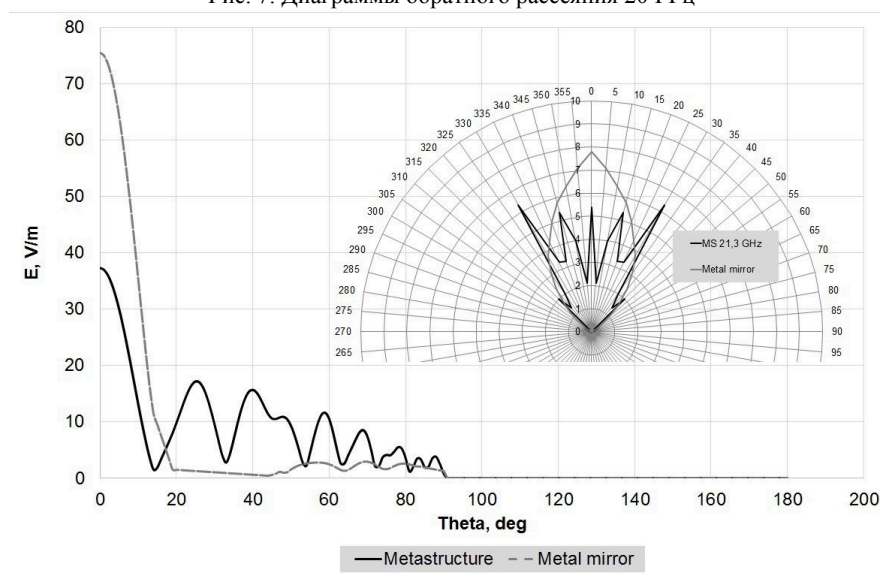


Рис. 8. Диаграммы обратного рассеяния 21,3 ГГц

Примечательно, что частота 21,3 ГГц не является резонансной. Коэффициент поглощения на ней является минимальным. На представленных на рис. 6-8 диаграммах видно, что ослабляемая мощность сильно уменьшается, а перераспределение поля на диаграмме становится шире, что выражается в наличии явных боковых лепестков. Из чего можно сделать предположение, что на заданной частоте эффект деструктивной интерференции ослабевает, однако перераспределение поля на поверхности все еще присутствует.

### Заключение

В работе исследованы частотные характеристики МС, состоящей из спиралевидных тре-

угольных проводящих структур, проанализированы ослабляющие свойства в СВЧ-диапазоне и выявлены резонансные частоты. Построены диаграммы распределения отраженного поля на выбранных характерных частотах, показывающие на резонансной частоте ослабление основного отраженного луча на 63 %, а также появление разветвленных боковых лепестков в диапазоне от 20° до 50°. Проведено сравнение результатов компьютерного моделирования и экспериментальных исследований. Отличие составляет не более 20 %, что укладывается в инструментальную погрешность измерений. Полученные результаты могут быть использованы при разработке трехмерных МС с избирательным отражением.

Литература

1. Broadband RCS Reduction Using Digital Impedance Metasurfaces with 2-Bit Coding of Axes of Anisotropy and Eigen Reactances / A.I. Semenikhin, D.V. Semenikhina, Y.V. Yukhanov, P.V. Blagovisnyy // 2018 Progress in Electromagnetics Research Symposium (PIERS-Toyama). 2018. PP. 1583-1590.
2. Wideband RCS Reduction Using Coding Diffusion Metasurface / L. Ali, Q. Li, T. Ali Khan, J. Yi, X. Chen // Materials 2019. Vol. 12(17). 2708.
3. Веселаго В. Г. Электродинамика веществ с одновременно отрицательными значениями  $\epsilon$  и  $\mu$  // Успехи физических наук. Июль, 1967. Т. 92. Вып. 3. С. 517–526.
4. Comptibility of optical transparency and microwave absorption in C-band for the metamaterial with second-order cross fractal structure / D. Shan, L. He, L. Deng, H. Lou, C. Liao, Y. Peng, Y. Xu, S. Huang // Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures. 116 (2020). 113756.
5. Metamaterial electromagnetic cloak at microwave frequencies / D. Schurig, J.J. Mock, B.J. Justice, S.A. Cummer, J.B. Pendry, A.F. Starr, D. R. Smith // Science. Nov. 2006. 314 (5801). PP. 977–980.
6. Dual-band plasmonic perfect absorber based on all-metal nanostructure for refractive index sensing application / Y. Cheng, H. Zhang, X.S. Mao, R. Gong // Materials Letters. May 2018. Vol. 219. PP. 123-126.
7. Composite medium with simultaneously negative permeability and permittivity / D.R. Smith, W.J. Padilla, D.C. Vier, S.C. Nemat-Nasser, S. Schultz // Physical Review Letters. May 2000. Vol. 84 (18). 4184.
8. Full-wave simulations of electromagnetic cloaking structures / S.A. Cummer, B.I. Popa, D. Schurig, D.R. Smith, J. Pendry // Physical Review E. 2006. 74 (3). 036621.
9. Сенсоры на основе диэлектрических метаматериалов / А.Н. Лагарьков, И.А. Рьжиков, А.В. Васькин, К.Н.

Афанасьев [и др.] // Вестник Московского университета. Сер. 2. Химия. 2015. Т. 56. № 3. С. 115-124.

10. Фёдоров С.М. Исследование влияния фильтрующих конденсаторов на рабочие характеристики управляемого метаматериала // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2023. Т. 19. № 4. С. 111-114.

11. Применение активной метаповерхности для кодирования при передаче данных / Е.А. Ищенко, Ю.Г. Пастернак, В.А. Пендюрин, С.М. Фёдоров // Воронежского государственного технического университета. 2023. Т. 19. № 5. С. 39-43.

12. Симуляция свойств метаструктур в пакете программ CST Studio / Н.А. Болдырев, А.С. Мазинов, М.М. Падалинский [и др.] // Радиолокация, навигация, связь: сб. трудов XXIX Междунар. науч.-техн. конф., посвященной 70-летию каф. радиофизики ВГУ. Воронеж: Воронежский государственный университет, 2023. Т. 4. С. 271-276.

13. Мазинов А.С., Фитаев И.Ш., Болдырев Н.А. Влияние пространственной ориентации проводящих элементов составной метаповерхности на их частотные характеристики и диаграммы рассеивания в СВЧ-диапазоне. // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2022. Т. 18. № 4. С. 86-90.

14. Мазинов А.С., Фитаев И.Ш., Болдырев Н.А. Ослабление нормальной составляющей отраженной электромагнитной волны комбинированными радиопоглощающими покрытиями // Письма в Журнал технической физики. 2022. Т. 48. № 19. С. 27-30.

15. Моделирование рассеивающих свойств блочных метаповерхностей в диапазоне 16-25 ГГц и сравнение с экспериментальными результатами / А.С.А. Мазинов, М.М. Падалинский, Н.А. Болдырев, А.В. Старосек // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Физика. 2023. Т. 23. № 2. С. 102-111.

Поступила 20.03.2024; принята к публикации 13.05.2024

Информация об авторах

**Болдырев Николай Алексеевич** – аспирант кафедры радиофизики и электроники, Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского (295007, Россия, Республика Крым, г. Симферополь, пр. Академика Вернадского, 4), e-mail: koly-aboldyrev@gmail.com

**Фитаев Ибраим Шекветович** – преподаватель кафедры радиофизики и электроники, Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского (295007, Россия, Республика Крым, г. Симферополь, пр. Академика Вернадского, 4), e-mail: fitaev.i@cfuv.ru, ORCID: 0000-0003-2426-3692

**Падалинский Михаил Михайлович** – аспирант кафедры радиофизики и электроники, Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского (295007, Россия, Республика Крым, г. Симферополь, пр. Академика Вернадского, 4) e-mail: m.padalinskiy@cfuv.ru, ORCID: 0000-0001-9691-4066

**Полетаев Дмитрий Александрович** – канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры радиофизики и электроники, Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского (295007, Россия, Республика Крым, г. Симферополь, пр. Академика Вернадского, 4), e-mail: poletaeva@cfuv.ru, ORCID: 0000-0003-2898-960X

**Мазинов Алим Сент-Аметович** – д-р физ.-мат. наук, зав. кафедрой радиофизики и электроники, Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского (295007, Россия, Республика Крым, г. Симферополь, пр. Академика Вернадского, 4), e-mail: mazinovas@cfuv.ru, ORCID: 0000-0003-0834-2390

**THE POSSIBILITY OF ATTENUATION OF THE MAIN LOBE OF THE REFLECTED WAVE BY MEANS OF A SPIRAL TRIANGULAR METASTRUCTURE**

**N.A. Boldyrev, I.Sh. Fitaev, M.M. Padalinsky, D.A. Poletaev, A.S. Mazinov**

**Vernadsky Crimean Federal University, Simferopol, Russia**

**Abstract:** this work presents metastructures in the form of unclosed spiral triangles, as well as their diffraction characteristics, namely scattering diagrams, the distribution of the electric field and current over the surface of the samples. This type of

structure makes it possible to obtain a number of practically important characteristics that are difficult to achieve using conventional weakening coatings. Such properties are achieved by changing the direction of propagation of the electromagnetic wave when it is reflected from the surface of the object, as well as due to the destructive interference of the reflected wave from specially designed resonators located on the surface of the sample. Thus, the above structures can form negative dielectric and magnetic permittivity in a certain frequency band, in our case, the range of 16-25 GHz. The work also includes computer modeling of the impact of an electromagnetic field of the specified range on the samples presented in the CST Studio software package. Then, the obtained data were compared with the results of experimental researches. Based on the data obtained, it can be concluded that the presented structure has high attenuation rates of the main lobe of the reflected electromagnetic wave. Thus, this property makes possible the further development of frequency-selective surfaces, which will be based on the above-described meta-coating

**Key words:** Reflection attenuation, scattering diagram, S-band, frequency dependences

#### References

1. Semenikhin A.I., Semenikhina D.V., Yukhanov Y.V., Blagovisnyy P.V. "Broadband RCS Reduction Using Digital Impedance Metasurfaces with 2-Bit Coding of Axes of Anisotropy and Eigen Reactances", *2018 Progress in Electromagnetics Research Symposium (PIERS-Toyama)*, 2018, pp. 1583-1590.
2. Ali L., Li Q., Ali Khan T., Yi J., Chen X. "Wideband RCS Reduction Using Coding Diffusion Metasurface", *Materials* 2019, vol. 12(17), 2708.
3. Veselago V.G. "Electrodynamics of substances with simultaneously negative values of  $\epsilon$  and  $\mu$ ", *Advances in Physical Sciences (Uspekhi fizicheskikh nauk)*, July 1967, vol. 92, iss. 3, pp. 517-526.
4. Shan D., He L., Deng L., Lou H., Liao C., Peng Y., Xu Y., Huang S. "Comptibility of optical transparency and microwave absorption in C-band for the metamaterial with second-order cross fractal structure", *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures*, 116 (2020), 113756.
5. Schurig D., Mock J.J., Justice B.J., Cummer S.A., Pendry J.B., Starr A.F., Smith D.R. "Metamaterial electromagnetic cloak at microwave frequencies", *Science*, Nov. 2006, 314 (5801), pp. 977-980.
6. Cheng Y., Zhang H., Mao X.S., Gong R. "Dual-band plasmonic perfect absorber based on all-metal nanostructure for refractive index sensing application", *Materials Letters*, May 2018, vol. 219, pp. 123-126.
7. Smith D.R., Padilla W.J., Vier D.C., Nemat-Nasser S.C., Schultz S. "Composite medium with simultaneously negative permeability and permittivity", *Physical Review Letters*, May 2000, vol. 84 (18), 4184.
8. Cummer S.A., Popa B.I., Schurig D., Smith D.R., Pendry J. "Full-wave simulations of electromagnetic cloaking structures", *Physical Review E*, 2006, 74 (3), 036621.
9. Lagarkov A.N., Ryzhikov I.A., Vaskin A.V., Afanasyev K.N. et al. "Sensors based on dielectric metamaterials", *The Bulletin of Moscow University. Chemistry (Vestnik Moskovskogo universiteta. Khimiya)*, 2015, vol. 56, no. 3, pp. 115-124.
10. Fedorov S.M. "Study of the influence of filter capacitors on the performance characteristics of a controlled metamaterial", *The Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2023, vol. 19, no. 4, pp. 111-114.
11. Ishchenko E.A., Pasternak Yu.G., Pendyurin V.A., Fedorov S.M. "Application of an active metasurface for coding during data transmission", *The Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2023, vol. 19, no. 5, pp. 39-43.
12. Boldyrev N.A., Mazinov A.S., Padalinsky M.M. et al. "Simulation of metastructures' properties in the CST Studio software package", *Radar, navigation, communication: collection (Radiolokatsiya, navigatsiya, svyaz': sb. trudov)*, Proc. of the XXIX International. scientific-technical conference dedicated to the 70th anniversary of the VSU Radiophysics department, in 4 vol., Voronezh, April 18-20, 2023, vol. 4, Voronezh, Voronezh State University, 2023, pp. 271-276.
13. Mazinov A.S., Fitaev I.Sh., Boldyrev N.A. "The influence of the spatial orientation of the conductive elements of a composite meta-surface on their frequency characteristics and dispersion patterns in the microwave range", *The Bulletin of the Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2022, vol. 18, no. 4, pp. 86-90.
14. Mazinov A.S., Fitaev I.Sh., Boldyrev N.A. "Attenuation of the normal component of the reflected electromagnetic wave by combined radio-absorbing coatings", *Letters to the Journal of Technical Physics (Pis'ma v Zhurnal tekhnicheskoy fiziki)*, 2022, vol. 48, no. 19, pp. 27-30.
15. Mazinov A.S.A., Padalinsky M.M., Boldyrev N.A., Starosek A.V. "Modeling the scattering properties of block metasurfaces in the range of 16-25 GHz and comparison with experimental results", *News of Saratov University. Physics (Izvestiya Saratovskogo universiteta. Fizika)*, 2023, vol. 23, no. 2, pp. 102-111.

Submitted 20.03.2024; revised 13.05.2024

#### Information about the authors

**Nikolay A. Boldyrev** – Postgraduate Student, Department of Radiophysics and Electronics, Vernadsky Crimean Federal University (4 Akademika Vernadskogo prosp., Simferopol 295007, Russia), e-mail: kolyaboldyrev@gmail.com  
**Ibraim Sh. Fitaev** – Assistant, Department of Radiophysics and Electronics, Vernadsky Crimean Federal University (4 Akademika Vernadskogo prosp., Simferopol 295007, Russia), e-mail: fitaev.i@cfuv.ru, ORCID: 0000-0003-2426-3692  
**Mihail M. Padalinskiy** - Postgraduate Student, Department of Radiophysics and Electronics, Vernadsky Crimean Federal University (4 Akademika Vernadskogo prosp., Simferopol 295007, Russia), e-mail: m.padalinskiy@cfuv.ru, ORCID: 0000-0001-9691-4066  
**Dmitriy A. Poletaev** – Cand. Sc. (Physics and Mathematics), Associate Professor, Department of Radiophysics and Electronics, Vernadsky Crimean Federal University (4 Akademika Vernadskogo prosp., Simferopol 295007, Russia), e-mail: poletaevda@cfuv.ru, ORCID: 0000-0003-2898-960X  
**Alim S. Mazinov** – Dr. Sc. (Physics and Mathematics), Professor, Head of the Department of Radiophysics and Electronics, Vernadsky Crimean Federal University (4 Akademika Vernadskogo prosp., Simferopol 295007, Russia), e-mail: mazinovas@cfuv.ru, ORCID: 0000-0003-0834-2390

## ПОКАЗАТЕЛЬ СТРУКТУРНОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ УПРАВЛЕНИЯ ИНФОРМАЦИОННЫМ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕМ В ГЕТЕРОГЕННОЙ СЕТИ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ ПРОСТРАНСТВЕННО-РАСПРЕДЕЛЕННОЙ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА

В.А. Шевцов<sup>1</sup>, А.М. Казанцев<sup>2</sup>, А.В. Тимошенко<sup>2</sup>, Р.А. Кочкаров<sup>3</sup>, С.В. Прокопчина<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет),  
г. Москва, Россия

<sup>2</sup>Радиотехнический институт им. академика А.Л. Минца,  
г. Москва, Россия

<sup>3</sup>Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации,  
г. Москва, Россия

**Аннотация:** в настоящее время усложнение условий функционирования и увеличение объемов передаваемых данных в пространственно-распределенные системы мониторинга (ПРСМ) с динамической топологией сети передачи данных затрудняют достижение заданных требований по оперативности, устойчивости и безопасности информационного обмена, в т.ч. в условиях отказов ее подсистем различного уровня. Рассмотрены теоретико-графовая модель ПРСМ и постановка оптимизационных задач с различными критериями: весовыми и топологическими. Отмечено, что для снижения последствий возможных деструктивных воздействий, а также прогнозирования поведения ПРСМ необходима метрика эффективности информационного взаимодействия информационных средств (ИС) в составе системы. Предложено использовать агрегированный топологический индекс, представляющий собой линейную свертку структурно-топологических метрик и реализующий в себе основные требования оперативного управления и контроля структурной устойчивости ПРСМ. Исходя из решаемых задач ПРСМ предложены основные структурно-топологические метрики. Отмечено, что, изучая каждую метрику и применяя к анализу предложенный критерий, можно оценить механизм информационного взаимодействия между ИС ПРСМ как с точки зрения структуры и ее качества, так и с точки зрения характера информационного обмена во времени

**Ключевые слова:** информационное взаимодействие, гетерогенная сеть, граф, деструктивные воздействия, основные структурно-топологические метрики, агрегированный топологический индекс

**Благодарности:** исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-69-10084

### Введение

Современные технологии связи и передачи данных позволяют формировать пространственно-распределенные системы мониторинга (ПРСМ) в едином информационном пространстве со значительным количеством разнородных информационных средств (ИС). Такие системы могут включать наземные и воздушные (например, беспилотные летательные аппараты) средства с применением сложных сенсоров, образующих гетерогенную сеть передачи данных и позволяющих в режиме реального времени обрабатывать и передавать разнородную информацию [1-3].

Комплексное применение таких ИС является основой для оперативного формирования подвижных полей информации и управления, т.е. адаптивных изменяющихся зон ответственности группировок ИС, действующих в услови-

ях различного рода дестабилизирующих воздействий (индустриальных и преднамеренных помех) [4].

В силу гетерогенности и распределенности ПРСМ характеризуются структурной сложностью, экстремальностью функционирования, трудностью принятия решений и выбора сценариев поведения и взаимодействия, нетривиальностью их формального описания и моделирования. Для обеспечения требуемой степени автономности, качества и оперативности управления ПРСМ появляется необходимость проведения исследований, направленных на адаптацию и интеграцию известных методов «теории оптимального управления» к решению задач комплексной автоматизации и интеллектуализации процессов информационного взаимодействия ИС в ПРСМ в различных условиях, в том числе при воздействии дестабилизирующих факторов. При этом одним из важнейших элементов «теории оптимального управления» является разработка высокоэффективных и качественных метрик. В связи с этим совершен-

ствование научно-методического аппарата, направленного на решение задач по повышению эффективности управления информационным взаимодействием в гетерогенной сети передачи данных ПРСМ за счет синтеза комплексного показателя оперативного управления и контроля структурной устойчивости, является крайне актуальной задачей.

Целью данной статьи является обоснование комплексного показателя, отражающего основные требования оперативного управления и контроля структурной устойчивости ПРСМ.

### Теоретико-графовая (структурная) модель пространственно-распределенной системы мониторинга

В качестве инструмента моделирования сложных многоэлементных систем используются графы большой размерности — с большим количеством вершин, связей между ними, весами разной природы. Для таких графов применяется общий термин «большой граф», вне зависимости от плотности соединения вершин и степени структуризации в терминологии больших данных [5, 7]. В случае гетерогенных сетей передачи данных в силу разной значимости узлов можно говорить о больших иерархических графах со многими весами, в том числе нечеткими и разнородными.

Рассмотрим теоретико-графовую модель ПРСМ в соответствии с [4, 8]. Структура системы мониторинга, в частности, специального назначения представляет собой иерархический граф  $G_L$ , состоящий из подграфов разных рангов  $G_l$ . Граф  $G_L = (V_L, E_L)$  — представляет собой физическую структуру сети с узлами и каналами связи между ними. Множество вершин  $V = \{v_i\}$  состоит из узлов сети, а каждый узел  $v_i$  взвешен множеством средств связи  $w_i = \{w_{ik}\}$  с различными протоколами  $w_{ik} = \{\pi_s\}$ . Множество ребер  $E = \{e_{ij}\}$  состоит из каналов связи между узлами  $v_i$  и  $v_j$ . Канал связи соединяет два узла  $v_i$  и  $v_j$ , если средства связи, размещенные в узлах, используют одинаковый протокол. Каждое ребро  $l$ -го ранга  $e^{(l)} \in E_L$  взвешено  $M$ ,  $M \geq 1$  числами, где  $l = \overline{1, L}$  — отражает уровни подграфов (подсетей).

Придание весов вершин и ребрам на момент времени  $t$  формирует матрицу  $\Lambda_t$  распределения информационных потоков между узлами сети. Наложение матрицы  $\Lambda_t$  на граф

$G_L = (V_L, E_L)$  отражает информационную структуру сети на момент времени  $t$  [4, 9-12].

Конфигурация системы связи  $S_t = \{\Lambda_t, G\}$  отражает текущее состояние системы связи с заданными структурными и весовыми значениями элементов графа  $G$  в момент времени  $t$ .

Согласно своему предназначению, ПРСМ должна не только осуществлять непрерывный мониторинг заданной целевой области, но и решать ряд оптимизационных задач, среди которых удержание параметров системы в заданных пределах, сохранение целостности и устойчивости системы, сохранение вычислительного баланса при решении сложных оперативных задач, оптимизация численных алгоритмов и повышение точности решений оптимизационных задач [13]. При этом каждая из этих задач предполагает использование своего набора параметров (метрик и показателей) [14-16].

Для решения указанных задач на множестве допустимых решений  $X = X(G_L) = \{x\}$ :  $x = (V_x, E_x)$ ,  $V_x \subseteq V_L$ ,  $E_x \subseteq E_L$  задается векторно-целевая функция:

$$F(x) = (F_1(x), F_2(x), \dots, F_i(x), \dots, F_M(x), \dots, F_{M+T}(x)) \quad (1)$$

с критериями:

$$F_i(x) = \text{op}[\omega_i(e)] \rightarrow \text{extr}, i = 1, 2 \dots M, \quad (2)$$

$$F_i(x) = \text{op}[\psi_i(v, e)] \rightarrow \text{extr}, i = M + 1, \dots, M + T, \quad (3)$$

где  $\text{op}$  — операция над функцией вида  $\text{max}$ ,  $\text{min}$ ,  $\text{sum}$ .

Критерии  $F_i(x)$ ,  $i = \overline{1, M}$  из (2) называются числовыми (весовыми) критериями и являются функциями от весовых характеристик, а критерии  $F_i(x)$ ,  $i = M + 1, M + T$  из (3) — топологическими, построенными на основе топологических (структурных) характеристик графа.

Весовые критерии могут принимать вид:

$$F_i(x) = \max_{e \in E_x} \omega_i(e) \xrightarrow{x} \text{min}, \quad (4)$$

$$F_i(x) = \min_{e \in E_x} \omega_i(e) \xrightarrow{x} \text{max}, \quad (5)$$

$$F_i(x) = \sum_{e \in E_x} \omega_i(e) \xrightarrow{x} \text{min}, \quad (6)$$

$$F_i(x) = \sum_{e \in E_x} \omega_i(e) \xrightarrow{x} \text{max}. \quad (7)$$

Топологические критерии могут принимать вид:

$$F_i(x) = \max_{e \in E_x, v \in V_x} \psi_i(v, e) \xrightarrow{x} \text{min}, \quad (8)$$

$$F_i(x) = \min_{e \in E_x, v \in V_x} \psi_i(v, e) \xrightarrow{x} \text{max}, \quad (9)$$

$$F_i(x) = \sum_{e \in E_x, v \in V_x} \psi_i(v, e) \overset{x}{\rightarrow} \min, \quad (10)$$

$$F_i(x) = \sum_{e \in E_x, v \in V_x} \psi_i(v, e) \overset{x}{\rightarrow} \max. \quad (11)$$

В результате, на множестве  $X$  необходимо выделить  $x^0$ , где  $F$  принимает предпочтительные значения по  $F_i(x)$ ,  $i = \overline{1, M+T}$ . Решением индивидуальной многокритериальной задачи является множество несравнимых альтернатив. В (2)-(11) записи  $\omega_i(e)$  и  $\psi_i(v, e)$  обозначают функции от весовых и топологических характеристик соответственно.

Необходимо отметить, что система связи в процессе функционирования может подвергаться деструктивным воздействиям, как естественного, так и искусственного характера, что влияет на ее устойчивость [4]. Деструктивное воздействие распространяется на отдельные элементы — узлы (вершины) и каналы (ребра) связи, а также на подсистемы (подграфы со множеством ребер и графов). Результатом деструктивного воздействия является нарушение функциональности двух видов:

— частичное нарушение (снижение весовых характеристик, например, пропускной способности канала связи);

— структурное нарушение (удаление ребер и вершин графа).

В первом случае сохранение общей функциональности системы обеспечивается частичным перераспределением потоков информации, повторной настройкой системы связи, решением многокритериальной задачи маршрутизации и др. [17-20]. Во втором случае нарушается структурная целостность системы (удаление ребер и вершин). При сохранении связности системы (графа) решается задача резервирования и перераспределения потоков. При отсутствии связности — формировании несвязных сетей (графов) необходимо решение задачи структурного восстановления и формирования новых связей с оптимальными критериями (время формирования канала-ребра, пропускная способность, надежность и др.) [6, 21-24].

При этом в случае изменения функциональных характеристик сети следует говорить об адаптивных сетях (динамических графах). Весовые и структурные характеристики элементов и подграфов сети  $G_L$  меняются в зависимости от ранга  $l = 1, 2, \dots, L$  и коэффициента подобия  $\theta \sim l$ . Постановка оптимизационной задачи на динамическом графе сохраняется, но очевидно — решение задачи может измениться. В таком случае  $x_t^0$  — решение индивидуальной

многокритериальной задачи в момент времени  $t$ .

В результате в целях снижения последствий возможных деструктивных воздействий, а также прогнозирования поведения ПРСМ необходима структурно-топологическая метрика эффективности информационного взаимодействия ИС в составе системы [25]. При этом для оперативного слежения за текущим состоянием метрика должна учитывать:

— состояние сложной многоэлементной системы в динамике;

— структурные особенности ПРСМ: иерархичность и наличие рангов структуры ее подсистем;

— влияние деструктивных воздействий на структурную составляющую системы: устойчивость, целостность системы, а также другие структурные характеристики живучести систем.

В качестве такой структурно-топологической метрики может быть использован агрегированный топологический индекс (АТИ), реализующий в себе основные требования оперативного управления и контроля структурной устойчивости ПРСМ.

### Агрегированный топологический индекс

В общем смысле под *структурной устойчивостью* будем понимать способность сохранения связности графа  $G_L$  ПРСМ в случае воздействия различных факторов, приводящих к удалению вершин, ребер и подграфов.

В таком случае для оперативного управления состоянием ПРСМ АТИ должен состоять из набора структурно-топологических метрик  $m_i$ , их линейной свертки. Для каждой составляющей метрики задается уровень важности  $a_i \in [0; 1]$ :  $АТИ = a_1 m_1 + a_2 m_2 + \dots + a_k m_k$ . Приближение значений АТИ к нижнему значению отрезка  $(0; 1)$  говорит о снижении структурной устойчивости, а достижение  $АТИ = 0$  о его структурном разрушении. Значение  $АТИ = 1$  соответствует «идеальному» состоянию с высоким уровнем структурно-топологических характеристики, в том числе структурной устойчивостью. При этом, так как сеть ПРСМ является адаптивной (динамический граф), то во времени меняется и топологический индекс  $АТИ_t = a_1 m_{t,1} + a_2 m_{t,2} + \dots + a_k m_{t,k}$ . Индекс  $АТИ_t$  является инструментом управления структурно-топологическими характеристиками сети

в момент времени  $t$ , в случае управления составляющими  $a_i m_{t,i}$ . Если же фиксировать значения  $a_i m_{t,i}$ , то  $ATI_t$  выступает в качестве инструмента анализа состояния (поведения) сети во времени.

В качестве основных структурно-топологических метрик  $m_i$ , исходя из решаемых задач ПРСМ, целесообразно определить [26-31]:

1. Показатель связности узлов сети  $K(G_L) = (\sum_{v \in V_L} k(v)) / |V_L|$  представляет собой средневзвешенный показатель порядка узлов  $k(v)$ . Порядок узла  $k(v) = \deg v / |V_L|$ , где  $\deg v$  степень вершины  $v \in V_L$ , а  $|V_L|$  — общее число вершин  $G_L$  и значения  $k(v) \in [0; 1]$ .

Показатель  $K(G_L) = 1$ , когда все вершины смежные и граф полный. Другой крайний противоположный случай, если граф не связный и все вершины изолированные:  $K(G_L) = 0$ .

2. Показатель реберной связности  $R(G_L) = \lambda(G_L) / |E_L|$ , где число реберной связности  $\lambda(G_L)$  определяется минимальным количеством удаленных ребер, приводящих к нарушению связности графа, а  $|E_L|$  — общее число ребер  $G_L$ . Показатель лежит на отрезке  $R(G_L) \in (0; 1)$ .

3. Диаметр графа  $D(G_L)$  вычисляется как максимальная длина среди всех кратчайших цепей между двумя вершинами  $u, v \in V_L$ :  $D(G_L) = \max_{u \in V} \max_{v \in V} d(u, v)$ .

4. Показатель смежности подграфов  $K(G_l)$ , где  $G_l$  представляют собой кластеры, подграфы с ребрами одинакового ранга (затравки в терминологии специальных графов со свойствами самоподобия), иерархии в многоуровневых графах (системах) и т.д. Индекс  $l$  указывает на ранг (уровень) подграфа. Этот показатель формируется аналогично показателю связности узлов. Вначале проводится операция стягивания подграфов  $G_l$  графа  $G_L$  в вершины, полученный граф обозначается  $G_{L-1}$ , далее вычисляется порядок узла  $k(v) = \deg v / |V_{L-1}|$ , где  $\deg v$  степень вершины  $v \in V_{L-1}$ , а  $|V_{L-1}|$  — общее число вершин  $G_{L-1}$  и значения  $k(v) \in [0; 1]$ .

$$K(G_l) = K(G_{L-1}) = (\sum_{v \in V_{L-1}} k(v)) / |V_{L-1}|.$$

5. Распределение степеней  $P(k)$  определяется как доля вершин графа  $G_L$  со степенью  $k$ :  $P(k) = n_k / n$ , где  $n_k$  — количество вершин степени  $k$ ,  $n = |V_L|$  — общее количество вершин.

6. Общий показатель посредничества вершин графа  $C(G_L) = (\sum_{v \in V_L} c(v)) / |V_L|$  пред-

ставляет собой средневзвешенный показатель степени посредничества отдельных вершин  $c(v) = \sum_{ij \in V_L} (d_{ij}(v) / d_{ij})$ , где  $d_{ij}$  — общее количество кратчайших путей между вершинами  $i$  и  $j$ ,  $d_{ij}(v)$  — количество кратчайших путей, проходящих через вершину  $v$ .

Нормализация показателя посредничества вершин графа осуществляется, как  $\text{normal } C(G_L) = (\sum_{v \in V_L} \text{normal } c(v)) / |V_L|$ , где  $\text{normal } c(v) = \frac{c(v) - \min c}{\max c - \min c}$ ,  $\text{normal } c(v) \in [0; 1]$ .

Необходимо отметить, что время расчета агрегированного топологического индекса  $ATI$  равно сумме расчетов его составляющих компонент  $m_i$ . Для динамического  $ATI_t$  необходимо рассчитывать значения на каждый момент времени  $t$ . В целях снижения времени (вычислительной сложности) используются специальные свойства, присущие большим иерархическим сетям. Задача вычисления  $m_i$  выполняется не на всей сети ПРСМ, а разделяется на подсети (подграфы), и далее результаты объединяются на верхней иерархии (уровне). Такой подход позволяет снижать вычислительную сложность для ряда метрик на порядок.

В случае нелинейной свертки появляются дополнительные требования к вычислительным ресурсам, а также накопление искажений в процессе итерационных расчетов. Также в случае решения оптимизационной задачи — указанные метрики выступают в виде критериев оптимизации. Рассмотрение нелинейной свертки заслуживает отдельного анализа и проверки результатов исследования [32].

В результате, изучая каждую из метрик  $m_i$  и применяя к анализу ПРСМ предложенный критерий, можно оценить механизм информационного взаимодействия между ИС, как с точки зрения структуры и ее качества, так и с точки зрения характера информационного обмена во времени.

## Заключение

Предложенная теоретико-графовая модель ПРСМ отражает структуру связей и их наполнение в ПРСМ. Иерархичность позволяет учитывать важность рангов (уровней) системы, а размерность графа (большой граф) — значительное количество узлов и связей между ними.

Задача функционирования ПРСМ усложняется во времени, как с точки зрения изменения структуры связей, так и наполнения узлов и каналов связи. В этом смысле теоретико-

графовая модель может использовать инструментарий больших динамических графов с иерархической структурой. В частности, составляющие агрегированного топологического индекса  $ATI_t$  могут учитывать уровни и характеристики подграфов (подсистем), например коэффициенты смежности подграфов  $K(G_l)$

Также свойства иерархичности позволяют разделять вычисление  $ATI_t$  в том числе в смысле параллельного вычисления для ускорения расчетов. Число разбиения структуры связей ПРСМ на иерархии, по сути отражает коэффициент ускорения расчетов  $ATI_t$  на иерархическом графе.

### Литература

1. Обоснование путей построения и оценка эффективности применения пространственно-распределенной системы информационных сенсоров для мониторинга обстановки / А.В. Зюзин, М.В. Кныш, С.Н. Разиньков, А.В. Тимошенко // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2022. Т. 22. № 3. С. 600-609.
2. Казанцев А.М., Кныш М.В., Макаров М.К. Выбор рационального состава группы радиоинформационных сенсоров пространственно-распределенной системы мониторинга // Труды МАИ: сетевой журн. 2022. № 127. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vybor-ratsionalnogo-sostava-gruppy-radioinformatsionnyh-sensorov-prostranstvenno-raspre-delennoy-sistemy-monitoringa> (дата обращения: 20.03.2024).
3. Ненашев В.А., Сенцов А.А. Пространственно-распределенные системы радиолокационного и оптического мониторинга: монография. СПб: ГУАП, 2022. 191 с.
4. Макаренко С.И. Модели системы связи в условиях преднамеренных дестабилизирующих воздействий и ведения разведки: монография. СПб.: Научно-технологические, 2020. 337 с.
5. Singh D., Dutta Pramanik P., Choudhury P. Big Graph Analytics: Techniques, Tools, Challenges, and Applications // Data Analytics: Concepts, Techniques, and Applications. Chapter 7. 2018. CRC Press. PP. 195-227.
6. Fan W., Hu C. Big Graph Analyses: From Queries to Dependencies and Association Rules // Data Sci. Eng. 2017. Vol. 2. PP. 36-55.
7. Gebreegziabher F., Patgiri R. The major challenges of big graph and their solutions: A review // Advances in Computers. 2023. Vol. 128. pp. 399-421.
8. Месарович М., Мако Д., Такахара И. Теория иерархических многоуровневых систем. М.: Мир, 1973. 344 с.
9. Ерусалимский Я.М. Дискретная математика: теория, задачи, приложения. М.: Вузовская книга, 2001. 279 с.
10. Алгоритмы: построение и анализ // Т. Кормен, Ч. Лейзерсон, Р. Ривест, К. Штайн. М.: Вильямс, 2005. 1296 с.
11. Структуры данных и алгоритмы // А.В. Ахо, Д.Э. Хопкрофт [и др.] М.: Вильямс, 2007. 400 с.
12. Форд Л., Фалкерсон Д. Поток в сетях. М.: Мир, 1966. 277 с.
13. Многометодный подход к управлению сложными объектами на основе комплексирования процедур численной оптимизации методами компьютерного моделирования / Б.Н. Тишуков, Я.Е. Львович, Д.В. Иванов, Э.И. Воробьев, А.В. Мандрыкин // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2020. Т. 16. № 1. С. 33-38.
14. Multi-Agent Dynamic Model of the Multi-Criteria Information Interaction of Structural Elements of a Self-Organizing Data Transmission Network of a Ground-Air Monitoring System / V.V. Borodin, D.A. Kletskov, A.V. Timoshenko, V.A. Shevtsov // Journal of Computer and Systems Sciences International. Vol. 61. PP. 990-1002.
15. Оценка непрерывности информационного взаимодействия и доведения информации в системах мониторинга с динамической структурой / А.А. Кочкаров, А.В. Тимошенко, А.В. Литвинов, Е.Ф. Лядова, Ю.Н. Гайчук // Электромагнитные волны и электронные системы. 2019. № 8. С. 66-71.
16. Критерии многокритериального выбора конфигурации телекоммуникационной сети системы непрерывного мониторинга с подвижными средствами наблюдения / А.В. Тимошенко, П.Г. Милованов, А.А. Кочкаров, Е.Ф. Лядова // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2021. Т. 15. № 8. С. 30-35.
17. Ногин В.Д. Принятие решений в многокритериальной среде: количественный подход. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2002. 144 с.
18. Подиновский В.В., Ногин В.Д. Парето-оптимальные решения многокритериальных задач. М.: Высшая школа, 1982. 256 с.
19. Бородин В.В., Петраков А.М., Шевцов В.А. Анализ алгоритмов маршрутизации в сети связи группировки беспилотных летательных аппаратов // Труды МАИ. 2016. № 87. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=69735> (дата обращения: 03.04.2024).
20. Минимизация рисков несанкционированного доступа к информации в наземных и аэромобильных радиосетях критически важных объектов методами многокритериальной многопутевой маршрутизации / А.В. Ананьев, А.С. Багдасарян, С.А. Багдасарян, А.Г. Кашенко, Г.А. Кашенко // Труды Научно-исследовательского института радио. 2017. № 2. С. 2-6.
21. Кочкаров А.А., Малинецкий Г.Г. Обеспечение стойкости сложных систем. Структурные аспекты. М., 2005. (Препринт / Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН: № 53). 34 с.
22. Управление риском: риск, устойчивое развитие, синергетика / В.А. Владимиров, В.В. Кульба, Г.Г. Малинецкий, Н.А. Махутов [и др.]. М.: Наука, 2000. 431 с.
23. Архипова Н.И., Кульба В.В. Управление в чрезвычайных ситуациях. М.: РГГУ, 2008. 474 с.
24. Кочкаров А.А., Салпагаров М.Б., Кочкаров Р.А. Моделирование разрушения сложных систем с ациклической структурой // Управление большими системами: сборник трудов. 2007. № 17. С. 103-120.
25. Лавлинская О.Ю., Курченкова Т.В. Применение теории графов в структурно-топологическом анализе информационных систем // Научные ведомости Белгородского государственного университета. Серия: Экономика. Информатика. 2017. № 23(272). С. 105-112.
26. Назаров А.Н., Сычев К.И. Модели и методы расчета показателей качества функционирования узлового оборудования и структурно-сетевых параметров сетей связи следующего поколения. Красноярск: Изд-во Поликом, 2010. 389 с.
27. Пасечников И.И. Методология анализа и синтеза предельно нагруженных информационных сетей. М.: Машиностроение-1, 2004. 216 с.

28. Gomez J., Peayo I., Balbuena C. New large graphs with given degree and diameter six // *Networks*. 1999. № 34 (2). PP. 154-161.

29. Егунов М.М., Шувалов В.П. Анализ структурной надёжности транспортной сети // *Вестник СибГУТИ*. 2012. № 1(17). С. 54-60.

30. Newman M.E.J. *Networks: An Introduction*. Oxford, UK: Oxford University Press, 2010. 772 p.

31. Mahendra Piraveenan. Percolation Centrality: Quantifying Graph-Theoretic Impact of Nodes during Percolation in Networks // *PLOS ONE*. 2013. Vol. 8. No. 1. P. e53095.

32. Носков С.И. Построение нелинейной свертки частных критериев эффективности в задаче векторной оптимизации // *Вестник ВГУ. Серия: Системный анализ и информационные технологии*. 2021. № 4. С. 30-36.

Поступила 28.03.2024; принята к публикации 06.05.2024

#### Информация об авторах

**Шевцов Вячеслав Алексеевич** – д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой, Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет) (125993, Россия, г. Москва, Волоколамское шоссе, д. 4), e-mail: vs.gtumai@gmail.com

**Казанцев Андрей Михайлович** – канд. техн. наук, ведущий инженер, Радиотехнический институт им. академика А.Л. Минца (127083, Россия, г. Москва, ул. 8 Марта, д. 10, стр. 1), e-mail: kazantsev.andrei@gmail.com, ORCID: 0000-0003-3608-8238

**Тимошенко Александр Васильевич** – д-р техн. наук, профессор, начальник комплексного отдела, Радиотехнический институт им. академика А.Л. Минца (127083, Россия, г. Москва, ул. 8 Марта, д. 10, стр. 1), e-mail: u567ku78@gmail.com, ORCID: 0000-0002-9791-142X

**Кочкарров Расул Ахматович** – канд. экон. наук, доцент, доцент кафедры, Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации (125167, Россия, г. Москва, Ленинградский пр-т, д. 49/2), e-mail: rasul\_kochkarov@mail.ru, ORCID: 0000-0003-3186-3901

**Прокопчина Светлана Васильевна** – д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры, Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации (125167, Россия, г. Москва, Ленинградский пр-т, д. 49/2), e-mail: svprokopchina@fa.ru, ORCID: 0000-0001-5500-2781

### INDICATOR OF STRUCTURAL EFFICIENCY OF INFORMATION INTERACTION MANAGEMENT IN HETEROGENEOUS DATA TRANSMISSION NETWORK OF SPATIALLY DISTRIBUTED MONITORING SYSTEM

V.A. Shevtsov<sup>1</sup>, A.M. Kazantsev<sup>2</sup>, A.V. Timoshenko<sup>2</sup>, R.A. Kochkarov<sup>3</sup>, S.V. Prokopchina<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Moscow Aviation Institute, Moscow, Russia

<sup>2</sup>Academician A.L. Mints Radiotechnical Institute, Moscow, Russia

<sup>3</sup>Financial University under the Government of the Russian Federation, Moscow, Russia

**Abstract:** at present, the increasing complexity of operating conditions and the increasing volume of transmitted data in spatially distributed monitoring systems (SDMS) with a dynamic topology of the data transmission network make it difficult to achieve the specified requirements for efficiency, stability and security of information exchange, including in the conditions of failures of its subsystems of different levels. The paper considers the graph-theoretical model of SDMS and the formulation of optimization problems with different criteria: weight and topological. It is noted that in order to reduce the consequences of possible destructive influences, as well as to predict the behavior of SDMS, it is necessary to metric the efficiency of information interaction of information means (IM) within the system. It is proposed to use an aggregated topological index, which is a linear convolution of structural and topological metrics and realizes the main requirements of operational management and control of structural stability of SDMS. Based on the solved problems of SDMS, the main structural-topological metrics are proposed. It is noted that by studying each metric and applying the proposed criterion to the analysis, it is possible to evaluate the mechanism of information interaction between IM of SDMS, both in terms of structure and its quality, and in terms of the nature of information exchange in time

**Key words:** information interaction, heterogeneous network, graph, destructive influences, basic structural and topological metrics, aggregated topological index

**Acknowledgements:** the research was supported by a grant from the Russian Science Foundation № 23-69-10084

## References

1. Zyuzin A.V., Knysh M.V., Razinkov S.N., Tymoshenko A.V. "Substantiation of construction and evaluation ways of the application efficiency for spatially distributed system of information sensors to provide environment monitoring", *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics (Nauchno-tekhnicheskiy vestnik informatsionnykh tekhnologiy, mekhaniki i optiki)*, 2022, vol. 22, no. 3, pp. 600–609. Doi: 10.17586/2226-1494-2022-22-3-600-609
2. Kazantsev A.M., Knysh M.V., Makarov M.K. "Selection of rational composition of heterogeneous grouping of radio information means of spatially distributed monitoring system, *Trudy MAI*, 2022, no. 127. DOI: 10.34759/trd-2022-127-15
3. Nenashev V.A., Sentsov A.A. "Spatially distributed radar and optical monitoring systems: monograph" ("Prostranstvenno-raspredelemnnye sistemy radiolokatsionnogo i opticheskogo monitoring: monografiya"), St. Petersburg: GUAP, 2022, 191 p.
4. Makarenko S.I. Models of a communication system in conditions of deliberate destabilizing impacts and intelligence (*Modeli sistemy svyazi v usloviyakh prednamerennykh destabiliziruyuschikh vozdeystsiy i vedeniya razvedki: monografiya*). St. Petersburg: Naukoemkie Tehnologii, 2020. 337 p.
5. Singh D., Dutta Pramanik P., Choudhury P. "Big Graph Analytics: Techniques, Tools, Challenges, and Applications" *Data Analytics: Concepts, Techniques, and Applications*, Chapter 7, 2018, CRC Press, pp. 195-227. DOI: <http://dx.doi.org/10.1201/9780429446177-7>
6. Fan W., Hu C. "Big Graph Analyses: From Queries to Dependencies and Association Rules", *Data Sci. Eng.*, 2017, vol. 2, pp. 36–55. DOI: <https://doi.org/10.1007/s41019-016-0025-x>
7. Gebreegziabher F., Patgiri R. "The major challenges of big graph and their solutions: A review", *Advances in Computers*, 2023, vol. 128, pp. 399-421. DOI: <https://doi.org/10.1016/bs.adcom.2021.10.010>
8. Mesarovich M., Mako D., Takahara I. "Theory of hierarchical multilevel systems" ("Teoriya ierarkhicheskikh vnogourovnevnykh system"), Moscow, Mir, 1973, 344 p.
9. Erusalimskiy Ya.M. "Discrete mathematics: theory, problems, applications" ("Diskretnaya matematika: teoriya, zadachi, prilozheniya"), Moscow, Vuzovskaya kniga, 2005, 268 p.
10. Cormen Thomas H., Leiserson Charles E., Rivest Ronald L. "Introduction to Algorithms", Moscow, Williams, 2005, 1296 p.
11. Alfred V. Aho, John E. Hopcroft, Jeffrey D. Ullman. "Data structures and algorithms", Moscow, Williams, 2007, 400 p.
12. Ford L., Falkerson D. "Flows in networks" ("Potoki v setyakh"), Moscow, Mir, 1966, 277 p.
13. Tishukov B.N., Lvovich Ya.E., Ivanov D.V., Vorobyev E.I., Mandrykin A.V. "Multi-method approach to complex objects management based on complexing procedures of numerical optimization by computer modeling methods", *The Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2020, vol. 16, no. 1, pp. 33-38.
14. Borodin V.V., Kletskov D.A., Timoshenko A.V., Shevtsov V.A. "Multi-Agent Dynamic Model of the Multi-Criteria Information Interaction of Structural Elements of a Self-Organizing Data Transmission Network of a Ground-Air Monitoring System", *Journal of Computer and Systems Sciences International*, vol. 61, pp. 990–1002
15. Kochkarov A.A., Timoshenko A.V., Litvinov A.V., Lyadova E.F., Gaichuk Yu. N. "Assessment of continuity of information interaction and information delivery in monitoring systems with dynamic structure", *Electromagnetic waves and electronic systems (Elektromagnitnye volny i elektronnye sistemy)*, 2019, vol. 8, pp.66-71.
16. Timoshenko A.V., Milovanov P.G., Kochkarov A.A., Lyadova E.F. "Criteria for multi-criteria selection of a telecommunications network configuration for a continuous monitoring system with mobile surveillance devices", *T-Comm: Telecommunications and Transport (T-Comm: Telekommunikatsii i transport)*, 2021, vol. 15, no. 8, pp. 30-35.
17. Nogin V.D. "Decision making in a multi-criteria environment: a quantitative approach" ("Prinyatie resheniy v mnogokriterialnoy srede: kolichestvennyy podkhod"), Moscow, FIZMATLIT, 2002, 144 p.
18. Podinovskiy V.V., Nogin V.D. "Pareto-optimal solutions to multicriteria problems" ("Pareto-optimal'nyye resheniya mnogokriterialnykh zadach"), Moscow, Vysshaya shkola, 1982, 256 p.
19. Borodin V.V., Petrakov A.M., Shevtsov V.A. "Analysis of routing algorithms in the communication network of a constellation of unmanned aerial vehicles", *Trudy MAI*, 2016, no. 18, available at: <https://trudymai.ru/published.php?ID=69735>
20. Ananyev A.V., Baghdasaryan A.S., Baghdasaryan S.A., Kashchenko A.G., Kashchenko G.A. "Minimization of risks of unauthorized access to information in ground and aeromobile radio networks of critical objects by methods of multi-criteria multipath routing", *Proc. of the Radio Research Institute (Trudy Nauchno-issledovatel'skogo instituta radio)*, 2017, vol. 2, pp. 2-6
21. Kochkarov A.A., Malinetsky G.G. "Provision of resistance of complex systems. Structural aspects" ("Obespechenie stojkosti slozhnykh sistem. Strukturnye aspekty"), Moscow: IPM im. M.V. Keldysha RAN, 2005, no. 53.
22. Vladimirov V.A., Kulba V.V., Malinetsky G.G., Makhutov N.A. et al. "Risk Management: Risk. Sustainable Development. Synergetics" ("Upravlenie riskom: Risk. Ustoichivoe razvitie. Sinergetika"), Moscow: Nauka, 2000, 431 p.
23. Arkhipova N.I., Kulba V.V. "Management in emergency situations" ("Upravlenie v chrezvychajnykh situatsiyah"), Moscow, RGGU, 2008, 474 p.
24. Kochkarov A.A., Salpagarov M.B., Kochkarov R.A. "Modeling the destruction of complex systems with an acyclic structure", *Large-scale Systems Control: coll. of works (Upravleniye bol'shimi sistemami: sbornik trudov)*, 2007, no. 17, pp. 103-120.
25. Lavlinskaya O.Yu, Kurchenkova T.V. "Application Of The Theory Of Graphs In The Structural And Topological Analysis Of Information Systems", *The Scientific Bulletin of Belgorod State University. Series: Economics. Informatics (Nauchnyye vedomosti Belgorodskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Ekonomika. Informatika)*, 2017, vol. 23, pp. 105-112.
26. Nazarov A.N., Sychev K.I. "Models and methods of calculation of the quality indicators of the node equipment functioning and structural-network parameters of the next generation communication networks" ("Modeli i metody rascheta pokazatelej kachestva funkcionirovaniya uzlovogo oborudovaniya i strukturno-setevykh parametrov setej svyazi sleduyushchego pokoleniya"), Krasnoyarsk, Izd-vo Polikom, 2010, 389 p.

27. Pasechnikov I.I. “Methodology of Analysis and Synthesis of Extremely Loaded Information Networks” (“Metodologiya analiza i sinteza predelno nagruzhennykh informatsionnykh setey”), Moscow, Mashinostoenie-1, 2004, 216 p.
28. Gomez J., Peayo I., Balbuena C. “New large graphs with given degree and diameter six”, *Networks*, 1999, vol. 34, no. 2, pp. 154-161.
29. Egunov M.M, Shuvalov V.P. “Structural Reliability Analysis of Transport Network”, *The Herald of the Siberian State University of Telecommunications and Information Science (Vestnik SibGUTI)*, 2012, vol. 1, pp. 54-60.
30. Newman M.E.J. “Networks: An Introduction”, Oxford, UK, Oxford University Press, 2010.
31. Mahendra Piraveenan. “Percolation Centrality: Quantifying Graph-Theoretic Impact of Nodes during Percolation in Networks”, *PLOS ONE*, 2013, vol. 8, no. 1, p. e53095.
32. Noskov S.I. “Construction of a nonlinear convolution of particular efficiency criteria in the vector optimization problem”, *Proc. of Voronezh State University. Series: Systems Analysis and Information Technologies (Vestnik VGU. Seriya: Sistemnyy analiz i informatsionnyye tekhnologii)*, 2021, vol. 4, pp. 30-36, available at: <https://doi.org/10.17308/sait.2021.4/3796>

Submitted 28.03.2024; revised 06.05.2024

#### Information about the authors

**Vyacheslav A. Shevtsov** – Dr. Sc. (Technical), Professor, Head of Department, Moscow Aviation Institute (National Research University) (4 Volokolamskoye Shosse, Moscow 125993, Russia), e-mail: [vs.gtumai@gmail.com](mailto:vs.gtumai@gmail.com)

**Andrey M. Kazantsev** – Cand. Sc. (Technical), leading engineer, Academician A.L. Mints Radiotechnical Institute (10 build. 1 8 Marta st., Moscow 127083, Russia), e-mail: [kazantsev.andrei@gmail.com](mailto:kazantsev.andrei@gmail.com), ORCID: 0000-0003-3608-8238.

**Alexander V. Timoshenko** – Dr. Sc. (Technical), Professor, Head of Integrated Department, Academician A.L. Mints Radiotechnical Institute (10 build. 1 8 Marta st., Moscow 127083, Russia), e-mail: [u567ku78@gmail.com](mailto:u567ku78@gmail.com), ORCID: 0000-0002-9791-142X

**Rasul A. Kochkarov** – Cand. Sc. (Economics), Associate Professor, Associate Professor of the Department, Financial University under the Government of the Russian Federation (49/2 Leningradsky prosp., Moscow 125167, Russia), e-mail: [rasul\\_kochkarov@mail.ru](mailto:rasul_kochkarov@mail.ru), ORCID: 0000-0003-3186-3901

**Svetlana V. Prokopchina** – Dr. Sc. (Technical), Professor, Professor of the Department, Financial University under the Government of the Russian Federation (49/2 Leningradsky prosp., Moscow 125167, Russia), e-mail: [svprokopchina@fa.ru](mailto:svprokopchina@fa.ru), ORCID: 0000-0001-5500-2781

**СПОСОБ ОБРАБОТКИ ИМПУЛЬСНЫХ СИГНАЛОВ С ОРТОГОНАЛЬНЫМ ЧАСТОТНЫМ РАЗДЕЛЕНИЕМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НИЗКОПЛОТНОСТНОГО КОДИРОВАНИЯ****М.В. Хорошайлова****Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия**

**Аннотация:** предложен способ повышения устойчивости системы к искажениям в канале передачи данных посредством интеграции циклического префикса, который является избыточной информацией, и виртуальной несущей в составной сигнал. Кроме того, чтобы снизить частоту ошибок, вводим в эту систему проверку четности низкой плотности (LDPC). На стороне приемника производительность оценки канала улучшается за счет оценки смещения синхронизации символа, оценки смещения несущей частоты и методов оценки канала, которым помогает априорная информация, полученная с помощью радиолокационных данных. Во время радиолокационного обнаружения совместная оценка расстояния и скорости радиолокационной цели достигается за счет использования согласованной фильтрации, сжатия импульсов и оконной обработки для получения задержки и доплеровской частоты. Чтобы получить более надежные данные, используем оценку минимальной среднеквадратичной ошибки, основанную на дискретном преобразовании Фурье, для оценки канала. Имитационное моделирование показывает, что предлагаемая система не только реализует функции передачи и обнаружения, но и улучшает показатели производительности интегрированного сигнала, такие как частота битовых ошибок (BER)  $6 \times 10^{-5}$ , пиковое отношение боковых лепестков -12,73 дБ, и интегрированное отношение боковых лепестков составляет -8,56 дБ при отношении сигнал/шум (SNR) 10 дБ

**Ключевые слова:** циклический префикс, низкоплотностное кодирование, мультиплексирование с ортогональным частотным разделением каналов, смещения синхронизации символа

**Благодарности:** работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания «молодежная лаборатория» № FZGM-2024-0003

**Введение**

С наступлением времен связи 6G распространение устройств беспроводной связи неизбежно, а частотных потенциалов становится все меньше. При проектировании простых систем, таких как ликвидация последствий землетрясений, интеллектуальный транспорт и интеллектуальное сельское хозяйство, интеграция независимых радиолокационных и коммуникационных устройств может привести к избыточному использованию беспроводной сети. Для эффективного использования частотных и аппаратных ресурсов совместное использование радиолокационного диапазона передачи данных подразделяется на два направления исследований: совместное использование диапазона радиолокационной связи и интегрированная система радиолокационной связи. Что касается совместных радиолокационных систем и систем связи, основной проблемой является разработка интегрированной формы сигнала. Следовательно, существует необходимость в разработке новой мультиплексированной формы сигнала, которая может передавать коммуникационную информацию и одновременно использоваться для обнаружения объекта.

Поэтому, чтобы повысить устойчивость системы к искажениям, вызванным каналом, в этой статье циклический префикс (CP) и условные частоты несущих (VC) интегрируются в составной сигнал. Кроме того, для снижения частоты ошибок связи вводим в эту систему проверку четности с низкой плотностью (LDPC). На стороне приемника производительность оценки канала улучшается за счет оценки временного смещения символа, оценки смещения несущей частоты и методов оценки канала с использованием априорной информации, полученной на основе радиолокационных данных.

**Методика проектирования встроенного сигнала**

Для повышения эффективности полосы пропускания расширение критерия Найквиста от связи с одной несущей до связи с несколькими несущими приводит к генерации перекрывающихся ортогональных сигналов поднесущих в частотной области, известных как OFDM [1]. Поскольку сигналы между различными поднесущими OFDM удовлетворяют ортогональности, его нечетные и четные несущие могут использоваться для модуляции сигналов радиолокации и связи соответственно. На рис. 1 показаны назначения поднесущих в частотной области (слева) и соответствующую

щие частотно-временные диаграммы (справа) для каждой ортогональной формы сигнала.

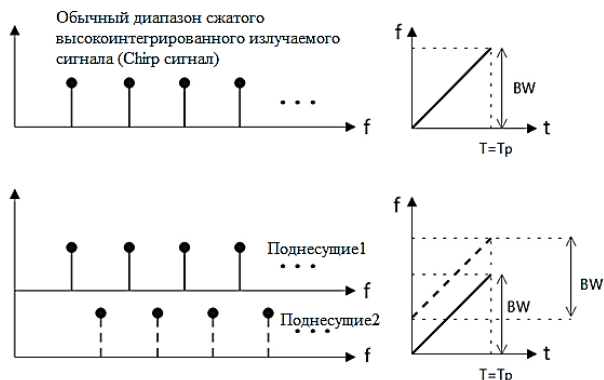


Рис. 1. Диаграмма распределения поднесущих Chirp-сигнала и частотно-временной график модулированного сигнала во временной области

Коды с низкой плотностью проверки на четность (LDPC) стали предпочтительной схемой канального кодирования для стандартов беспроводной связи, таких как IEEE802.16e и 5G, из-за их производительности исправления

ошибок, которая приближается к пределу Шеннона [3]. В этой интегрированной системе некоторые последовательные поднесущие могут подвергаться глубокому замиранию [1, 2]. Таким образом, в этой здесь вводится LDPC-кодирование для устранения случайных ошибок, вызванных глубоким замиранием в случае с несколькими несущими. Код LDPC представляет собой набор линейных пакетных кодов  $(n, k)$ , где  $n$  — длина кода, а  $k$  — длина последовательности сообщений, которая может быть однозначно определена с помощью разреженной контрольной матрицы  $H$ . Каждая строка матрицы контрольной суммы соответствует уравнению контрольной суммы, а каждый столбец соответствует переменному узлу. Выбрали частоту кодирования LDPC, равную  $1/2$ , чтобы повысить эффективность исправления ошибок в сигнале.

На рис. 2 представлена структурная схема конструкции системы приемопередатчика OFDM chirp, основанная на LDPC-кодировании.

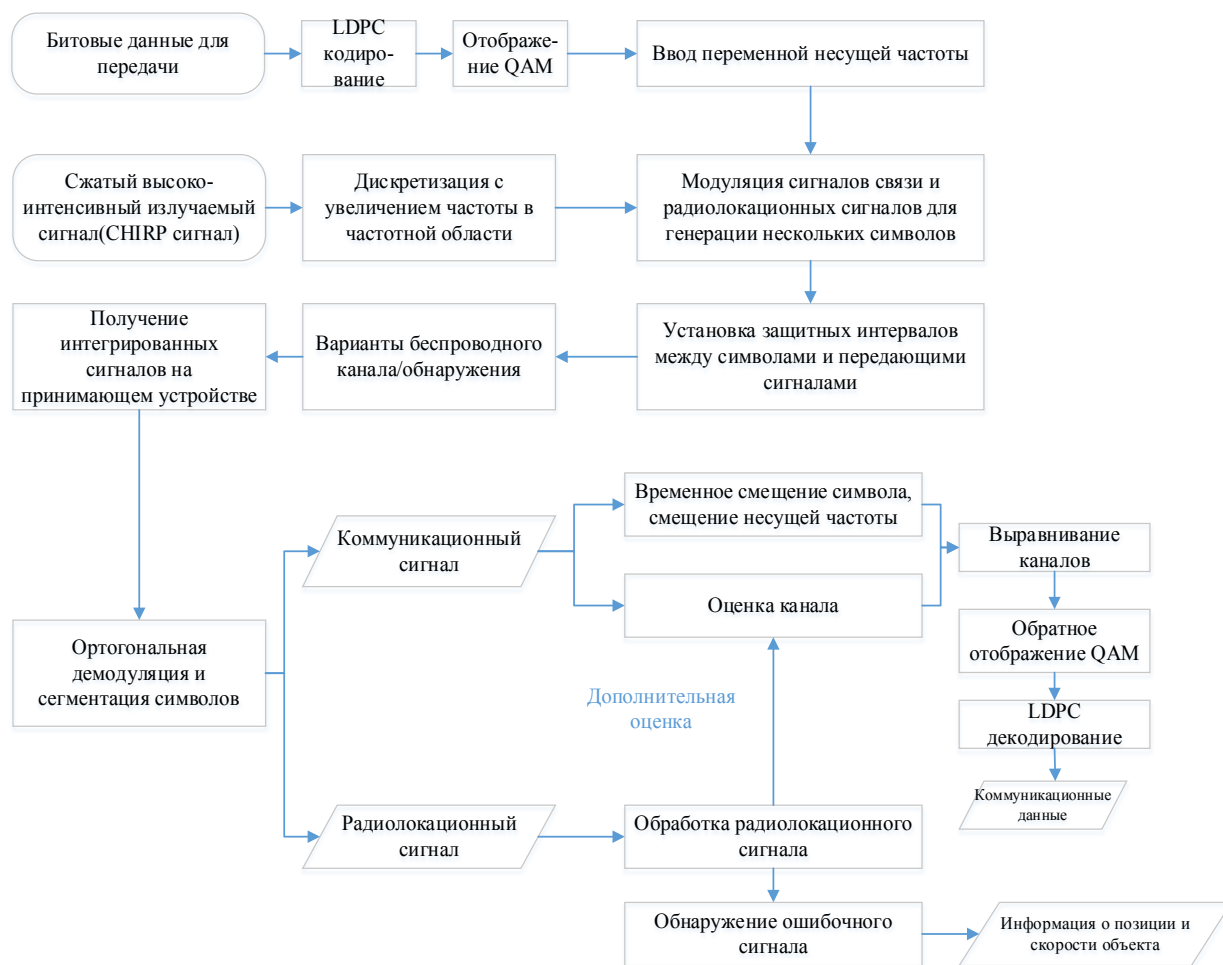


Рис. 2. Этапы интегрированного проектирования и обработки сигналов

**Система обработки интегрированных сигналов радиолокационной связи**

Моделирование системы связи со встроенным LDPC-кодированием в каналах рэлеевского затухания показывает, что использование алгоритма суммарного произведения (SPA) значительно повышает производительность системы [4]. SPA в традиционном LDPC-кодировании предполагает большое количество умножений, что приводит к высокой вычислительной сложности при реализации. Следовательно, информация о вероятности представляется с использованием коэффициентов правдоподобия, что приводит к алгоритму распространения доверия с логарифмическим отношением правдоподобия (LLR BP) [5]. В этом случае исходные сообщения для каналов выглядят следующим образом

$$L(p_i) = \frac{\ln p_i(0)}{\ln p_i(1)} = \ln \frac{P(v_i = 0 | y_i)}{P(v_i = 1 | y_i)}, \quad (1)$$

где  $v_i$  представляет  $i$ -й переменный узел, а  $p_i(b)$  представляет апостериорную вероятность кодового слова  $s_i = b$ , когда  $y_i$  принимается на принимающей стороне. Внешняя информация, передаваемая контрольным узлом переменному узлу, выглядит следующим образом:

$$r_{ji} = \ln \frac{r_{ji}(0)}{r_{ji}(1)} = \ln \frac{1 + \prod_{i' \in V(j)/i} (1 - 2q_{i'j}(1))}{1 - \prod_{i' \in V(j)/i} (1 - 2q_{i'j}(1))}, \quad (2)$$

где  $r_{ij}$  представляет внешнюю информацию, передаваемую от контрольного узла  $j$  к переменному узлу  $i$ , а  $V(j)/i$  обозначает набор других переменных узлов, подключенных к  $j$ -му контрольному узлу, за исключением  $i$ -го переменного узла. Упрощение внешней информации приводит к следующему с введением  $\tanh(x) = (e^x - e^{-x}) / (e^x + e^{-x})$ :

$$r_{ji} = 2 \tanh^{-1} \left( \prod_{i' \in V(j)/i} \tanh \frac{q_{i'j}}{2} \right). \quad (3)$$

Даже с введением  $\tanh$  в логарифмическую область по-прежнему потребляется значительное количество аппаратных ресурсов.

В здесь представлен алгоритм распространения доверия с минимальной суммой (min-sum BP) для преобразования сложных функциональных операций в операции с символьными значениями и операции численного сравнения. Здесь минимальное значение используется для замены результатов умножения:

$$\prod_{i' \in V(j)/i} \tanh \frac{q_{i'j}}{2} \approx \min_{i' \in V(j)/i} \left( 2 \tanh \frac{q_{i'j}}{2} \right). \quad (4)$$

Значение обновления контрольного узла алгоритма min-sum BP больше, чем значение, полученное алгоритмом LLR BP, т.е.,

$$2 \tanh^{-1} \left( \prod_{i' \in V(j)/i} \tanh \frac{q_{i'j}}{2} \right) < \min_{i' \in V(j)/i} \left( \tanh |q_{i'j}| \right). \quad (5)$$

Поэтому здесь умножаем эту внешнюю информацию на мультипликативный коэффициент масштабирования  $\alpha$ , чтобы получить LDPC-улучшенный нормализованный алгоритм минимальной суммы (NMSA). Следовательно, внешняя информация, передаваемая от контрольных узлов к переменным узлам, может быть упрощена следующим образом:

$$r_{ji} = \alpha \prod_{i' \in V(j)/i} \text{sgn}(q_{i'j}) \cdot \min_{i' \in V(j)/i} \left( \tanh |q_{i'j}| \right). \quad (6)$$

Из рис. 3 видно, что скорость сходимости максимальна при  $\alpha = 0,8$ .

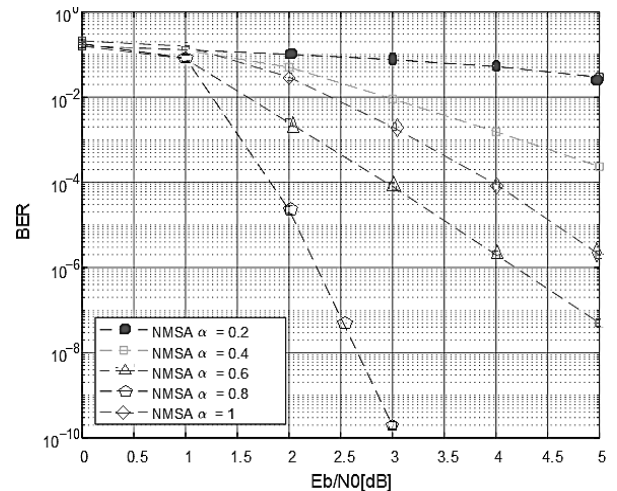


Рис. 3. Изменение BER с различными мультипликативными коэффициентами уменьшения  $\alpha$ , в соответствии с алгоритмом NMSA

В процессе принятия решения о декодировании, после итераций, апостериорная вероятность переменных узлов определяется следующим образом:

$$q_{ij} = \ln \frac{p_i(0) \prod_{j' \in C(i)} r_{j'i}(0)}{p_i(1) \prod_{j' \in C(i)} r_{j'i}(1)} = L(p_i) + \sum_{j' \in C(i)} r_{j'i} \quad (7)$$

Если значение больше 0, т. е.  $P(v_i = 0) > P(v_i = 1)$ ,  $v_i$  может быть принято равным 0.

### Смещение по времени символа и несущей частоты

В этой интегрированной системе начальная точка входного канала интегрированного сигнала и поле быстрого преобразования Фурье (БПФ) могут быть несогласованными из-за временного смещения сигнала (STO). Выполняем быстрое преобразование Фурье

(БПФ) для полученных выборок  $\{x_l[n + \delta]\}_{n=0}^{N-1}$  во временной области, где  $\delta$  - количество выборок. Получаем принятый сигнал в частотной области следующим образом:

$$Y_l = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x_l[n + \delta] e^{-j2\pi nk/N} = X_l[k] e^{j2\pi k\delta/N} \quad (8)$$

Когда в принятом сигнале наблюдается смещение фазы, это приводит к вращению совокупности сигналов вокруг начала координат. Чтобы обеспечить точную выборку передаваемого сигнала, необходимо учитывать временную синхронизацию символов [6]. Из-за перекрытия между окончанием символа и соответствующими данными, как показано на рис. 4, когда конец символа попадает в пределы скользящего окна, сходство между двумя блоками выборки в пределах окна достигает своего максимума.

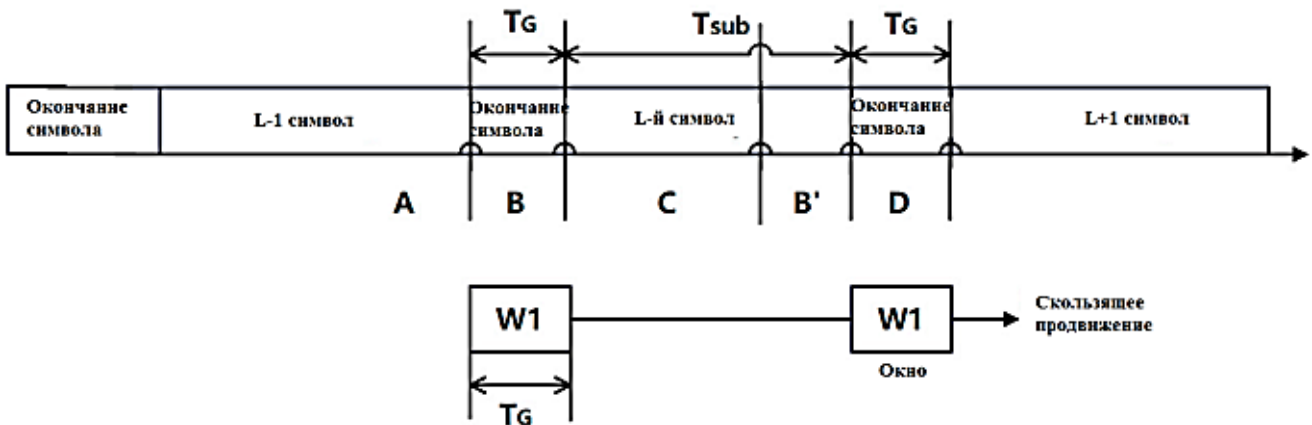


Рис. 4. Метод оценки временного смещения символа с использованием двойных скользящих окон

Используем корреляцию между двумя блоками выборки в  $W1$  и  $W2$ , а затем оцениваем временное смещение символа, максимизируя логарифмическую функцию правдоподобия. Пусть  $\rho = \text{SNR}/(\text{SNR} + 1)$  представляют фактическое количество выборок, усредненных в пределах окна. Затем временное смещение символа оценивается следующим образом:

$$\delta_{ML} = \arg \max_{\delta} \{ \gamma[\delta] - \rho \phi[\delta] \} \quad (9)$$

$$\gamma[m] = \sum_{n=m}^{m+L-1} y_l[n] y_l^*[n + N], \quad (10)$$

$$\phi[m] = \frac{1}{2} \sum_{n=m}^{m+L-1} \left\{ |y_l[n]|^2 + |y_l[n + N]|^2 \right\}. \quad (11)$$

Значения  $\gamma(\delta)$  и  $\phi(\delta)$  в (9) показаны в (10) и (11). На принимающей стороне сигнала неизбежно возникает искажение несущей, и также учитываем смещение несущей частоты (CFO), вызванное доплеровским сдвигом  $f_d$ . Пусть  $f_{\text{offset}} = f_c - f_c'$ , где  $f_c$  и  $f_c'$  представляют несущие частоты передатчика и приемника соответственно. Доплеровский сдвиг  $f_d$  определяется как несущей частотой  $f_c$ , так и быстродействием подвижного модуля  $v$ , т.е.  $f_d = v \cdot f_c/c$ .

Определяем нормализованное смещение несущей частоты как отношение смещения несущей частоты к расстоянию между поднесущими:  $\varepsilon = f_{\text{offset}}/\Delta f$ . Для нормализованного смещения несущей частоты оно может быть разложено на две части, т.е.  $\varepsilon = \varepsilon_i + \varepsilon_f$ , где  $\varepsilon_i$  представляет целочисленное смещение частоты (IFO), а  $\varepsilon_f$  представляет дробное смещение частоты (FFO). Когда между передатчиком и приемником имеется смещение несущей частоты на величину  $\varepsilon$ , принятый сигнал представляется следующим образом:

$$y_l[n] = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} H[k] X_L[k + \delta] e^{j2\pi(k+\varepsilon)n/N} + z_l[n]. \quad (12)$$

Преобразуем два символа  $y_l[n]$  и  $y_{l+D}[n]$  в сигнал частотной области  $\{Y_l[k]\}_{K=0}^{N-1}$  и  $\{Y_{l+D}[k]\}_{K=0}^{N-1}$  с помощью БПФ, который используется для извлечения направляющей частоты. Затем смещение несущей частоты при оценке направляющей частоты используется для компенсации принятого сигнала во временной области. Конкретная схема показана на рис. 5.

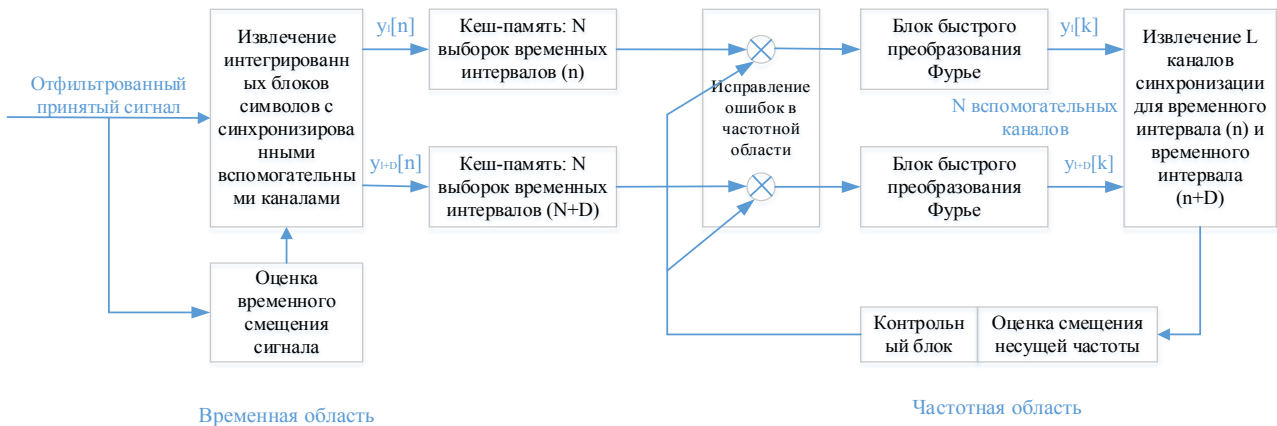


Рис. 5. Схема синхронизации со смещением несущей частоты с использованием управляющего сигнала

На рис. 6 показана оценка смещения несущей частоты с использованием разности фаз между циклическим префиксом и соответствующими символами мультиплексирования с ортогональным частотным разделением в конце, а также оценка смещения несущей частоты на основе разности фаз между двумя повторяющимися префиксами.

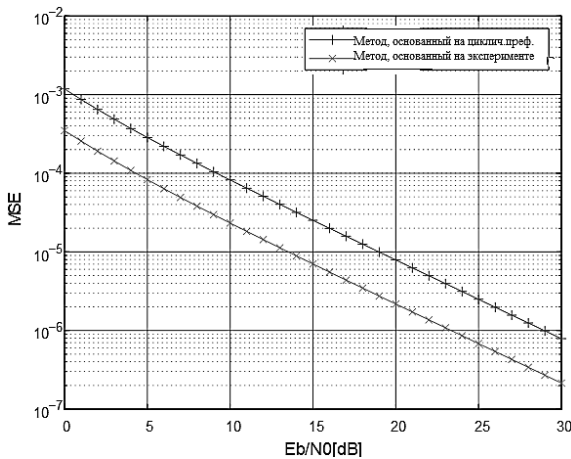


Рис. 6. Среднеквадратичная оценка методов определения смещения несущей частоты

Можно заметить, что среднеквадратичная ошибка (MSE) оценки смещения несущей частоты с использованием контрольных сигналов меньше [7]. По мере увеличения отношения сигнал/шум (SNR) среднеквадратичная ошибка оценки смещения несущей частоты продолжает уменьшаться.

### Результаты моделирования

Проверяем эффективность предложенного метода проектирования и обработки предложенной формы интегрированного сигнала с помощью имитационных экспериментов в MATLAB 6.1.

Сравнение производительности получено с помощью имитационных экспериментов. На рис. 7 показаны эхо-сигналы со сжатым импульсом с отношением пика к боковым лепесткам (PSLR) -12,73 дБ. Интегральное отношение боковых лепестков (ISLR) составляет -8,56 дБ, что является улучшением по сравнению с -6,04 дБ при традиционном методе.

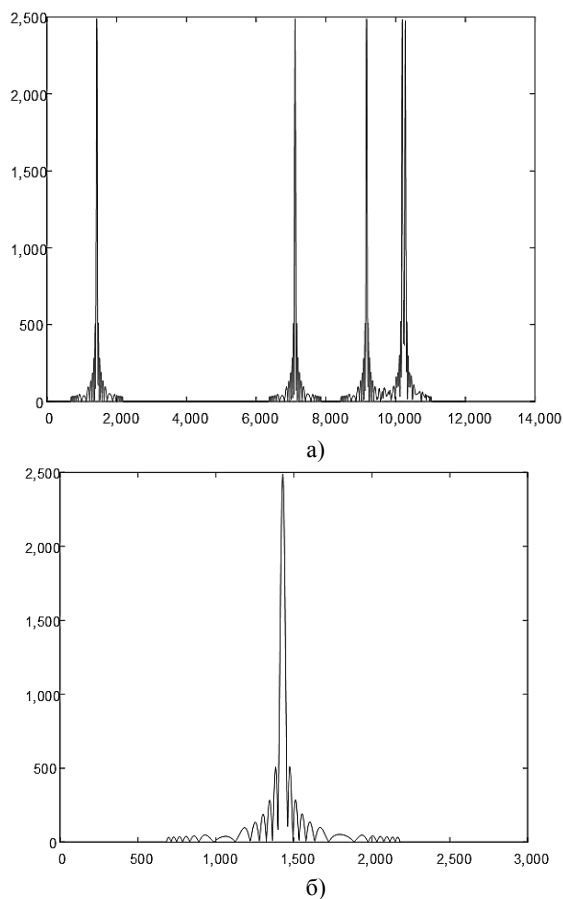


Рис. 7. Эхо-сигнал объекта после сжатия импульса.  
(а) Эхо-сигнал радара от пяти целей;  
(б) эхо-сигнал радара от одной цели

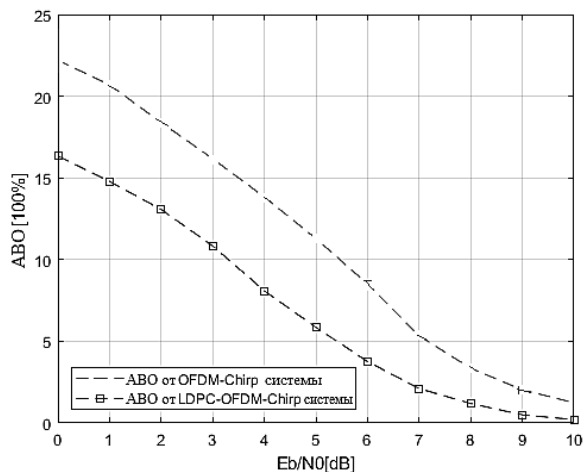


Рис. 8. Сравнение значений амплитуды вектора ошибок (ABO) для различных случаев

В реальных ситуациях из-за несовершенств системы, таких как фазовый шум, потеря несущей частоты и другие дефекты, положение сигнала на диаграмме созвездия может отклоняться от идеальных местоположений. Чтобы всесторонне оценить качество модулированного сигнала, вычислили векторные

различия между опорным сигналом и фактическим передаваемым сигналом. На рис. 8 показаны расхождения между фактическим сигналом и идеальным сигналом в соответствии с предложенным подходом.

### Заключение

Усовершенствован коммуникационный аспект интегрированной структуры проектирования формы сигнала. Чтобы уменьшить влияние внеполосного излучения между различными поднесущими, принято решение добавить эффективную несущую и циклический префикс к форме сигнала вместо добавления нулевого отступа перед символами. Более того, использование оценки временного смещения символа и оценки смещения несущей частоты в приемнике обеспечивает временную и спектральную синхронизацию принимаемого сигнала. Это эффективно улучшает качество передачи интегрированного сигнала. Для радиолокационного обнаружения используется отношение пиковых частот к боковым лепесткам и интегральное отношение боковых лепестков в частотной области для оценки эффективности их радиолокационного обнаружения. Сигналы Chirp, дискретизированные в частотной области, излучаются в виде широких импульсов для обеспечения широкого диапазона действия. Соответствующий алгоритм сжатия импульсов используется во время приема для получения узкого импульса для обеспечения его разрешения.

Моделирование в Matlab выполнено для проверки того, что интегрированная система, может точно передавать и принимать данные связи, достигать битовой ошибки (BER)  $6 \times 10^{-5}$  и амплитуды вектора ошибок 0,2087 при отношении сигнал/шум (SNR) 10 дБ, и выполнять измерения скорости и расстояния до радиолокационных целей с отношением пиковых значений к боковым лепесткам -12,73 дБ.

### Литература

1. MIMO-OFDM Wireless Communications with MATLAB / Y.S. Cho, J. Kim, W.Y. Yang, C.G. Kang // John Wiley & Sons: Hoboken, NJ, USA, 2010. PP. 95–168.
2. Protection Scheme of Subcarrier Index in OFDM with Index Modulation Aided by LDPC Coding / Y.J. Zhu, Y.Y. He, Y. Fan, R.G. Yao // J. Northwestern Polytech. Univ. 2021. Vol. 39. PP. 818–823.
3. Wang, W.-Q. MIMO SAR OFDM Chirp Waveform Diversity Design with Random Matrix Modulation. IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 2015. Vol. 53. PP. 1615–1625.
4. Blind Recognition of LDPC Codes Using Convolutional Neural Networks / L. Li, Z. Huang, C. Liu, J. Zhou,

Y. Zhang // In Proceedings of the 2021 IEEE 4th International Conference on Electronics Technology (ICET), Chengdu, China, 7–10 May 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 11.03.2024; принята к публикации 06.05.2024

#### 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: 0000-0001-9167-9538

## A METHOD FOR PROCESSING PULSE SIGNALS WITH ORTHOGONAL FREQUENCY DIVISION USING LOW-DENSITY CODING

M.V. Khoroshailova

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

**Abstract:** in this article, a method is proposed to increase the stability of the system to distortions in the data transmission channel by integrating a cyclic prefix, which is redundant information, and a virtual carrier into a composite signal. In addition, to reduce the error rate, we introduce low-density parity checking (LDPC) into this system. On the receiver side, channel estimation performance is improved by estimating symbol synchronization offset, estimating carrier frequency offset, and channel estimation methods aided by a priori information obtained from radar data. During radar detection, a joint estimation of the distance and velocity of a radar target is achieved by using consistent filtering, pulse compression, and window processing to obtain delay and Doppler frequency. To obtain more reliable data, we use an estimate of the minimum standard error based on the discrete Fourier transform to estimate the channel. Simulation modeling shows that the proposed system not only implements transmission and detection functions, but also improves the performance of the integrated signal, such as the bit error rate (BER)  $6 \times 10^{-5}$ , the peak side lobe ratio is -12.73 dB and the integrated side lobe ratio is -8.56 dB with a signal-to-noise ratio (SNR) of 10 dB

**Key words:** cyclic prefix, low-density encoding, multiplexing with orthogonal frequency division of channels, symbol synchronization offsets

**Acknowledgments:** the work was financially supported by the Ministry of Science and Higher Education of Russian Federation as a part of the state project "The Laboratory of the Youth People" no. FZGM-2024-0003

#### References

1. Cho, Y.S.; Kim, J.; Yang, W.Y.; Kang, C.G. "MIMO-OFDM Wireless Communications with MATLAB", John Wiley & Sons, Hoboken, NJ, USA, 2010, pp. 95–168.
2. Zhu Y.J., He Y.Y., Fan Y., Yao R.G. "Protection Scheme of Subcarrier Index in OFDM with Index Modulation Aided by LDPC Coding", *J. Northwestern Polytech. Univ.*, 2021, vol. 39, pp. 818–823.
3. Wang, W.-Q. "MIMO SAR OFDM Chirp Waveform Diversity Design with Random Matrix Modulation", *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 2015, vol. 53, pp. 1615–1625.
4. Li L., Huang Z., Liu C., Zhou J., Zhang Y. "Blind Recognition of LDPC Codes Using Convolutional Neural Networks", *Proc. of the 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., Turetskaja 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. Khoroshailova M.V. "FPGA-based channel coding architecture for a 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 11.03.2024; revised 06.05.2024

#### Information about authors

**Marina V. Horoshailova** – Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Ocyabrya str., Voronezh 394026, Russia), e-mail: pmv2205@mail.ru, ORCID: 0000-0001-9167-9538

## МИКРОПОЛОСКОВЫЙ КРОССОВЕР ДИАПАЗОНА УВЧ НА ОСНОВЕ МАЛОГАБАРИТНЫХ ШЛЕЙФНЫХ МОДИФИКАЦИЙ

А.В. Останков<sup>1</sup>, Н.Н. Щетинин<sup>2</sup>, С.А. Слинчук<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

<sup>2</sup> Воронежский институт ФСИИ России, г. Воронеж, Россия

**Аннотация:** микрополосковые многолучевые схемы диаграммообразования фазированных антенных решеток могут содержать кроссоверы, обеспечивающие передачу мощности полезного сигнала по взаимно-пересекающимся направлениям в одной плоскости. Классические микрополосковые кроссоверы представляют собой каскадное соединение двух сонаправленных ответвителей, каждый из которых при реализации на основе четвертьволновых шлейфов обладает существенными размерами в диапазоне ультравысоких частот. Цель работы заключается в минимизации размеров кроссовера на основе ответвителей за счёт замены четвертьволновых шлейфов, формирующих топологию кроссовера, на их эквивалентные малоразмерные модификации. В качестве альтернативы исходным отрезкам линии передачи взяты комбинации Т- и П-образных шлейфов, совмещенных со встречно-штыревыми структурами и меандровыми линиями, анализ и синтез которых выполнен авторами в более ранних публикациях. Предложенное конфигурирование позволяет добиться эффективного использования свободного пространства внутри кроссовера и, тем самым, значительно сократить габаритные размеры устройства. Частотные свойства классического микрополоскового кроссовера и оригинального кроссовера, реализованного на модифицированных шлейфах, исследованы на основе строгого электродинамического моделирования методом моментов. Представлены и сопоставлены амплитудно-частотные характеристики классического и модифицированного кроссоверов. Установлено, что площадь, занимаемая модифицированным устройством, более чем на 80 % меньше по сравнению с традиционной конструкцией. Однако пятикратное снижение габаритов кроссовера сопровождается сужением рабочей полосы частот в полтора раза

**Ключевые слова:** кроссовер, топология, модификация, Т-секция, П-секция, полоса пропускания

### Введение

Микрополосковые диаграммообразующие схемы [1] фазированных антенных решеток [2] реализуются на основе базовых элементов – направленных ответвителей [3] и фазовращателей [4]. Однако, в ряде случаев, микрополосковые диаграммообразующие схемы могут содержать кроссоверы [5]. Особенностью кроссоверов является в обеспечении непрерывной передачи потоков мощности высокочастотного сигнала в двух взаимно пересекающихся направлениях и отсутствии взаимодействия между ними [6].

Широкое применение кроссоверов при построении многоэлементных диаграммообразующих схем в диапазоне ультравысоких частот ограничено из-за их относительно больших габаритных размеров. Однако существует ряд способов уменьшения размеров кроссоверов, в частности, например, за счет замены микрополосковых отрезков длинных линий на искусственные длинные линии шлейфных модификаций [7]. Помимо этого, минимизировать четвертьволновые микрополосковые линии можно с помощью меандровых линий, встречно-

штыревых структур, П- и Т-образных секций, высокоомных, низкоомных структур и их разнообразных комбинаций [8].

Кроссовер, как правило, представляет собой каскадное соединение двух сонаправленных ответвителей, первый из которых реализует деление мощности, а второй, напротив, суммирует потоки мощности.

На рис. 1 представлена классическая топология кроссовера на основе четвертьволновых отрезков линии передачи с размерами, адаптированными к центральной частоте 0.9 ГГц.

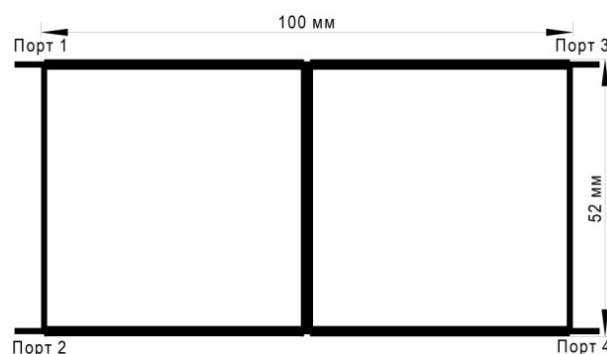


Рис. 1. Кроссовер на основе классических направленных ответвителей

Геометрические размеры кроссовера с топологией на рис. 1 определяются центральной частотой работы устройства и используемой диэлектрической подложкой, в качестве которой взята подложка Rogers 4003С толщиной 0.508 мм с относительной диэлектрической проницаемостью 3.55 и тангенсом угла диэлектрических потерь 0.0022. Из рис. 1 следует, что площадь занимаемая кроссовером на подложке составляет 5200 мм<sup>2</sup>, что может ограничивать практическое применение кроссовера традиционной топологии.

Цель работы заключается в минимизации размеров кроссовера на основе направленных ответвителей за счёт замены четвертьволновых шлейфов, формирующих топологию кроссовера, на их эквивалентные по электрическим характеристикам, но малоразмерные модификации.

### Способ реализации и анализ малогабаритных шлейфных модификаций

Одним из эффективных способов сокращения габаритных размеров направленных ответвителей, реализуемых на основе четвертьволновых отрезков микрополосковых линий, является замена традиционных шлейфов эквивалентными им структурами различных модификаций [9]. Совмещение низкоомных, высокоомных шлейфов и их оригинальных комбинаций позволяет добиваться значительного сокращения габаритных размеров устройств на основе четвертьволновых отрезков.

На рис. 2 представлены предлагаемые топологии шлейфных структур, предположительно эквивалентных четвертьволновым линиям передачи в составе ответвителя, особенностями которых являются малые габаритные размеры и обеспечение требуемых волновых сопротивлений. Микрополосковая топология, реализующая 50-омную структуру, показана на рис. 2, а, 35-омная конфигурация — на рис. 2, б.

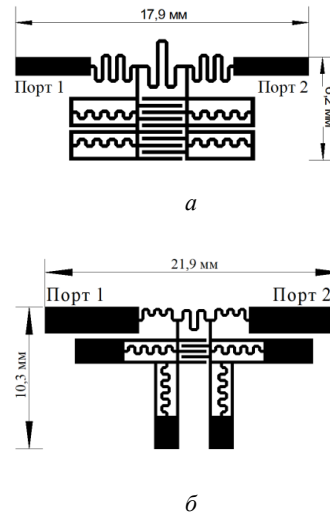


Рис. 2. Предлагаемые топологии шлейфных структур с волновым сопротивлением: а – 50; б – 35 Ом

Исследование электрических характеристик 50- и 35-омной модифицированных шлейфных структур выполнялось с помощью электродинамического моделирования методом моментов [10] в системе автоматизированного проектирования ADS [11]. Общей особенностью рассматриваемых топологий (рис. 2) является их сходная конфигурация, позволяющая совмещать микрополосковые встречно-штыревые и плоские распределенные ёмкости наряду с индуктивностью в виде меандровой линии. Такое комбинирование разных по форме полосков приводит к эффективному использованию площади на подложке и, как следствие к существенному уменьшению габаритных размеров. Заметим, что детальный анализ амплитудно-частотных, фазочастотных характеристик и волновых сопротивлений встречно-штыревых структур, микрополосковых Т- и П-секций представлен в работах [12, 13], соответственно.

Четырехполюсники на рис. 2 можно охарактеризовать следующими электрическими параметрами: волновым сопротивлением, набегом фазы, коэффициентом отражения ( $S_{11}$ ) и коэффициентом передачи ( $S_{21}$ ). Исходя из их назначения, на центральной частоте 0.9 ГГц, исследуемые малогабаритные шлейфы должны характеризоваться волновыми сопротивлениями 50 и 35 Ом, а также фазовым набегом, равным «минус» 90°. Значения коэффициентов отражения и передачи 50-омного модифицированного шлейфа как функции частоты показаны на рис. 3, а, частотные зависимости фазового сдвига и волнового сопротивления – на рис. 3, б.

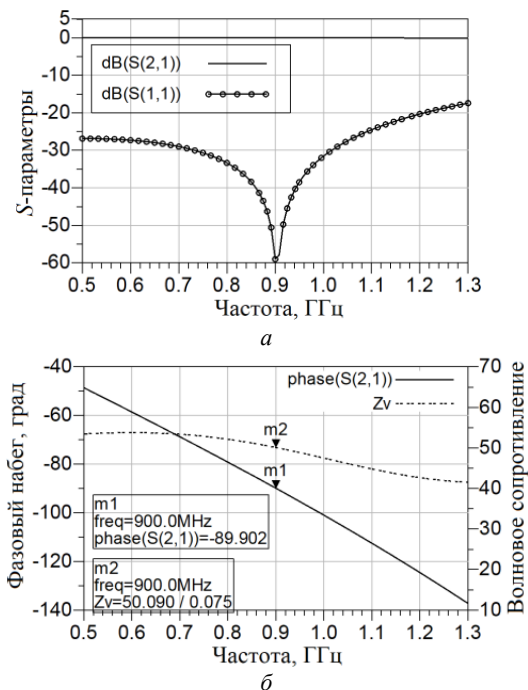


Рис. 3. Частотные характеристики коэффициентов отражения и передачи (а), набега фазы и волнового сопротивления (б) модифицированного 50-омного шлейфа

Аналогичные по содержанию характеристики модифицированного 35-омного шлейфа представлены на рис. 4.

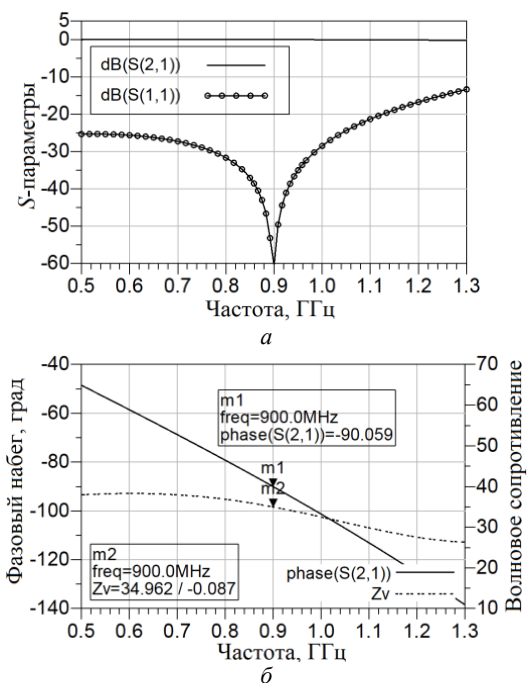


Рис. 4. Частотные характеристики коэффициентов отражения и передачи (а), набега фазы и волнового сопротивления (б) модифицированного 35-омного шлейфа

Геометрия представленных на рис. 2 модифицированных шлейфов оптимизирована по критерию минимального значения коэффици-

ента отражения  $S_{11}$  при условии обеспечения требуемого волнового сопротивления и набега фазы. Маркерами (m1, m2) на центральной частоте 0.9 ГГц указаны достижимые теоретически значения волнового сопротивления и фазового набега. Видно, что значения указанных величин близки к идеальным, что способствует реализации восьмиполусных устройств (направленных ответвителей и, в конечном счете, кроссовера) с высокими электрическими характеристиками.

Следующий этап подразумевает компоновку малогабаритных четырехполусных модифицированных шлейфов в единую топологию восьмиполусного устройства – кроссовера.

### Результаты и их обсуждение

На рис. 5 представлена топология малогабаритного кроссовера, основой которого является модифицированный сонаправленный ответвитель [14, 15], реализованный на основе рассмотренных модифицированных шлейфов, располагающихся таким образом, чтобы максимально эффективно использовать пространство внутри восьмиполусного устройства.

Кроссовер представляет собой каскадное соединение двух сонаправленных ответвителей, отличительной особенностью которых является компактное совмещение встречно-штыревых структур и меандровых линий.

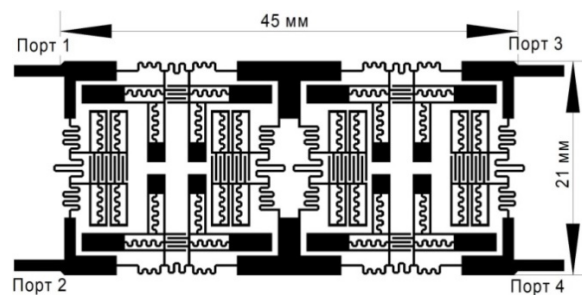


Рис. 5. Топология малогабаритного кроссовера на основе предложенных и исследованных шлейфных модификаций

Необходимо заметить, что уход от четвертьволновых линий передачи и переход к минимизированным шлейфным структурам всегда сопровождается сужением полосы рабочих частот. Чаще всего подобный эффект связан с близким расположением в составе топологии множества шлейфных неоднородностей, что приводит к их взаимному электродинамическому влиянию и, как следствие, к ухудшению частотных характеристик.

На рис. 6 приведены совмещенные амплитудно-частотные характеристики классической и модифицированной топологий кроссоверов.

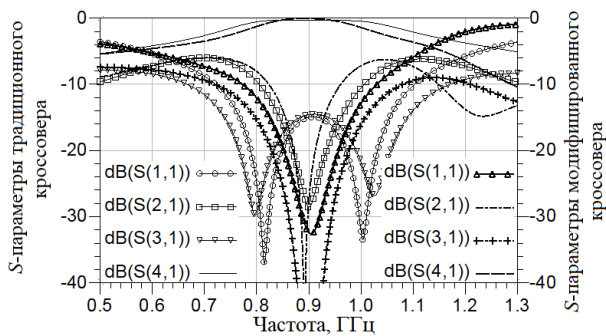


Рис. 6. Амплитудно-частотные характеристики кроссоверов

Анализ результатов электродинамического моделирования демонстрирует сходство частотных зависимостей рассматриваемых топологий кроссоверов, что свидетельствует об эквивалентности замещаемых классических четвертьволновых отрезков и модифицированных шлейфов. Однако если полоса рабочих частот кроссовера на основе классических шлейфов, определяемая по уровню коэффициента отражения ( $S_{11}$ ) «минус» 20 дБ, составляет 12 %, то у кроссовера на основе модифицированных шлейфов полоса частот равна 8 %. Уменьшение полосы рабочих частот модифицированного кроссовера, как отмечалось выше, связано с миниатюризацией четвертьволновых шлейфов при их преобразовании в структуры с эквивалентными характеристиками.

На центральной частоте 0.9 ГГц значения коэффициента отражения ( $S_{11}$ ) кроссоверов с классической и модифицированной топологией равны «минус» 15 дБ и «минус» 32 дБ соответственно. Рассматриваемые кроссоверы характеризуется также вносимыми потерями ( $S_{31}$ ) и сонаправленной связью ( $S_{41}$ ). Вносимые потери кроссовера с классической топологией на частоте 0.9 ГГц составляют «минус» 14.6 дБ, в то время как параметр  $S_{31}$  модифицированной топологии на этой же частоте равен «минус» 45 дБ. Уровень сонаправленной связи представленных кроссоверов варьируется в диапазоне «минус» (0.1 - 0.3) дБ.

### Заключение

Таким образом, предложена и исследована микрополосковая топология кроссовера на модифицированных шлейфах. Топология характеризуется приемлемыми амплитудно-частотны-

ми характеристиками, что подтверждается результатами электродинамического моделирования методом моментов. Несомненным преимуществом предложенного модифицированного кроссовера является площадь, занимаемая им на подложке, которая составляет 945 мм<sup>2</sup>, что более чем на 80 % меньше по сравнению с традиционной конструкцией. При этом по полосе рабочих частот модифицированная топология уступает классической в 1.5 раза.

Важно отметить, что электродинамическое моделирование и, особенно, оптимизация относительно сложных микрополосковых шлейфных конфигураций характеризуется существенными затратами времени на одну итерацию. Следовательно, необходимы вычислительные алгоритмы для «быстрого» синтеза базовых шлейфных структур, на основе композиции которых будут разрабатываться микрополосковые топологии самых разнообразных конфигураций. Такая методика позволит расширить частотные свойства и возможности по миниатюризации микроволновых устройств при существенном сокращении времени синтеза на основе электродинамического моделирования.

### Литература

1. Богачев И.А., Демшевский В.В., Сидоренко С.С. Печатная многолучевая антенная решётка // Электроника и микроэлектроника СВЧ. 2022. Т. 1. С. 270-275.
2. Хансен Р.С. Фазированные антенные решетки. М.: Техносфера, 2012. 560 с.
3. Останков А.В., Щетинин Н.Н. Микрополосковые направленные ответвители УВЧ и СВЧ диапазонов // Радиостроение. 2017. № 5. С. 1-37.
4. A novel Schiffman phase shifter with a defected microstrip structure / Y.X. Xin, B.-Z. Wang, J. He, Q.Q. He // Journal of Electromagnetic Waves and Applications. 2008. Vol. 22. № 2-3. PP. 187-193.
5. Recent developments of Butler matrix from components design evolution to system integration for 5G beamforming applications: A survey / A.B. Shallah, F. Zubir, M.K.A. Rahim et al. // IEEE Access. 2022. Vol. 10. PP. 88434-88456.
6. Сычев А.Н. Кроссоверы СВЧ на связанных линиях с полной связью // Доклады ТУСУР. 2017. Т. 20. № 3. С. 124-127.
7. Рыжман И.Н., Холодняк Д.В. Малогабаритные делители мощности и направленные ответвители на искусственных длинных линиях в интегральном исполнении // Электроника и микроэлектроника СВЧ. 2022. Т. 1. С. 387-391.
8. Летавин Д.А. Методика структурного синтеза шлейфных мостов УВЧ диапазона с уменьшенными габаритными размерами: дис. ... канд. техн. наук, 2021. 127 с.
9. Летавин Д.А. Миниатюрные конструкции микрополосковых мостовых устройств // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2016. № 18. С. 917-921.

10. Никольский В.В. Вариационные методы для внутренних задач электродинамики. М.: Наука, 1967. 460 с.

11. ADS 2021 Product Release. URL: <https://www.keysight.com/ru/ru/products/software/pathwavedesign-software/pathwave-advanced-design-system.html> (Accessed 31 January 2024).

12. Останков А.В., Щетинин Н.Н., Дашян С.Ю. Методика проектирования микрополосковых направленных ответвителей на встречно-штыревых структурах // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2020. Т. 16. № 4. С. 70-75.

13. Останков А.В. Щетинин Н.Н., Дашян С.Ю. Частотные характеристики модифицированных микрополос-

ковых шлейфов, эквивалентных четвертьволновым отрезкам // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2022. Т. 18. № 3. С. 51-56.

14. Останков А.В., Щетинин Н.Н. Микрополосковый направленный ответвитель, выполненный на основе отрезков искусственных длинных линий // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Сер. Естественные и технические науки. 2016. № 1. С. 23-25.

15. Модификации направленных ответвителей с малоразмерными шлейфами нестандартной конфигурации / А.В. Останков, В.Н. Кострова, Н.Н. Щетинин, К.А. Разинкин // Радиотехника. 2020. Т. 84. № 6 (12). С. 49-57.

Поступила 01.02.2024; принята к публикации 07.05.2024

#### Информация об авторах

**Останков Александр Витальевич** — д-р техн. наук, доцент, заведующий кафедрой радиотехники, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: avostankov@mail.ru

**Щетинин Никита Николаевич** — канд. техн. наук, доцент, старший преподаватель кафедры основ радиотехники и электроники, Воронежский институт ФСИН России (394072, Россия, г. Воронеж, ул. Иркутская 1-а), e-mail: nikita.shetinin@mail.ru

**Слинчук Светлана Александровна** — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры радиотехники, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: sslinchuk@gmail.com

## MICROSTRIP CROSSOVER FOR THE UHF RANGE BASED ON COMPACT LOOP MODIFICATIONS

A.V. Ostankov<sup>1</sup>, N.N. Schetinin<sup>2</sup>, S.A. Slinchuk<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

<sup>2</sup> Voronezh Institute of the Russian Federal Penitentiary Service, Voronezh, Russia

**Abstract:** microstrip multi-beam phased array antenna systems may include crossovers that enable the transmission of useful signal power in mutually intersecting directions in a single plane. Classical microstrip crossovers consist of a cascade connection of two co-directional dividers, each of which, when implemented based on quarter-wave loops, has significant dimensions in the UHF range. The aim of this work is to minimize the size of the crossover by replacing the quarter-wave loops, which form the crossover topology, with their equivalent compact modifications. Combinations of T- and Pi-shaped loop sections combined with back-to-back structures and meander lines are taken as alternatives to the original transmission line segments, the analysis and synthesis of which were carried out by the authors in earlier publications. This proposed configuration allows for the efficient use of free space within the crossover and thus significantly reduces the dimensions of the device. The frequency properties of the classical microstrip crossover and the original crossover implemented on modified loops were studied based on rigorous electromagnetic modeling using the method of moments. The amplitude-frequency characteristics of the classical and modified crossovers are presented and compared. It was found that the area occupied by the modified device is more than 80 % smaller compared to the traditional construction. However, the fivefold reduction in the dimensions of the crossover is accompanied by a narrowing of the operating frequency band by one and a half times

**Key words:** crossover, topology, modification, T-section, Pi-section, passband

#### References

1. Bogachev I.A., Demshevsky V.V., Sidorenko S.S. "Printed multibeam antenna array", *Microwave electronics and microelectronics (Elektronika i mikroelektronika SVCH)*, 2022, vol. 1, pp. 270-275.
2. Hansen R.S. "Phased antenna arrays" ("Fazirovannyye antennyye reshetki"), Moscow, Technosfera, 2012. 560 p.
3. Ostankov A.V., Shchetinin N.N. "UHF and SHF micro-strip directional couplers", *Radio Engineering (Radiostroenie)*, 2017, no. 5, pp. 1-37.
4. Xin Y.X., Wang B.-Z., He J., He Q.Q. "A novel Schiffman phase shifter with a defected microstrip structure", *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, 2008, vol. 22, no. 2-3, pp. 187-193.
5. Shallah A.B., Zubir F, Rahim M.K.A., Majid H.A., Sheikh U.U., Murad N.A., Yusoff Z. "Recent developments of Butler matrix from components design evolution to system integration for 5G beamforming applications: A survey", *IEEE Access*, 2022, vol. 10, pp. 88434-88456.
6. Sychev A.N. "Microwave crossovers based on coupled line couplers", *Proceedings of TUSUR University (Doklady TUSUR)*, 2017, vol. 20, no. 3, pp. 124-127.
7. Ryzhman I.N., Kholodnyak D.V. "Small-sized power dividers and directional couplers on artificial long lines in an integrated design", *Microwave electronics and microelectronics (Elektronika i mikroelektronika SVCH)*, 2022, vol. 1, pp. 387-391.

8. Letavin D.A. "Method of structural synthesis of UHF stub bridges with reduced overall dimensions" ("Metodika strukturnogo sinteza shleifnykh mostov UVCh diapazona s umen'shennymi gabaritnymi razmerami"), Cand. of Tech. Sci. diss., 2021, 127 p.
9. Letavin D.A. "Miniature constructions of microstrip couplers", *News of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences (Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiiskoi akademii nauk)*, 2016, vol. 18, no. 2, pp. 917-921.
10. Nikolsky V.V. "Variational methods for internal problems of electrodynamics" ("Variatsionnyye metody dlya vnutrennikh zadach elektrodinamiki"), Moscow, Nauka, 1967, 460 p.
11. "ADS 2021 Product Release", available at: <https://www.keysight.com/ru/ru/products/software/pathwave-designsoftware/pathwave-advanced-design-system.html> (accessed 31.01.2024).
12. Ostankov A.V., Shchetinin N.N., Dachian S.Yu. "Methodology of designing micro-strip directional couplers on interdigitated structures", *The Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2020, vol. 16, no. 4, pp. 70-75.
13. Ostankov A.V., Shchetinin N.N., Dachian S.Yu. "Frequency characteristics of modified microstrip sub lines equivalent to quarter-wave segments", *The Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2022, vol. 18, no. 3, pp. 51-56.
14. Ostankov A.V., Shchetinin N.N. "Microstrip directional coupler made on the basis of segments of artificial long lines", *Modern science: current problems of theory and practice. Series Natural and technical sciences (Sovremennaya nauka: aktual'nyye problemy teorii i praktiki. Seriya Yestestvennyye i tekhnicheskiye nauki)*, 2016, no. 1, pp. 23-25.
15. Ostankov A.V., Kostrova V.N., Shchetinin N.N., Razinkin K.A. "Modifications of directional couplers with small-sized circuits of non-standard configuration", *Radio Engineering (Radiotekhnika)*, 2020, vol. 84, no. 6(12), pp. 49-57.

Submitted 01.02.2024; revised 07.05.2024

#### Information about the authors

**Aleksandr V. Ostankov** - Dr. Sc. (Technical), Associate Professor, Head of the Department of Radio Engineering, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: avostankov@mail.ru  
**Nikita N. Shchetinin** - Cand. Sc. (Technical), Senior Lecturer, Voronezh Institute of the Russian Federal Penitentiary Service (1a Irkutskaya str., Voronezh 394072, Russia), e-mail: nikita.shetinin@mail.ru  
**Svetlana A. Slinchuk** - Cand. Sc. (Technical), Senior Lecturer, Department of Radio Engineering, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: sslinchuk@gmail.com

**ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПРОЦЕНТА ВЫХОДА ГОДНЫХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ****А.В. Башкиров, А.Б. Антиликаторов, А.С. Костюков, П.И. Подмарков****Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия**

**Аннотация:** прогнозирование процента выхода годных изделий является критическим аспектом при разработке интегральных схем. Успешное определение этого процента имеет важное значение как на различных этапах разработки, так и в стадии производства. Он определяется для каждой партии изделий отдельно с помощью простых расчетов, которые включают в себя подсчет количества годных интегральных схем, которые соответствуют техническим требованиям, а также количества забракованных после каждой технологической операции или группы операций, включая контрольные этапы. В процессе оценки процента выхода годных интегральных микросхем различают две основные категории: выход годных интегральных схем по пластине (подложке) при формировании кристаллов (плат) и выход годных после стадии полной сборки, что в совокупности позволяет оценить эффективность производственного процесса и технологическую надежность системы производства интегральных микросхем в целом. Приведены математические модели, которые предназначены для описания возникновения случайных отказов интегральных схем. Представленные модели основаны, в свою очередь, на анализе статистических данных, а именно, на распределении Пуассона и биномиальном распределении. Приведенные в статье модели адаптированы под различные условия возникновения ситуаций отказа интегральных микросхем

**Ключевые слова:** интегральная микросхема, технологический процесс, вероятность отказов, тип дефектов, число отказов, тестовый контроль, процент выхода годных интегральных схем

**Введение**

Чем более сложная технология, тем больше вероятность появления неисправностей, поэтому оценка процента производства рабочих интегральных микросхем (ИС) имеет особое значение при создании сложных блоков, с целью предсказания процента производства рабочих изделий применяются различные методы, например, математическое моделирование технологического процесса, статистический анализ результатов испытаний, экспертные оценки и другие. При этом учитывается не только сложность самого технологического процесса, но также качество используемых материалов, уровень квалификации персонала, условия работы и другие факторы, которые влияют на процесс производства ИС. Оценка процента производства рабочих ИС является ключевым показателем качества производства и представляет собой значимую задачу для разработчиков ИС и технологов, занимающихся производством [1].

**Используемые в производстве модели оценки выхода годных ИС**

Предполагается, что выход годных ИС после каждой операции является независимым

событием, то есть успех или неудача на одной операции не влияет на результаты других операций, т.е. у нас есть данные о выходе годных изделий после каждой операции. В этом случае можно использовать произведение вероятностей для определения общего выхода годных интегральных схем.

В этом случае можно вычислить процент рабочих интегральных микросхем ( $X$ ), используя выражение:

$$X = X_1 X_2 \dots X_n X_{сб}, \quad (1)$$

где  $n$  – общее число выполненных операций с известным процентом рабочих ИС;  $X_{сб}$  – процент годных ИС после сборки.

Из-за случайно-детерминированной природы технологических процессов в области микроэлектроники, процент выхода рабочих интегральных микросхем  $X$  может значительно варьировать не только между разными партиями, но и внутри отдельных пластин. Это вызвано различными факторами, такими как неоднородность материалов, изменения температуры и другие физические воздействия.

Поэтому уравнение (1) имеет ограниченную применимость и должно рассматриваться в контексте конкретного проекта и условий производства. В реальности производительность производственной линии может отличаться от ожидаемой, что влечет за собой потребность в дополнительном контроле и

управлении процессом производства микроэлектронных компонентов [2].

Статистические модели представляют собой теоретическую основу для прогнозирования процента рабочих интегральных микросхем. Они учитывают вероятность случайных отказов и распределение дефектов, которые могут вызвать неисправности интегральных микросхем в процессе их производства.

Для оценки вероятности возникновения случайных отказов используется понятие среднего времени между отказами (MTBF – Mean Time Between Failures). Распределение дефектов обычно описывается моделями распределения Пуассона или гауссовскими моделями [3].

Статистические модели, разработанные для прогнозирования процента рабочих интегральных микросхем, не зависят от конкретного типа дефектов, которые могут возникать в процессе производства с их случайным характером. Вне зависимости от того, какой именно дефект стал причиной отказа, статистические модели могут использоваться для оценки вероятности отказа и оптимизации производственных процессов [4].

Это означает, что независимо от того, являются ли причинами брака начальный пробой слоев SiO<sub>2</sub>, утечки токов р-п-переходов или дефекты фотолитографии, являющиеся наиболее распространенными причинами дефектов (отказов) разрабатываемых схем, теоретически возможно прогнозировать, какие интегральные схемы будут являться годными.

### Разработанные модели оценки выхода годных ИС

На основании вышесказанного, были разработаны математические модели, которые предназначены для описания случайных отказов.

Модель для среднего числа отказов:

$$n_i = S_i P_i, \quad (2)$$

где  $\bar{n}$  - среднеарифметическое значение отказов, вызываемых дефектами  $i$ -го типа в ИС;  $S_i$  - общая площадь чувствительной к дефектам области;  $P_i$  - плотность дефектов.

Для расчета отказов, которые возникают из-за точечных дефектов и связаны с размерами структур:

$$n_i = L_i P_i, \quad (3)$$

где  $L_i$  - критическая длина.

Модель, обусловленная точечными дефектами пересечения токопроводящих дорожек и контактных площадок, будет иметь вид:

$$n_i = \bar{n}_{oi} N_i, \quad (4)$$

где  $n_{oi}$  - среднеарифметическая величина отказов при пересечении токопроводящих дорожек или контактных площадок;  $N_i$  - общее число пересечений или контактных площадок.

Повышенные значения токов утечки, которые приводят к отказам в р-п-переходах, связаны с дефектами, находящимися в области обедненного слоя, который определяется его площадью и толщиной. В данном случае модель имеет следующий вид:

$$n_i = V_i P_i, \quad (5)$$

где  $V_i$  - критический (чувствительный к дефектам) объем обедненного слоя.

Для определения числа отказов, обусловленных дефектами фотолитографии разных размеров, математическое выражение примет вид:

$$n_i = \bar{\theta}_i S_k P_i, \quad (6)$$

где  $\bar{\theta}_i = \int_0^\infty \theta_i(x) h_i(x) dx$  – средняя вероятность отказа;  $S_k$  - площадь кристалла (платы);  $\theta_i(x)$  – вероятность проявления на отказе  $i$ -го дефекта;  $h_i(x)$  - распределение дефектов  $i$ -го типа.

Для оценки количества прогнозируемых дефектов на интегральных микросхемах значения плотности дефектов (количество дефектов на единицу длины, площади, объема или пересечения), используемые в уравнениях (2) - (6), определяются путем контроля тестовых структур. Для базовых технологических процессов эти значения плотностей дефектов сохраняются и используются для реальных ИС. Поэтому среднее число отказов  $n_i$ , вызванных дефектами  $i$ -го типа, может быть выражено как:

$$n_{pi} = \bar{n}_{Ti} S_{pi} / S_{Ti}, \quad (7)$$

где  $\bar{n}_{Ti}$  - среднее значение отказов в тестовой ячейке;  $S_{pi}$ ,  $S_{Ti}$  - площади критических областей рабочей ИС и тестовой ячейки.

Для прогнозирования процента рабочих интегральных микросхем, учитывая различные виды неисправностей (отказов) и различные законы распределения, применяются следующие математические модели.

Модель, основанная на пуассоновском распределении, предполагает, что вероятность возникновения внезапных отказов не зависит от наличия уже произошедших отказов:

$$Y = \prod_{i=1}^m \exp(-\bar{n}_{pi}), \quad (8)$$

где  $\bar{n}_{pi} = \int_0^t g(\tau) d\tau$  - среднее число отказов  $i$ -го вида;  $m$  - общее число отказов по их классификации;  $g(\tau)$  - величина пуассоновского распределения отказов.

Модель, основанная на биномиальном распределении, предполагает, что вероятность возникновения отказов не зависит от времени и убывает линейно с увеличением числа уже произошедших отказов:

$$Y = \prod_{i=1}^m (1 + \frac{\bar{n}_{pi}}{N_i})^{N_i}, \quad (9)$$

где  $N_i = c_i/b_i$  - число отказов, обусловленных дефектами  $i$ -го вида;  $c_i$  и  $b_i$  - постоянные величины распределения рассчитываемого отказа.

В случаях, когда рассчитываемое биномиальное распределение, принимает отрицательное значение, отказы считаются независимыми друг от друга и определяются исходя из:

$$Y = \prod_{i=1}^m (1 + \frac{\bar{n}_{pi}}{\alpha_i})^{-\alpha_i}, \quad (10)$$

где  $\alpha_i$  - параметр распределения (зависит от размаха распределения) отказов, обусловленных дефектами  $i$ -го вида.

Формула (10) представляет собой универсальную математическую модель прогнозирования процента работоспособных интегральных микросхем при любом распределении отказов, вызванных случайными дефектами. Когда  $\alpha$  стремится к бесконечности, выражение (10) преобразуется в (8), а при  $\alpha = -N$  - в (9).

Формула, используемая для прогнозирования процента рабочих интегральных микросхем (ИС) с учетом существенных дефектов, представляет собой следующее выражение:

$$Y = \prod_{j=1}^n Y_{0j} \prod_{i=1}^m (1 + \frac{\bar{n}_{pi}}{\alpha_i})^{-\alpha_i}, \quad (11)$$

где  $n$  - общее значение существенных дефектов;  $Y_{0j}$  - процент годных ИС при существенных дефектах  $j$ -го вида.

Значения переменной  $\bar{n}_{pi}$ , входящей в выражения (8) - (11), определяются на основе результатов тестовых измерений, используя выражение (8).

Иногда процент работоспособных прогнозируемых блоков интегральных схем связывают с общей площадью кристалла ( $S$ ) [5].

В этом случае представляется возможным применение упрощенной математической модели следующего вида:

$$Y = (Y_T)^{S_k/S_0}, \quad (12)$$

где  $Y_T$  - выход годных серийно выпускаемых или тестовых кристаллов площадью  $S_0$ .

Выражение (12) можно использовать в случае «малых» ( $\leq 0,1$  мкм) случайных дефектов.

При использовании группировки («кластеризации») дефектов для прогнозирования процента рабочих интегральных микросхем, можно использовать выражение, основанное на прогнозировании вероятности появления годных ИМС с учетом количества дефектов:

$$Y = [1 + \frac{(\alpha \sqrt{Y_T^{-1}})^{S_k}}{S_0}]^{-\alpha}, \quad (13)$$

где  $\alpha$  - параметр «кластеризации» дефектов, определяемый экспериментально с помощью выражения  $Y_T = (1 + \frac{d_T}{\alpha})^{-\alpha}$ .

В случае «больших» ( $> 1$  мкм) дефектов, соизмеримых с равными элементами ИС, используем выражение:

$$n_T = \int_0^\infty S(x) D(x) dx, \quad (14)$$

где  $S(x)$  - критическая площадь;  $x$  - размер (диаметр) дефекта.

Для прогнозирования процента выхода годных ИС любого типа можно использовать тестовые кристаллы. Тестовые кристаллы содержат блоки тестовых ячеек с predetermined структурами, которые позволяют контролировать определенные виды отказов [6].

Тогда для основных видов дефектов математическая модель примет вид:

$$Y = (1 - D_0)^{m_0} (1 - D_1)^{m_1} (1 - D_2)^{m_2}, \quad (15)$$

где  $D_o, D_1, D_2$  - вероятности отказов по каждому из дефектов, определяемые по измерениям соответствующих тестовых ячеек;  $m$  - число тестовых ячеек в каждом блоке тестового кристалла.

Определение значений вероятности отказов по каждому из дефектов  $D_o, D_1, D_2$  осуществляется путем измерений соответствующих тестовых ячеек прогнозируемой микросхемы. Кроме того, выражение (15) становится особенно актуальным при проявлении доминирующих дефектов.

Для определения оптимального значения рабочих резервных блоков интегральных схем используется следующее выражение:

$$Y = \sum_{n=0}^R \frac{(M+R)!}{(M+R-n)n!} Y_1^{(M+R-n)} (1 - Y_1)^n, \quad (16)$$

где  $M$  и  $R$  - число основных и резервных схем в ИМС;  $Y_1$  - выход годных для одной основной схемы;  $n$  - целое число ( $n = 0, \dots, R$ ).

### Заключение

Использование предлагаемых математических моделей при прогнозировании процента выхода годных интегральных схем имеет ряд преимуществ. В частности, использование проводимого анализа по предложенной методике позволяет учесть ряд факторов, влияющих на процентное соотношение выхода годных изделий, при учете их взаимодействия друг на друга.

Предварительный анализ различных сценариев и оптимизация процессов производства изделий способствует выявлению причин возникновения неисправностей в схемах еще на стадии проектирования, что позволяет заблаговременно принять меры по улучшению качества и надежности производства и выбору оптимальных параметров технологического процесса для достижения максимального процента выхода годных изделий.

Таким образом, используя предлагаемый алгоритм тестового контроля качества ИС, мы можем повысить эффективность и надежность процесса производства ИС, а также возможность предсказать процент выхода рабочих интегральных микросхем любой функциональной сложности.

### Литература

1. Ефимов И.Е. Микроэлектроника. Физические и технологические основы, надежность: учеб. пособие. М.: Высш. шк., 1986. 416 с.
2. Гусев В.Г., Гусев Ю.М. Электроника и микропроцессорная техника: учебник для вузов. М.: Высш. шк., 2004. 4790 с.
3. Степаненко И.П. Основы микроэлектроники. М.: Лаборатория Базовых Знаний, 2010. 306 с.
4. Технология интегральной электроники / под общ. ред. А.П. Достанко и Л.И. Гурского. Минск: Интегралполиграф, 2009. 379 с.
5. Белоус А.И., Красников Т.Я., Солодуха В.А. Основы проектирования субмикронных микросхем. М.: Техносфера, 2020. 782 с.
6. Пиганов М.Н. Индивидуальное прогнозирование показателей качества элементов и компонентов микросборок. М.: Новые технологии, 2012. 267 с.

Поступила 01.02.2024; принята к публикации 06.05.2024

### Информация об авторах

**Башкиров Алексей Викторович** – д-р техн. наук, доцент, проректор по науке и инновациям, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: fabi7@mail.ru  
**Антиликаторов Александр Борисович** – канд. техн. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: antilikatorov63@mail.ru  
**Костюков Александр Сергеевич** – старший преподаватель, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: stalkerklon@mail.ru  
**Подмарков Павел Игоревич** – магистрант, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: podmarkov.pasha@yandex.ru

## FORECASTING THE YIELD PERCENTAGE OF SUITABLE ICS

A. V. Bashkirov, A.B. Antilikatorov, A.S. Kostyukov, P.I. Podmarkov

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

**Abstract:** forecasting yield percentage is a critical aspect in integrated circuit design. The successful determination of this percentage is important both at various stages of development and during the production stage. It is determined for each batch of products separately using simple calculations, which include counting the number of valid integrated circuits that meet the technical requirements, as well as the number of rejected ones after each technological operation or group of operations, in-

cluding control stages. In the process of assessing the percentage of yield of suitable integrated circuits, two main categories are distinguished: the yield of suitable integrated circuits on the wafer (substrate) during the formation of crystals (boards) and the yield of suitable ones after the full assembly stage, which together makes it possible to assess the efficiency of the production process and the technological reliability of the system production of integrated circuits in general. Mathematical models are presented that are intended to describe the occurrence of random failures of integrated circuits. The presented models are based, in turn, on the analysis of statistical data, namely the Pausson distribution and the binomial distribution. The models presented in the article are adapted to various conditions for the occurrence of failure situations of integrated circuits

**Key words:** ICS, technological process probability of failures, type of defects, number of failures, test control, percentage of output of suitable IS

#### References

1. Efimov I.E. "Microelectronics. Physical and technological foundations, reliability: textbook" ("Mikroelektronika. Fizicheskiye i tekhnologicheskiye osnovy, nadezhnost': ucheb. Posobiye"), Moscow, Vyssh. Shk., 1986, 416 p.
2. Gusev V.G., Gusev Yu.M. "Electronics and microprocessor technology: textbook for universities" ("Elektronika i mikroprotssornaya tekhnika: uchebnik dlya vuzov"), Moscow, Vyssh. Shk., 2004, 4790 p.
3. Stepanenko I.P. "Fundamentals of microelectronics" ("Osnovy mikroelektroniki"), Moscow, Laboratoriya Bazovykh Znaniy, 2010, 306 p.
4. "Technology of integrated electronics" ("Tekhnologiya integral'noy elektroniki"), ed. by Dostanko A.P., Gursky L.I., Minsk, Integralpoligraf, 2009, 379 p.
5. Belous A.I., Krasnikov T.Ya., Solodukha V.A. "Fundamentals of designing submicron microcircuits" ("Osnovy proyektirovaniya submikronnykh mikroskhem"), Moscow, Technosphera, 2020, 782 p.
6. Piganov M.N. "Individual forecasting of quality indicators of elements and components of microassemblies" ("Individual'noye prognozirovaniye pokazateley kachestva elementov i komponentov mikrosborok"), Moscow, Novyye tekhnologii, 2012, 267 p.

Submitted 01.02.2024; revised 06.05.2024

#### Information about the authors

**Aleksey V. Bashkirov** – Dr. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: fabi7@mail.ru

**Alexander B. Antilikatorov** - Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: antilikatorov63@mail.ru

**Alexander S. Kostyukov** - Senior Lecturer, Voronezh State Technical University (20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: stalkerklon@mail.ru

**Pavel I. Podmarkov** - Master's student, Voronezh State Technical University (20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: podmarkov.pasha@yandex.ru

## ПОВЫШЕНИЕ ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТИ В БЕСПРОВОДНЫХ СИСТЕМАХ СВЯЗИ С OFDM-МОДУЛЯЦИЕЙ ПУТЁМ СНИЖЕНИЯ ПИК-ФАКТОРА СИГНАЛА

О.Н. Чирков, Е.А. Куцев

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

**Аннотация:** приводится описание технологии OFDM-модуляции (Orthogonal Frequency-Division Multiplexing — ортогональное мультиплексирование с частотным разделением каналов) сигналов в широкополосных системах связи, обозначаются особенности организации канала связи с OFDM, достоинства и недостатки данного вида обработки сигналов, а также область его применения. Рассматривается положительное и негативное влияние от введения в структуру сигнала защитного интервала и маркеров синхронизации на эффективность работы OFDM-системы. Проводится описание пик-фактора сигнала как основной характеристики широкополосного канала связи и главной проблемы при разработке системы связи с таким видом модуляции. Затрагивается вопрос о влиянии пик-фактора сигнала как на эффективность передачи данных в беспроводной системе связи, так и на сложность и себестоимость конструкции приёмо-передающих устройств. После обозначения проблемы пик-фактора сигнала рассматривается вопрос об эффективных методах снижения пик-фактора, применимых к каналу с OFDM-модуляцией. Проводится анализ искажающих и неискажающих методов снижения пик-фактора и, в конце, приводится сравнительная характеристика представленных методов по эффективности передачи данных, помехоустойчивости беспроводного канала связи и по целесообразности областей применения этих методов при проектировании беспроводной системы связи

**Ключевые слова:** OFDM-модуляция, пик-фактор, частотно-временная сетка, быстрое преобразование Фурье, обратное дискретное преобразование Фурье, клиппирование, компадирование, субоптимальный метод

### Введение

Ортогональное частотное деление каналов с мультиплексированием (Orthogonal Frequency Division Multiplexing — OFDM) — метод передачи потока цифровых данных одновременно на нескольких частотных каналах, которые обеспечивают определённое количество несущих и поднесущих колебаний. OFDM-модуляция входит в ряд популярных и современных способов формирования сигналов, используемых в системах высокоскоростной передачи данных. Данная технология была изобретена в 1966 г. компанией Intersil, патент на изобретение был получен Робертом Ченгом в 1970 г. OFDM-модуляцию можно считать перспективной с точки зрения построения многолучевых широкополосных цифровых систем радиосвязи, поскольку такая обработка сигналов обеспечивает достаточно высокую спектральную эффективность вышеуказанных систем.

В настоящее время преобразование сигналов посредством OFDM-модуляции заложено в основу таких стандартов связи, как: ADSL, DVB-C2, DVB-C, IEEE 802.11, HIPERLAN/2, DVB-T, DVB-T2, ISDB-T, DVB-H, T-DMB, MediaFLO, DRM, Flash-OFDM, LTE, IEEE 802.16 (WiMAX) и WiBro; IEEE 802.15.3a [1].

Данная технология крайне популярна в области проектирования широкополосных систем радиосвязи, так как обладает рядом преимуществ. Ввиду того, что поднесущие колебания при OFDM-модуляции можно располагать внутри канала связи близко друг к другу, можно добиться высокой эффективности использования радиочастотного спектра. В принцип формирования канала связи с OFDM-модуляцией заложены меры разграничения поднесущих во временной области, что исключает возможность возникновения межсимвольных искажений. Также данный вид модуляции позволяет обработать конкретную поднесущую из используемого частотного спектра.

Однако, сигнал, обработанный посредством OFDM-модуляции, также имеет и ряд недостатков. Одним из таких недостатков является высокая синхронизация времени и частоты проходящего по каналу связи сигнала, что ограничивает скорость передачи данных. Сигнал, модулированный по технологии OFDM, сильно подвержен влиянию эффекта Доплера. Введение защитного интервала в структуру канала связи с OFDM-модуляцией, с одной стороны, позволяет избежать межсимвольных искажений, но в то же время задаёт ограничение по скорости передачи данных. И самым явным недостатком такого вида радиосвязи является зависимость качества передачи

данных от значения пик-фактора сигнала, проходящего по широкополосному каналу связи с OFDM-модуляцией.

Ещё одна особенность OFDM-модуляции отражается на аппаратной составляющей приёмно-передающих устройств. Дело в том, что при OFDM-модуляции сигнал каждого подканала подвергается фазовой и амплитудной модуляции. Это значит, что такой сигнал предварительно должен быть усилен с помощью усилителя с высокой линейностью. Очень важно, чтобы сигнал после OFDM-модуляции смог передавать свои максимальные, пиковые значения без искажений, так как только достоверная точность передачи сигнала сможет обеспечить эффективную передачу информации и целостность пакета данных на приёмной стороне. И это притом, что пиковые значения сигнала в канале связи с OFDM-модуляцией могут в десятки раз превышать его среднее

значение, а значит, сохранить их в неискажённой форме — отдельная задача [2].

### Принцип обработки сигнала OFDM-модуляцией

Суть OFDM-модуляции состоит в том, что высокоскоростной поток данных разделяется на конечное число низкоскоростных потоков данных, каждый из которых закреплен за определённым частотным каналом. При проведении сравнительной характеристики данного вида обработки сигнала с частотной модуляцией можно выделить, что при OFDM-модуляции сигнала происходит группировка поднесущих колебаний, что позволяет сузить полосу пропускания канала. Частотная модуляция представлена на рис. 1, график OFDM-модуляции показан на рис. 2.

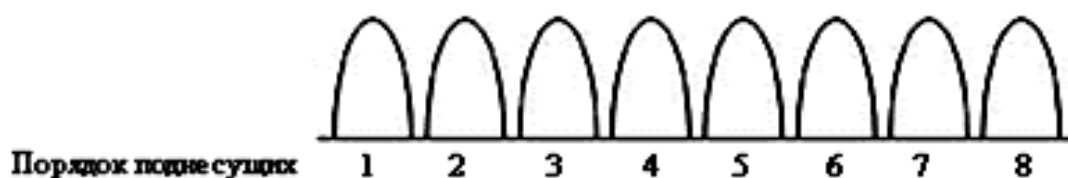


Рис. 1. Частотная модуляция сигнала

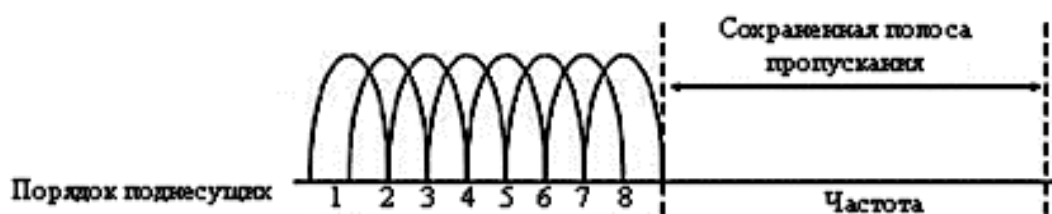


Рис. 2. Группировка поднесущих при OFDM-модуляции сигнала

В этом случае происходит ограничение возможности выбора отдельных поднесущих на приёмной стороне при определении плотности группировки поднесущих за счёт их взаимной ортогональности, поэтому при формировании OFDM-сигнала должен осуществляться определённый разнос поднесущих по частотам. С другой стороны, стоит отметить преимущество наиболее плотного размещения подканалов, поскольку при этом соразмерно увеличивается эффективность использования частотного спектра. Картина организации порядка размещения подканалов представлена на рис. 3.

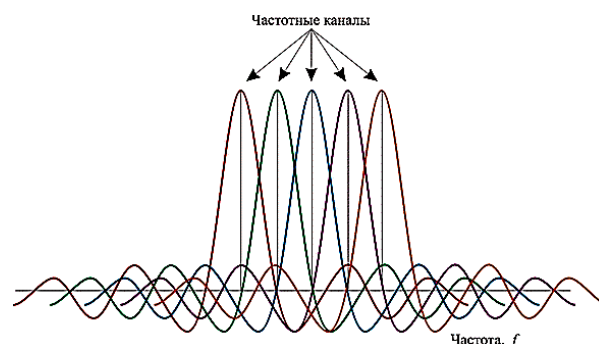


Рис. 3. Пример относительного размещения частотных подканалов при OFDM-модуляции

Однако при подобной компоновке подканалов становится возможной проблема межсимвольных искажений, которую можно ре-

шить путём обеспечения ортогональности — для этого частоты поднесущих должны отстоять друг от друга на величину скорости манипуляции. Для получения ряда подканалов с требуемым шагом их разноса и для обеспечения при этом условия ортогональности поднесущих на максимальной скорости манипуляции используют быстрое преобразование Фурье (БПФ) [3, 11].

Организация канала связи с OFDM-модуляцией начинается с разделения исходного канала на поднесущие по времени и частоте.

В результате этой операции образуется радиочастотный канал, который представляет собой набор спектров, близко расположенных друг к другу, и смежных коротких временных отрезков. Графическое представление разделения канала на поднесущие показано на рис. 4.

На следующем этапе обработки OFDM-модуляцией созданный канал беспроводной связи подвергается введению поднесущих в частотно-временную область, каждой ячейке которой назначается собственная поднесущая (рис. 5).

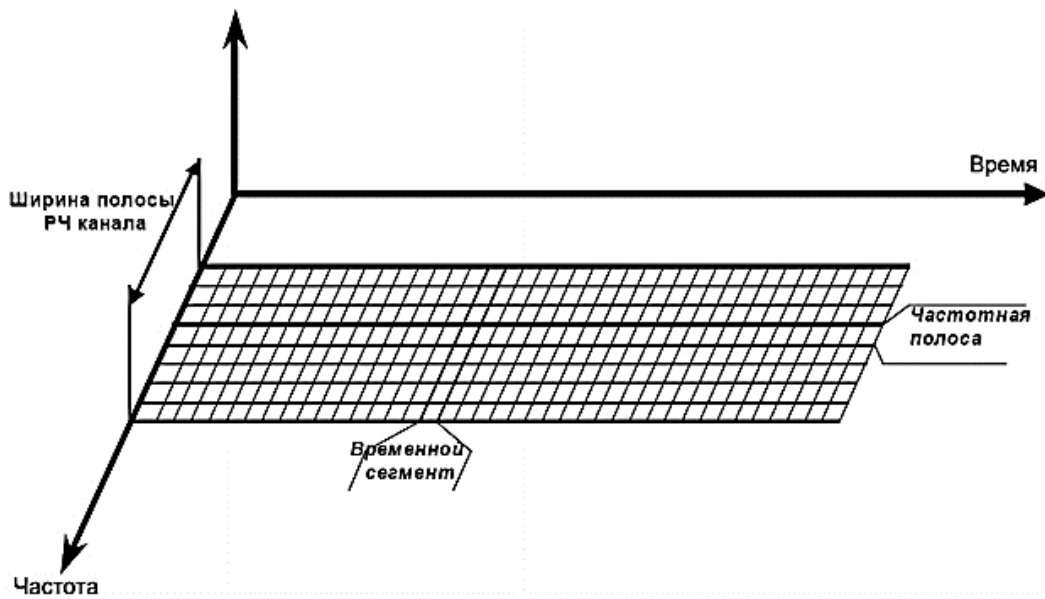


Рис. 4. Разделения широкополосного канала связи на поднесущие

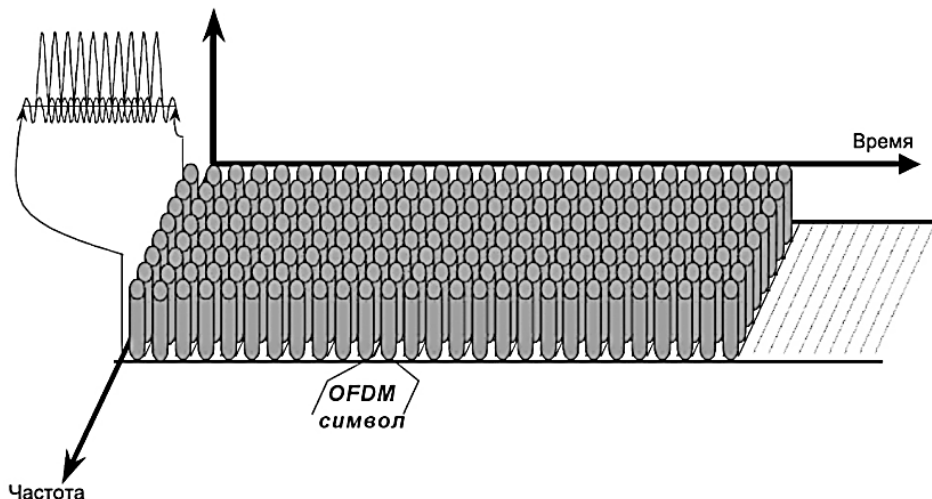


Рис. 5. Введение поднесущих частот в частотно-временную область канала связи

Термин «OFDM-символ» применим для набора поднесущих в определённом временном сегменте. При расположении символов также необходимо соблюдать условие ортого-

нальности, которое в данном случае формулируется следующим образом: временной интервал между последующими символами должен

быть равен величине, обратной длительности символа.

Плотность распределения подканалов с OFDM-модуляцией ограничена возможностью появления эхо-сигналов — копий основного сигнала с задержкой по времени. Другими словами, происходит неблагоприятное пересечение последовательных символов: в определённый момент времени происходит искажение начала символа OFDM-сигнала из-за наложения на этот участок поднесущей окончания предыдущего символа. Для устранения этой особенности организуется дополнительное разделение последовательно идущих сим-

волов путём введения во временную область широкополосного канала связи защитных интервалов. Иными словами, происходит умышленная задержка сигнала по времени. Порядок введения защитных интервалов показан на рис. 6.

Затем, чтобы демодулировать сигнал, принимающие устройства должны производить его выборку в течение полезной продолжительности символа OFDM. Этот этап называется синхронизацией каналов. Для этой цели в определённые положения частотно-временной сетки помещают маркеры синхронизации, как показано на рис. 7.

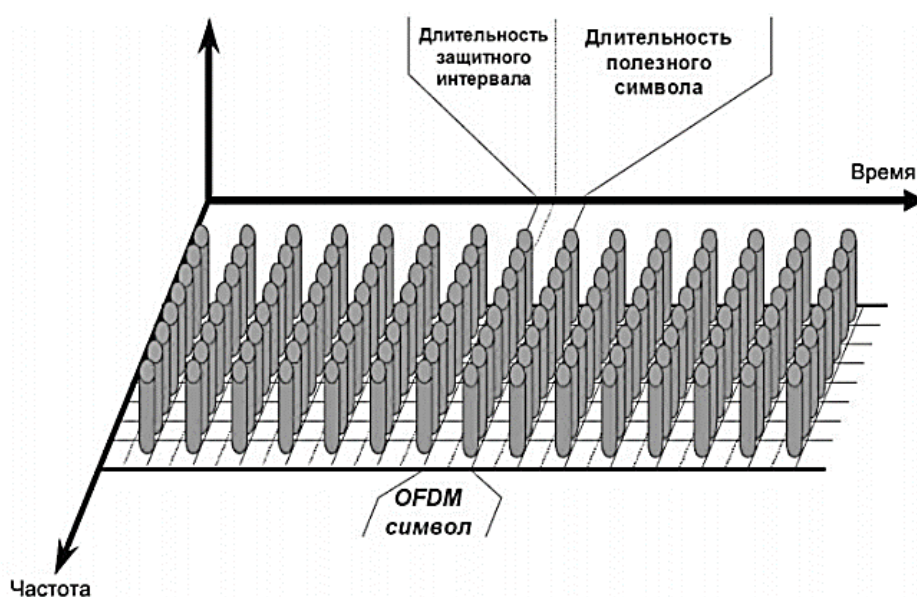


Рис. 6. Порядок введения защитного интервала в беспроводной канал связи

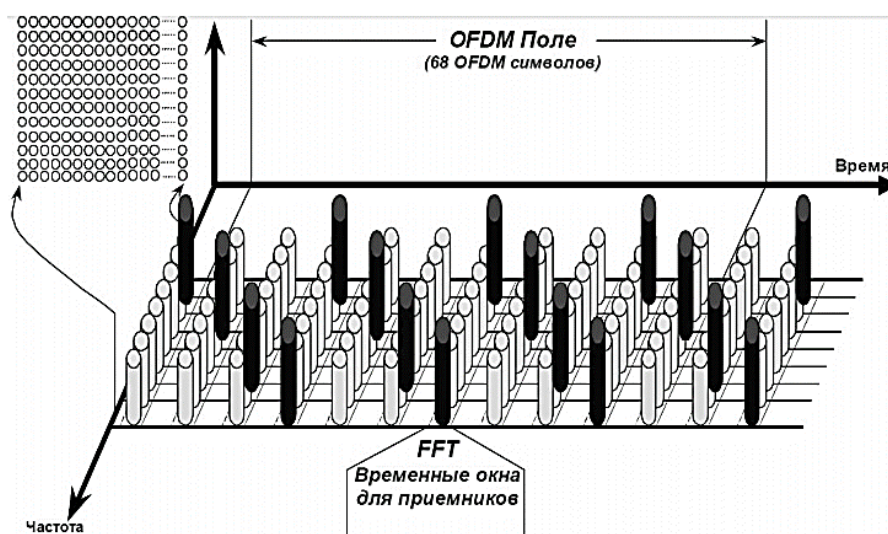


Рис. 7. Ввод маркеров синхронизации

Указанные этапы модулирования определяют ряд основных параметров OFDM-модуляции. У данной схемы обработки сигнала есть как достоинства, так и недостатки. Операция ввода защитного интервала снижает скорость передачи данных, а наличие маркеров синхронизации усложняет алгоритм демодуляции сигнала. В то же время данные этапы обработки сигнала обеспечивают возможность передавать данные без потерь и искажений.

### **Характеристика пик-фактора широкополосного канала с OFDM-модуляцией и его влияние на помехоустойчивость системы связи**

Несмотря на преимущества OFDM-модуляции, данный метод не лишён недостатков. Камнем преткновения такого метода обработки сигнала является пик-фактор — величина отношения пиковой мгновенной мощности сигнала к его средней мощности

$$PAPR = \frac{P_{max}}{P_{av}}$$

Пиковая мощность при этом определяется выражением

$$P_{max} = \max(x[i])_{i=1...N},$$

где  $i$  — значение текущего отчёта,

$N$  — длина сигнала [4].

Значение пик-фактора увеличивается вследствие повышений детализации модулированного сигнала посредством увеличения количества поднесущих, вводимых в широкополосный канал связи. Стоит отметить, что при заполнении канала определённым количеством поднесущих, пик-фактор такого сигнала по своему значению стремится принять вид белого шума [5].

При более детальном рассмотрении данной проблемы выясняется, что при передаче некоторых символов по беспроводному каналу связи с OFDM-модуляцией фазы поднесущих в некоторые моменты времени складываются таким образом, что их взаимное усиление друг друга порождает кратковременный пик излучаемой мощности, вызывающий помехи в канале связи. Существуют меры аппаратного снижения пик-фактора сигнала. В частности, можно использовать усилители мощности с широким линейным динамическим диапазоном. Пик-фактор имеет особое значение при рассмотрении высокочастотных сигналов ра-

диосвязи. Высокочастотное появление всплесков мощности влечёт за собой клиппирование сигнала, появление в его структуре внутриполосного и внеполосного искажения. Также в таких условиях сигнал может испытывать искажения нелинейные, особенно опасные при передаче данных, так как после такого искажения сигнал на приёмной стороне иногда не поддаётся демодуляции, а значит, пакет данных, передаваемый этим сигналом, становится утерянным [6, 12].

Значительный пик-фактор сигнала негативно сказывается на конструкционной, технологической и экономической составляющих изделия, так как решение этой проблемы требует введения в схему дополнительных узлов обработки сигнала и использования дорогостоящих компонентов, которые закладываются в конструкцию приёмно-передающих устройств [7, 8].

### **Методы снижения пик-фактора в широкополосных каналах связи с OFDM-модуляцией, основанные на амплитудном ограничении сигнала**

В виду того, что OFDM-модуляция является полезной технологией в области радиосвязи, было разработано и запатентовано множество решений, позволяющих устранить недостатки такой передачи данных, в частности, были разработаны способы снижения пик-фактора модулированного сигнала. К таким средствам модификации канала связи относятся способы, основанные на ограничении амплитуды сигнала, реализованные, например, посредством применения оконных функций. С точки зрения оптимизации широкополосного канала связи амплитудное ограничение сигнала имеет ряд достоинств. Посредством такой обработки сигнала возможно уменьшить его динамический диапазон, повысить среднюю глубину модуляции, а также увеличить среднюю мощность передаваемых сигналов за счёт того, что максимальное значение мощности будет соответствовать не пиковому значению всплесков мощности, а усреднённому по поднесущим значению. Процедуру ограничения амплитуды принято называть клиппированием сигнала. По роду возникновения клиппирование может быть умышленным, которое целенаправленно закладывается в организацию канала связи для его оптимизации, и естественным, которое вызвано внешними факторами при недоработке помехоустойчивости канала связи.

Простейшим способом ограничения амплитуды сигнала является метод жесткого ограничения, который предполагает ограничение пиков амплитуды сигнала на заданном уровне. Применение жесткого клиппирования означает, что сигнал не может быть восстановлен в исходное состояние, при этом информация, переносимая на участках отсечки амплитуды сигнала, также теряется навсегда. В момент обрезания пика амплитуды часть энергии распространяется за пределы канала связи. Иными словами, происходит резкое увеличение внеполосного излучения, что является главным недостатком данного метода. Использование метода жёсткого ограничения позволяет снизить пик-фактор почти вдвое, но при этом уровень внеполосного излучения увеличивается примерно на 50 %. Чтобы уменьшить пик-фактор сигнала с наименьшим увеличением внеполосного излучения, следует использовать оконные функции и сводить длину окна к минимуму, так как от этого параметра зависит величина вносимых внеполосных искажений [7].

Информация, которая была заложена в отброшенную при мягком клиппировании часть сигнала, не теряется полностью ввиду предварительного сжатия этой информации. В процессе организации клиппирования широкополосного сигнала можно прибегнуть к сжатию динамического диапазона (рис. 8), что возможно осуществить с помощью цифрового или аналогового компадирования.

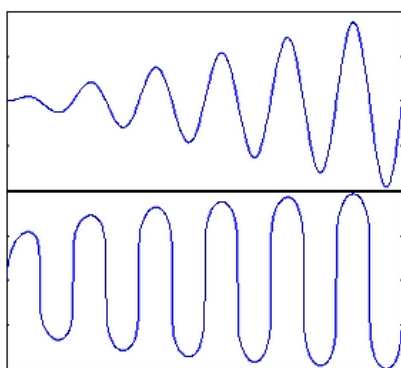


Рис. 8. Форма сигнала до и после процедуры сжатия

Для сжатия сигнала можно использовать устройства с логарифмической характеристикой сжатия (рис. 9). При этом выбор характеристики сжатия определяет уровень амплитуды сигнала: для сигналов малой амплитуды следует использовать характеристику сжатия с более крутым фронтом, чем для сигналов большей амплитуды.

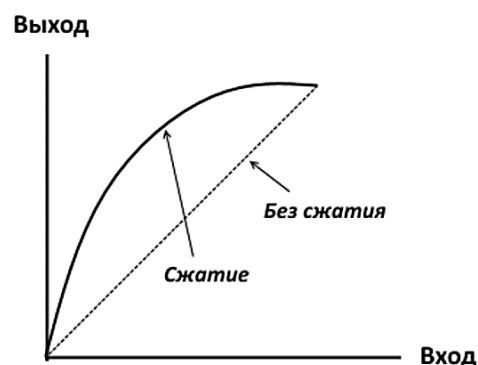


Рис. 9. Характеристика сжатия сигнала широкополосной системы связи

Кроме того, подход к сжатию сигнала зависит от принципа работы схемы передатчика. Нелинейные кодеки, которые часто используются в системах передачи цифровых данных, осложняют реализацию таких схем, поэтому в их случае следует заменить плавную характеристику сжатия на сегментную характеристику, которая представляет собой кусочно-дробную аппроксимацию плавной характеристики сжатия.

#### **Особенности применения частичной последовательности передачи для снижения пик-фактора в системах беспроводной связи с OFDM-модуляцией**

Методы амплитудного ограничения сигнала относятся к группе искажающих способов формирования широкополосного канала связи с OFDM-модуляцией. Помимо них существуют также неискажающие методы, в совокупность которых относится также частичная последовательность передачи PTS (Partial Transmit Sequence). PTS можно отнести к числу самых эффективных методов уменьшения значений пик-фактора при формировании беспроводного канала связи с OFDM-модуляцией. Этот метод заключается в уменьшении пик-фактора за счет уменьшения вероятности появления модулированных поднесущих с одинаковой фазой. В отличие от методов амплитудного ограничения, PTS не подвергает передаваемые сигналы внутриполосным и внеполосным искажениям. Однако, данный метод также не лишён недостатков, которым является сложность реализации классической схемы PTS из-за использования значительного количества блоков обратного дискретного преобразования Фурье (ОДПФ) с целью определения оптимальных фазовых последовательностей. Также имеет место экспо-

ненциальное увеличение потребляемых аппаратных ресурсов по мере увеличения размера используемого блока ОДПФ.

OFDM-модуляция формирует канал связи с  $N$  близко расположенных друг к другу ортогональных поднесущих  $X = [X_0, X_1, \dots, X_{N-1}]^T$ , где  $(\cdot)^T$  обозначают операцию транспонирования матрицы или вектора. OFDM-сигналы получают с использованием ОДП [3, 13]:

$$x_n = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{k=0}^{N-1} X_k e^{j2\pi kn/N}.$$

Пик-фактор OFDM-сигнала можно выразить как:

$$PARP(x(n)) = \frac{\max\{|x_n|^2\}}{E\{|x_n|^2\}},$$

где  $\max\{|x_n|^2\}$  и  $E\{|x_n|^2\}$  — максимальная и средняя мощности OFDM-сигнала, соответственно;

$|x_n|$  — амплитуда сигнала.

При методе PTS происходит разделение входного пакета данных  $X$  на непересекающиеся  $M$  совокупностей, представленных  $\{X^{(m)}, m = \overline{0, M-1}\}$ ,  $X = \sum_{m=0}^{M-1} X^{(m)}$ . Каждый подблок состоит из  $N$  элементов. При этом некоторые из которых имеют ненулевую величину, а остальные равны нулю. Внутри каждого подблока проводится умножение поднесущей на соответствующую ей фазовую последовательность  $b_m = e^{j\varphi_m}$ , чтобы минимизировать пик-фактор объединенного сигнала во временной области. Схема описываемого блока представлена на рис. 10. Подблоки  $X^{(m)}$  преобразуются в  $M$  временных частичных последовательностей передачи  $\{X^{(m)}, m = \overline{0, M-1}\}$ . Временной комбинированный сигнал можно описать формулой

$$\bar{x}_n = \sum_{m=0}^{M-1} b_m IFFT(X^{(m)}) = \sum_{m=0}^{M-1} b_m x^{(m)}.$$

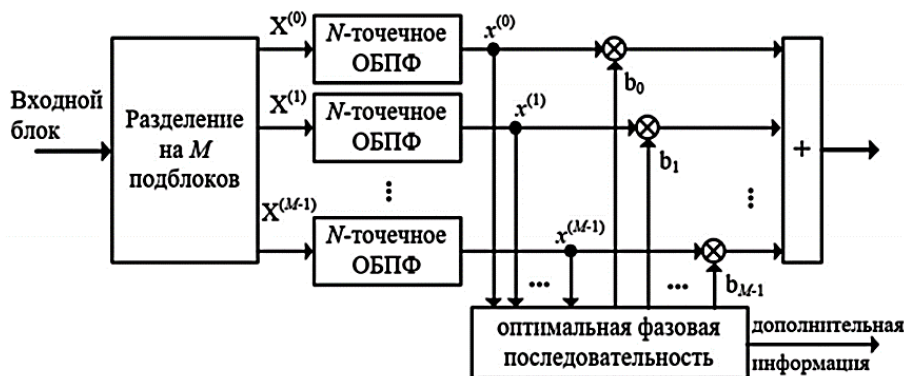


Рис. 10. Блок-схема способа PTS

На этапе разделения входного блока на подблоки можно выделить три основных метода [9]: смежное деление, чередующееся деление и псевдослучайное деление. Стоит отметить, что схема PTS, использующая чередующееся деление, имеет наименьшую вычислительную сложность.

Суть метода частичной последовательной передачи заключается в нахождении такой последовательности фаз, которая позволила бы получить при OFDM-модуляции временной сигнал с наименьшим пик-фактором. При  $V$  возможных значений  $m$ -й фазы существуют  $V^M$  фазовых последовательностей. При бинарных последовательностях  $V = 2$  ( $b_m = 1$  или  $b_m = -1$ ). При  $b_m = 1$  снижение пик-фактора невозможно наблюдать с помощью метода PTS.

Следовательно, для достижения оптимальной последовательности необходимо использовать последовательности фаз  $V^{M-1}$ . Стоит отметить, что при увеличении количества используемых подблоков экспоненциально возрастает и количество операций, необходимых при поиске оптимальной последовательности. Для метода частичной последовательности передачи сложность реализации поиска оптимальной фазовой последовательности является явной проблемой, для решения которой было разработано множество методов. Субоптимальный метод предполагает использование двоичных последовательностей для снижения вычислительной сложности с минимальным количеством тестов для достижения оптимального порядка фаз [10].

### Заключение

В данной статье был подробно рассмотрен принцип работы OFDM-модуляции, достоинства, недостатки, области применения и технология данного вида обработки сигналов. Было обозначено, что при OFDM-модуляции входной сигнал разбивается на совокупность поднесущих, которые помещаются в сегменты частотно-временной сетки. Технология организации беспроводного канала связи с OFDM-модуляцией также предполагает введение в структуру сигнала таких вспомогательных аспектов, как защитный интервал и маркеры синхронизации. Было рассмотрено положительное и негативное влияние этих дополнений на эффективность работы OFDM-системы.

Также в статье был рассмотрен такой параметр как пик-фактор, который выступает в качестве основной характеристики и главного недостатка передачи данных по OFDM-модулированному каналу связи. Было выявлено, что пик-фактор есть отношение значения мгновенной пиковой мощности к средней мощности поднесущих канала и что на высоких частотах всплесков мощности пик-фактор стремится к созданию помех уровня белого шума. Пик-фактор является причиной усложнения конструкции и увеличения стоимости приёмно-передающей системы связи, поэтому именно снижением этого показателя достигаются лучшие результаты эффективности передачи данных по каналу OFDM.

Кроме того, в данной статье приведён анализ искажающих и неискажающих методов снижения пик-фактора широкополосного канала связи с OFDM-модуляцией, по результатам которого были сделаны следующие выводы:

1. Методы амплитудного ограничения не предоставляют высокой надёжности передачи данных, так как какая-то часть информации может быть безвозвратно потеряна в случае использования системы с жёстким ограничением. Кроме того, при такой обработке сигналов возможны искажения, вызванные внутриполосными и внеполосными излучениями, из-за чего на приёмной стороне возможно получение неполного или искажённого пакета данных. Методы амплитудного ограничения не рекомендуется применять при проектировании специальных систем связи с OFDM-модуляцией, к которым предъявляются особые требования к эффективности передачи данных.

2. Неискажающий метод частичной последовательности передачи имеет больший потенциал в плане эффективной передачи данных и

помехоустойчивости, однако сложность реализации таких систем на порядок выше в виду того, что сложность определения оптимальной последовательности передачи поднесущих возрастает по экспоненте с увеличением количества блоков ОДПФ, что в свою очередь негативно отражается в плане потребности в вычислительной мощности. Кроме того, аппаратная составляющая таких систем также усложнена количеством блоков ОДПФ, которое также возрастает экспоненциально в зависимости от сложности задачи поиска оптимальной последовательности. Это существенно отражается и на сложности конструкции приёмно-передающих устройств, и на их себестоимости. Поэтому метод PTS целесообразно применять только при проектировании высоконадёжных и специальных систем связи с OFDM-модуляцией.

### Литература

1. Шахнович И.В. Современные технологии беспроводной связи. Москва: Техносфера, 2006. 288 с.
2. Ian Poole. OFDM Orthogonal Frequency Division Multiplexing Tutorial. 2009. 230 p.
3. Разработка модели физического уровня OFDM модема // Omoled. Коллаборация в области образования / И.Г. Минаев. 2 марта 2011. URL: <http://omoled.ru/publications/view/2> (дата обращения: 20.02.2024).
4. Yang, Multicarrier Communications. John Wiley & Sons Ltd., 2009. 581 с.
5. Li Y., Stuber G. Orthogonal frequency division multiplexing for wireless communications. Springer. 2006. 306 p.
6. Коржихин Е.О., Власюк И.В. Методы снижения пик-фактора в системах наземного цифрового телевизионного вещания стандарта DVB-T2. T-Comm — Системы подвижной связи и цифрового телерадиовещания. Выпуск по итогам 6-й отраслевой научной конференции МТУСИ «Технологии информационного общества», М.: «ИД Медиа Паблишер». 2012. № 9. С. 83-86.
7. Prasad R., OFDM for wireless communication systems. Artech House, 2004. 289 с.
8. Hanzo L., OFDM and MC-CDMA a primer. John Wiley & Sons, 2006. 411 p.
9. Muller S.H., Huber J.B. OFDM with reduced peak-to-average power ratio by optimum combination of partial transmit sequences // IEE Electronics Letters. Feb. 1997. Vol. 33. No. 5. PP. 36-69.
10. Cimini L.J., Sollenberger N.R. Peak-to-average power ratio reduction of an OFDM signal using partial transmit sequences // IEEE Commun. Letters. Mar. 2000. Vol. 4. No. 3. PP. 86-88.
11. Пилотная оценка канала радиосвязи в MIMO-OFDM системах / О.Н. Чирков, М.А. Ромащенко, И.С. Бобылкин [и др.] // Труды международного симпозиума «Надёжность и качество». 2019. Т. 2. С. 87-90.
12. Чирков О.Н., Ромащенко М.А., Чепелев М.Ю. Современные методы оценки канала радиосвязи в условиях многолучевости // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2019. Т. 15. № 3. С. 68-73.
13. Чирков О.Н. Прямое формирование OFDM сигналов // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2012. Т. 8. № 5. С. 54-56.

## 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: 0000-0003-2250-2100

**Кушев Евгений Алексеевич** – студент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: Kuschew1911@gmail.com

## IMPROVING NOISE IMMUNITY IN WIRELESS COMMUNICATION SYSTEMS WITH OFDM MODULATION BY REDUCING THE PEAK FACTOR OF THE SIGNAL

O.N. Chirkov, E.A. Kushchev

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

**Abstract:** this article describes the technology OFDM signal modulation in broadband communication systems, identifies the features of the organization of the OFDM channel, the advantages and disadvantages of this type of signal processing, as well as its scope. The peak factor of the signal is described as the main characteristic of the OFDM communication channel and the main problem in the development of a communication system with this type of modulation. Here, the question of the influence of the peak factor of the signal on both the efficiency of data transmission in a wireless communication system and the complexity and cost of the design of receiving and transmitting devices is raised. After the designation of the peak factor problem of the signal, the article considers the question of effective methods of reducing the peak factor applicable to the OFDM channel. The analysis of distorting and non-distorting methods of peak factor reduction is carried out and at the end a comparative characteristic of the presented methods is given in terms of data transmission efficiency, noise immunity of the OFDM channel and the expediency of the areas of application of these methods in the design of a wireless communication system

**Key words:** OFDM modulation, peak factor, time-frequency grid, fast Fourier transform, inverse discrete Fourier transform, clipping, companding, suboptimal method

### References

1. Shakhnovich I.V. “Modern wireless communication technologies”, (“Sovremennyye tekhnologii besprovodnoy svyazi”), Moscow, Tekhnosfera, 2006, 288 p.
2. Poole Ian “OFDM Orthogonal Frequency Division Multiplexing Tutorial”, 2009, 230 p.
3. Minaev I.G. “Development of a physical layer model of an OFDM modem”, *Omoled. Collaboration in the field of education*, March 2, 2011, available at: <http://omoled.ru/publications/view/2> (accessed 02. 20. 2024).
4. Yang L. “Multicarrier Communications”, John Wiley & Sons Ltd., 2009, 581 p.
5. Li Y., Stuber G. “Orthogonal frequency division multiplexing for wireless communications”, Springer, 2006, 306 p.
6. Korzhikhin E.O., Vlyasyuk I.V. “Methods for reducing the crest factor in terrestrial digital television broadcasting systems of the DVB-T2 standard”, *T-Comm - Mobile communication and digital television and radio broadcasting systems*. Issue based on the results of the 6th industry scientific conference of MTUSI *Technologies of the Information Society*, Moscow, ID Media Publisher, 2012, no. 9, pp. 83-86.
7. Prasad R. “OFDM for wireless communication systems”, Artech House, 2004, 289 p.
8. Hanzo L. “OFDM and MC-CDMA a primer”, John Wiley & Sons, 2006, 411 p.
9. Muller S.H., Huber J.B. “OFDM with reduced peak-to-average power ratio by optimum combination of partial transmit sequences”, *IEE Electronics Letters*, Feb. 1997, vol. 33, no. 5, pp. 36-69.
10. Cimini L.J., Sollenberger N.R. “Peak-to-average power ratio reduction of an OFDM signal using partial transmit sequences”, *IEEE Commun. Letters*, Mar. 2000, vol. 4, no. 3, pp. 86-88.
11. Chirkov O.N., Romashchenko M.A., Bobylkin I.S. et al. “Pilot evaluation of a radio communication channel in MIMO-OFDM systems”, *Proc. of the international symposium “Reliability and Quality”*, 2019, vol. 2, pp. 87-90.
12. Chirkov O.N., Romashchenko M.A., Chepelev M.Yu. “Modern methods for assessing a radio communication channel in multipath conditions”, *The Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2019, vol. 15, no. 3, pp. 68-73.
13. Chirkov O.N. “Direct generation of OFDM signals”, *The Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2012, vol. 8, no. 5, pp. 54-56.

Submitted 29.02.2024; revised 09.05.2024

### 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: 0000-0003-2250-2100

**Evgeny A. Kushchev** – Student, Voronezh State Technical University, (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: Kuschew1911@gmail.com

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ И МАГНИТНОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ БЛИЖНЕГО ПОЛЯ ПОЛОСКОВОЙ АНТЕННЫ

В.В. Глотов, А.И. Зимин

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

**Аннотация:** в области сверхвысокочастотной техники довольно часто используются полосковые антенны, как правило, изготавливаемые по технологии печатных плат или интегральных схем. Анализ уровня их излучения и влияния материала корпуса весьма важны на этапе разработки данного устройства для оценки электромагнитной совместимости. В современном мире вопрос правильной оценки электромагнитной совместимости играет значимую роль в проектировании и разработке радиоэлектронной аппаратуры. Многие разработчики для экономии временных и материальных средств стремятся на ранних этапах провести анализ своих устройств, в том числе и на электромагнитную совместимость. Мощным программным пакетом для анализа на электрическую и магнитную составляющую от излучающего источника является - Ansys HFSS. В статье представлено описание алгоритма анализа магнитной и электрической составляющей ближнего поля применительно к полосковой антенне. Так же проводится сравнение уровня излучения в корпусе из различных материалов. Были проанализированы электрическая и магнитная составляющая ближнего поля полосковой антенны. Также было проведено сравнение электрической и магнитной составляющей полосковой антенны в закрытых конструкциях – в корпусе

**Ключевые слова:** магнитное поле, электрическое поле, излучение, корпус, программное обеспечение

### Введение

Развитие компьютерных технологий и средств программного моделирования позволяет разработчику получить точное описание пространства магнитной и электрической составляющих ближнего поля. Использование программных средств в свою очередь существенно сокращают время анализа тестируемого устройства [1, 2].

На рынке существует множество программ, которые могут произвести анализ электрической и магнитной составляющей в ближней зоне. Широкое распространение в среде разработчиков радиоэлектронной аппаратуры получило программное обеспечение (ПО) - Ansys HFSS, имеющее множество пакетов решателей с обширным функционалом.

### Экспериментальное исследование

В рамках исследования была построена конструкция полосковой антенны в Ansys HFSS с рабочей частотой  $f = 5503$  МГц. Произведём расчёт длины  $W$ , ширины  $L$ , а также смещение фидера  $y_0$  антенны согласно следующим формулам:

$$W = \frac{c}{2 \cdot f} \cdot \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}} \quad (1)$$

$$L = \frac{c}{2 \cdot f} - 0.824 \cdot \frac{(\epsilon_{reff} + 0.3) \left(\frac{W}{h} + 0.264\right)}{(\epsilon_{reff} - 0.258) \left(\frac{W}{h} + 0.8\right)} \quad (2)$$

$$\epsilon_{reff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left( \frac{1}{\sqrt{1 + 12 \cdot \frac{h}{W}}} \right) \quad (3)$$

$$y_0 = \frac{L}{\pi} \cdot \arccos \left( \sqrt{\frac{Z_{фидера}}{Z_{антенны}}} \right) \quad (4)$$

$$Z_{антенны} = 90 \cdot \frac{\epsilon_r^2}{\epsilon_r - 1} \cdot \left(\frac{L}{W}\right)^2, \quad (5)$$

где  $c$  – скорость света,  $f$  – рабочая частота,  $\epsilon_r$  – диэлектрическая проницаемость диэлектрика,  $\epsilon_{reff}$  – эффективная диэлектрическая проницаемость,  $Z_{фидера}$  – импеданс фидерной линии, равен 50 Ом,  $Z_{антенны}$  – входной импеданс антенны.

Из расчётов имеем, что длина антенны будет равна  $W = 16,507$  мм, ширина  $L = 12,256$  мм, а фидер смещён на расстоянии  $y_0 = 4,532$  мм от центра в сторону одной из излучающих сторон. Антенна располагается на слое диэлектрика FR-4 толщиной  $h = 1,8$  мм, длиной  $A = 22$  мм и шириной  $B = 18$  мм. Схематичное устройство полосковой антенны приведено на рис. 1.

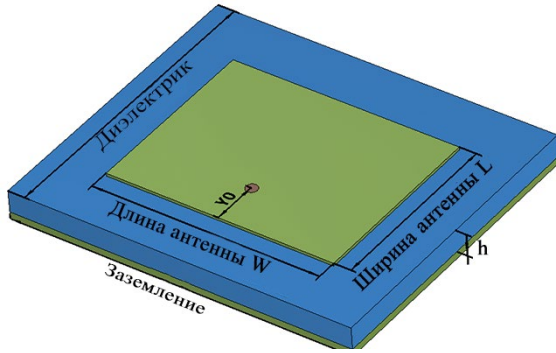


Рис. 1. Схематичное устройство полосковой антенны

Для проведения анализа на электрическую и магнитную составляющую ближнего поля полосковой антенны был разработан следующий алгоритм действий.

Откроем программу «Ansys HFSS», создаём новый проект, нажав кнопку «New» и добавим в проект пакет «HFSS Design» нажав соответствующую кнопку.

В открывшемся окне создадим диэлектрик согласно размерам. Для этого в ленте откроем вкладку «Draw», нажмём на кнопку «Draw box» и создадим параллелепипед произвольной формы. В открывшемся окне (рис. 2) задаём ему значения начальной точки и размеров по осям X, Y, Z: Position (-A/2, -B/2, 0), XSize (A), YSize (B), ZSize (1.8). При этом мы можем вводить размеры как цифрами, так и буквами, при втором методе ввода откроется окно назначения переменной, где мы можем ввести значение, что облегчит дальнейшую работу. Далее перейдем на вкладку «Attribute», показанной на рис. 3 в поле «Name» назначим имя FR4. После этого кликнем по полю «Material» и нажмём кнопку «edit», которая позволит изменить материал созданного объекта. В открывшемся окне выберем материал FR4\_эпоху, который соответствует материалу FR-4. Далее в поле «Transparent» зададим прозрачность 0,6.

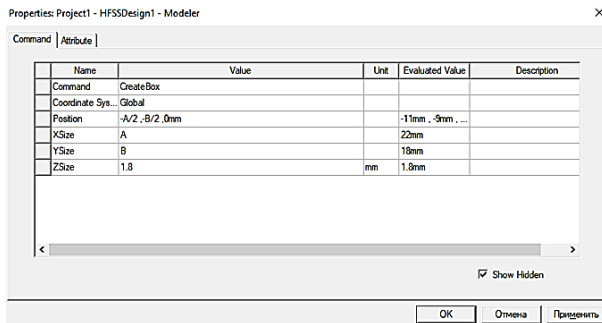


Рис. 2. Окно редактирования положения и размеров созданного параллелепипеда

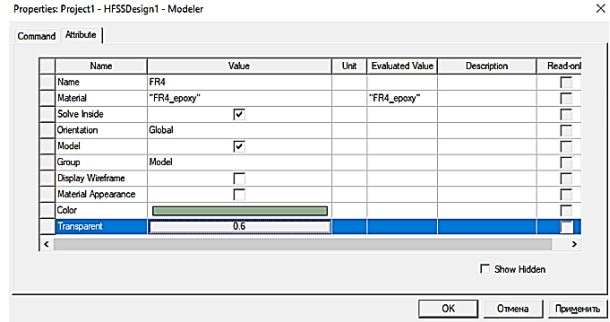


Рис. 3. Окно настройки диэлектрика

Далее создадим плоскость заземления. Для этого нам необходимо нажать клавишу F, что позволит нам выделять грани объекта. Нажимаем левой кнопкой мыши на верхнюю грань параллелепипеда, далее нажмем клавишу B, что позволит выделить грань, располагающуюся ниже. Далее на вкладке «Draw» выберем функцию «Surface», в ней «Create Object From Face». Данная функция превратит выделенную на нашем диэлектрике грань в отдельный объект. После этого мы в дереве объектов выделим созданную грань (подсвечена серым), двойным кликом откроем окно свойств и назначим в поле «Name» имя GND, а также в поле «Color» зададим оранжевый цвет. Далее выделим эту грань в дереве, и правой кнопкой мыши нажмем на нее. Выберем «Assign Boundary», далее «Perfect E». В открывшемся окне зададим имя GND и отметим галочкой параметр «Infinite Ground Plane». Выполненные действия зададут данной грани свойства идеального проводника. Если все сделано верно, в дереве проекта на вкладке «Boundaries» появится созданная нами плоскость заземления.

Далее создадим коаксиальный кабель. Для этого выделим плоскость заземления через дерево объектов, и на вкладке «Draw» нажмем на кнопку «Draw circle» и создадим произвольную окружность. В открывшемся окне зададим ей следующие параметры: Center position (0, y0(-4.532), 0), Radius (1.6) и на вкладке «Attribute» в поле «Name» присвоим ей имя Cutout.

Далее, зажав клавишу Ctrl, выделим области GND и Cutout в дереве объектов и выполним булево вычитание, нажав кнопку «Subtract» в панели «Draw». В открывшемся окне слева должен находиться объект, из которого будет вычтен объект в окне справа (параметр «Clone tool objects before operation» должен быть отключен, иначе вычтенный объект клонируется и останется на месте). Результат показан на рис. 4.

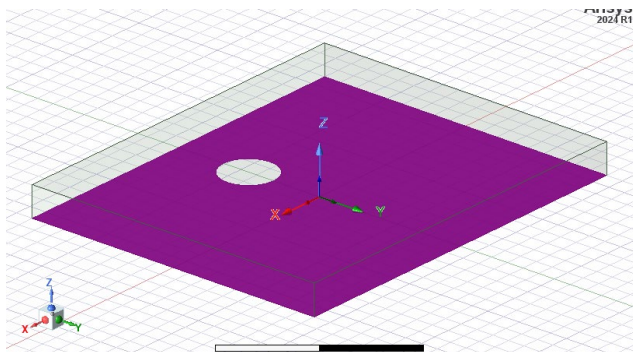


Рис. 4. Визуальный вид модели после вычитания объектов

Далее создаем коаксиальный кабель. Для этого в панели «Draw» нажимаем на кнопку «Draw cylinder» и создаём цилиндр произвольной формы. В открывшемся окне задаем параметры: Center position (0, y0, 0) Radius (1.6) Height (-5). Далее на вкладке «Attribute» в поле «Name» присвоим имя Coax, а в поле «material» зададим материал polyethylene, в поле «Color» зададим серый цвет и в поле «Transparent» зададим прозрачность 0,5.

Далее создадим проводник нашего кабеля. Для этого создадим произвольный цилиндр, в открывшемся окне установим следующие параметры: Center position (0, y0, 0), Radius(0.7), Height(-5). Далее на вкладке «Attribute» в поле «Name» присвоим имя CoaxPin а в поле «material» зададим материал pec, обладающий свойствами идеального проводника, в поле «Color» зададим красный цвет и в поле «Transparent» зададим прозрачность 0.

Далее выделим в дереве объектов Coax и снова создадим цилиндр с параметрами: Center position (0, y0, 0), Radius (0.7), Height (1.8). Далее на вкладке «Attribute» в поле «Name» присвоим имя Probe а в поле «material» зададим материал pec, в поле Color зададим красный цвет и в поле transparent зададим прозрачность 0. В результате модель примет вид, показанный на рис. 5.

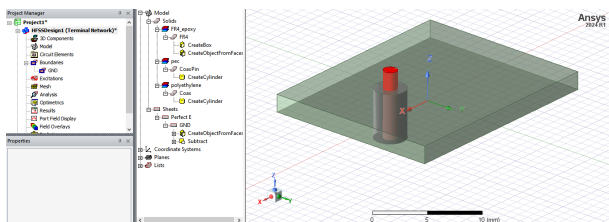


Рис. 5. Визуальный вид модели после создания коаксиального кабеля

Далее создаем саму поверхность антенны. Для этого выберем верхнюю грань нашего

диэлектрика и в панели «Draw» нажмем на кнопку «Draw rectangle» и создадим прямоугольник произвольной формы. В открывшемся окне зададим следующие параметры: Position (-W/2, -L/2, 1.8), XSize (W), YSize (L). Далее перейдем на вкладку «Attribute», в поле «Name» назначим имя Patch, в поле «Color» зададим оранжевый цвет, в поле «Transparent» зададим прозрачность 0,6. В завершении придадим созданной плоскости свойство идеального проводника также, как и с плоскостью заземления.

Следующим шагом мы назначим порт нашего коаксиального кабеля. Для этого выделяем нижнюю грань кабеля, жмем правой кнопкой мыши и выбираем «Assign Excitation», далее «Port», «Terminal Wave Port». В открывшемся окне задаем имя порта в поле «Name» как Coax Port.

Если все сделано верно, модель имеет следующий вид, а в дереве проекта на вкладке Excitations появится порт Coax Port, который будет привязан к элементу Coax Pin. Результат наших действий показан на рис. 6.

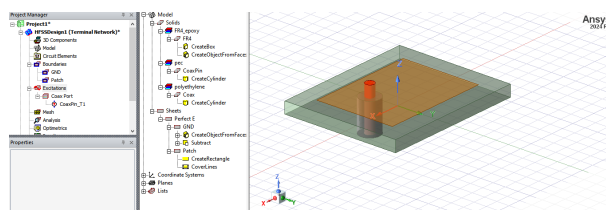


Рис. 6. Конечный вид модели полосковой антенны

Заключительным этапом создаем воздушную область, в которой данная модель будет анализироваться. Для этого в ленте откроем вкладку «Draw» нажмем на кнопку «Draw box» и создадим параллелепипед произвольной формы. В открывшемся окне зададим ему следующие параметры: Position (-125, -125, -5), XSize (250), YSize (250), ZSize (55). Далее перейдем на вкладку «Attribute», в поле «Name» назначим имя Air. После этого кликнем по полю «material» и нажмем кнопку «edit». В открывшемся окне выберем материал air, обладающий свойствами воздуха. Далее в поле «Display Wireframe» поставим галочку, что оставит от данного параллелепипеда только каркас.

Далее зададим границы, в которых будет производиться расчет излучения. Для этого на панели «Draw» нажмем кнопку «Select by name», что позволит выбрать конкретные грани у объекта. В открывшемся окне нажмем на поле Air и выделим все грани, кроме нижней, как показано на рис. 7.

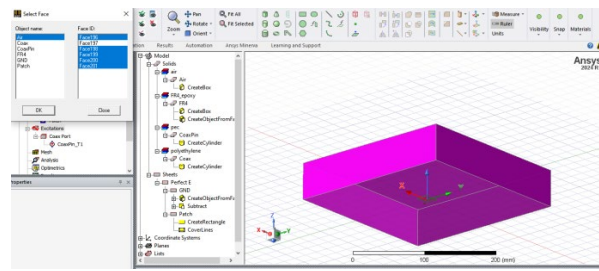


Рис. 7. Выбор границ анализа излучения

Нажимаем правой кнопкой мыши по выделенному объекту и выбираем «Assign Boundary», далее «Radiation». Данная функция определяет границы анализа излучения. Далее в дереве проекта нажимаем правой кнопкой на вкладку «Radiation» и выбираем «Insert Far Field Setup», «Infinite Sphere», что откроет окно параметров для анализа в ближнем поле, представленное на рис. 8.

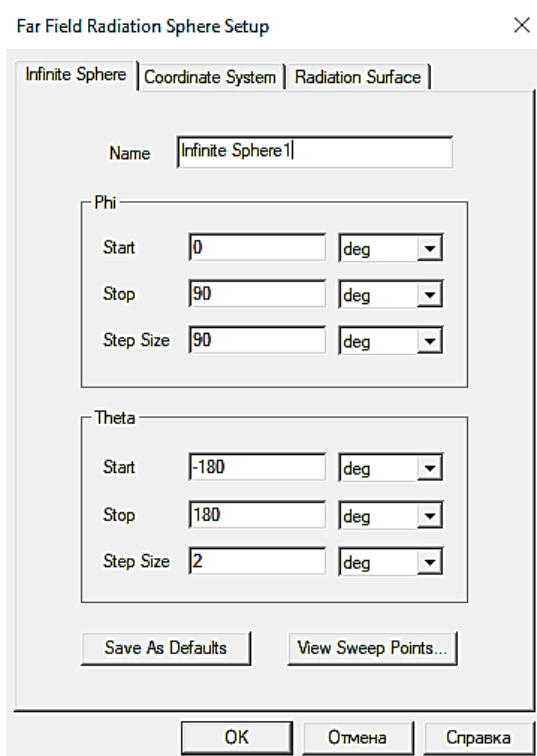


Рис. 8. Окно настройки границ анализа

Зададим условия анализа. Для этого в дереве проекта нажмем правой кнопкой на «Analysis», далее «Add solution setup», «Advanced» зададим параметры как на рис. 8. В следующих окнах зададим параметры как на рис. 9 и рис. 10.

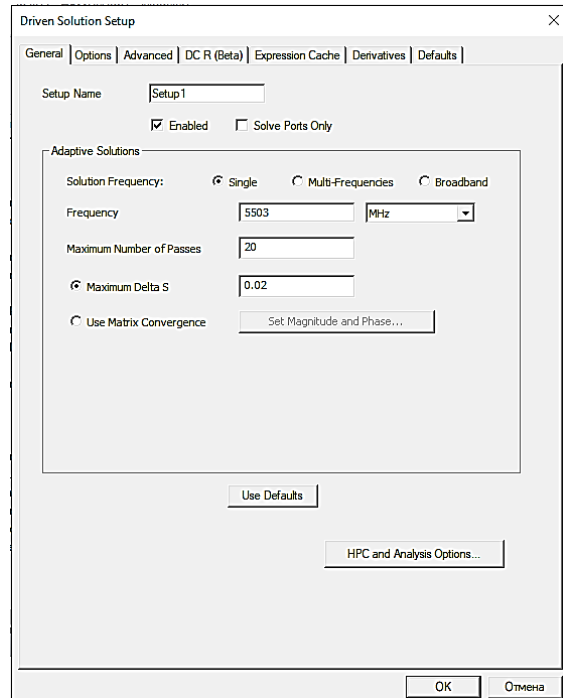


Рис. 9. Окно условий анализа

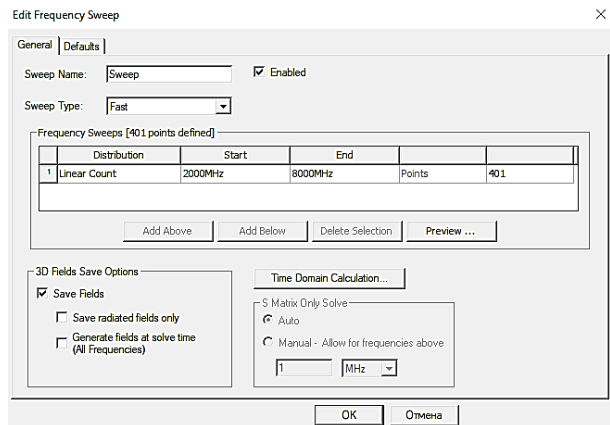


Рис. 10. Окно частотных условий анализа

Далее перейдем на панель «Simulation» и проверим верность заданных параметров анализа и отсутствие ошибок в модели нажав кнопку «Validate».

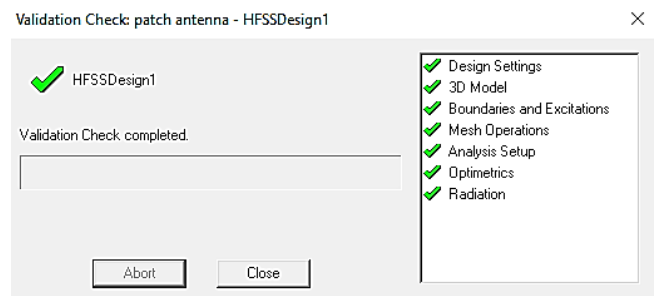


Рис. 11. Окно проверки параметров анализа и моделирования

Убедившись в отсутствии критических ошибок, как показано на рис. 11, жмем кнопку «Analyze all», после чего ожидаем окончания анализа нашей модели.

### Результаты анализов

Данное ПО позволяет проанализировать множество важных параметров устройства [3,4]. Помимо анализа магнитной и электрической составляющих ближнего поля, есть функции для оценки прочих характеристик, например, диаграммы направленности, изображенной на рис. 12. Мы можем вывести её перейдя на вкладку «Results» на ленте и выбрав «Far Fields Report» далее «Mag/Ang Polar».

В панели «Results» можно проанализировать и многие другие параметры.

Далее проанализируем распространение магнитной и электрической составляющих поля при частоте анализа 2,4 и 5,5 ГГц и сравним результаты. Для этого зададим новые условия анализа, для 2,4 ГГц проведем анализ. После всех вычислений выберем в дереве поле Air, нажмем на него правой кнопкой мыши, далее «Plot fields», «H», «MagH» для магнитной со-

ставляющей и «Plot fields», «E», «MagE». Убедимся, что в поле «Solution» установлены настройки анализа на 2,4 ГГц, проведем анализ. Наблюдаем результаты. Повторим опыт для 5,5 ГГц и сравним. Результаты представлены на рис. 13 и 14.

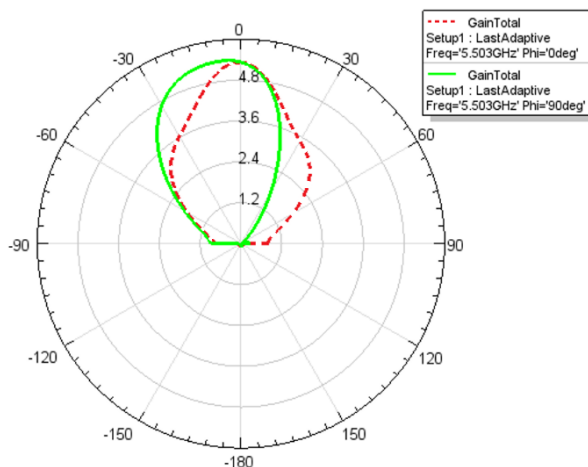
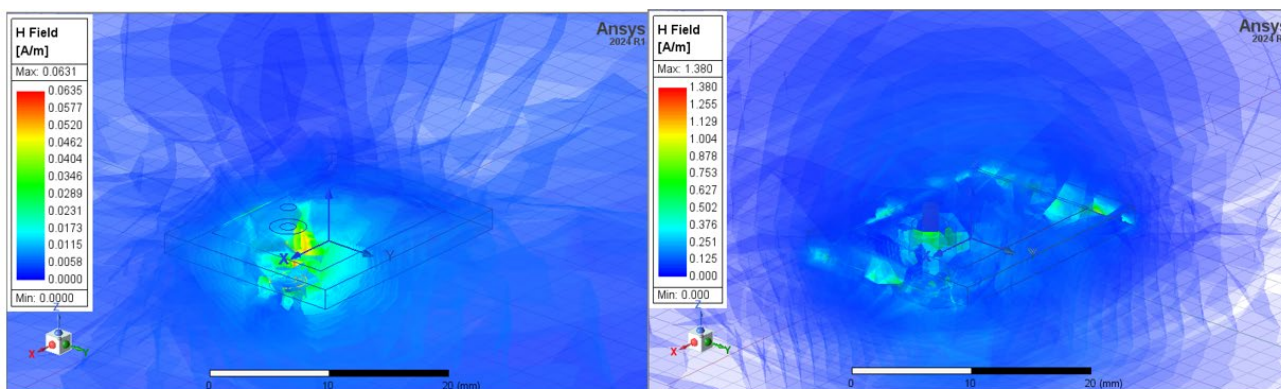


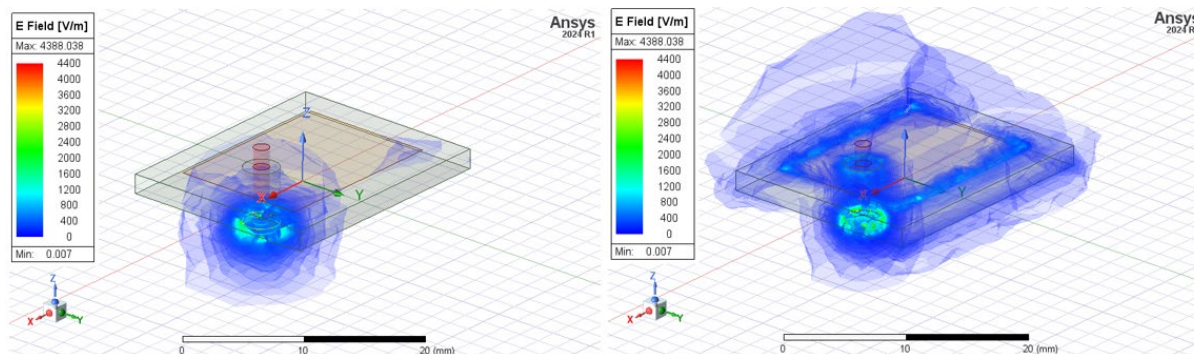
Рис. 12. Диаграмма направленности модели полосковой антенны



а)

б)

Рис. 13. Результаты анализа магнитной составляющей поля: а) при частоте 2,4 ГГц; б) при частоте 5,5 ГГц



а)

б)

Рис. 14. Результаты анализа электрической составляющей поля: а) при частоте 2,4 ГГц; б) при частоте 5,5 ГГц

Наблюдаем, что при частоте 2,4 ГГц амплитуда магнитной составляющей поля значительно ниже, нежели при частоте 5,5 ГГц: наибольшего значения поле достигает возле фидера и в первом случае равно 0,055 А/м, а во втором близко к 1 А/м. Аналогично и для электрической составляющей: наибольшее распространение наблюдается при 5,5 ГГц, однако максимальное значение амплитуды, которое концентрируется возле начала фидера в обоих случаях одинаково и равно 4400 В/м. В то же время, при 2,4 ГГц электрическая

составляющая практически не распространяется вдоль антенны.

Сравним влияние корпуса и его материала на распространение электрической составляющей.

Для этого создадим по описанной ранее методике два параллелепипеда разных размеров, и вычтем большего меньший, а далее из полученного объекта вычтем модель антенны. Проведем анализ на частоте 5,5 ГГц. Результаты показаны на рис. 15, 16, 17, 18.

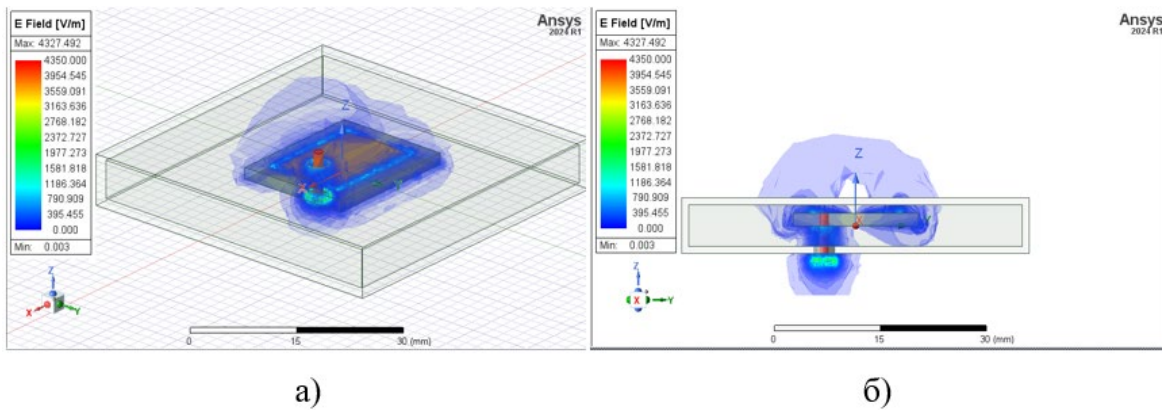


Рис. 15. Результаты анализа электрической составляющей поля при частоте 5,5 ГГц в «корпусе» из воздуха: а) изометрическая проекция; б) относительно оси X

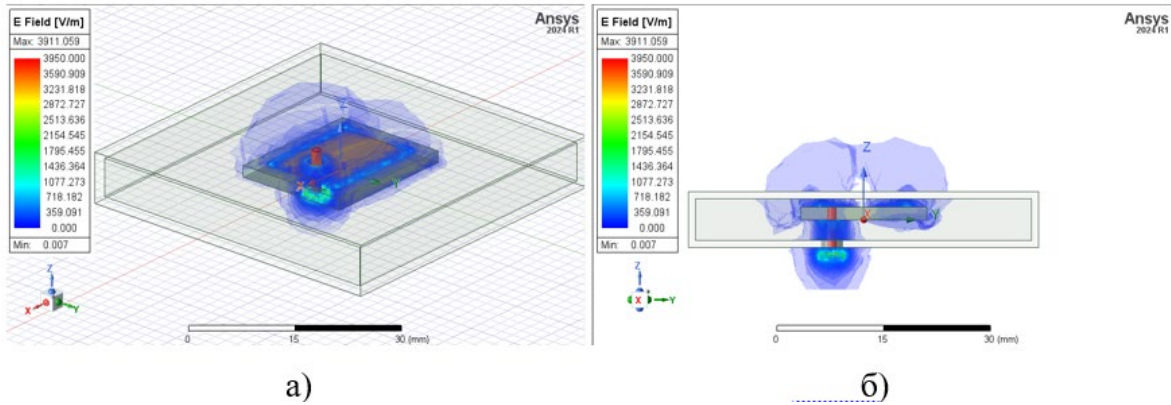


Рис. 16. Результаты анализа электрической составляющей поля при частоте 5,5 ГГц в корпусе из оргстекла: а) изометрическая проекция; б) относительно оси X

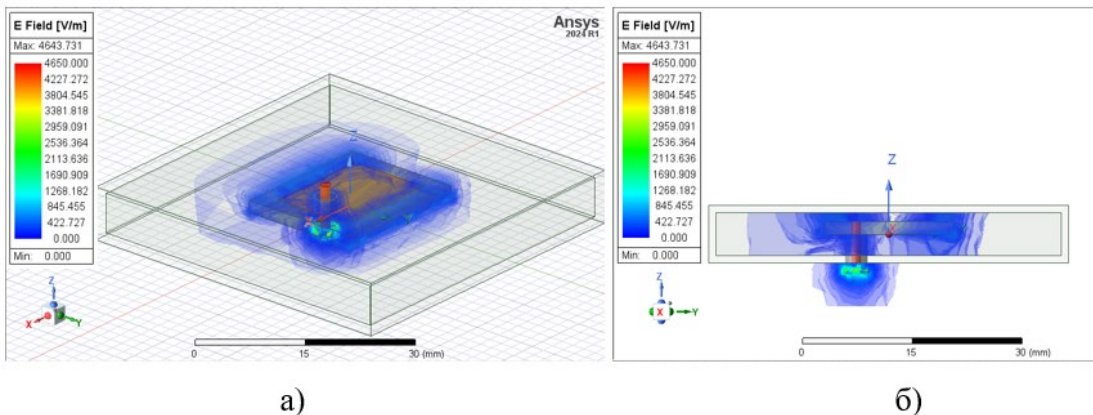


Рис. 17. Результаты анализа электрической составляющей поля при частоте 5,5 ГГц в корпусе из алюминия: а) изометрическая проекция; б) относительно оси X

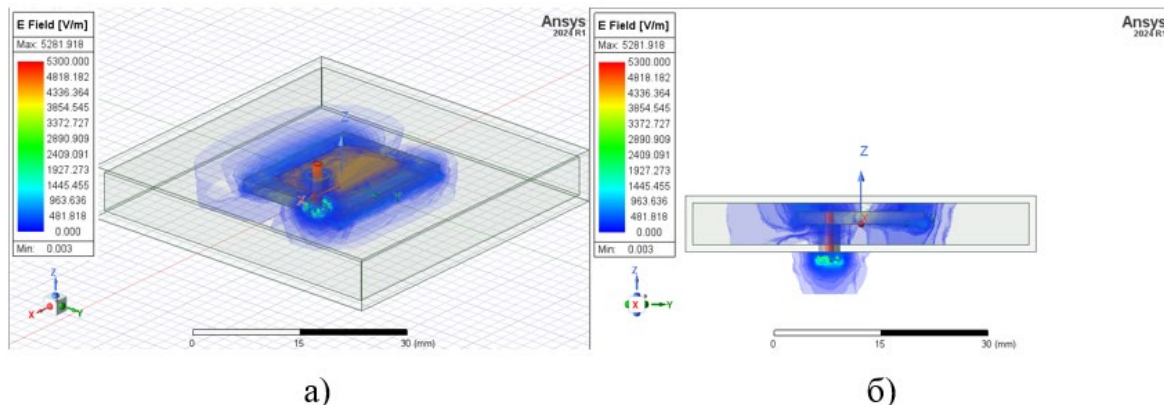


Рис. 18. Результаты анализа электрической составляющей поля при частоте 5,5 ГГц в корпусе из железа: а) изометрическая проекция; б) относительно оси X

На рис. 15 «корпус» из воздуха приведен для удобства сравнения воздействия корпуса из различных материалов на электрическую составляющую, следует считать, что корпуса нет.

В результате измерений наблюдаем, что наличие корпуса либо снижает, либо вовсе исключает распространение электрической составляющей вне корпуса [5,6]. Корпус из оргстекла слабо ограничивает распространение, однако значительно понизил максимальное значение напряженности. Корпуса из металлов же наоборот, значительно повысили напряженность поля внутри корпуса, но исключают распространение вне корпуса. Для наглядности, сведём данные в табл. 1.

Таблица 1  
Сравнение численных значений напряженности поля

Материал корпуса	Максимальная напряженность поля, В/м
«Воздух»	4327,5
Оргстекло	3911,7
Алюминий	4643,7
Железо	5281,9

### Заключение

В данной статье была разработана методика для анализа магнитной и электрической составляющей ближнего поля применительно к полосковой антенне. В ходе эксперимента установлено, что отклонение от рабочей частоты приводит к значительному ухудшению характеристик устройства, а также влияние различных материалов, из которых может быть изготовлен корпус. Так, наибольшая напряжённость в ближнем поле формировалась в корпусах из металлов, однако, при использо-

вании металлического корпуса исключается распространение поля вне стенок корпуса.

Также следует отметить, что для расчетов и анализа различных устройств в современном мире намного удобнее и выгоднее использовать специализированное ПО. Использование таких средств существенно экономит время разработчика, не требуя создавать данное устройство в физическом виде и позволяя провести все необходимые расчёты быстро и с высокой точностью.

### Литература

1. Кечиев Л.Н. Проектирование печатных плат для цифровой быстродействующей аппаратуры. М.: ООО «Група ИДТ», 2007. 616 с.
2. Макаров О.Ю., Муратов А.В., Ромащенко М.А. Методы обеспечения внутриаппаратурной электромагнитной совместимости и помехоустойчивости в конструкциях электронных средств: монография. Воронеж: ФГБОУ ВПО «Воронежский государственный технический университет», 2013. 234 с.
3. Патент на изобретение RU 2593910 С2. Антенна Вивальди с печатной линзой на единой диэлектрической подложке: № 2014128331/28; заявл. 11.07.2014; опубл. 10.08.2016 / Ашихмин А.В., Федоров С.М., Негрбов В.В., Пастернак Ю.Г., Авдюшин А.С.
4. Зеленин И.А., Рыжиков А.Г., Фёдоров С.М. Антенная решетка на основе линзы Ротмана // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2012. Т. 8. № 11. С. 102-105.
5. Исследование характеристик антенной решетки на основе линзы Ротмана и антенн с эллиптическими плечами / А.Г. Рыжиков, С.А. Слинчук, С.М. Фёдоров, В.И. Чугуевский // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2013. Т. 9. № 2. С. 49-52.
6. Ашихмин А.В., Першин П.В., Фёдоров С.М. Пеленгование с использованием модели, в которой наблюдаемое поле является суперпозицией плоской падающей волны и рассеянных сферических волн, создаваемых блестящими точками на корпусе рассеивателя // Вестник Воронежского института МВД России. 2018. № 3. С. 70-76.

Информация об авторах

**Глотов Вадим Валерьевич** – канд. техн. наук, доцент кафедры радиоэлектронных устройств и систем, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: vadik-livny@mail.ru, ORCID: 0000-0001-5129-4369

**Зимин Алексей Ильич** – студент группы РП-214, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: zlexey.03@mail.ru, ORCID: 0009-0009-6542-1918

**STUDY OF NEAR-FIELD ELECTRICAL AND MAGNETIC COMPONENTS FOR STRIPE ANTENNA**

**V.V. Glotov, A.I. Zimin**

**Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia**

**Abstract:** in the field of microwave technology, strip antennas are often used, usually manufactured using printed circuit board or integrated circuit technology. Analysis of the level of their radiation and the influence of the housing material is very important at the development stage of this device to assess electromagnetic compatibility. In the modern world, the issue of correct assessment of electromagnetic compatibility plays a significant role in the design and development of electronic equipment. To save time and money, many developers strive to analyze their devices at the early stages, including electromagnetic compatibility. A powerful software package for analyzing the electrical and magnetic components from a radiating source is Ansys HFSS. The article presents a description of the algorithm for analyzing the magnetic and electrical components of the near field in relation to a strip antenna. A comparison of the radiation level in a housing made of different materials is also carried out. The electric and magnetic components of the near field of the strip antenna were analyzed. A comparison was also made of the electrical and magnetic components of the antenna strip in closed structures - in a housing

**Key words:** magnetic field, electric field, radiation, housing, software

References

1. Kechiev L.N. “Design of printed circuit boards for digital high-speed equipment” (“Proyektirovaniye pechatnykh plat dlya tsifrovoy bystrodeystvuyushchey apparatury”), Moscow, OOO Grupa IDT, 2007, 616 p.
2. Makarov O.Yu., Muratov A.V., Romashchenko M.A. “Methods for ensuring intra-hardware electromagnetic compatibility and noise immunity in electronic design: monograph” (“Metody obespecheniya vnutriapparaturnoy elektromagnitnoy sovmestimosti i pomekhoustoychivosti v konstruktsiyakh elektronnykh sredstv: monografiya”), Voronezh, FGBOU VPO Voronezhskiy gosudarstvennyy tekhnicheskoy universitet, 2013, 234 p.
3. Ashikhmin A.V., Fedorov S.M., Negrobov V.V., Pasternak Yu.G., Avdyushin A.S “Vivaldi antenna with a printed lens on a single dielectric substrate” (“Antenna Vival'di s pechatnoy linzoy na yedinoy dielektricheskoy podlozhke”), Patent of RF RU 2593910 C2., no. 2014128331/28, appl. 07.11.2014, publ. 08.10.2016.
4. Zelenin I.A., Ryzhikov A.G., Fedorov S.M. “Antenna array based on Rothman lens”, *The Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2012, vol. 8, no. 11, pp. 102-105.
5. Ryzhikov A.G., Slinchuk S.A., Fedorov S.M., Chuguevsky V.I. “Study of the characteristics of an antenna array based on a Rotman lens and antennas with elliptical arms”, *The Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2013, vol. 9, no. 2, pp. 49-52.
6. Ashikhmin A.V., Pershin P.V., Fedorov S.M. “Direction finding using a model in which the observed field is a superposition of a plane incident wave and scattered spherical waves created by shiny points on the diffuser body”, *The Bulletin of Voronezh Institute of the Ministry of Internal Affairs of Russia (Vestnik Voronezhskogo instituta MVD Rossii)*, 2018, no. 3, pp. 70-76.

Submitted 29.03.2024; revised 13.05.2024

Information about the authors

**Vadim V. Glotov** – Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, the Department of Radioelectronic Devices and Systems, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: vadik-livny@mail.ru, ORCID: 0000-0001-5129-4369

**Alexey I. Zimin** – Student, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: zlexey.03@mail.ru, ORCID: 0009-0009 -6542-1918

## К ВОПРОСУ О МАКЕТИРОВАНИИ МИКРОПОЛОСКОВЫХ ПОЛОСОВЫХ ФИЛЬТРОВ В ЛАБОРАТОРНЫХ УСЛОВИЯХ (Часть 2)

А.Е. Рудь<sup>1,2</sup>, Л.Э. Черноиванов<sup>1,2</sup>, И.А. Арзамасцев<sup>2</sup>, А.В. Гречишкин<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

<sup>2</sup>АО «Концерн «Созвездие», г. Воронеж, Россия

**Аннотация:** при проектировании микрополосковых фильтров для уточнения результатов расчетов зачастую требуется проведение макетирования. Существуют несколько способов макетирования в лабораторных условиях. Важным вопросом при выборе способа макетирования является степень соответствия параметров изготовленного макета расчетным параметрам. Достижимая степень соответствия параметров определяет применимость того или иного способа макетирования. Дается качественная оценка применимости фрезерования топологии микрополоскового полосового фильтра на станке с числовым программным управлением (ЧПУ) для целей макетирования в лабораторных условиях. Рассматриваемый способ заключается в генерации программы управления станком с ЧПУ на основе рассчитанной топологии микрополоскового полосового фильтра с учетом особенностей применяемого инструмента. После этого выполняется фрезерование фольгированного диэлектрического материала. Для изготовленного таким способом макета были проведены измерения параметров: геометрических размеров топологии и амплитудно-частотной характеристики фильтра (АЧХ). Приведены рисунки, демонстрирующие геометрические размеры рассчитанного фильтра и фрезерованного макета. Дополнительно для оценки качества изготовления приведены увеличенные под микроскопом микрополосковые резонаторы полученного макета. На основе сравнения расчетных геометрических параметров и расчетной АЧХ с соответствующими параметрами изготовленного макета микрополоскового полосового фильтра сделана качественная оценка применимости фрезерования для макетирования в лабораторных условиях. Дополнительно приводится сравнение отклонений геометрических размеров и АЧХ макета микрополоскового полосового фильтра, изготовленного по технологии фотолитографии топологии с последующим химическим травлением

**Ключевые слова:** микрополосковый фильтр, полосовой фильтр, макетирование

### Введение

В [1] был сделан вывод о возможности использования фотолитографии с последующим химическим травлением как способа изготовления макетов в лабораторных условиях для уточнения результатов расчета при проектировании микрополосковых фильтров. Однако у данного способа макетирования имеются существенные недостатки — высокая погрешность в процессе фотолитографии и явление подтравливания [2], которые тяжело контролировать в лабораторных условиях и которые приводят к существенным отклонениям геометрических размеров топологии макетируемого фильтра.

Альтернативой фотолитографического нанесению топологии на фольгированную диэлектрическую основу с последующим химическим травлением является фрезерование топологии на станке с числовым программным управлением [3].

Целью данной статьи является качественная оценка применимости фрезерования для изготовления макета микрополоскового полосового фильтра в лабораторных условиях. Для этого необходимо:

- сгенерировать управляющую программу для станка с ЧПУ (G-код или G-code [4]);
- отфрезеровать макет микрополоскового полосового фильтра на станке с ЧПУ;
- измерить геометрические размеры и электрические параметры полученного фильтра;
- провести сравнение расчетных параметров (геометрических размеров и АЧХ) с параметрами изготовленного макета, проанализировать применимость рассматриваемого способа;
- оценить качество изготовления в сравнении с рассмотренным в [1] способом.

### Генерация G-кода на основе топологии фильтра

Для того чтобы выполнить фрезерование печатной платы, необходимо написать или сгенерировать программу управления станком с ЧПУ на языке G-код. Сгенерировать программу управления для фрезерования рассматриваемого фильтра можно следующим образом:

- на основе рассчитанных в [1] геометрических размеров микрополоскового полосового фильтра, представленных на рис. 1, выполнить трассировку топологии фильтра, результатом которой является РСВ-файл;

— экспортировать PCB-файл в gerber-файл, представляющий собой двухмерное векторное изображение печатной платы (топологии);

— с помощью САМ-программы [5] (в нашем случае FlatCAM) по gerber-файлу выполнить настройку параметров обработки с учетом применяемого инструмента: отступы, число проходов режущего инструмента (фрезы), заглубление и т.д. Затем сгенерировать G-код.

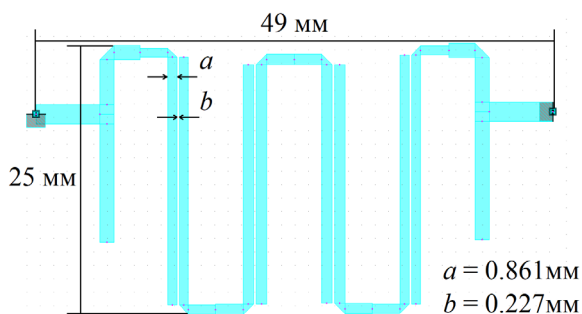


Рис. 1

### Изготовление макета

Как и в [1] макет изготовлялся на фольгированном диэлектрическом материале RO4003 [6].

Фрезерование выполнялось на станке с ЧПУ модели CNC1419 (рис. 2) и фрезой производства DJTOL A3J6.3001 с диаметром наконечника 0.1 мм и углом заточки 30° (рис. 3). При обработке был снят слой меди толщиной 0.035 мм (35 мкм).

Для управления станком было использовано свободно распространяемое программное обеспечение Candle GRBL.

На рис. 4 приведено изображение отфрезерованного макета. На рис. 5 приведено увеличенное под микроскопом изображение макетов, изготовленных с помощью фрезерования (слева) и химического травления (справа).



Рис. 2



Рис. 3

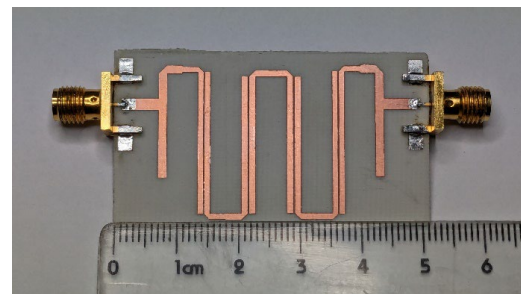


Рис. 4

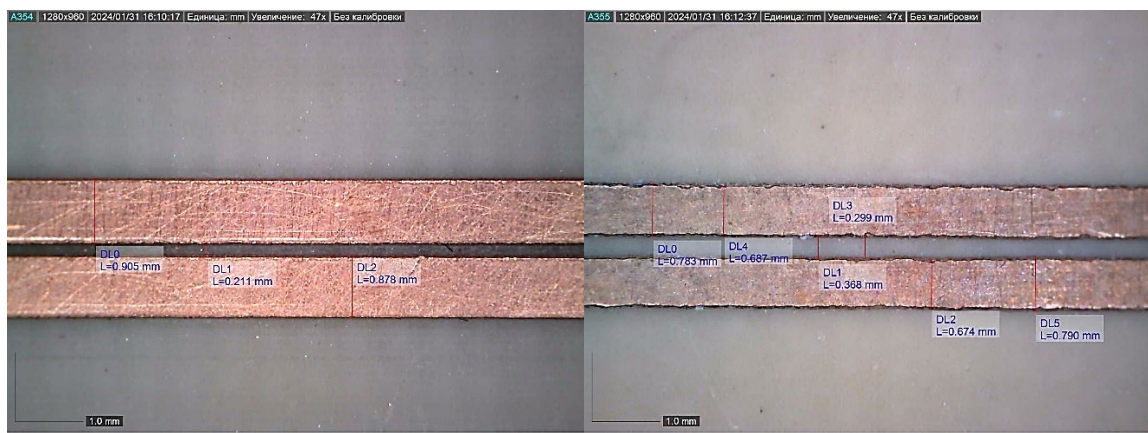


Рис. 5

### Измерение параметров фрезерованного макета

### Сравнение расчетных параметров с измеренными параметрами макетов

На рис. 6 приведены расчетная АЧХ фильтра, измеренная АЧХ фрезерованного макета и АЧХ макета из [1], а также контрольные точки (КТ).

В табл. 1 приведено сравнение некоторых расчетных геометрических параметров с измеренными параметрами изготовленных макетов. В табл. 2 приведено сравнение амплитудно-частотных характеристик.

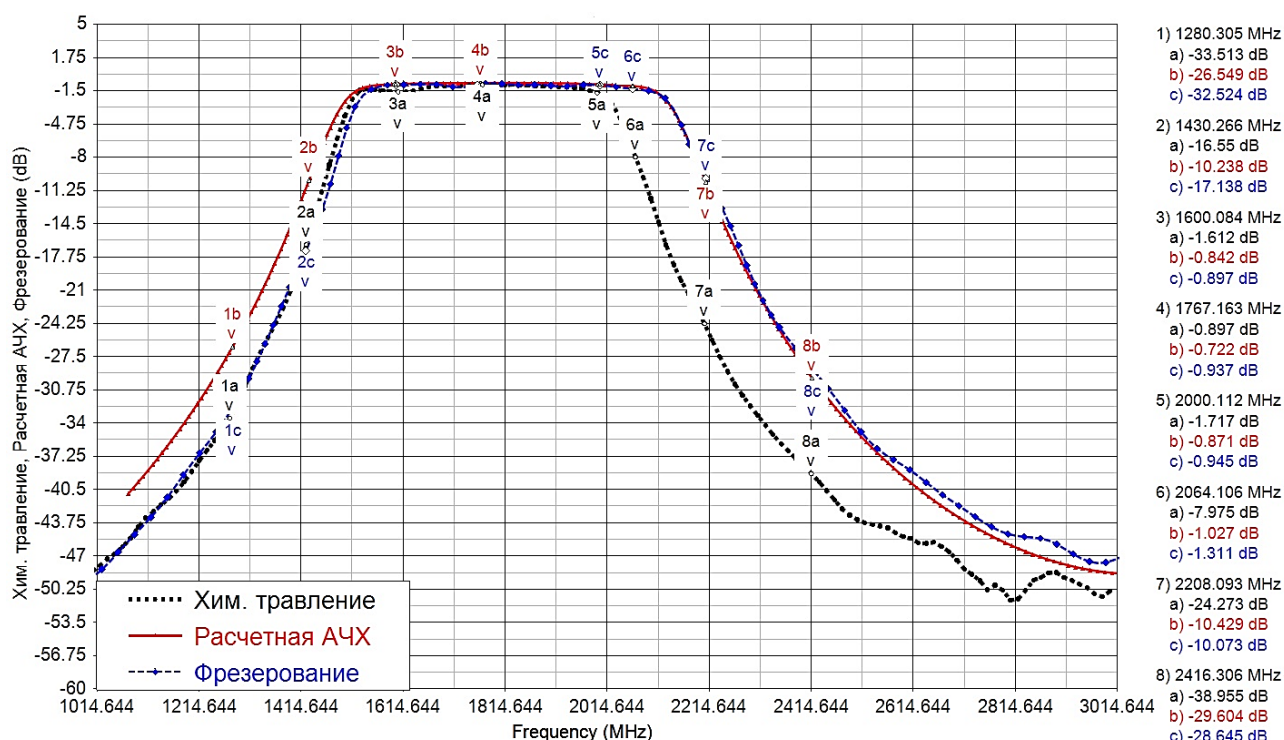


Рис. 6

Таблица 1

Параметр	Расчет	Макет (хим. травление)	Макет (фрезерование)	Абсолютное отклонение		Относительное отклонение	
				Хим. тр.	Фрезер.	Хим. тр.	Фрезер.
Ширина резонатора:							
DL0	0.861 мм	0.783 мм	0.905 мм	0.078 мм	0.044 мм	9.1 %	5.1 %
DL2	0.861 мм	0.674 мм	0.878 мм	0.187 мм	0.017 мм	21.7 %	1.97 %
Расстояние между резонаторами:							
DL1	0.227 мм	0.368 мм	0.211 мм	0.141 мм	0.016 мм	62.1 %	7.04 %

Таблица 2

Параметр	Расчет	Макет (фрезерование)	Макет (хим. травление)
Полоса пропускания фильтра по уровню -1.5 дБ, МГц	530	512	465
Потери в полосе пропускания, дБ	1.5	1.5	1.7
Неравномерность в полосе пропускания	0.5	0.5	0.5
Подавление на 10% отстройки от нижней/верхней полосы пропускания, дБ	-14/-18	-20/-18	-22/-22
Подавление на 20% отстройки от нижней/верхней полосы пропускания, дБ	-39/-34	-34/-33	-36/-38

Геометрические размеры фрезерованного макета и изготовленного с использованием химического травления имеют значительные различия, что ярко отражается расстоянием между резонаторами, где относительное отклонение для технологии химического травления составляет 62.1%. Также по рис. 5 видно, что при фрезеровании ширина резонаторов получается более равномерной. Это может быть объяснено неконтролируемой погрешностью при нанесении топологии с помощью фотолитографии и химического травления, которая оказывает большее влияние, чем биения шпинделя станка с ЧПУ.

Стоит заметить, что в [1] расчетная АЧХ была получена электромагнитным методом анализа, в данной же работе использован линейный метод, что объясняет различия между расчетной АЧХ и АЧХ макета, изготовленного по технологии химического травления (рис. 6).

### Заключение

По приведенным результатам можно сделать вывод о применимости фрезерования на станке с ЧПУ для изготовления макетов микрополосковых фильтров на начальных этапах проектирования, а также, что фрезерование

является предпочтительным в сравнении с химическим травлением, т.к. отклонения геометрических размеров макета оказываются меньшими.

### Литература

1. Рудь А.Е., Черноиванов Л.Э., Арзамасцев И.А., Гречишкин А.В. К вопросу о макетировании микрополосковых полосовых фильтров в лабораторных условиях // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2023. Т. 19. № 6. С. 115-120.
2. Смертина Т. Высокоточное травление. От теории к практике // Технологии в электронной промышленности. 2008. № 3 С. 12-19.
3. Кожевников Д.В., Кирсанов С.В. Резание материалов: учебник. М.: Машиностроение. 2007. 304 с.
4. ГОСТ 20999-83 (СТ СЭВ 3585). Государственный стандарт Союза ССР. Устройства числового программного управления для металлообрабатывающего оборудования. Кодирование информации управляющих программ.
5. Малюх В.Н. Введение в современные САПР: Курс лекций. М.: ДМК Пресс, 2010. 192 с.
6. Reference manual. RO4000 Laminates RO4003C and RO4350B – Data Sheet // 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: 17.08.2022).

Поступила 29.02.2024; принята к публикации 06.05.2024

### 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

## ON THE ISSUE ABOUT MICROSTRIP BANDPASS FILTERS PROTOTYPING IN THE LABORATORY CONDITIONS (Part 2)

A.E. Rud<sup>1,2</sup>, L.E. Chernoiwanov<sup>1,2</sup>, I.A. Arzamascev<sup>2</sup>, A.V. Grechishkin<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

<sup>2</sup>JSC “Concern “Sozvezdie”, Voronezh, Russia

**Abstract:** when designing microstrip bandpass filters, prototyping is often required to refine the calculation results. There are several ways to model in the laboratory. An important issue when choosing a layout method is the degree to which the parameters of the manufactured layout correspond to the calculated parameters. The achievable degree of parameter compliance determines the applicability of a particular layout method. Within the framework of this work, a qualitative assessment of the applicability of milling the topology of a microstrip filter on a numerical control machine (CNC) for the purposes of layout in laboratory conditions is given. The method under consideration consists in generating a control program for a CNC machine based on the calculated topology of a microstrip bandpass filter, taking into account the features of the tool used. After that, the foil dielectric material is milled. For the layout made in this way, measurements of the parameters were carried out:

the geometric dimensions of the topology and the amplitude-frequency response of the filter (frequency response). The figures showing the geometric dimensions of the calculated filter and the milled layout are given. Additionally, microstrip resonators of the resulting layout are magnified under a microscope to assess the manufacturing quality. Based on a comparison of the calculated geothermal parameters and the calculated frequency response with the corresponding parameters of the manufactured microstrip filter layout, a qualitative assessment of the applicability of milling for layout in laboratory conditions was made. Additionally, a comparison of deviations in geometric dimensions and frequency response of a microstrip bandpass filter layout manufactured using photolithography technology followed by chemical etching is presented

**Key words:** microstrip filter, bandpass filter, prototyping

#### References

1. Rud A.E., Chernoiivanov L.E., Arzamascev I.A., Grechishkin A.V. "On the issue about microstrip bandpass filters prototyping in the laboratory conditions", *The Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2023, vol. 19, no. 6, pp. 115-120.
2. Smertina T. "High precision etching. From theory to practice", *Technologies in the electronics industry (Tekhnologii v elektronnoy promyshlennosti)*, 2008, no. 3, pp. 12-19.
3. Kozhevnikov D.V., Kirsanov S.V. "Cutting of materials. Textbook" ("Rezaniye materialov: uchebnik"), Moscow, Mashinostroyeniye, 2007, 304 p.
4. GOST 20999-83 (ST CMEA 3585), The state standard of the USSR, "Numerical control devices for metalworking equipment. Encoding of information of control programs" ("Ustroystva chislovogo programmnoy upravleniya dlya metalloobrabatyvayushchego oborudovaniya. Kodirovaniye in-formatsii upravlyayushchikh program").
5. Malyukh V.N. "Introduction to modern CAD systems: A course of lectures" ("Vvedeniye v sovremennyye SAPR: Kurs lektsiy"), Moscow, DMK Press, 2010, 192 p.
6. 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>

Submitted 29.02.2024; revised 06.05.2024

#### Information about the authors

**Anastasia E. Rud** – Postgraduate Student, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya, Voronezh 394006, Russia), Senior Constructor, JSC «Concern «Sozvezdie» (14 Plekhanovskaya, Voronezh 394018, Russia), e-mail: [anastas.rud2012@yandex.ru](mailto:anastas.rud2012@yandex.ru)

**Leonid E. Chernoiivanov** – Masters Student, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya, Voronezh 394006, Russia), Constructor, JSC «Concern «Sozvezdie» (14 Plekhanovskaya, Voronezh 394018, Russia), e-mail: [leonidfya@vk.com](mailto:leonidfya@vk.com)

**Ilya A. Arzamascev** – Senior Constructor, JSC «Concern «Sozvezdie» (14 Plekhanovskaya, Voronezh 394018, Russia), e-mail: [ilya.arz.al@ya.ru](mailto:ilya.arz.al@ya.ru)

**Aleksandr V. Grechishkin** – Cand. Sc. (Technical), Head of Sector, JSC «Concern «Sozvezdie» (14 Plekhanovskaya, Voronezh 394018, Russia), e-mail: [grechishkin.av@mail.ru](mailto:grechishkin.av@mail.ru)

**ВЫЯВЛЕНИЕ РАЗМЕРОВ НОВООБРАЗОВАНИЙ НА ОСНОВЕ РАДИОВОЛН**Е.А. Ищенко<sup>1</sup>, С.М. Фёдоров<sup>1,2</sup>, Е.Д. Егорова<sup>1</sup>, Д.А. Новиков<sup>1</sup>, Ю.С. Цимбалист<sup>1</sup>, Е.А. Тоцкая<sup>1</sup><sup>1</sup>Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия<sup>2</sup>Международный институт компьютерных технологий, г. Воронеж, Россия

**Аннотация:** рассматривается возможность выявления онкологических новообразований с использованием систем сверхвысоких частот (СВЧ) из двух антенн миллиметрового диапазона, а также определения размеров новообразований на основе изменений характеристик канала. Определение характеристик проходящих электромагнитных волн основывается на амплитудах принятого сигнала, его Фурье-спектра, матрицы  $S_{21}$ -параметров, диэлектрических характеристик системы на основе матрицы рассеяния. Представлена модель электродинамики, имитирующая взаимодействие электромагнитных волн со стратифицированной структурой ткани, включающей кожу, жир и мышечные слои, с уникальными диэлектрическими константами, магнитной проницаемостью и электропроводностью. Суть технологии заключается в использовании двухслойных патч-радиаторов в диапазоне частот от 23,97 до 28,88 ГГц, выбранных за их чувствительность к мельчайшим неопластическим изменениям из-за коротких длин волн. В модели оцениваются опухоли радиусом от 1 мм до 10 мм, изучается влияние размера опухоли на распространение радиоволн, определяемое параметрами коэффициента передачи  $S_{21}$ . Результаты показывают прямую зависимость между увеличением размера опухоли и уменьшением амплитуды сигнала, принимаемого антенной, что говорит о способности метода обнаруживать опухоли на начальных стадиях, что необходимо для эффективного лечения

**Ключевые слова:** электродинамическое моделирование, выявление заболеваний, волновое сканирование, матрица рассеяния, спектральный анализ, диэлектрические характеристики

**Введение**

Развитие технологий выявления новообразований является важной задачей для обеспечения здоровья человечества, так как раннее выявление онкологических заболеваний положительно сказывается на медицинском прогнозе. Благодаря тому, что возникновение опухолей приводит к изменению диэлектрических параметров тканей, помимо компьютерной томографии (КТ) и магнитно-резонансной томографии (МРТ) становится возможным предположение, что новообразование может быть выявлено на основе характеристик распространения радиоволн через ткани человека. Возможность подобного предположения подтверждается в работах [1, 2, 3], где авторы показывают, что у онкологических тканей наблюдаются серьезные отклонения в значениях диэлектрической проницаемости тканей, что позволяет выявлять опухоли на основе изменившихся характеристик при распространении радиоволн через ткани человека.

В работе [4] авторы показывают, что увеличение число клеток в опухоли приводит к изменению характеристик проницаемости общей ткани, что позволяет сделать вывод —

чем больше размеры новообразования, тем сильнее изменяются характеристики канала.

В работе [5] авторы предлагают метод выявления новообразований на основе пропуска через ткани СВЧ-излучения, причем показывается, что использование сигналов с гауссовской огибающей позволяет избежать ложных реакций, ошибочных искажений характеристик по сравнению с использованием линейно-частотно моделированных-сигналов (ЛЧМ), при этом выявление основывается на основе рассеивания радиоволн от опухоли, но такой метод может базироваться на изменении коэффициента отражения антенного элемента, что в свою очередь является трудно выявляемым, за счет чего происходит снижение точности.

В работе [6] предлагается волновой метод выявления новообразований головного мозга человека, причем определение основывается на изменении характеристик отраженного сигнала относительно двух близкорасположенных антенн, таким образом удастся учесть характеристики индивидуального объекта и выявить неглубоко расположенных опухолей.

Как видно, исследование в направлении выявления новообразований на основе характеристик радиоволн является важной и актуальной задачей.

### Исследуемая модель

В процессе исследования производилось изучение задачи, когда новообразование находилось в стадии перерождения (серьезное уменьшение диэлектрической проницаемости тканей тела), когда опухоль возникала в мышечном слое — рис. 1, при этом для

формирования измерительного канала используются двуслойные патч-излучатели с рабочим диапазоном частот от 23.97 до 28.88 ГГц, что позволяет за счет малой длины волны выявлять даже самые малые размеры новообразований, а широкий рабочий диапазон позволяет получать характеристики матрицы передачи  $S_{21}$  даже в широком диапазоне частот.

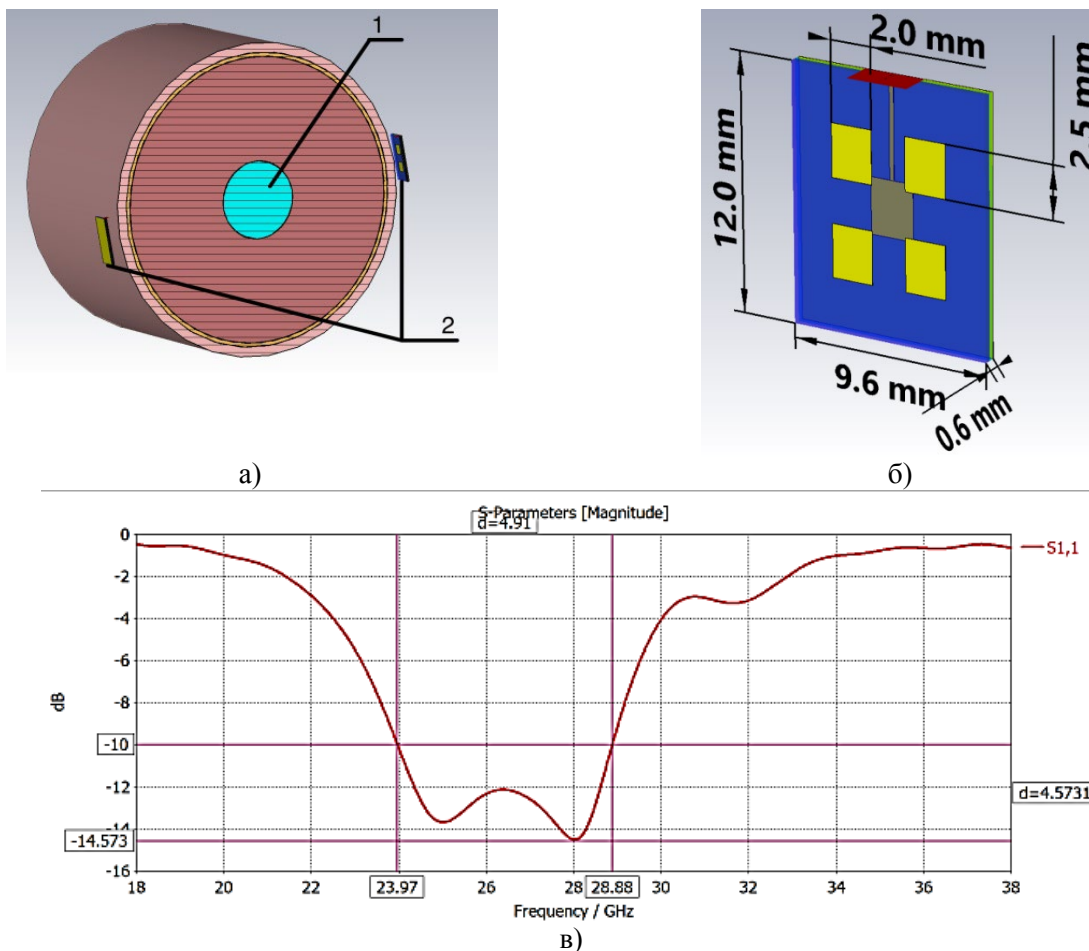


Рис. 1. Вид исследуемой задачи: а) ткани тела человека с новообразованием (1) и сканирующими антеннами (2); б) антенный элемент; в) возвратные потери антенного элемента с указанием рабочего диапазона

Электродинамически модель тканей сформирована из нескольких слоев: кожи (толщина слоя 2.5 мм,  $\epsilon = 69.45, \mu = 1, \sigma = 0.507$  см/м), жировой прослойки (толщина 1 мм,  $\epsilon = 6.07, \mu = 1, \sigma = 0.036$  см/м), мышечной ткани (толщина 73 мм,  $\epsilon = 65.97, \mu = 1, \sigma = 0.708$  см/м), таким образом удается учитывать характеристики распространения волн через все слои тканей тела человека, особенно через мышечную ткань, обладающую высокой диэлектрической проницаемостью. В процессе моделирования рассматривалась задача, когда в тканях возникает новообразование с различными размерами — радиус сферы в 1, 2.5, 5, 10 мм, что позволит оценить, насколько серьезное влия-

ние на характеристики распространения радиоволн оказывают размеры опухоли. У онкологической ткани диэлектрические параметры:  $\epsilon = 18, \mu = 1, \delta = 1.05$  на частоте 33 ГГц.

Для оценки влияния размеров новообразования на характеристики тканей возможно благодаря использованию технологии формирования канала между двумя антеннами изучить:  $S_{21}$ -параметры системы (коэффициент передачи в прямом направлении); диэлектрические параметры всей структуры на основе метода, который описан в [7]; амплитуд сигналов на приемной стороне при передаче сигнала с гауссовской огибающей [5] и их преобразований Фурье.

**Выполнение моделирования влияния размера новообразования на характеристики тканей**

При моделировании в порт излучающей антенны подавался сигнал с гауссовской огибающей, что в соответствии с [5] позволяет избежать фантомных реакций, а также обеспечить максимальную чувствительность к выявлению изменений характеристик протекания

электромагнитного поля (ЭМП) через ткани. Причем из-за особенностей характеристик тканей и размеров новообразования, а также глубины его нахождения, отраженный сигнал практически не отличается, что делает возможным выявление лишь на основе характеристик передачи в системе. На рис. 2 приводятся сигналы, которые возникают в процессе протекания через систему.

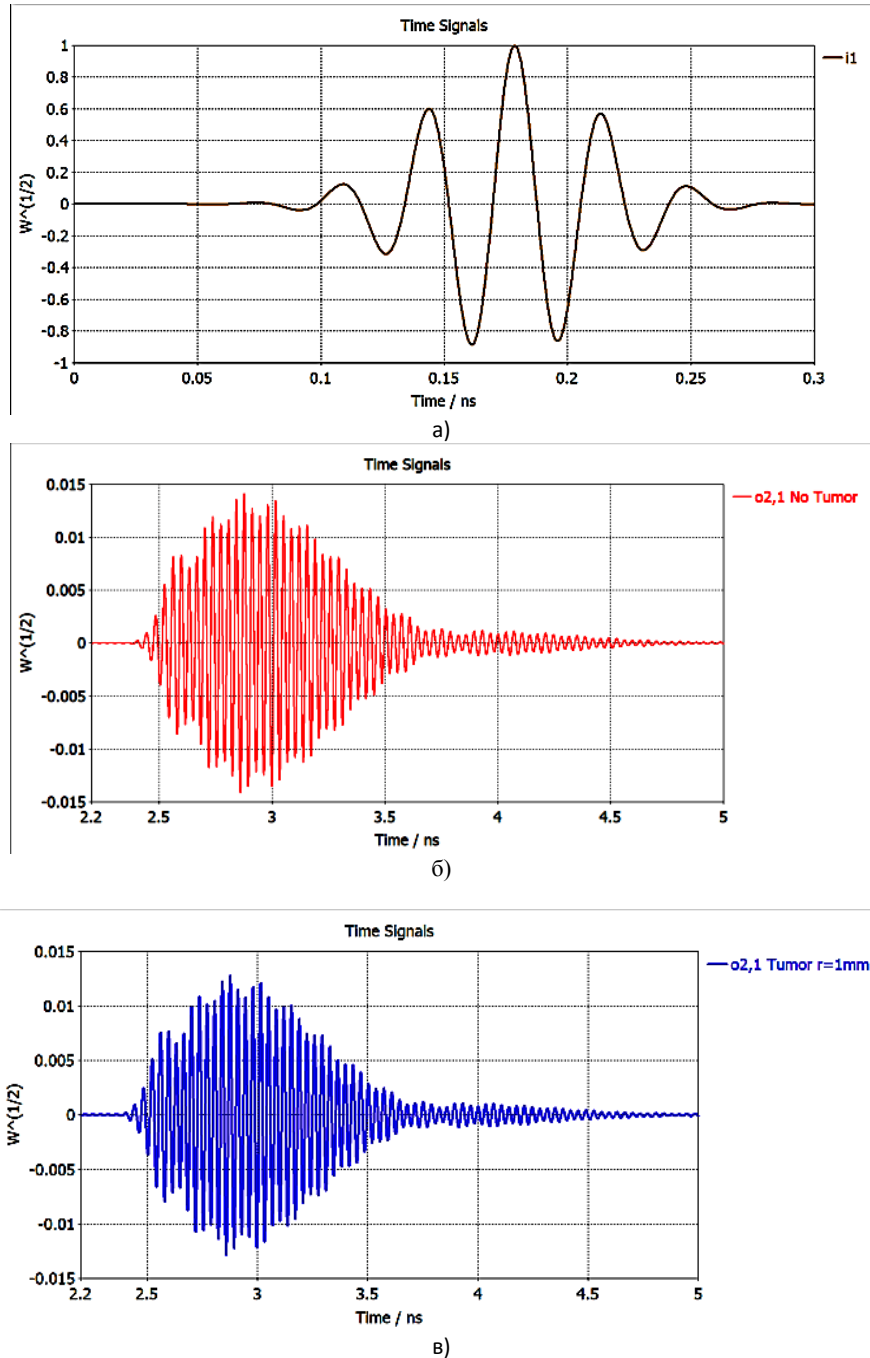


Рис. 2. Сигналы, полученные в процессе моделирования:  
 а) изначальный сигнал, подаваемый в систему; б) сигнал на приемной антенне при отсутствии опухоли;  
 в) сигнал при опухоли радиусом 1 мм; г) сигнал при опухоли радиусом 2.5 мм; д) сигнал при опухоли радиусом 5 мм;  
 е) сигнал при опухоли радиусом 10 мм

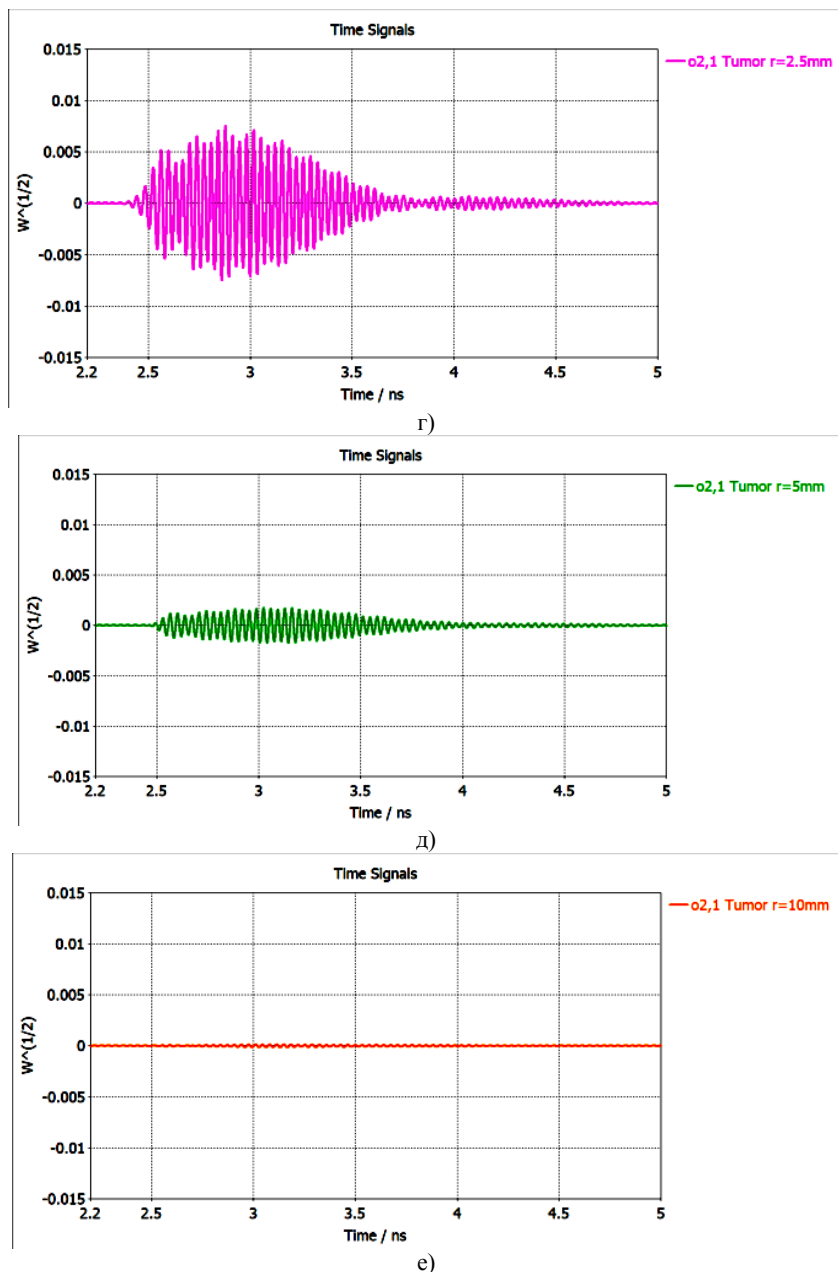


Рис. 2. Сигналы, полученные в процессе моделирования:  
 а) изначальный сигнал, подаваемый в систему; б) сигнал на приемной антенне при отсутствии опухоли;  
 в) сигнал при опухоли радиусом 1 мм; г) сигнал при опухоли радиусом 2.5 мм; д) сигнал при опухоли радиусом 5 мм;  
 е) сигнал при опухоли радиусом 10 мм (продолжение)

Как видно по полученным зависимостям, с увеличением размеров новообразования наблюдается значительное снижение амплитуды сигнала на выходе приемной антенны, что позволяет сделать вывод о том, что даже малое новообразование радиусом 1 мм приводит к серьезному снижению амплитуды сигнала на

выходе цепи (табл. 1), также для удобства анализа характеристик сигнала возможно использование преобразования Фурье для принятых сигналов, так как для полученных после преобразования спектров ожидается значительное изменение максимального уровня – рис. 3.

Характеристики сигналов при различных размерах новообразования

Радиус новообразования, мм	Амплитуда сигнала Вт <sup>1/2</sup>	Изменение амплитуды (нет опухоли), %	Максимум спектра Фурье
Нет опухоли	0.0141	0	$5.11 \cdot 10^{-12}$
1	0.0128	9.22	$4.60 \cdot 10^{-12}$
2.5	0.0075	46.81	$2.77 \cdot 10^{-12}$
5	0.0018	87.23	$8.65 \cdot 10^{-13}$
10	0.0001	99.29	$2.77 \cdot 10^{-14}$

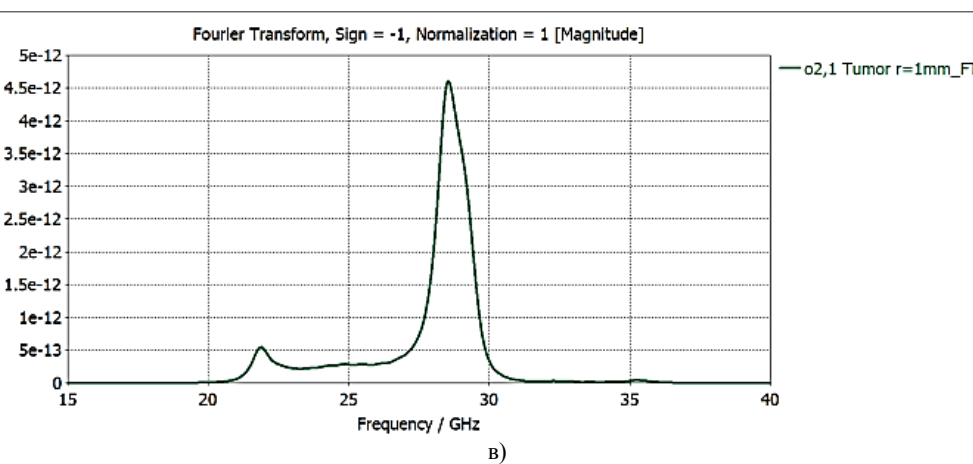
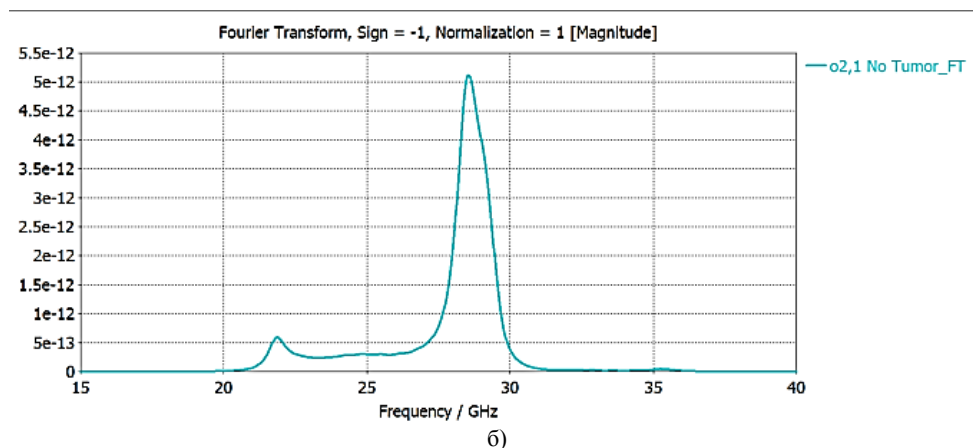
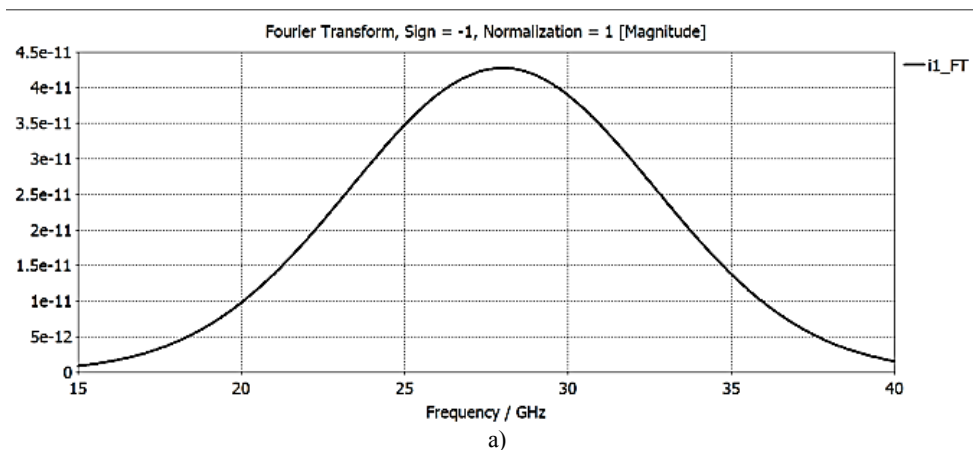


Рис. 3. Преобразованный Фурье-спектр сигналов в системе: а) изначального сигнала с гауссовской огибающей; б) спектр при отсутствии опухоли; в) спектр при опухоли радиусом 1 мм; г) спектр при опухоли радиусом 2.5 мм; д) спектр при опухоли радиусом 5 мм; е) спектр при опухоли радиусом 10 мм

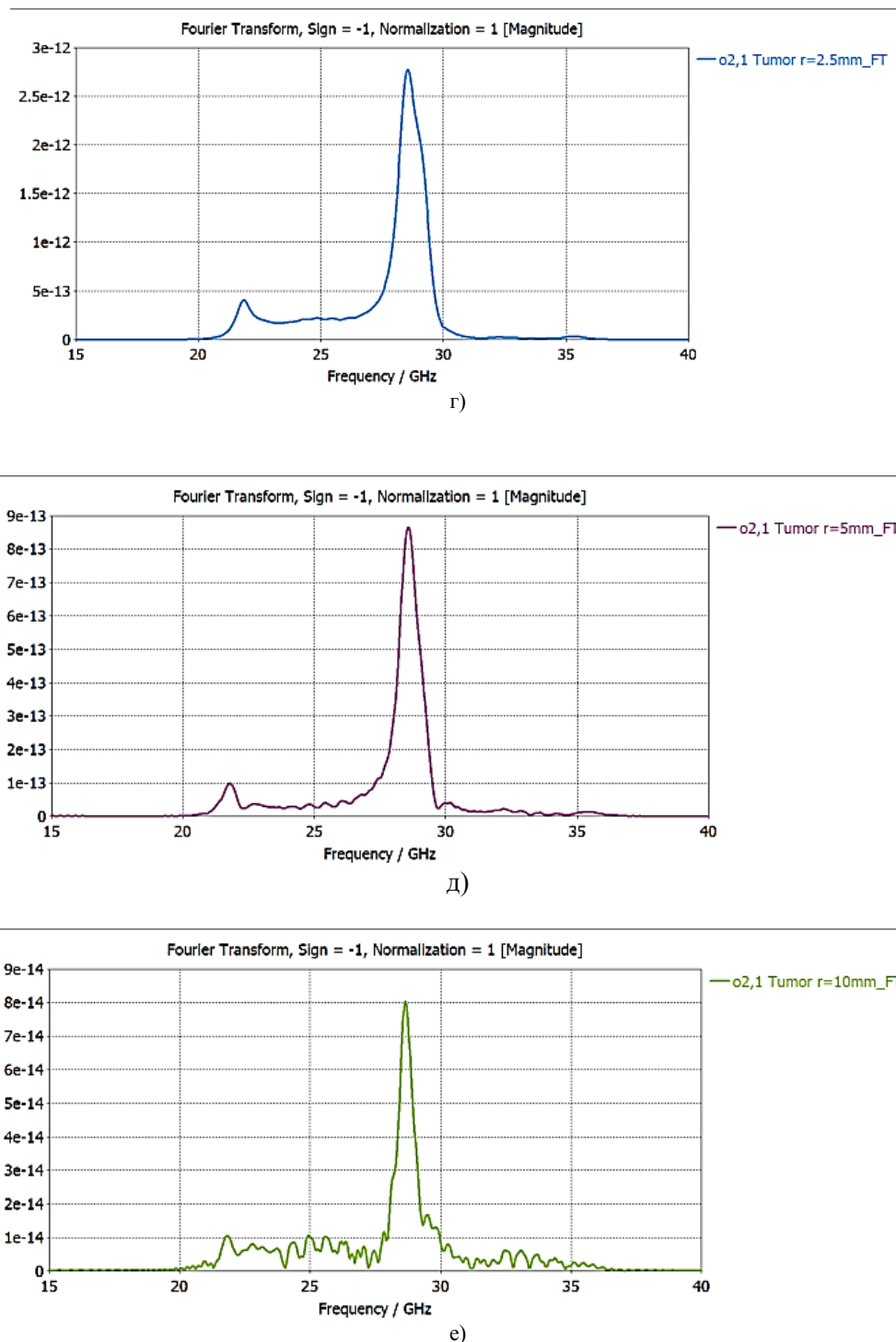


Рис. 3. Преобразованный Фурье-спектр сигналов в системе: а) изначального сигнала с гауссовской огибающей; б) спектр при отсутствии опухоли; в) спектр при опухоли радиусом 1 мм; г) спектр при опухоли радиусом 2.5 мм; д) спектр при опухоли радиусом 5 мм; е) спектр при опухоли радиусом 10 мм (продолжение)

Как и ожидалось, максимальные значения спектров Фурье уменьшаются с увеличением размеров опухоли.

Как видно из полученных результатов, онкологическое новообразование оказывает серъ-

езное влияние на характеристики распространения электромагнитных волн, при этом возможно оценить влияние характеристик распространения волн через ткани на основе  $S_{21}$ -параметров системы, которые приводятся на рис. 4.

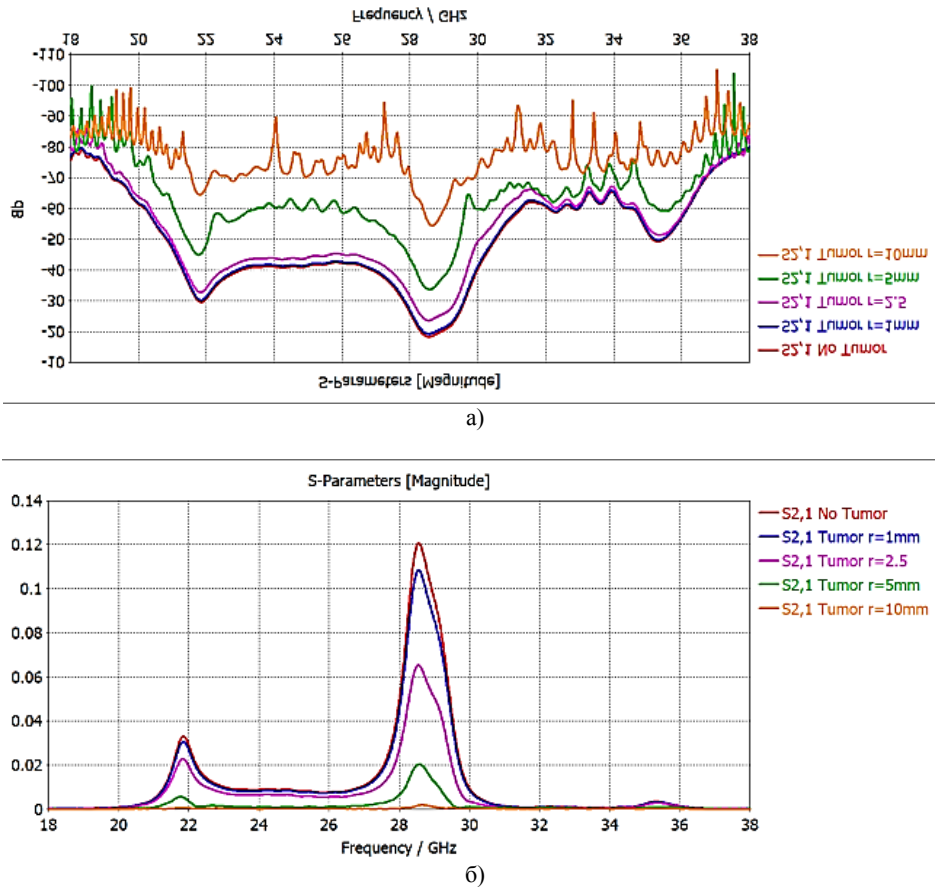


Рис. 4. Характеристики  $S_{21}$ -параметров системы при протекании через ткани человека: а) логарифмический масштаб; б) линейный масштаб

Как видно, с увеличением размеров новообразования происходит уменьшение значений матрицы рассеяния, а именно коэффициента передачи ( $S_{21}$ ). Для удобства анализа воспользуемся табл. 2, в которой приводятся значения для частоты 28.56 ГГц, на которой наблюдается максимум коэффициента передачи.

На основе полученной матрицы рассеяния из  $S_{11}$  и  $S_{21}$ -параметров и методов, описанных

в [7], возможно определить диэлектрические характеристики структуры, причем рассмотрим диапазон частот от 24 до 29 ГГц – рис. 5, также в табл. 3 приводятся значения диэлектрической проницаемости на частоте 27.08 ГГц, что является максимальным значением в рассматриваемом диапазоне.

Таблица 2

Характеристики $S_{21}$			
Размер новообразования, мм	$S_{21}$ , лин	Изменения $S_{21}$ , %	$S_{21}$ , дБ
Нет	0.121	0	-18.37
1	0.108	10.74	-19.30
2.5	0.065	46.28	-23.70
5	0.020	83.47	-33.81
10	0.002	98.35	-55.11

Таблица 3

Зависимость $\epsilon$ от размеров опухоли		
Размеры новообразования, мм	Значение $\epsilon$ на частоте 27.08 ГГц	Значение $\epsilon$ на частоте 28.56 ГГц
Нет опухоли	45.25	2.89
1	42.94	2.99
2.5	44.58	2.92
5	49.86	3.17
10	45.85	2.94

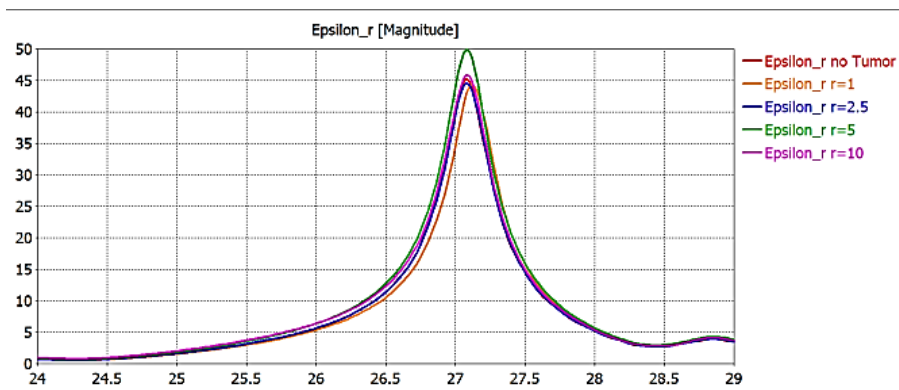


Рис. 5. Характеристики диэлектрической проницаемости для различных размеров новообразований

Из-за особенностей расчета диэлектрической проницаемости на основе матрицы рассеяния наблюдается высокая нестабильность полученных результатов  $\epsilon_r$ , что делает выявление опухолей с его использованием наименее точным и эффективным, однако даже с таким способом заметно, что наблюдается изменение характеристик распространения радиоволн.

### Заключение

Развитие современных способов выявления новообразований является важной и актуальной задачей, которую стремится решить современная медицина. Создание новых технологий выявления заболеваний является актуальной, важной и сложной задачей, так как выявление характеристик онкологических тканей требует проведения большого числа выборок и измерений ткани. Описанный в данной работе электродинамический метод основан на важной информации об онкологических тканях – отличие их диэлектрических характеристик от здоровых тканей, причем дальнейшее развитие описанной технологии способно позволить выявлять заболевание на самых ранних стадиях, когда обеспечивается самый благоприятный прогноз для пациента.

### Литература

1. Dielectric characterization of healthy and malignant colon tissues in the 0.5-18 GHz frequency band / A. Fornes-Leal, C. Garcia-Pardo, M. Frasson, V. Pons Beltrán, N. Cardona // *Phys Med Biol*. 2016. Vol. 61, № 20. Pp. 7334-7346.
2. Cheng Y., Fu M. Dielectric properties for non-invasive detection of normal, benign, and malignant breast tissues using microwave theories // *Thorac Cancer*. 2018. Vol. 9. № 4. Pp. 459-465.
3. Characterization of several cancer cell lines at microwave frequencies / V. Nerguizian, A. Alazzam, I. Stiharu, M. Burnier // *Measurement*. 2017. Vol. 109. Pp. 354-358.
4. Permittivity measurements of brain cancer cell solutions: towards the electric characterisation of single cancer stem cells / W. Gamal, M. Tanori, A. Casciati, M. Mancuso, L. Persano [et al.] // *EMF-Med 1st World Conference on Biomedical Applications of Electromagnetic Fields*. 2018. Split, France. Pp. 1-2.
5. A comparison between two algorithms for microwave breast cancer detection / S. M. Salvador, G. Vecchi, G. Pagana, C. Cacciatore, R. Maggiora, E.A. Attardo. URL: <https://www.ursi.org/proceedings/procGA08/papers/KBEp8.pdf> (дата обращения: 02.04.2024).
6. Microwave imaging for brain tumour detection using an UWB Vivaldi Antenna array / H. Zhang, B. Flynn, A.T. Erdogan, T. Arslan // *2012 Loughborough Antennas & Propagation Conference (LAPC)*. 2012. Pp. 1-4.
7. A Review of the Scattering-Parameter Extraction Method with Clarification of Ambiguity Issues in Relation to Metamaterial Homogenization / S. Arslanagic [et al.] // *IEEE Antennas and Propagation Magazine*. 2013. Vol. 55. № 2. Pp. 91-106.

Поступила 29.03.2024; принята к публикации 13.05.2024

### Информация об авторах

**Ищенко Евгений Алексеевич** – аспирант, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: kursk1998@yandex.ru, ORCID: 0000-0002-5270-0792

**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. 29 б), e-mail: fedorov\_sm@mail.ru, ORCID: 0000-0001-9027-6163

**Егорова Евгения Дмитриевна** – студент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, д. 84), e-mail: evgenia\_egorova23@mail.ru, ORCID: 0009-0005-1983-3103

**Новиков Дмитрий Анатольевич** – студент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, д. 84), e-mail: mr.dimanov2002@mail.ru

**Цимбалист Юлия Сергеевна** – студент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, д. 84), e-mail: tsmbilst@mail.ru

**Тоцкая Евгения Анатольевна** – студент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, д. 84), e-mail: eugenia.totskaya@yandex.ru

## DETECTING THE SIZE OF NEOPLASMS ON THE BASIS OF RADIO WAVES

**E.A. Ishchenko<sup>1</sup>, S.M. Fedorov<sup>1,2</sup>, E.D. Egorova<sup>1</sup>, D.A. Novikov<sup>1</sup>, Yu.S. Tsimbalist<sup>1</sup>, E.A. Totskaya<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

<sup>2</sup>International Institute of Computer Technologies, Voronezh, Russia

**Abstract:** the paper considers the possibility of detecting cancerous neoplasms using a microwave system of two antennas of millimeter range, as well as determining the size of neoplasms based on changes in the characteristics of the channel. The determination of the characteristics of the passing electromagnetic waves is based on the amplitudes of the received signal, its Fourier spectrum, the  $S_{21}$ -parameter matrix, and the dielectric characteristics of the system based on the scattering matrix. An electrodynamic model simulating the interaction of electromagnetic waves with a stratified tissue structure including skin, fat, and muscle layers with unique dielectric constants, magnetic permeability, and electrical conductivity is presented. The essence of the technology is the use of bilayer patch radiators in the frequency range of 23.97 to 28.88 GHz, chosen for their sensitivity to the smallest neoplastic changes due to their short wavelengths. Tumors with radii ranging from 1 mm to 10 mm are evaluated in the model, and the effect of tumor size on radio wave propagation, as determined by  $S_{21}$  transmission coefficient parameters, is studied. The results show a direct correlation between increasing tumor size and a decrease in the amplitude of the signal received by the antenna, indicating the ability of the method to detect tumors in their initial stages, which is necessary for effective treatment

**Key words:** electrodynamic modeling, disease detection, wave scanning, scattering matrix, spectral analysis, dielectric characteristics

### References

1. Fornes-Leal A, Garcia-Pardo C, Frasson M, Pons Beltrán V, Cardona N. “Dielectric characterization of healthy and malignant colon tissues in the 0.5-18 GHz frequency band”, *Phys Med Biol*, 2016 Oct 21;61(20):7334-7346, doi: 10.1088/0031-9155/61/20/7334. Epub 2016 Oct 3. PMID: 27694718.
2. Cheng Y, Fu M. “Dielectric properties for non-invasive detection of normal, benign, and malignant breast tissues using microwave theories”, *Thorac Cancer*, 2018;9(4):459-465, doi:10.1111/1759-7714.12605
3. Nerguizian V., Alazzam A., Stiharu I., Burnier M. “Characterization of several cancer cell lines at microwave frequencies”, *Measurement*, 2017, vol. 109, pp. 354-358.
4. Gamal W., Tanori M., Casciati A., Mancuso M., Persano L. et al. “Permittivity measurements of brain cancer cell solutions: towards the electric characterisation of single cancer stem cells”, *EMF-Med*, 1st World Conference on Biomedical Applications of Electromagnetic Fields, Sep 2018, Split, France, pp.1-2. (hal-02008234)
5. Salvador S. M., Vecchi G., Pagana G., Cacciatori C., Maggiora R., Attardo E.A. “A comparison between two algorithms for microwave breast cancer detection”, available at: <https://www.ursi.org/proceedings/procGA08/papers/KBep8.pdf> (accessed 02.04.2024).
6. Zhang H., Flynn B., Erdogan A.T., Arslan T. “Microwave imaging for brain tumour detection using an UWB Vivaldi Antenna array”, *Loughborough Antennas & Propagation Conference (LAPC)*, 2012, pp. 1-4, doi: 10.1109/LAPC.2012.6402964.
7. S. Arslanagić et al., “A Review of the Scattering-Parameter Extraction Method with Clarification of Ambiguity Issues in Relation to Metamaterial Homogenization”, *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, April 2013, vol. 55, no. 2, pp. 91-106, doi: 10.1109/MAP.2013.6529320.

Submitted 29.03.2024; revised 13.05.2024

### Information about authors

**Evgeny A. Ishchenko** – Postgraduate Student, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: kursk1998@yandex.ru, ORCID: 0000-0002-5270-0792

**Sergei M. Fedorov** – Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), International Institute of Computer Technologies (29 b Solnechanya str., Voronezh 39026, Russia), e-mail: fedorov\_sm@mail.ru, ORCID: 0000-0001-9027-6163

**Evgeniya D. Egorova** – Student, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: evgenia\_egorova23@mail.ru, ORCID: 0009-0005-1983-3103

**Dmitry A. Novikov** – Student, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: mr.dimanov2002@mail.ru

**Yulia S. Tsimbalist** – Student, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: tsmbilst@mail.ru

**Evgeniya A. Totskaya** – Student, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: eugenia.totskaya@yandex.ru

## ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА РОЯ ЧАСТИЦ В ЗАДАЧЕ ОПТИМИЗАЦИИ СИСТЕМЫ ПИД-РЕГУЛИРОВАНИЯ ПРОГРАММИРУЕМОЙ ЭЛЕКТРОННОЙ НАГРУЗКИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

И.С. Бобылкин<sup>1</sup>, А.В. Иванов<sup>1</sup>, А.А. Кузёмкин<sup>1</sup>, Е.В. Паринава<sup>2</sup>, Е.М. Ивашкина<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

<sup>2</sup>ПАО Сбербанк, г. Воронеж, Россия

**Аннотация:** в настоящее время схема управления электронной нагрузкой постоянного тока обычно основана на аналоговом управлении, то есть контур управления формируется операционным усилителем. Таким образом, в процессе повышения тока легко вызвать низкую скорость отклика и перенапряжение, а улучшение скорости отклика имеет большое значение для тестовой линии, применяющей электронные нагрузки. Динамический отклик важен при тестировании нагрузки источников питания и батарей. Поэтому в данной статье изучается цифровое управление электронной нагрузкой постоянного тока. Цифровая система управления нагрузкой постоянного тока имеет характеристики нелинейности, что затрудняет ее теоретическое моделирование. Поэтому для получения математической модели используется набор инструментов State Flow отечественной среды динамического моделирования SimInTech. Традиционный метод настройки ПИД требует больших временных затрат и имеет плохой эффект. В этой статье используется ПИД-регулятор с самонастройкой параметров, основанный на алгоритме оптимизации роя частиц. С помощью SimInTech были смоделированы и сравнены две схемы управления: традиционное ПИД-управление и ПИД-управление с оптимизацией роем частиц (ОРЧ-ПИД управление). Результаты показывают, что оптимизированный ПИД-контроллер демонстрирует более быстрый отклик по сравнению с традиционным алгоритмом ПИД-управления, а производительность системы значительно улучшается. Разработанная система управления электронной нагрузкой позволит обеспечивать устойчивость к помехам и минимизировать их воздействие на управление.

**Ключевые слова:** электронная нагрузка, ПИД-регулирование, оптимизация роем частиц, контрольно-измерительные приборы, динамическое моделирование, передаточная функция

### Актуальность работы

Когда источник питания покидает производственную линию, то для его проверки и настройки функциональной способности стабилизации выходного напряжения питания используется программируемая электронная нагрузка, а традиционная статическая нагрузка не может удовлетворить требования испытаний [1]. Электронная нагрузка постоянного тока - это своего рода прибор, который имитирует традиционную статическую нагрузку, а также поглощает и преобразует электрическую энергию в другую форму для хранения или потребления энергии. Она имеет более широкий спектр применения при тестировании производственных источников питания и аккумуляторов [2].

Электронная нагрузка может управляться компьютером для поддержания высокой точности в соответствии с потребностями фактического тестирования, что в значительной степени преодолевает влияние факторов окружающей среды на общую нагрузку и обеспечива-

ет точность тестирования. Электронная нагрузка постоянного тока, изучаемая в этой статье, потребляет энергию через МОП-транзистор (MOSFET) для достижения функции моделирования фактической нагрузки. В зависимости от различных применений электронная нагрузка постоянного тока может работать в четырех режимах: режим постоянного тока (Constant Current, CC), режим постоянного напряжения (Constant Voltage, CV), режим постоянного сопротивления (Constant Resistance, CR) и режим постоянной мощности (Constant Power, CP). Режим постоянного тока поглощает электрическую энергию, вырабатываемую источником питания при постоянном значении тока, но его динамическая характеристика недостаточна, когда какое-либо оборудование нуждается в тестировании высоким током. С появлением интеллектуальных алгоритмов, таких как нейронные сети, цифровое управление приборами становится более совершенным и гибким.

Некоторые ученые изучали программное управление электронной нагрузкой на основе ПИД-регулятора [3]. Ключевым моментом ПИД-регулирования является настройка параметров, в то время как традиционные методы,

такие как метод Циглера-Николса и метод проб и ошибок, очень неточны и трудно получить хорошие параметры [4].

В 1995 году был предложен эволюционный метод вычислений, основанный на теории роевого интеллекта, именуемый алгоритмом оптимизации роем частиц (ОРЧ) [5]. Алгоритм ОРЧ имеет быструю скорость сходимости и прост в реализации. Поэтому, стремясь устранить недостаток медленного динамического отклика электронной нагрузки постоянного тока, предлагается применить алгоритм ОРЧ для оптимизации параметров ПИД. Функция приспособленности алгоритма ОРЧ, подлежащая оптимизации, задана двумя показателями: скоростью динамического отклика и скоростью перерегулирования. Эффективность алгоритма ОРЧ проверена путем моделирования.

### Создание упрощенной модели силового контура электронной нагрузки постоянного тока

Электронная нагрузка постоянного тока в основном зависит от энергопотребления МОП-транзистора, работа транзистора в области постоянного тока (также известной как область насыщения, активная область). В этой области, когда напряжение на обоих концах затвора и истока постоянно, ток почти не меняется с изменением напряжения на обоих концах стока и истока, демонстрируя постоянную токовую характеристику. Силовая цепь электронной нагрузки постоянного тока в основном состоит из операционного усилителя и МОП-транзистора с замкнутым контуром, через сопротивление (измерительный шунт) для расчета значения тока. Упрощенная схема показана на рис. 1.

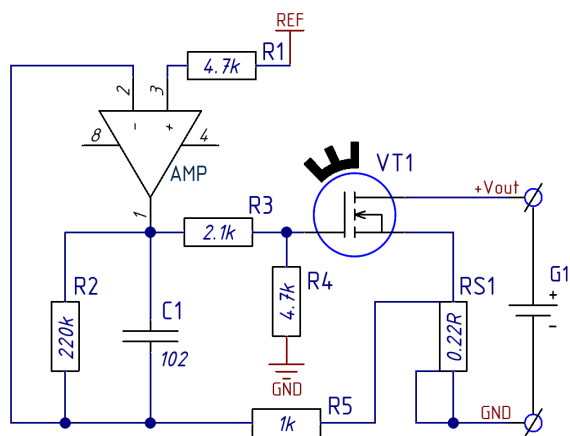


Рис. 1. Упрощенная схема электронной нагрузки постоянного тока

Поскольку система, состоящая из схемы, имеет нелинейные характеристики, выполнить теоретическое моделирование сложно, поэтому для идентификации математической модели системы используется среда динамического моделирования SimInTech.

В настоящее время все необходимые настройки реализованы в специальной библиотеке блоков, которая обеспечивает создание моделей систем в виде конечных автоматов, (представление State Flow) и может быть использована при создании моделей управления [6].

Как показано на рис. 2, после импорта данных, моделируемая система имеет один вход и один выход. Входные данные — это опорное напряжение, а выходные — текущее значение тестируемой нагрузки. Были установлены следующие параметры модели передаточной функции (ПФ): 1 полюс и 1 ноль. Как показано на рис. 3, степень соответствия кривой выходного сигнала достигает 87%, а полученная ПФ соответствует заданным требованиям системы.

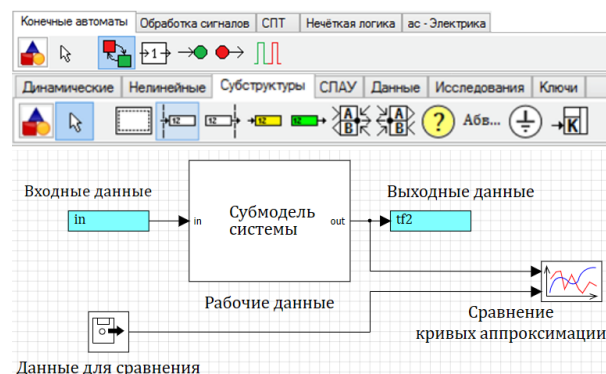


Рис. 2. Интерфейс State Flow SimInTech

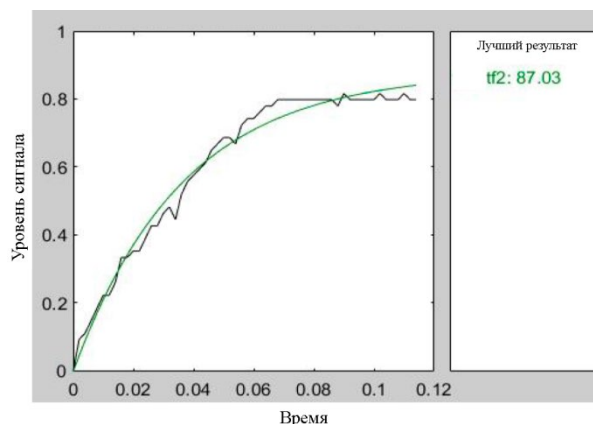


Рис. 3. Кривая аппроксимации

Таким образом, приблизительная ПФ системы электронной нагрузки постоянного тока может быть получена с помощью набора ин-

струментов State Flow среды SimInTech при помощи следующего выражения:

$$G(s) = \frac{80,55}{27,5 + s}. \quad (1)$$

**Метод управления электронной нагрузкой постоянного тока**

**1. ПИД-регулятор**

Традиционное ПИД-регулирование широко используется в промышленных контроллерах и является надежным методом управления [7]. Поскольку компьютер является своего рода средством контроля выборки, контрольное количество может быть рассчитано только в соответствии со значением отклонения времени выборки. Таким образом, непрерывный алгоритм ПИД-регулирования не может быть использован напрямую. Необходимо использовать метод дискретизации. В соответствии с алгоритмом непрерывного ПИД-регулирования дискретное ПИД-представление непрерывного времени  $t$  получается путем последовательной выборки временных точек. Интеграл заменяется приближением накопления ошибок, а производная заменяется приближением разности. Формула дискретизации для этого процесса выглядит следующим образом:

$$\begin{cases} u(k) = K_p e(k) + K_I \sum_{i=0}^k e(i) + \\ + K_D [e(k) - e(k - 1)]; \end{cases} \quad (2)$$

$$e(k) = r(k) - y(k), \quad (3)$$

где  $K_p$  – коэффициент пропорциональности;

$K_I$  – интегральный коэффициент;

$K_d$  – дифференциальный коэффициент;

$e(k)$  – ошибка процесса;

$r(k)$  – заданное значение;

$y(k)$  – выход системы.

**2. ПИД-регулятор с ОРЧ**

Оптимизация роем частиц — это алгоритм роевого интеллекта с небольшим количеством параметров, простой и легкий в реализации. В алгоритме оптимизации роем частиц для достижения контроля над целью исполь-

зуются три параметра: скорость, положение и значение приспособленности. Формула (4) представляет собой скорость обновленной частицы, а формула (5) — положение обновленной частицы.

$$V_{id}^{k+1} = w(k)v_{id}^k + c_1r_1(p_{id}^k - x_{id}^k) + c_2r_2(g_{id}^k - x_{id}^k); \quad (4)$$

$$x_{id}^{k+1} = x_{id}^k + v_{id}^{k+1} \cdot dt, \quad (5)$$

где  $d$  – размер частицы;

$v_{id}^k$  – текущая скорость частицы  $i$  поколения  $k$ ;

$v_{id}^{k+1}$  – текущая скорость частицы  $i$  поколения  $k+1$ ;

$w(k)$  – весовой коэффициент инерции;

$c_1$  и  $c_2$  – коэффициенты обучения в процессе итеративного обновления частиц;

$r_1$  и  $r_2$  – случайные числа между  $[0, 1]$ ;

$p_{id}^k$  – локальная оптимальная позиция;

$g_{id}^k$  – глобальная оптимальная позиция;

$x_{id}^{k+1}$  – позиция частицы  $i$  поколения  $k+1$ ;

$x_{id}^k$  – позиция частицы  $i$  поколения  $k$ ;

$dt$  – интервал смещения моделирования.

Блок-схема ПИД-регулирования оптимизации потока частиц показана на рис. 4.

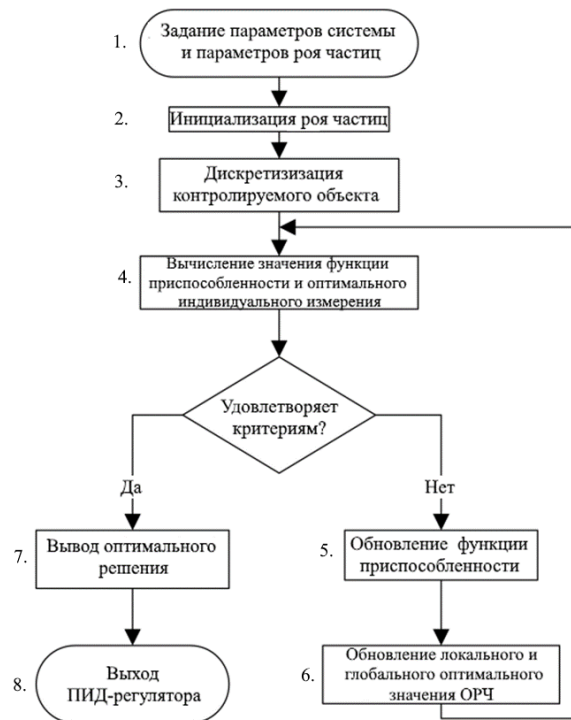


Рис. 4. Блок-схема алгоритма ПИД-управления оптимизации потока частиц

### 3. Улучшение алгоритма ОРЧ

В итерационном процессе базового алгоритма ОРЧ легко могут оказаться в локальном экстремуме, что повлияет на результаты эксперимента. Это связано с тем, что скорость инерции частиц слишком велика, что приведет к существенному увеличению времени на расчет оптимального решения. Поэтому для нивелирования данного негативного эффекта нужно с увеличением количества итераций линейно уменьшать коэффициент инерции алгоритма. Данное выражение можно представить в виде следующей формулы:

$$w(k + 1) = w(k) - 0,7 \frac{i}{n} w(k), \quad (6)$$

где  $i$  – алгебра текущей итерации;  
 $n$  – общая алгебра.

### 4. Выбор интегральной оценки качества системы

Интеграл от взвешенного модуля ошибок (ИВМО) выбран в качестве функции приспособленности улучшенного алгоритма ОРЧ в данной работе. Система, разработанная по этому критерию, обладает такими преимуществами, как регулировка периода времени и небольших колебаний. Функция ИВМО позволяет уменьшить вклад большой начальной ошибки в интеграл и учесть ошибку, появляющуюся в дальнейшем. Функция определяется по формуле:

$$J(\text{ИВМО}) = \int_0^{\infty} t|e(t)|dt. \quad (7)$$

С увеличением количества итераций, чем меньше значение  $J(\text{ИВМО})$ , тем точнее и соответственно лучше будет полученный результат. Блок-схема с улучшенного ОРЧ-ПИД-регулирования показана на рис. 5.

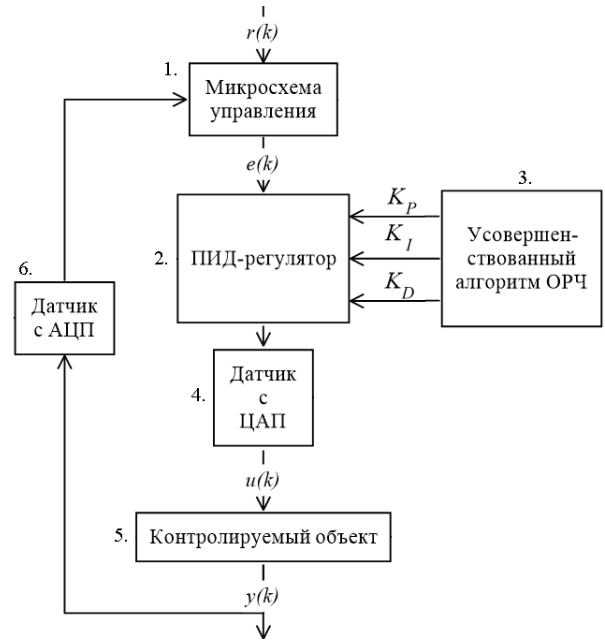


Рис. 5. Блок-схема ПФ с улучшенным ОРЧ-ПИД-регулятором

### Настройка и анализ моделирования

Выходной диапазон ПИД-регулятора  $u(k)$  установлен как  $[0,3]$ , период выборки моделирования установлен как 0,001 секунды, интервал смещения моделирования  $dt$  равен  $[0,3]$ , период управления составляет 0,002 секунды, коэффициенты инерции  $w, c_1, c_2$  равны 2 каждый, начальная скорость частицы равна 0, предел скорости равен 1, предел положения равен  $[0,50]$ . Число итераций равно 20, а размер роя частиц – 20.

Путем применения алгоритма регуляторы были оптимизированы. Полученные данные сведены в график на рис. 6, значения коэффициентов занесены в табл. 1.

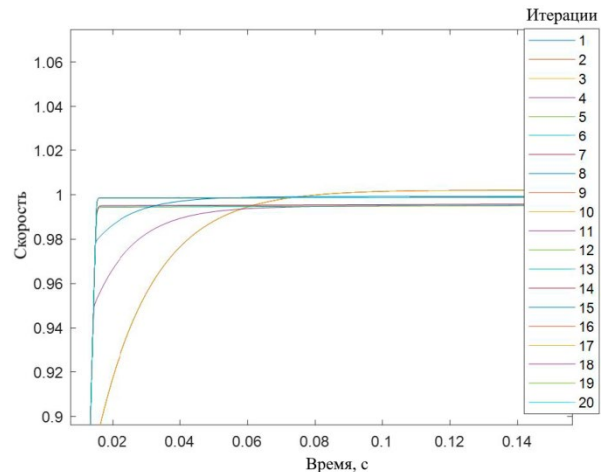


Рис. 6. Графики отклика всех итераций ПФ

Таблица 1  
Значения коэффициентов параметров управления

Метод управления	$k_p$	$k_i$	$k_d$
ПИД	5,3084	2,654	0,0027
ОРЧ-ПИД	27,3792	8,2902	0

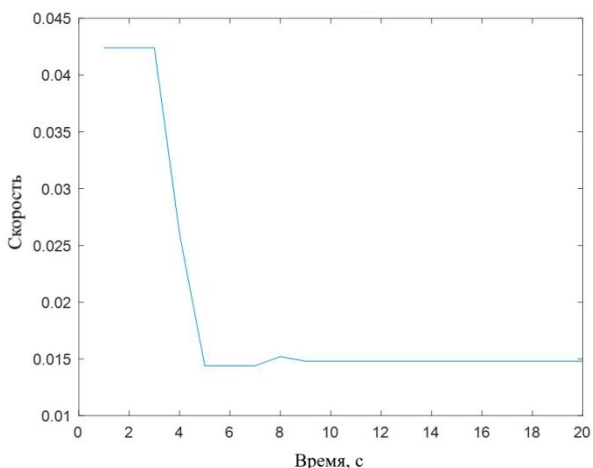


Рис. 7. График изменения времени отклика ПФ

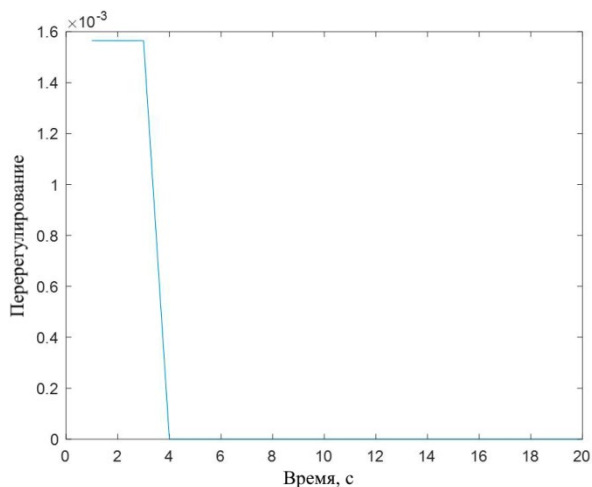


Рис. 8. График изменения перерегулирования ПФ

На рис. 7 и 8, скорость ответа наиболее стабильна на 9-й итерации, а избыточное регулирование минимизируется на 4-й итерации. Как показано на рис. 9, показатель эффективности ИВМО снижается, а параметры управления стремятся к оптимальному решению.

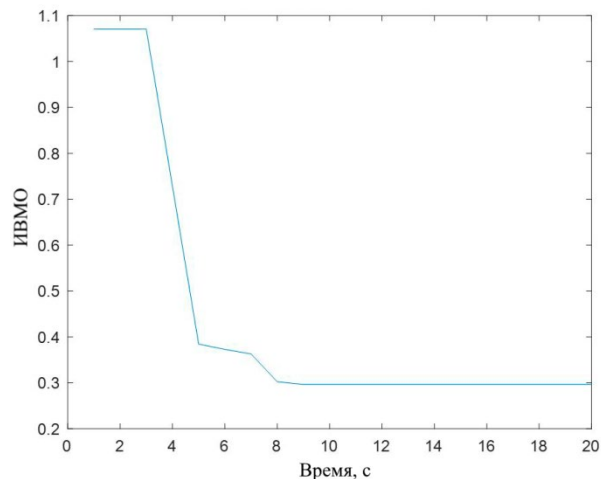


Рис. 9. График изменения ИВМО

Как показано на рис. 10, по сравнению с традиционным ПИД-регулированием, система с ОРЧ, значительно увеличивает скорость сходимости, а время ее переходного процесса составляет всего 0,0148 с, в то время как стандартному ПИД-управлению требуется больше времени для достижения стабильного состояния. Согласно приведенным выше результатам моделирования, улучшенный ОРЧ-ПИД алгоритм может значительно повысить скорость реагирования электронной нагрузки постоянного тока.

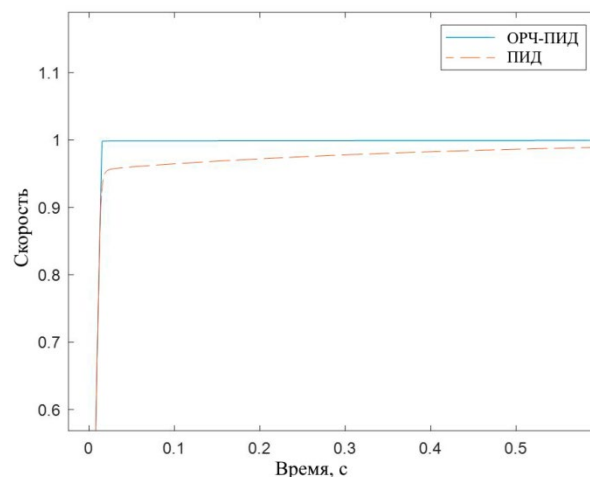


Рис. 10. Сравнение кривых отклика

### Заключение

Динамический отклик является важным показателем электронной нагрузки при нагрузочном тестировании источников питания и аккумуляторных батарей. Из результатов моделирования по сравнению с традиционным алгоритмом ПИД-управления видно, что ПИД-

## Литература

регулятор, оптимизированный за счет оптимизации рою частиц, может достичь лучшего эффекта управления и увеличить скорость реакции системы. В данной статье регулятор электронной нагрузки управляется в идеализированных условиях. В реальных же нагрузках в дополнение к входному опорному напряжению на выходные характеристики будут влиять и другие факторы, такие как наведенные шумы и помехи.

Таким образом, система управления электронной нагрузки должна отвечать современным требованиям по помехоустойчивости в реальном времени и минимизировать влияние этих эффектов на управление. В перспективе необходимо учитывать дополнительные влияющие факторы и дополнять параметрическое управление, чтобы уменьшить влияние внешних факторов на скорость динамического реагирования электронной нагрузки.

1. Ромашенко М.А., Гудков А.В. Современные подходы к диагностике и ремонту маломощных импульсных источников питания // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2021. Т. 17. № 6. С. 81-86.
2. Овчаров П.П., Петренко В.И. Электронная нагрузка повышенной мощности для испытания импульсных источников питания // Современные проблемы радиоэлектроники и телекоммуникаций. 2023. № 6. С. 46.
3. He S., Kong F., Yang L. Application of Fuzzy Neural PID Control Based on Improved PSO // Automation and Instrumentation. 2012. № 27(04). Pp. 35-39.
4. Meng J., Chen Q., and Zhang, K. Simulation of PID Control for Vehicle Suspension Based on PSO Algorithm // Computer Simulation. 2013. № 30(04). Pp. 155-158.
5. Kennedy J., Eberhart R. Particle Swarm Optimization // Proceedings of the IEEE International Conference on Neural Networks. 1995. Pp. 1942-1948.
6. Александров А.А., Шалобанов С.В. Идентификация систем управления в отечественной среде моделирования SimLnTech // Информационные технологии XXI века: сборник научных трудов. Хабаровск: Тихоокеанский государственный университет, 2023. С. 51-54.
7. Лебедев В.Ф., Подвальный С.Л. ПИД-регулятор оптимальный по среднеквадратическому критерию качества // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2001. № 8-1. С. 44-46.

Поступила 29.03.2024; принята к публикации 13.05.2024

## Информация об авторах

**Бобылкин Игорь Сергеевич** – канд. техн. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет (34006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), тел. +79038511113, e-mail: bobytkin@bk.ru, ORCID: 0000-0001-7489-2249

**Иванов Алексей Вадимович** – магистр, Воронежский государственный технический университет (34006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: cs\_off@mail.ru, ORCID: 0000-0002-9517-8332

**Кузёмкин Андрей Александрович** – магистр, Воронежский государственный технический университет (34006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: andreyhillsa@gmail.com, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-2013-8862>

**Паринова Евгения Викторовна** - главный специалист единого распределительного контактного центра, ПАО Сбербанк (394006, Россия, Воронеж, ул 9 Января, 28), e-mail: ysahno86@gmail.com

**Ивашкина Екатерина Михайловна** – студент, Воронежский государственный технический университет (34006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: katya.ivashk-ina@yandex.ru

## APPLICATION OF THE PARTICLE SWARM METHOD IN THE TASK OF OPTIMIZING THE PID CONTROL SYSTEM OF A PROGRAMMABLE DC ELECTRONIC LOAD

I.S. Bobylkin<sup>1</sup>, A.V. Ivanov<sup>1</sup>, A.A. Kuzyomkin<sup>1</sup>, E.V. Parinova<sup>2</sup>, E.M. Ivashkina<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

<sup>2</sup>Sberbank PJSC, Voronezh, Russia

**Abstract:** currently, the DC electronic load control circuit is mainly based on analog control, that is, the control circuit is controlled by an operational amplifier. Thus, in the process of increasing the current, it is easy to cause low response speed and overvoltage, and improving the response speed is of great importance for the test line. Dynamic response is important when testing the load of power supplies and batteries. Therefore, this article examines the digital control of a DC electronic load. The digital DC load control system has non-linearity characteristics, which makes it difficult to theoretically model it. Therefore, to obtain a mathematical model, the State Flow toolset of the domestic SimLnTech dynamic modeling environment is used. The traditional method of setting up a PID requires a lot of time and has a bad effect. This article uses a self-tuning PID controller based on a particle swarm optimization algorithm. Two control schemes were modeled and compared using SimLnTech modeling: traditional PID control and PID control with particle swarm optimization (PSO-PID control). The results show that the optimized PID controller demonstrates a faster response compared to the traditional PID control algorithm, and the system per-

formance is significantly improved. The developed electronic load control system will ensure resistance to interference and minimize their impact on control.

**Keywords:** electronic load, PID regulation, particle swarm optimization, instrumentation, dynamic modeling, transfer function

#### References

1. Romashchenko M.A., Gudkov A.V. "Modern approaches to the diagnosis and repair of low-power switching power supplies" // *The Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudartsvennogo tekhnicheskogo universiteta)*. 2021. T. 17. № 6. pp. 81-86.
2. Ovcharov P.P., Petrenko V.I. "Electronic load for increasing power for testing switching power supplies" // *Modern problems of radio electronics and telecommunications*. 2023. № 6. P. 46.
3. He S., Kong F., Yang L. "Application of fuzzy neural PID control based on improved PSO" // *Automation and Instrumentation*. 2012. № 27(04). pp. 35-39.
4. Meng J., Chen K., Zhang K. "Simulation of PID control of vehicle suspension based on the PSO algorithm" // *Computer Simulation*. 2013. № 30(04). pp. 155-158.
5. Kennedy J., Eberhart R. "Particle swarm optimization" // *Proceedings of the IEEE International Conference on Neural Networks*. 1995. pp. 1942-1948.
6. Aleksandrov A.A., Shalobanov S.V. "Identification of control systems in the domestic SimLnTech environment" // *Information technologies of the XXI century: collection of scientific works*. Khabarovsk: Pacific State University, 2023. pp. 51-54.
7. Lebedev V.F., Podvalny S.L. "PID controller according to the quadratic quality criterion" // *The Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudartsvennogo tekhnicheskogo universiteta)*. 2001. № 8-1. pp. 44-46.

Submitted 29.03.2024; revised 13.05.2024

#### Information about the author

**Igor S. Bobylkin**– Candidate of Technical Sciences, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: bobyln@bk.ru, ORCID: 0000-0001-7489-2249

**Alexey V. Ivanov**– Master's student, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: cs\_off@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9517-8332>

**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>

**Evgeniya V. Parinova** - Chief Specialist of the Unified Distribution Contact Center, Sberbank PJSC (January 9, 28, Voronezh, 394006, Russia), e-mail: ysahno86@gmail.com

**Ekaterina M. Ivashkina**– student, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: katya.ivashkina@yandex.ru

**Машиностроение и машиноведение**

DOI 10.36622/1729-6501.2024.20.2.028

УДК 621.9.048

**РАСШИРЕНИЕ ОБЛАСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В МАШИНОСТРОЕНИИ  
КОМБИНИРОВАННЫХ НАУКОЕМКИХ ТЕХНОЛОГИЙ****В.П. Смоленцев, О.Н. Кириллов, А.А. Извеков****Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия**

**Аннотация:** рассмотрены вопросы расширения области использования комбинированных наукоемких технологий, применяемых на заключительных финишных этапах обработки. В результате исследований систематизировано свыше 40 способов обработки и рассмотрены схемы их реализации. Предложена методика решения проблемы на основе использования электронного банка конструкторско-технологических решений. Приведены результаты систематизации и унификации схем и способов комбинированных физико-химических, ультразвуковых и лучевых методов чистовой обработки, полученных в ходе создания банка технологических решений. Установлены перспективные способы комбинированной чистовой обработки внутренних поверхностей, в частности, каналов различного сечения с прямолинейными и криволинейными осями, за счет анодного растворения припуска. Приведено краткое описание диалоговой среды, посредством которой организован доступ к информации банка технологических решений. На примере метода комбинированной обработки показаны способы практического применения результатов исследований при проектировании технологий чистовой обработки деталей машин расширенной номенклатуры различных отраслей машиностроения и смежных отраслей техники. В частности, изучены открывающиеся возможности использования показанных логических связей с целью автоматизации исследований и применяемых технологий в области медицины, что расширяет возможности комбинированных способов обработки

**Ключевые слова:** комбинированные методы, банк конструкторско-технологических решений, технологии, проектирование, область использования

**Введение**

В ходе построения логической структуры банка конструкторско-технологических решений чистовых методов обработки особое внимание уделено систематизации, унификации и разработке методов чистовой размерной обработки. Это объясняется увеличением спроса промышленных предприятий на данный вид обработки и недостаточным научным заделом в этой области.

**Классификация комбинированных  
методов обработки с наложением полей**

В результате проведенных исследований методов электрохимической, электрофизической, ультразвуковой, лучевой обработки и их сочетаний в форме комбинированного процесса систематизировано [1, 2, 3] свыше 40 способов обработки, включающих до 80 схем их реализации. Для каждого способа установлены типовые планы обработки, унифицированы методики определения технологических режимов, сформулированы наборы типовых решений по

выбору оборудования, рабочих сред и технологической оснастки. Полученные результаты положены в основу создания электронного банка структурированных конструкторско-технологических решений физико-химических методов обработки, логическая схема которого приведена на рис. 1.

Для организации доступа к данным, в банке конструкторско-технологических решений и работы с ними создана диалоговая среда конечного пользователя, которая является отображением логической схемы базы данных (рис. 1) в структуру многооконных экранов (рис. 2). Каждый экран диалоговой среды (рис. 2) состоит из одного или нескольких окон, которые служат для визуализации предлагаемых меню, форматов для задания числовых или символьных значений входных данных, рекомендуемых вариантов технологических решений и результатов их выбора.

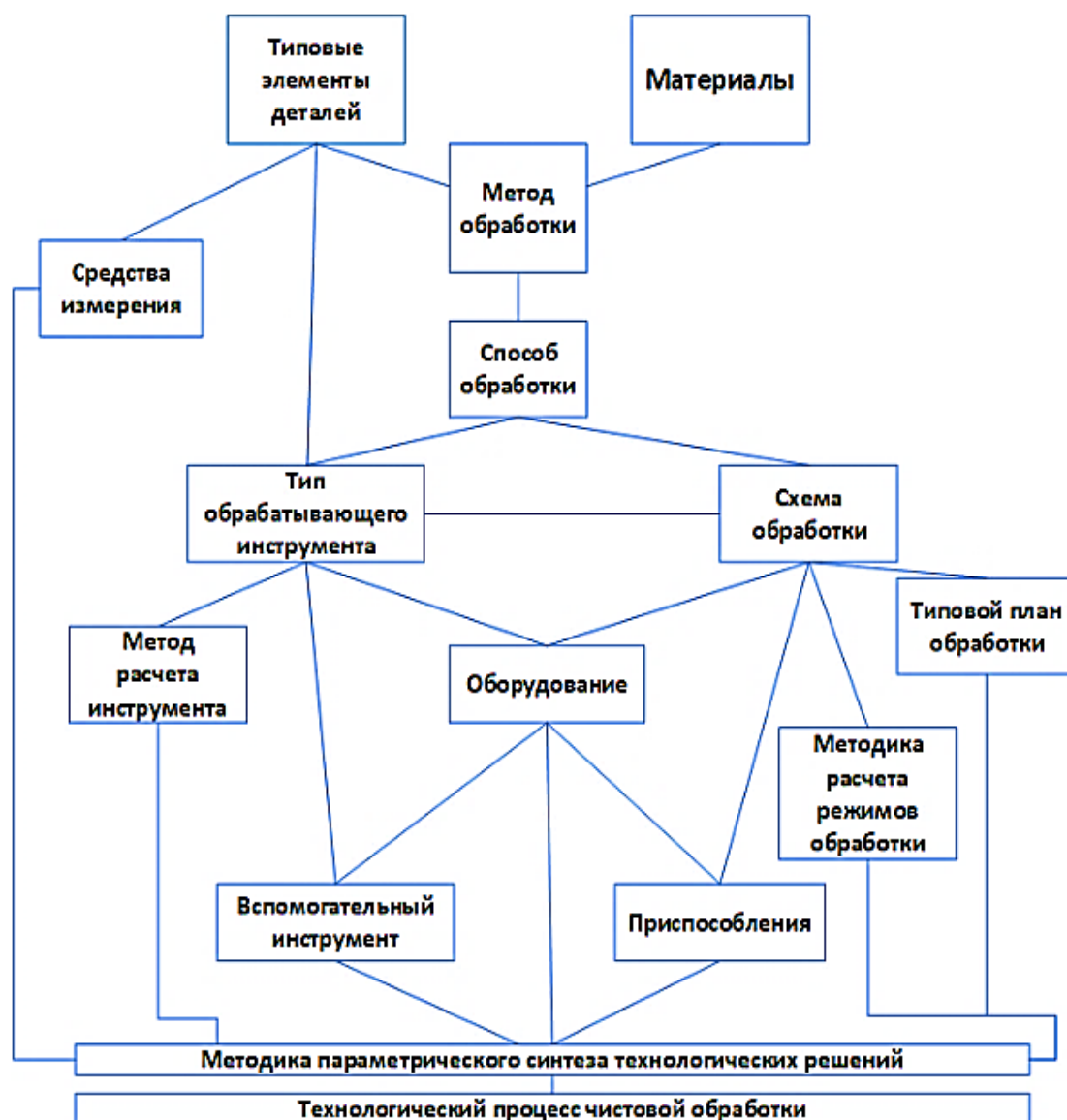


Рис. 1. Логическая схема данных электронного банка конструкторско-технологических решений

По отношению к элементам деталей и методам обработки множества конструкторско-технологических решений в структуре банка образуются инвариантные цепи: от типовых элементов инструкций деталей машин и совокупности обрабатываемых материалов через методы, способы и схемы чистовой обработки до конкретных наборов типовых планов обработки, моделей оборудования, конструкций технологической оснастки, методик расчета режимов обработки и обрабатываемого инструмента (рис. 2).

Организация диалоговой среды на рис. 2 обеспечивает управление процессом проектирования технологий, дает возможность поэтапного сжатия области поиска технологических решений путем отработки производственной технологичности за счет определения множе-

ства возможных решений, проверки их на допустимость и выбора окончательных решений из числа допустимых. Таким образом при построении плана обработки осуществляется преобразование структуры конструктивных параметров обрабатываемой детали в структуру технологического процесса её изготовления.

Опыт показывает, что предложенный подход к созданию технологических банков данных и диалоговых сред пользователей обеспечивает возможность автоматизации проектирования большинства видов технологий чистовой обработки, в частности обработки резанием, что подтверждено созданием и промышленной эксплуатацией ряда систем автоматизированного проектирования технологических процессов изготовления наукоемких деталей машиностроения.

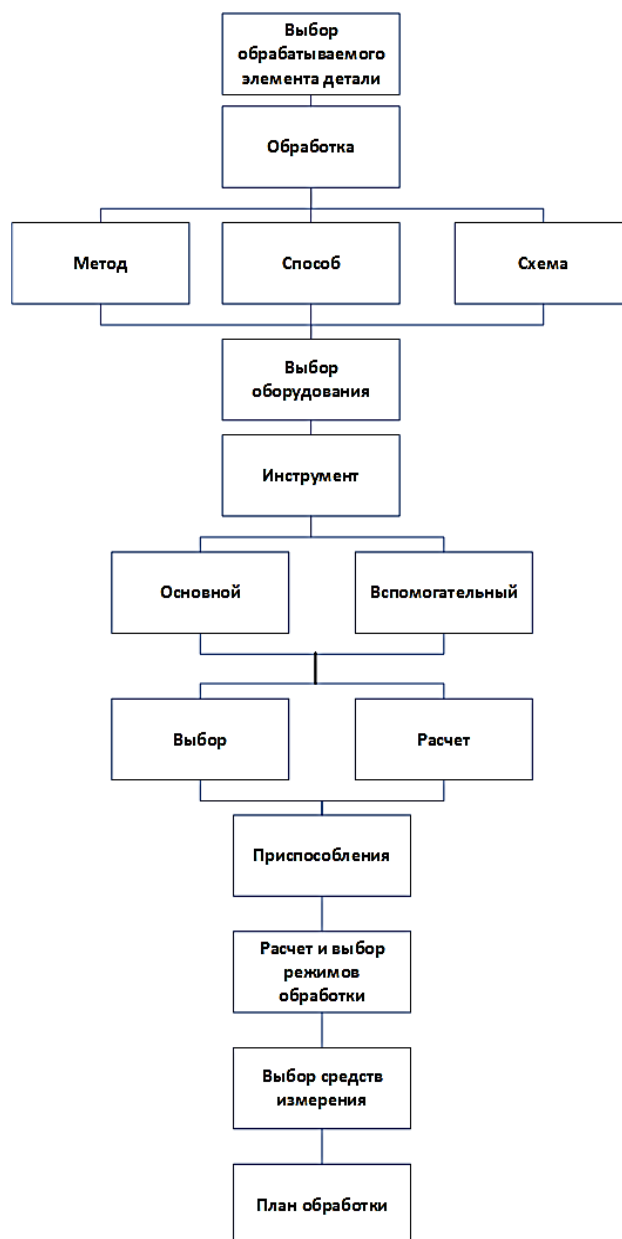


Рис. 2. Структура диалоговой среды конечного пользователя

### Структура принятия решений для комбинированной чистовой обработки

В ходе проведенных исследований установлен ряд перспективных способов чистовой обработки, одним из которых является комбинированная обработка внутренних поверхностей с анодным растворением припуска. Этот способ эффективен при обработке каналов различного профиля, в том числе с переменным сечением, как с прямолинейными, так и с криволинейными осями. Областью применения электрохимической и комбинированной обработки каналов являются детали редукторов, насосов, компрессоров, двигателей внутреннего сгорания, изделий

энергетического машиностроения, авиационно-космической отрасли промышленности.

Способы электрохимической и комбинированной с анодным процессом обработки каналов реализуются различными схемами [1], которые отличаются друг от друга по конструкции применяемых электродов-инструментов и комбинациям относительных перемещений инструмента и заготовки. Рассматриваемой схеме комбинированной обработки соответствует следующий типовый план обработки:

1. Подготовительная стадия по схеме на рис. 2 с выполнением операций:

1.1. Зачистка базовых поверхностей детали до металлического контакта для подвода тока при комбинированной обработке;

1.2. Контроль величины и места расположения припуска под обработку.

2. Операция по удалению припуска комбинированной обработкой.

2.1. Установить заготовку и после обработки снять;

2.2. Обработка заготовки.

3. Промывка объекта обработки.

4. Операция пассивации.

5. Контрольная операция.

Фрагмент структуры конструкторско-технологических решений для электрохимической и комбинированной обработки на примере изготовления наиболее простых, но широко используемых открытых и глухих круглых каналов с прямой осью, приведен на рис. 3.

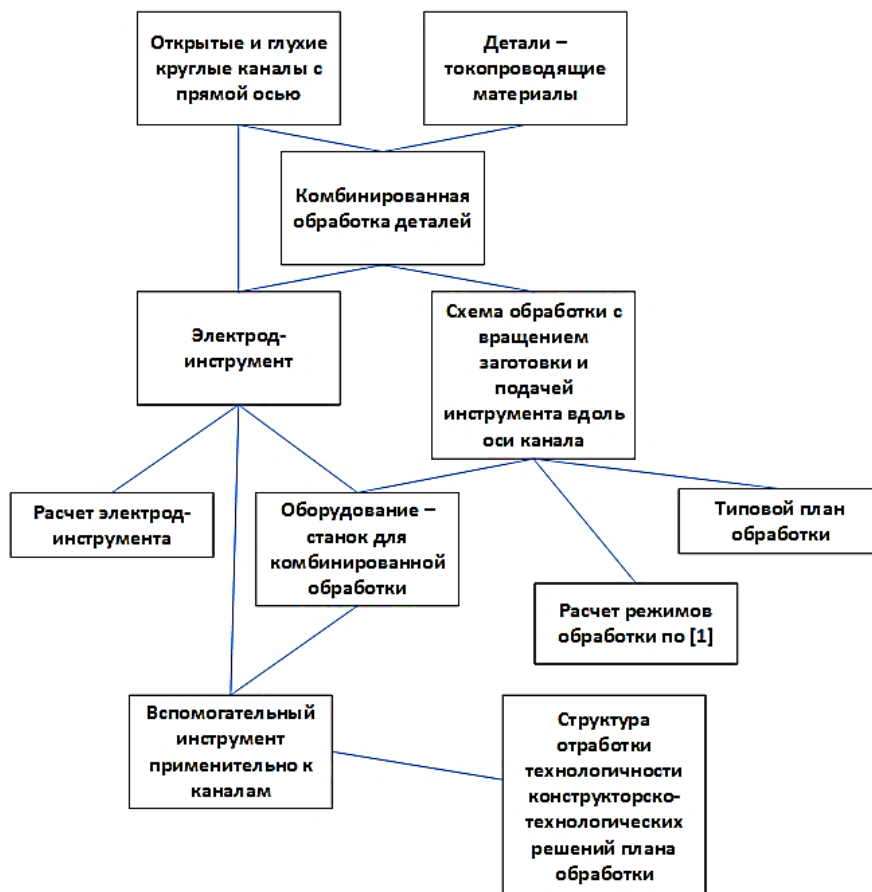


Рис. 3. Фрагмент построения структуры конструкторско-технологических решений

Логические схемы, приведенные в работе, в частности на рис. 3, позволили разработать автоматизированные способы диагностики и управления процессами в машиностроении и расширить возможности комбинированных методов обработки на применение их в медицинской технике. Так с участием авторов предложены [4] способы лечения парадонтоза, при которых введение лекарственных веществ осуществляется комбинированным воздействием анодного процесса и механического давления выработкой электрического тока за счет усилий сжатия зубов самого пациента без использования внешних источников энергии. Это позволило создать компактные приборы, обеспечивающие введение лечебных препаратов, например в экспедициях.

## Заключение

Разработанная структура банка конструкторско-технологических решений для комбинированных методов обработки обеспечивает комплексный подход, методическую, технологическую и информационную полноту информации при выборе, применении и технологическом обеспечении чистовых методов обработки при комбинации различных воздействий.

Структура банка конструктивно-технологических решений инвариантна по отношению к большинству методов, в том числе комбинированных с применением электрических, лучевых методов чистовой обработки, и успешно используется при проектировании технологий в машиностроении и других отраслях техники.

Рассмотрены перспективы применения предложенных логических связей для автоматизации процессов и диагностики в медицинской технике, что существенно расширяет область использования комбинированных методов обработки.

#### Литература

1. Смоленцев Е.В. Проектирование электрических и комбинированных методов обработки. М.: Машиностроение, 2005. 511 с.
2. Смоленцев В.П., Коптев И.Т. Нетрадиционные

методы обработки в точном машиностроении // Междунар. науч.-техн. конф. «ССП-2012». Воронеж: ВГКПТЭС, 2012. С. 114-124.

3. Смоленцев В.П., Кириллов О.Н., Рязанцев А.Ю. Технология низкочастотной импульсной чистовой обработки деталей пространственной формы / под. ред. А.В. Киричека // Прогрессивные машиностроительные технологии, оборудование и инструменты. Коллективная монография. М.: Издательский дом «Спектр», 2015. Т. 5. Раздел 5. С. 265-302.

4. Патент №2008037 Российская Федерация. Способ введения лекарственных препаратов в ткани пародонта: № 4928225; заявл. 17.04.1991; опубл. 28.02.1994; бюл. изобр. № 4 / Смоленцев В.П., Фролов В.Н., Малиновская Л.А.

Поступила 12.03.2024; принята к публикации 12.05.2024

#### Информация об авторах

**Смоленцев Владислав Павлович** – д-р техн. наук, профессор, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), тел.: 89036559970, e-mail: vsmolen@inbox.ru

**Кириллов Олег Николаевич** – д-р техн. наук, профессор, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: kirillov.olli@yandex.ru

**Извеков Александр Андреевич** – аспирант, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), тел.: 89038544706, e-mail: vmzizvekov@gmail.com

### EXPANDING OF THE SCOPE OF USE OF COMBINED HIGH-TECH TECHNOLOGIES IN MECHANICAL ENGINEERING

V.P. Smolentsev, O.N. Kirillov, A.A. Izvekov

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

**Abstract:** the paper considers the issues of expanding the scope of use of combined high technology technologies used at the final finishing stages of processing. As a result of research, over 40 processing methods have been systematized and schemes for their implementation have been considered. A method for solving the problem is proposed based on the use of an electronic bank of design and technological solutions. The results of systematization and unification of schemes and methods of combined physical-chemical, ultrasonic and radiation finishing methods obtained during the creation of a bank of technological solutions are presented. Promising methods for combined finishing of internal surfaces, in particular, channels of various cross-sections with straight and curved axes, due to anodic dissolution of the allowance, have been established. A brief description of the dialogue environment through which access to information from the technological solutions bank is organized is provided. Using the example of the combined processing method, methods for the practical application of research results in the design of finishing technologies for machine parts of an expanded range of various branches of mechanical engineering and related branches of technology are shown. In particular, the emerging possibilities of using the shown logical connections for the purpose of automating research and applied technologies in the field of medicine have been studied, which expands the capabilities of combined processing methods

**Key words:** combined methods, bank of design and technological solutions, technologies, design, scope of use

#### References

1. Smolentsev E.V. "Design of electrical and combined processing methods" ("Proyektirovaniye elektricheskikh i kombinirovannykh metodov obrabotki"), Moscow, Mashinostroenie, 2005, 511 p.
2. Smolentsev V.P. Koptev I.T. "Unconventional processing methods in precision engineering", International Scientific and Technical Conference SSP-2012, Voronezh, VGKPTES, 2012, pp. 114-124.
3. Smolentsev V.P., Kirillov O.N., Ryazantsev A.Yu., Smolentsev V.P. "Technology of low-frequency pulse finishing of spatial shape parts", *Advanced engineering technologies, equipment and tools (Progressivnyye mashinostroitel'nyye tekhnologii, oborudovaniye i instrumenty)*, vol. 5, a collective monograph ed. by A.V. Kirichek, section 5, Moscow, Spectrum, 2015, pp. 265-302.
4. Smolentsev V.P., Frolov V.N., Malinovskaya L.A. "The method of administration of drugs into periodontal tissues" ("Sposob vvedeniya lekarstvennykh preparatov v tkani parodonta"), Patent of RF no. 2008037, application 4928225 dated 17.04.1991, publ. 28.02.1994, bull. of invention no. 4.

Submitted 12.03.2024; revised 12.05.2024

#### Information about the authors

**Vladislav P. Smolentsev** - Dr. Sc. (Technical), Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: vsmolen@inbox.ru, tel. +79036559970

**Oleg N. Kirillov** - Dr. Sc. (Technical), Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: kirillov.olli@yandex.ru, tel. +79081472413

**Alexander A. Izvekov** - Postgraduate Student, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: vmzizvekov@gmail.com, tel. +79038544706

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОИЗВОДЯЩИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ФРЕЗ ДЛЯ ВЫСОКОПРОИЗВОДИТЕЛЬНОЙ ОБРАБОТКИ КРИВОЛИНЕЙНЫХ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС ЭКСЦЕНТРИКОВО-ЦИКЛОИДАЛЬНОГО ЗАЦЕПЛЕНИЯ

В.В. Куц, Ю.А. Мальнева

Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Россия

**Аннотация:** рассмотрен принципиально новый способ обработки криволинейных зубчатых колес эксцентриково-циклоидального зацепления с криволинейным профилем с применением специального инструмента. Выполнено моделирование поверхностей колёс эксцентриково-циклоидального зацепления с криволинейным профилем для малого и большого колеса. Показана схема формообразования малого колеса эксцентриково-циклоидального зацепления с применением фасонной фрезы с конструктивной радиальной подачей. Получена производящая поверхность фрезы, позволяющая выполнить все условия формообразования при реализации предложенной схемы формообразования малого колеса эксцентриково-циклоидального зацепления с криволинейным профилем. Для большого колеса предложена схема формообразования по методу обката с применением червячного колеса. Выполнено моделирование производящей поверхности червячной фрезы для формообразования поверхности большого колеса эксцентриково-циклоидального зацепления по методу обката. Данная производящая поверхность фрезы также позволяет выполнить все условия формообразования при реализации предложенной схемы формообразования. Данный подход может быть использован при проектировании фрез, предназначенных для обработки криволинейных зубчатых колес эксцентриково-циклоидального зацепления различных размеров. Применение подобных специальных инструментов позволит выполнить переход к серийному и массовому производству зубчатых колёс с данным эксцентриково-циклоидальным зацеплением

**Ключевые слова:** эксцентриково-циклоидального зацепление, фреза, моделирование, производящая поверхность

**Благодарности:** работа выполнена в рамках реализации программы развития ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет» проекта «Приоритет-2030»

### Введение

В настоящее время широко обсуждаются вопросы создания и применение новых видов зацеплений, а также вопросы проектирование на их базе новых зубчатых передач. Частным примером таких передач является эксцентриково-циклоидальное зубчатое зацепление с криволинейным профилем [1, 2] (рис. 1).



Рис. 1 Эксцентриково-циклоидальное зацепление с криволинейным профилем [5]

В работах [3, 4] и на интернет ресурсе [5] показаны основные преимущества данного вида зацепления по сравнению с традиционными (эвольвентными зацеплениями, зацеплениями Новикова и пр.) и несмотря на это, эксцентриково-циклоидальное зубчатое зацепление не получило широкого распространения. Одной из причин этого является отсутствие технологий (станков и инструментов), обеспечивающих массовый выпуск зубчатых колес с криволинейным профилем. Применение схем формообразования поверхностей данных зубчатых колес, основанных на многокоординатных пространственных перемещениях, с использованием станков с числовым программным управлением и универсального инструмента [6], работающего по методу касания или специализированного инструмента [7-8], работающего по методу копирования профиля зуба, не позволяет достигать высоких показателей по производительности, и может быть эффективно использовано лишь в условиях единичного и мелкосерийного производства. Для перехода к серийному и массовому производству необходима разработка новых высокопроизводительных схем формообразования и на их основе создание специализированных станков и инструментов.

Данная работа посвящена моделированию производящих поверхностей специализирован-

ных инструментов (фрез) на примере нескольких высокопроизводительных схем формообразования колёс эксцентриково-циклоидальное зубчатое зацепление с криволинейным профилем (рис. 2), в частности, для малого колеса эксцентриково-циклоидальной передачи (см. рис. 1). Рассмотрим схему формообразования с применением фасонных фрез с конструктивной радиальной подачей, а для большого колеса схему обработки по методу обката с применением червячного колеса.

### Моделирование поверхностей колёс эксцентриково-циклоидального зацепления с криволинейным профилем

В работах [9, 10] были приведены формулы для моделирования поверхностей зубчатых колёс эксцентриково-циклоидального зацепления с криволинейным профилем, на рис. 2 представлены результаты моделирования данных поверхностей.

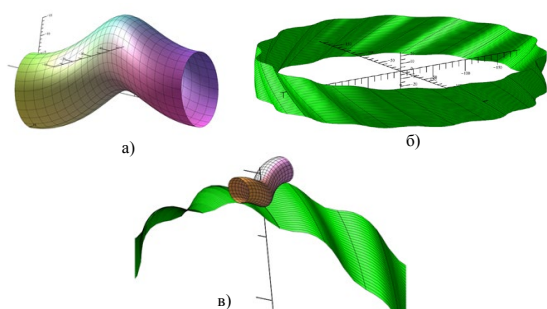


Рис. 2. Моделирование поверхностей колёс эксцентриково-циклоидального зацепления с криволинейным профилем по [9, 10]: а) малого колеса; б) большого колеса; в) в зацеплении

На рис. 3 приведена схема формообразования малого колеса эксцентриково-циклоидального зацепления с применением фасонных фрез с конструктивной радиальной подачей.

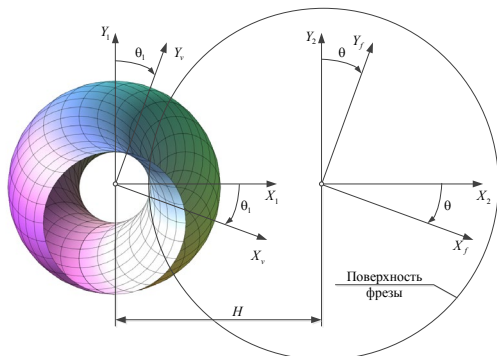


Рис. 3. Схема формообразования малого колеса эксцентриково-циклоидального зацепления с применением фасонной фрезы с конструктивной радиальной подачей

### Моделирование производящей поверхности фрезы

В соответствии с данной схемой, оси инструмента и нарезаемого колеса параллельны, частота вращения инструмента равна частоте вращения обрабатываемого колеса и формообразование поверхности колеса будет выполняться за один оборот фрезы. Производящую поверхность инструмента определим на основе построения семейства огибающих поверхностей, для чего составим основное уравнение формообразования [11-15] малого колеса эксцентриково-циклоидального зацепления с криволинейным профилем в соответствии со схемой (см. рис. 3)

$$\bar{r}_v(v, \alpha) = A_z \cdot \bar{r}_f(v, \alpha), \quad (1)$$

где  $\bar{r}_v(v, \alpha)$  - векторное уравнение поверхности обрабатываемого малого колеса эксцентриково-циклоидального зацепления [9, 10];

$v$  и  $\alpha$  - параметры поверхности колеса;

$A_z$  - матрица формообразующей системы;

$\bar{r}_f(v, \alpha)$  - уравнение производящей поверхности фрезы.

Матрица формообразующей системы  $A_z$  в соответствии со схемой формообразования (см. рис. 3) можно рассчитать, как

$$A_z = A^{(6)}(\theta_1) \cdot A^{(11)}(H) \cdot A^{(6)}(-\theta), \quad (2)$$

где  $A^{(6)}(\theta_1)$  - матрица поворота заготовки вокруг оси  $OZ_v$  на угол  $\theta_1$ ;

$$A^{(6)}(\theta_1) = \begin{bmatrix} \cos(\theta_1) & -\sin(\theta_1) & 0 & 0 \\ \sin(\theta_1) & \cos(\theta_1) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

где  $A^{(11)}(H)$  - матрица установки межосевого расстояния между осями вращения заготовки и фрезы на величину  $H$

$$A^{(11)}(H) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & H \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad (4)$$

где  $A^{(6)}(-\theta)$  - матрица поворота фрезы вокруг оси на угол  $\theta$

$$A^{(6)}(-\theta) = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) & 0 & 0 \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (5)$$

Уравнение производящей поверхности фрезы получим из уравнения (1)

$$\bar{r}_f(v, \alpha) = A_{\Sigma}^{-1} \cdot \bar{r}_v(v, \alpha). \quad (6)$$

Полученное, таим образом, уравнение (6) будет содержать четыре параметра  $v, \alpha, \theta_1, \theta$ , что является избыточным (необходимо наличие только двух параметров), и требует наложения связей на любые два параметра из четырёх. Поэтому на параметр вращения заготовки наложим кинематическую связь в соответствии с предложенной схемой формообразования

$$\theta_1 = \theta. \quad (7)$$

Количество параметров при этом сократится до трёх  $v, \alpha, \theta$  и уравнение (6) на данном этапе можно будет рассматривать как векторную функцию от трех аргументов  $\bar{r}_f(v, \alpha, \theta)$ . На параметр  $\theta$  наложим связь огибания путем решения относительно параметра  $\theta$  уравнение вида

$$\frac{\partial \bar{r}_f(v, \alpha, \theta)}{\partial v} \cdot \frac{\partial \bar{r}_f(v, \alpha, \theta)}{\partial \alpha} \cdot \frac{\partial \bar{r}_f(v, \alpha, \theta)}{\partial \theta} = 0 \quad (8)$$

или в матричном виде

$$\begin{bmatrix} \bar{i}_f \cdot \frac{\partial \bar{r}_f(v, \alpha, \theta)}{\partial v} & \bar{j}_f \cdot \frac{\partial \bar{r}_f(v, \alpha, \theta)}{\partial v} & \bar{k}_f \cdot \frac{\partial \bar{r}_f(v, \alpha, \theta)}{\partial v} \\ \bar{i}_f \cdot \frac{\partial \bar{r}_f(v, \alpha, \theta)}{\partial \alpha} & \bar{j}_f \cdot \frac{\partial \bar{r}_f(v, \alpha, \theta)}{\partial \alpha} & \bar{k}_f \cdot \frac{\partial \bar{r}_f(v, \alpha, \theta)}{\partial \alpha} \\ \bar{i}_f \cdot \frac{\partial \bar{r}_f(v, \alpha, \theta)}{\partial \theta} & \bar{j}_f \cdot \frac{\partial \bar{r}_f(v, \alpha, \theta)}{\partial \theta} & \bar{k}_f \cdot \frac{\partial \bar{r}_f(v, \alpha, \theta)}{\partial \theta} \end{bmatrix} = 0. \quad (9)$$

Решая уравнение (8) или (9), было установлено, что

$$\theta = \alpha. \quad (10)$$

и после замены  $\theta$  в (6) было получено уравнение производящей поверхности фрезы с конструктивной радиальной подачей

$$\bar{r}_f(v, \alpha) = \begin{bmatrix} \varepsilon \cdot \cos v - (H - \frac{d}{2}) \cos \alpha \\ \varepsilon \cdot \sin v - (H - \frac{d}{2}) \sin \alpha \\ \frac{l \cdot v}{2\pi} \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (11)$$

где  $\varepsilon$  - эксцентриситет обрабатываемого малого колеса;

$d$  - диаметр окружности сечения зуба;

$l$  - ширина (длина) колеса.

На рис. 4 показан результат моделирования производящей поверхности фрезы по (11) для малого колеса эксцентриково-циклоидального зацепления с криволинейным профилем при заданных параметрах [9,10]  $d=20$  мм,  $\varepsilon=5$  мм,  $l=50$  мм и  $H=200$  мм.

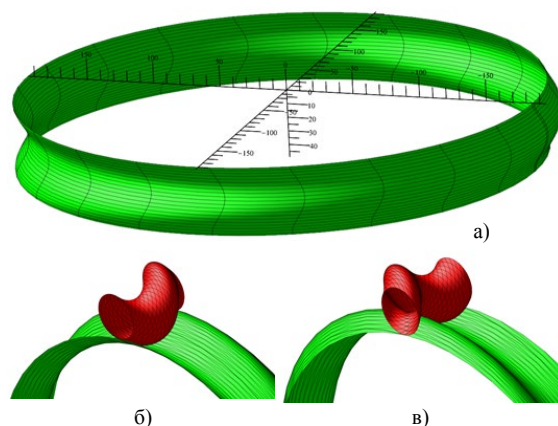


Рис. 4. Моделирование производящей поверхности фрезы: а) исходный вид производящей поверхности; б) в контакте с малым колесом, при  $\theta=0$ ; в) в контакте с малым колесом, при  $\theta=\pi$

Таким образом, полученная производящая поверхность фрезы (11) позволяет выполнить все условия формообразования при реализации предложенной схемы формообразования.

Для большого колеса рассмотрим схему формообразования по методу обката с применение червячного колеса (рис. 5).

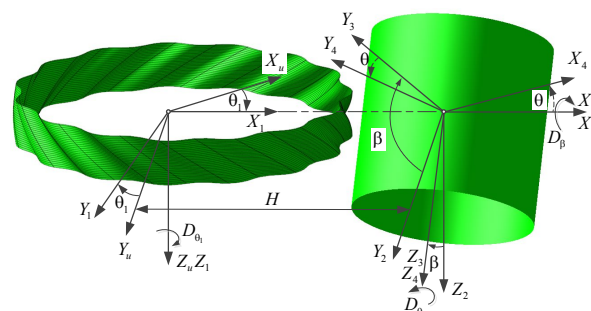


Рис. 5. Схема формообразования большого колеса эксцентриково-циклоидального зацепления по методу обката с применение червячного колеса

В соответствии с данной схемой производящая поверхность фрезы устанавливается на расстоянии  $H$  от оси большого колеса, и ось фрезы повернута на угол  $\beta$  советующий углу подъема линии криволинейной поверхности

зубьев. Частота вращения большого колеса будет в  $Z+1$  раз меньше частоты вращения фрезы, где  $Z$  - количество зубьев большого колеса и фреза совершает поступательное перемещение вдоль оси колеса.

Тогда, матрицу формообразования, входящую в основное уравнение формообразования (1) для данной схемы, запишем как

$$A_z = A^{(6)}(\theta_1) \cdot A^{(3)}(z) \cdot A^{(1)}(H) \cdot A^{(4)}(\beta) \cdot A^{(6)}(\theta), \quad (12)$$

где  $A^{(3)}(z)$  - матрица поступательного перемещения фрезы вдоль оси большого колеса на величину  $z$ ;

$A^{(4)}(\beta)$  - матрица поворота оси фрезы повернута на угол  $\beta$  соответствующий углу подъема линии криволинейной поверхности зубьев.

Уравнение производящей поверхности фрезы представим аналогично (6) в виде

$$\bar{r}_f(v, \alpha, \theta) = A_z^{-1} \cdot \bar{r}_u(v, \alpha), \quad (13)$$

где  $\bar{r}_u(v, \alpha)$  - векторное уравнение поверхности обрабатываемого большого колеса эксцентриково-циклоидального зацепления [9, 10].

Угол  $\beta$ , соответствующий углу подъема линии криволинейной поверхности зубьев, определим как

$$\beta = \arccos \left( \left[ \frac{\partial \bar{r}_u(v, \alpha)}{\partial v} \cdot \left| \frac{\partial \bar{r}_u(v, \alpha)}{\partial v} \right|^{-1} \right] \cdot \left[ \frac{\partial \bar{r}_u^{XY}(v, \alpha)}{\partial v} \cdot \left| \frac{\partial \bar{r}_u^{XY}(v, \alpha)}{\partial v} \right|^{-1} \right] \right)_{v=0, \alpha=0}, \quad (14)$$

где  $\bar{r}_u^{XY}(v, \alpha)$  - проекция векторной функции  $\bar{r}_u(v, \alpha)$  на координатную плоскость  $OX_uY_u$

$$\bar{r}_u^{XY}(v, \alpha) = \begin{bmatrix} \bar{i}_u \cdot \bar{r}_u(v, \alpha) \\ \bar{j}_u \cdot \bar{r}_u(v, \alpha) \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (15)$$

Для получения уравнения производящей поверхности, зададим следующие связи:

$$z = 0; \quad (16)$$

$$\theta_1 = -\frac{\theta}{Z+1}. \quad (17)$$

Связь огибания, применительно к данной схеме, наложим на параметр  $v$  для чего составим

уравнение, аналогичное уравнению (8) или (9) и решим его относительно параметра  $v$ . С учетом установленной связи огибания уравнение производящей поверхности фрезы в общем виде может быть представлено, как

$$\bar{r}_f(\alpha, \theta) = \bar{r}_f(v = f(\alpha, \theta), \alpha, \theta). \quad (18)$$

На рис. 6. показан пример изменение связи  $v = f(\alpha, \theta)$  для большого колеса с параметрами [9,10]  $d=20$  мм,  $\varepsilon=5$  мм,  $l=50$  мм,  $a=200$  мм,  $Z=15$  и  $H=200$  мм.

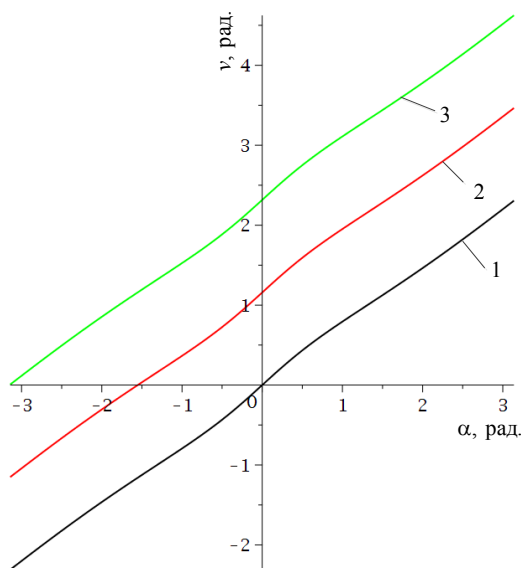


Рис. 6. Пример реализации связи огибания  $v = f(\alpha, \theta)$ : 1) при  $\theta=0$ ; 2) при  $\theta=\pi/2$ ; 3) при  $\theta=\pi$

А на рис. 7 показана модель участка производящей поверхности при заданных интервалах параметров  $\alpha=[-2\pi; 2\pi]$  и  $\theta=[0; 2\pi]$ .

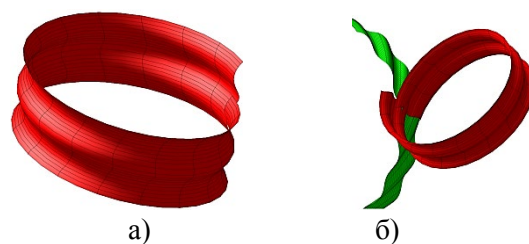


Рис. 7. Моделирование производящей поверхности червячной фрезы для формообразования поверхности большого колеса эксцентриково-циклоидального зацепления по методу обката: а) исходная поверхность; б) в контакте с поверхностью большого колеса

Данная производящая поверхность фрезы также позволяет выполнить все условия формообразования при реализации предложенной схемы формообразования.

## Заключение

Таким образом, в соответствии с предложенными схемами формообразования малого и большого криволинейного зубчатого колеса эксцентриково-циклоидальной передачи, были разработаны методы расчета точек производящих фрез: фрезы фасонной с конструктивной радиальной подачей и червячной фрезы, работающей по методу обката. Данный подход, может быть использован при проектировании фрез, предназначенных для обработки криволинейных зубчатых колес эксцентриково-циклоидального зацепления различных размеров. Применение подобных инструментов позволит выполнить переход к серийному и массовому производству зубчатых колес с данным зацеплением.

## Литература

1. Эксцентриково-циклоидальное зацепление зубчатых колес и механизмы на его основе / В.В. Становский, С.М. Казакиявичус, Т.А. Ремнева, В.М. Кузнецов // Теория и практика зубчатых передач и редукторостроения: сб. докл. науч.-техн. конф. ИжГТУ. Ижевск, 2008. С. 148-152.
2. Двухступенчатый редуктор на основе эксцентриково-циклоидального зацепления (зацепление ExCyGear) / В.В. Становской, С.М. Казакиявичус, Т.А. Ремнева, В.М. Кузнецов, А.М. Бубенчиков, Н.Р. Щербаков, Й. Шмидт // Вестник машиностроения. 2011. № 12. С. 41-43.
3. Становской В.В., Казакиявичус С.М., Ремнева Т.А. Преимущества использования эксцентриково-циклоидального (ЭЦ) зацепления в главных передачах транспортных средств (по результатам сравнительных испытаний) // XII Международная научно-техническая конференция «Современные проблемы машиностроения». Томск, 2019. С. 70-76.
4. Работоспособность эксцентриково-циклоидального зацепления при изменении межосевого расстояния колес. Модификация вершин и впадин зубьев / С.М. Казакиявичус, В.В. Становской, Т.А. Ремнева и др. // Вестник машиностроения. 2011. № 3. С. 7-9.
5. Technology market. URL: <http://www.ecgearing.com/> (дата обращения: 08.04.2024г.).
6. Математическое моделирование процесса формообразования деталей конического передаточного механизма с ЭЦ-зацеплением / С.А. Камчатный, В.М. Кузнецов, А.В. Сквородин, Н.Р. Щербаков // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. 2014. № 2(28). С. 5-17.
7. Бубенчиков А.М., Казакиявичус С.М., Костарев А.А. Математическое моделирование профильной фрезы для обработки деталей цилиндрической передачи // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. 2016. № 4(42). С. 5-14.
8. Костарев А.А. Геометрическое моделирование процесса обработки профильной фрезой деталей передаточного механизма с эксцентриково-циклоидальным зацеплением // Сборник статей. Томск, 24–30 апреля. Томск: Национальный исследовательский Томский государственный университет, 2015. С. 16-21.
9. Щербаков Н.Р. Математическая модель планетарного передаточного механизма с эксцентриково-циклоидальным зацеплением // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. 2009. № 1 (19). Ч. 1. С. 77-81.
10. Щербаков Н. Р. Математическое и компьютерное моделирование динамического состояния систем передачи движения: специальность 05.13.18 "Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ": дис. ... д-ра физ.-мат. наук. Томск, 2009. 213 с.
11. Лашнев С.И., Борисов А.Н., Емельянов С.Г. Геометрическая теория формирования поверхностей режущих инструментов. Курск : Курский государственный технический университет, 1997. 391 с.
12. Решетов Д.Н., Портман В.Т. Точность металлорежущих станков. М.: Машиностроение, 1986. 336 с.
13. Куц В.В. Методология предпроектных исследований специализированных металлорежущих систем : специальность 05.02.07 "Технология и оборудование механической и физико-технической обработки" : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. Курск, 2012. 365 с.
14. Куц В.В., Разумов М.С., Мальнева Ю.А. Моделирование производящих поверхностей фрез с конструктивной радиальной подачей для обработки эксцентриковых валов // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2016. № 8-1. С. 126-131.
15. Моделирование производящих поверхностей торцевых фрез с конструктивной осевой подачей для обработки валов с равноосным контуром / В.В. Куц, Д.С. Гридин, М.С. Разумов, О.С. Зубкова // Известия Юго-Западного государственного университета. 2018. № 4(79). С. 24-31.

Поступила 29.03.2024; принята к публикации 13.05.2024

## Информация об авторах

**Куц Вадим Васильевич** – д-р техн. наук, профессор кафедры машиностроительных технологий и оборудования, Юго-Западный государственный университет (305040, Россия, г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94), e-mail: [kuc-vadim@yandex.ru](mailto:kuc-vadim@yandex.ru)  
**Мальнева Юлия Андреевна** – канд. техн. наук, доцент, зав. кафедрой дизайна и индустрии моды, Юго-Западный государственный университет (305040, Россия, г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94), e-mail: [yuliyamaximencko2010@yandex.ru](mailto:yuliyamaximencko2010@yandex.ru)

## MODELING OF THE PRODUCING SURFACES OF MILLING CUTTERS FOR HIGH-PERFORMANCE MACHINING OF CURVED GEARS ECCENTRIC-CYCLOIDAL ENGAGEMENT

V.V. Kutz, Yu.A. Malneva

Southwest State University, Kursk, Russia

**Annotation:** in this paper, a fundamentally new method of processing curved gears of eccentric-cycloidal engagement with a curved profile using a special tool is considered. The surfaces of wheels of eccentric-cycloidal engagement with a curved profile for small and large wheels are simulated. The scheme of forming a small wheel of eccentric-cycloidal engagement using a shaped milling cutter with a constructive radial feed is shown. The producing surface of the milling cutter is obtained, which allows to fulfill all the conditions of shaping when implementing the proposed scheme for shaping a small wheel of eccentric-cycloidal engagement with a curved profile. For a large wheel, a shaping scheme using the rolling method using a worm wheel is proposed. Modeling of the producing surface of a worm mill for shaping the surface of a large wheel of eccentric-cycloidal engagement using the rolling method is performed. This milling cutter producing surface also allows you to fulfill all the shaping conditions when implementing the proposed shaping scheme. This approach can be used in the design of milling cutters designed for working curved gears of eccentric-cycloidal engagement of various sizes. The use of such special tools will make it possible to make the transition to serial and mass production of gears with this eccentric-cycloidal engagement

**Key words:** eccentric-cycloidal engagement, milling cutter, modeling, producing surface

**Acknowledgments:** The work was carried out within the framework of the implementation of the development program of the Southwestern State University of the Priority 2030 project

### References

1. Stanovskiy V.V., Kazakevicius S.M., Remneva T.A., Kuznetsov V.M. "Eccentric-cycloidal gearing of gears and mechanisms based on it", *Theory and practice of gears and gearboxes (Teoriya i praktika zubchatykh peredach i reduktorostroyeniya)*, coll. of rep., scientific and technical conf. IzhSTU, Izhevsk, 2008, pp. 148-152.
2. Stanovskoy V.V., Kazakevicius S.M., Remneva T.A., Kuznetsov V.M., Bubenichikov A.M., Shcherbakov N.R., Schmidt J. "Two-stage gearbox based on eccentric-cycloidal gearing (ExCyGear gearing)", *The Bulletin of Mechanical Engineering (Vestnik mashinostroyeniya)*, 2011, no. 12, pp. 41-43.
3. Stanovskoy V.V., Kazakevicius S.M., Remneva T.A. "Advantages of using eccentric cyclic (EC) gearing in the main gears of vehicles (based on the results of comparative tests)", *Modern problems of mechanical engineering (Sovremennyye problemy mashinostroyeniya)*, XII International Scientific and Technical Conference, Tomsk, 2019, pp.70-76.
4. Kazakevicius S.M., Stanovskoy V.V., Remneva T.A. et al. "Efficiency of eccentric-cycloidal engagement when changing the axial distance of the wheels. Modification of peaks and depressions of teeth", *The Bulletin of Mechanical Engineering (Vestnik mashinostroyeniya)*, 2011, no. 3, pp. 7-9.
5. "Technology market", available at: <http://www.ec-gearing.com/> (accessed 08.04.2024).
6. Kamchatny S.A., Kuznetsov V.M., Skovorodin A.V., Shcherbakov N.R. "Mathematical modeling of the shaping process of parts of a conical transmission mechanism with EC engagement", *The Bulletin of Tomsk State University. Mathematics and mechanics (Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika i mekhanika)*, 2014, no. 2 (28), pp. 5-17.
7. Bubenichikov A.M., Kazakevicius S.M., Kostarev A.A. "Mathematical modeling of a profile milling cutter for processing cylindrical transmission parts", *The Bulletin of Tomsk State University. Mathematics and mechanics (Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika i mekhanika)*, 2016, no. 4 (42), pp. 5-14.
8. Kostarev A.A. "Geometric modeling of the machining process with a profile milling cutter of parts of a transfer mechanism with eccentric-cycloidal engagement", coll. of articles, Tomsk, 2015, April 24-30, Tomsk, Natsional'nyy issledovatel'skiy Tomskiy gosudarstvennyy universitet, 2015, pp. 16-21.
9. Shcherbakov N.R. Mathematical model of a planar transmission mechanism with eccentric-cycloidal engagement // Reports of the Tomsk State University of Control Systems and Radio Electronics. 2009. No. 1 (19). Part 1. pp. 77-81.
10. Shcherbakov N. R. Mathematical and computer modeling of the dynamic state of motion transmission systems: specialty 05.13.18 "Mathematical modeling, numerical methods and software packages": dissertation for the degree of Doctor of Physical and mathematical Sciences. Tomsk, 2009. 213 p.
11. Lashnev S.I., Borisov A.N., Yemelyanov S.G. "Geometric theory of surface formation by cutting tools" ("Geometricheskaya teoriya formirovaniya poverkhnostey rezhushchimi instrumentami"), Kursk, Kurskiy gosudarstvennyy tekhnicheskii universitet, 1997, 391 p.
12. Reshetov D.N., Portman V.T. "Precision of metal-cutting machines" ("Geometricheskaya teoriya formirovaniya poverkhnostey rezhushchimi instrumentami"), Moscow, Mashinostroenie, 1986, 336 p.
13. Kutz V.V. "Methodology of pre-design studies of specialized metal-cutting systems" ("Metodologiya predproyektnykh issledovaniy spetsializirovannykh metallorezhushchikh system"), specialty 05.02.07 "Technology and equipment of mechanical and physico-technical processing", diss. Dr. Sc. (Technical) degree, Kursk, 2012, 365 p.
14. Kutz V.V., Razumov M.S., Malyneva Yu.A. "Modeling of the producing surfaces of cutters with a structural radial feed for processing eccentric shafts", *Proc. of Tula State University. Technical sciences ("Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskiye nauki")*, 2016, no. 8-1, pp. 126-131.
15. Kutz V.V., Gridin D.S., Razumov M.S., Zubkova O.S. "Modeling of the producing surfaces of end mills with a constructive axial feed for working shafts with an equiaxed contour", *Proc. of the Southwest State University (Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta)*, 2018, no. 4 (79), pp. 24-31.

Submitted 29.03.2024; revised 13.05.2024

### Information about the authors

**Vadim V. Kuts** – Dr. Sc. (Technical), Professor of the Department of Mechanical Engineering Technologies and Equipment, Southwestern State University (94 50 let Oktyabrya str., Kursk 305040, Russia), e-mail: [kuc-vadim@yandex.ru](mailto:kuc-vadim@yandex.ru)  
**Yulia A. Malneva** – Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Head of the Department of Design and Fashion Industry, Southwestern State University (94 50 let Oktyabrya str., Kursk 305040, Russia), e-mail: [yuliyamaximencko2010@yandex.ru](mailto:yuliyamaximencko2010@yandex.ru)

## ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ТРЕХМЕРНОГО СКАНИРОВАНИЯ ДЛЯ СОЗДАНИЯ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ СТАНОЧНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

О.А. Рябинина, А.И. Болдырев, А.А. Болдырев, Д.Ю. Левин

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

**Аннотация:** описывается возможность применения технологии трехмерного сканирования для создания цифрового двойника станочного оборудования и его дальнейшего использования в процессе технологической подготовки производства. Цифровой двойник – это инструмент оптимизации работы специалистов, позволяет воссоздать инфраструктуру и логику операций физического объекта. Полученные таким способом цифровые модели станочного оборудования можно будет использовать в дальнейшем в автоматизированных системах управления предприятием, а также при грамотном проектировании планировок участков и производственных потоков в трехмерном пространстве, где двойник выступит в качестве 3D темплета оборудования для более оптимальной организации производственного процесса. Программно-аппаратные комплексы, предназначенные для обучения, в том числе самостоятельного, навыкам работы на станках производства, оснащенных системами числового программного управления (ЧПУ), могут использовать цифровой двойник для создания и симуляции программ ЧПУ на компьютере. Являясь полным виртуальным прототипом реального станка, он позволяет не только обучать работе с системами ЧПУ, но и, не тратя станочного времени, отлаживать ранее разработанные программы обработки, исключая с его помощью возможные столкновения узлов станка, устраняя дефекты и неточности программ, оптимизируя режимы работы. Приведен алгоритм проведения трехмерного сканирования станочного оборудования и пояснения к нему. Применение указанных технологий направлено на сокращение сроков технологической подготовки производства за счёт создания цифровой библиотеки станочного оборудования

**Ключевые слова:** цифровые двойники; трехмерное сканирование; станочное оборудование; технологическая подготовка производства; цифровой технологический процесс

### Введение

Технология цифровых двойников появилась совсем недавно. Создание виртуальных или цифровых двойников для установок и физических объектов появилось в начале XXI века.

Цифровой двойник (ЦД) представляет собой виртуальную копию физического мира, виртуальную модель реального объекта или ситуации, которая на микро- и макроуровне с помощью набора математических моделей описывает состояние объекта и всех его элементов [1].

Цифровой двойник не ограничивается сбором данных, полученных на стадии разработки и изготовления продукта — он продолжает собирать и анализировать данные во время всего жизненного цикла реального объекта. Технология цифровых двойников позволяет получить дополнительные проценты повышения выработки или снижения износа и энергопотребления без замены и реконструкции дорогостоящего промышленного оборудования.

Цифровые двойники оборудования представляют собой мощный инструмент для оптимизации производственных процессов. Способы их получения разнообразны и часто комбинируют различные технологии для достижения наилучших результатов [2].

Чаще всего оцифровка оборудования производится либо с помощью традиционных инструментов измерения, но в малых долях (для проектирования станочных приспособлений (СП) определяются габаритные размеры рабочей области и специфичные элементы), либо строится трехмерная графическая модель производства, без учета размеров и технических характеристик, для использования в процессах проектирования планировки участка и производственных потоков (вместо двумерных «темплетов», которые наиболее распространены для данных задач) [3].

### Методы исследования

Трехмерное сканирование (3D-сканирование) — это процесс анализа реального объекта или окружающей среды с целью сбора трехмерных данных о его форме и, возможно, внешнем виде (например, цвете). Собранные

данные затем могут быть использованы для построения цифровых 3D-моделей [4].

Основная цель 3D-сканирования — получить точное и детальное представление о форме и геометрии объекта в трех измерениях. Данную технологию можно считать одним из способов получения цифрового двойника любого вида изделия. Процесс трехмерного сканирования представлен на рис. 1.



Рис. 1. Процесс 3D-сканирования

3D-сканирование играет важную роль в отрасли машиностроения, предоставляя множество преимуществ и возможностей. Вот несколько ключевых аспектов значения 3D-сканирования в этой отрасли:

1. Проектирование и прототипирование — создание точных 3D-моделей существующих объектов, например деталей, машин и инструментов, позволяет инженерам и дизайнерам проектировать новые изделия на основе реальных данных. 3D-сканирование помогает ускорить процесс прототипирования, обеспечивая точные геометрические данные для создания прототипов и тестирования новых продуктов.

2. Качество и контроль производства — 3D-сканирование используется для контроля качества и точности изготавливаемых деталей и изделий. Сканирование может выявлять дефекты и отклонения в реальном времени, что

помогает улучшить процессы производства и предотвратить брак.

3. Реверс-инжиниринг — этот процесс позволяет воссоздавать 3D-модели существующих деталей и систем, которые могут быть устаревшими или недоступными. Это особенно полезно для замены деталей в старых машинах и оборудовании, без необходимости создания новых чертежей с нуля.

4. Оптимизация производственных процессов — 3D-сканирование может использоваться для анализа и оптимизации производственных процессов, включая распределение оборудования, определение оптимальных путей передвижения материалов и оптимизацию производственных линий [5].

5. Снижение времени и затрат — внедрение 3D-сканирования в процессы машиностроения помогает снизить время на создание документации и уменьшить затраты на разработку и производство. Это особенно важно в условиях конкурентного рынка.

6. Совместное проектирование и сотрудничество — 3D-модели, созданные с помощью сканирования, могут быть легко обменены и использованы в совместных проектах и командной работе, что улучшает коммуникацию и сотрудничество между различными отделами и компаниями.

3D-сканирование — довольно сложный процесс, требующий отлаженных действий со стороны специалиста. Как его применение в отрасли непосредственно по назначению, так и предшествующие и последующие этапы имеют свою последовательность работы и определенные ограничения. Универсальный алгоритм работы с 3D-сканером существует и прописан в каждом техническом паспорте к оборудованию [6].

Далее будет представлен алгоритм действий при трехмерном сканировании станочного оборудования, и описано на что следует обратить внимание на каждом из этапов.

#### **Методика создания цифрового двойника станочного оборудования**

Последовательность действий при сканировании станочного оборудования будет определяться на основе общего алгоритма работы с 3D-сканерами, а также спецификой объекта, над которым будут проводиться работы. На рис. 2 приведен алгоритм 3D-сканирования станочного оборудования в виде блок-схемы.

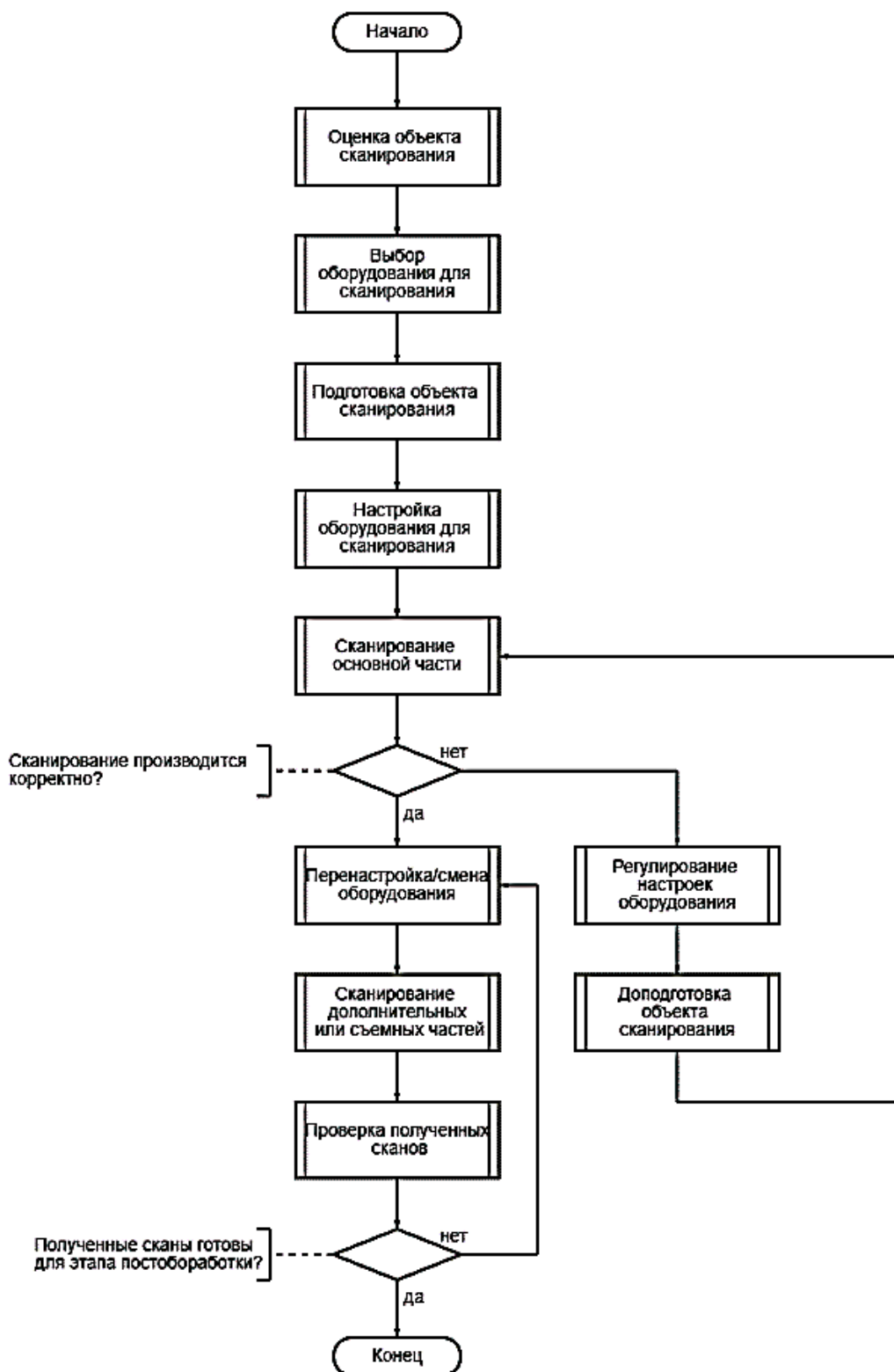


Рис. 2. Алгоритм 3D-сканирования станочного оборудования

Пояснения к алгоритму 3D-сканирования станочного оборудования:

Этап 1. Оценка объекта сканирования.

Оцениваются размеры объектов, которые будут отсканированы. Это требуется для выбо-

ра правильной конфигурации сканера и определения области сканирования. Определяются участки, которые требуют более детального сканирования (рабочая область и другие, которые могут быть задействованы в дальнейшем

процессе нисходящего проектирования (проектирования по месту) как база).

Если станок подвижен, то его следует расположить так, чтобы он был виден со всех сторон, а его поверхности были доступны для сканирования. Не допускается наличие непрозрачных поверхностей или препятствий в зоне наиболее точной детализации, которые могли бы помешать процессу сканирования. Необходимо определить в каком положении будет сканироваться станок, где будут располагаться рабочие органы при сканировании (в минимальном или максимальном положении) и, если объект имеет большое количество элементов, то его следует разобрать и отсканировать важные части отдельно.

Также на качество полученной модели влияет освещение вокруг станка. Следует воспользоваться дополнительными источниками света, чтобы на объекте не было затемненных участков, так как они не будут обработаны сканером.

Этап 2. Выбор оборудования для сканирования.

Данный этап должен проводиться на основе имеющейся базы станков, которые будут оцифрованы, их габаритов, геометрии, конфигурации, сложности конструкций и т.д. В первую очередь идет выбор между типами сканеров: лазерный или оптический.

Лазерные сканеры обычно более точны и могут лучше обрабатывать сложные геометрические формы. Они часто используются в промышленности для сканирования объектов с высокой точностью. Обеспечивают более высокую точность и разрешение, что делает их предпочтительными для задач, где требуется углубленная детализация. Часто они лучше подходят для сканирования твердых и непрозрачных материалов. Но зачастую такие сканеры могут быть более дорогими и требовать определенных знаний в области 3D-сканирования.

Оптические сканеры в ряде случаев могут быть более удобными для сканирования объектов, где важны цвета и текстуры. Они также могут быть более эффективными для сканирования крупных объектов, обеспечивать достаточную точность, но не всегда на том же уровне, что и лазерные сканеры. Требуют больше времени на сбор данных, особенно если важны высокие разрешение и детализация. Такое оборудование лучше работает с прозрачными и светопроницаемыми материалами. Оптические сканеры более доступны и просты в использовании, рынок представителей шире в разном ценовом диапазоне.

После того как был определен тип съемки, следует выбрать оборудование по его техническим характеристикам: допустимой точности, размерам сканируемой области, возможности работать в стационарном и ручном режимах;

Этап 3. Подготовка объекта сканирования.

Объект должен быть чистым и свободным от лишних элементов. Требуется убрать пыль, грязь, следы пальцев или любые другие загрязнения, которые могут повлиять на качество сканирования. Рабочая область вокруг объекта должна быть свободна от ненужных предметов и препятствий, которые могут мешать процессу сканирования. Станок и все его компоненты закрепляются так, чтобы они оставались неподвижными в течение всего процесса сканирования. Затем производится обработка блестящих поверхностей матирующим антибликовым спреем и размещение опорных точек (маркеров).

Рекомендуется размещать маркеры случайным образом, чтобы программа сканирования могла правильно определить их местоположение. В этом случае в большинстве мест маркеры размещаются на расстоянии 250–350 мм друг от друга.

Однако на узких участках и кромках (например, кромке крыла) целесообразно размещать их немного ближе, поскольку кромка имеет ограниченную площадь поверхности. Минимальное количество маркеров в поле сканирования на таких участках должно быть четыре. Чем выше уровень детализации объекта (например, рабочие органы станочного оборудования), тем больше маркеров следует установить на каждой из поверхностей компонентов. Чем ниже уровень детализации и проще геометрия формы, тем меньше опорных точек требуется. В нормативной документации к сканеру указывается рекомендуемое количество меток для сканирования.

Этап 4. Настройка оборудования для сканирования.

К оборудованию для сканирования помимо самого 3D-сканера относится еще и устройство, к которому он будет подключаться, и где будет строиться цифровая модель станочного оборудования (например, персональный компьютер или ноутбук). Перед процессом сканирования должно быть установлено и протестировано программное обеспечение для работы со сканером и формирования облака точек.

При подключении сканера в программе выставляются настройки разрешения, скорости сканирования, уровня детализации. Также проводится процедура калибровки сканера для

обеспечения точности и правильности полученных данных.

Этап 5. Сканирование основной части.

После всех подготовительных работ начинается процесс трехмерного сканирования. Сначала выбирается позиционирование сканера относительно объекта — статичное или подвижное. При работе со средними и большими станками будет производиться подвижное сканирование. Здесь главное выдерживать расстояние до станочного оборудования. У каждого сканера есть оптимальное расстояние, которое должно быть между сканером и сканируемым объектом (указывается в руководстве к каждому сканеру). Это требуется для четкого захвата высококачественных 3D-данных. При движении сканера важно следить за расстоянием до объекта. Сканер перемещается таким образом, чтобы даже при сканировании под разными углами расстояние было примерно одинаковым. Это помогает избежать потери сканера в пространстве и траты времени на поиск исходного положения. Если требуется приблизиться к объекту, во время сканирования мелких элементов, то следует воспользоваться кнопками оптического увеличения/уменьшения на самом сканере, что позволит заснять участки более подробно без потери координат.

Этап 6. Перенастройка или смена оборудования.

Во время трехмерного сканирования важно отслеживать получающийся результат. В процессе на сканируемые участки можно наносить дополнительно матирующий спрей или добавлять новые маркеры, если какие-то поверхности не получаются считать, но при этом важно следить, чтобы положение старых опорных точек не было при этом изменено.

Также, если позволяют ресурсы, то лучше производить смену оборудования в зависимости от типа сканируемых объектов. То есть для мелких и более детализированных частей использовать другой тип сканера, чем на съемку основной геометрии. При использовании одного сканера во время перехода со сканирования основной геометрии на рабочие органы требуется внести изменения в настройки сканирования: поменять уровень детализации, разрешение и скорость съемки.

Этап 7. Сканирование дополнительных или съемных частей.

Данный этап по своим действиям не отличается от процесса съемки основной части станочного оборудования. Требования к подготовке объектов для сканирования такие же, а перена-

стройка самого оборудования аналогична действиям выполняемыми на предыдущем этапе.

Этап 8. Проверка полученных сканов.

В программном обеспечении для сканирования следует проверить полученные облака точек на пустые участки («дыры» в модели), возможно ли их будет сшить вручную или требуется досканирование. Также проверяется, чтобы все стороны оборудования были отображены в проекте и имели общие опорные точки, по которым далее будет происходить их «сшивки» в одну цифровую модель.

Если возникли проблемы с полученными облаками точек и требуется повторное сканирование каких-либо элементов, то следует вернуться к этапу 6, выполнить перенастройку оборудования для сканирования, а также проверит объекты, которые будут оцифровываться на соответствие критериям, выявленным на этапе 3.

При готовности оцифрованной модели она сохраняется в нужном формате для дальнейшего использования в процессе технологической подготовки производства.

### **Трехмерное сканирование станочного оборудования**

Данная методика была апробирована на оборудовании кафедр технологии машиностроения и графики, конструирования и информационных технологий в промышленном дизайне Воронежского государственного технического университета. Для процесса трехмерного сканирования был использован оптический сканер SHININDG 3D EinScan Pro EP. Это профессиональный ручной сканер с высоким разрешением, который подходит для работы как начинающих, так и опытных пользователей. Он обеспечивает высокое разрешение и точность при ручном сканировании, а также при фиксированном сканировании. Зона работы данного оборудования 209x160 мм - 310x240 мм, расстояние до объекта 510 мм, скорость сканирования в ручном режиме 10 кадров/сек или 3000000 точек/сек; а точность до 0,05 мм (при фиксированном позиционировании сканера, в ручном режиме до 0,1 мм). Для получения трехмерной модели сканер подключается напрямую к компьютеру и использует специальное программное обеспечение (ПО) ExScan Pro от той же компании SHININDG 3D. Обработка и оптимизация полученной модели происходит также в данной программе.

Для апробации среди лабораторного оборудования были выбраны: станок с ЧПУ фрезерно-гравировальный настольный AMAN и

станок электроэрозионный копировально-прошивочный модели 4Г721Э.

В соответствии с алгоритмом сканирования станочного оборудования, выделенным выше, первым этапом была произведена подготовка установок, которая включала в себя обработку блестящих поверхностей матирующим антибликовым спреем, а также установку дополнительного освещения, для того, чтобы сделать все поверхности сканируемого объекта умеренно-контрастными.

Также по всем сканируемым участкам были распределены и наклеены специальные маркеры, также известные как опорные точки, которые помогают в позиционировании 3D-сканера и получении 3D-координат объекта. Плотность их распределения по зоне сканирования зависит от важности данной части установки в будущей 3D-модели, например, на рабочую зону станка требуется большее количество маркеров, для получения более точной информации о геометрии и форме, а вот для участков, от которых требуется только общая информация, такая как положение и габариты, допускается более редкое размещение опорных точек для сканирования. Данный этап, проведенный для фрезерно-гравировального настольного станка с ЧПУ, представлен на рис. 3.



Рис. 3. Подготовка станка для сканирования

При подготовке сканирующего оборудования в специальном ПО также выбирается режим детализации. Его можно менять в процессе сканирования, поэтому при оцифровке рабочей зоны станка выбирается высокая степень детализации, а при сканировании остальных участков сделать упрощение и переключить сканер на режим низкой детализации (рис. 4).

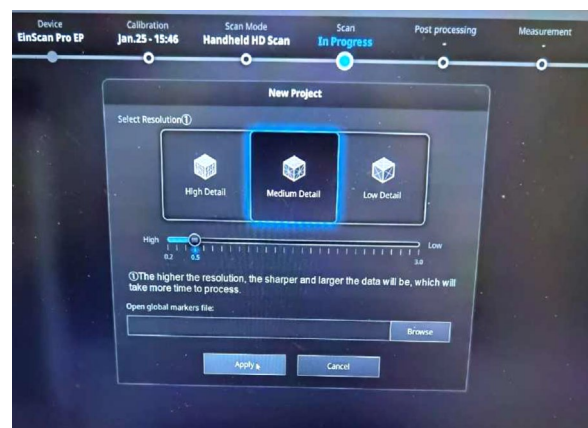


Рис. 4. Выбор режимов детализации для 3D-сканера

Далее было произведено непосредственно сканирование оборудования в ручном режиме. Эмпирическим путем было выявлено, что лучше всего производит манипуляции с помощью функционала оборудования, например, кнопок оптического увеличения «Zoom +» и «Zoom -», так как в отличие от физического изменения положения сканера было сокращено количество мест потери координат и сканирование происходило быстрее, без лишних временных затрат на восстановление исходного положения.

Так как данная апробация производилась 3D-сканером, не предназначенным для оцифровки больших объектов, то процесс потребовал больше временных и трудовых затрат, однако в целом последовательность алгоритма сохранилась. Также это показало важность правильного выбора оборудования для работы. На рис. 5 представлен процесс сканирования станка AMAN, а на рис. 6 — процесс сканирования станка 4Г721Э.



Рис. 5. Процесс сканирования станка AMAN



Рис. 6. Процесс сканирования станка 4Г721Э

Так как сканер напрямую подключен к ПО ExScan Pro, то отсканированные области отображаются в реальном времени, облако точек строится автоматически. Так же отображается видео с камеры, установленной на сканере для более удобной ориентации пользователя в пространстве (рис. 7).

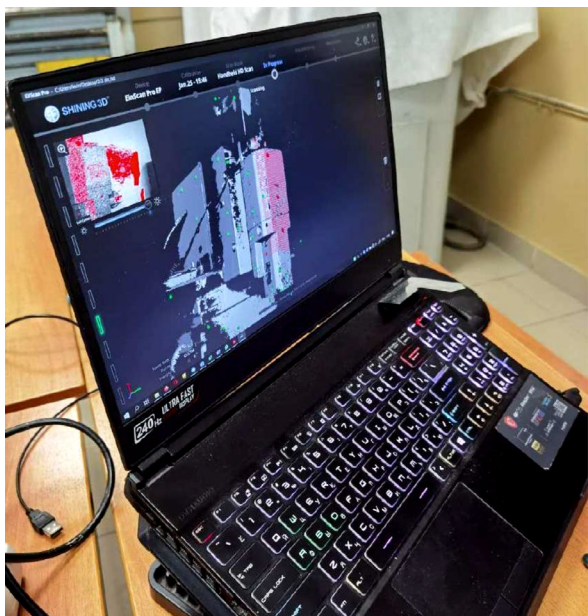


Рис. 7. Построение облака точек при сканировании

После этапа сканирования полученную модель требуется доработать, прежде чем использовать по прямому назначению. Это можно сделать либо в той же программе, если ее функционал позволяет, либо воспользоваться

специальными программами для работы с облаками точек и mesh-моделями.

### Заключение

Цифровые двойники станочного оборудования в российской промышленности только получают распространение и используются в основном для отладки программы обработки и симуляции работы на станках с ЧПУ. Такие программы интегрируются с САМ-системами (автоматизированными системами, предназначенными для подготовки управляющих программ для станков с ЧПУ) и могут использоваться в качестве обучения работе оператора. Но также их применение возможно при создании планировок цехов, для проектирования и визуализации работы средств технологического оснащения и разработке цифровых технологических процессов.

В данной работе был предложен вариант выполнения оцифровки станочного оборудования и получения его виртуальной модели при помощи трехмерного сканирования.

### Литература

1. Анализ проблем, возникающих при автоматизированном проектировании станочных приспособлений / О.А. Рябина, А.И. Болдырев, А.А. Болдырев, Д.Ю. Левин // Вестник Тульского государственного университета. Автоматизация: проблемы, идеи, решения: сб. научных трудов Национальной научно-техн. конференции с международным участием: АПИР-28. 2023. С. 176-180.
2. Digital twin for CNC machine tool: modeling and using strategy / W. Luo, T. Hu, C. Zhang, Y. Wei // J Ambient Intell Humaniz Comput. 10 (2018). PP. 2-5.
3. Пономарев К.С., Феофанов А.Н. Цифровой двойник производства как инструмент цифровизации технологических процессов предприятия // Актуальные тренды и перспективы развития науки, техники, технологий: сб. научных трудов по материалам межд. науч.-практ. конф. Под общ. ред. Е.П. Ткачевой. Белгород: АПНИ, 2019. С. 141-145.
4. Curless V. From range scans to 3D models // ACM SIGGRAPH Computer Graphics. 2000. Vol. 33. No. 4. PP. 38-41.
5. К вопросу технологичности изделий сниженной массы в авиационной и ракетно-космической технике, полученных с помощью дегенеративного дизайна / А.А. Болдырев, Д.Ю. Левин, О.А. Рябина, А.И. Болдырев // Воронежский научно-технический вестник. 2021. № 4 (38). С. 29-35.
6. Александрова В.В., Зайцева А.А., Брысковский Г.В. Цифровые программируемые 3D-технологии // Материалы конф. «Информационные технологии в управлении». 2012. С. 547-553.

Поступила 05.03.2024; принята к публикации 13.05.2024

Информация об авторах

**Рябинина Ольга Алексеевна** – аспирант, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), тел. 8-952-540-69-70, e-mail: ryabinina\_olya@mail.ru

**Болдырев Александр Иванович** – д-р техн. наук, профессор, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), тел. 8-473-253-09-73, e-mail: aiboldyrev@mail.ru

**Болдырев Александр Александрович** – канд. техн. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), тел. 8-904-212-61-83, e-mail: alexboldyrev@yandex.ru

**Левин Дмитрий Юрьевич** – старший преподаватель, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), тел. 8-910-249-40-99, e-mail: levin\_du@cst-eg.ru

**APPLICATION OF THREE-DIMENSIONAL SCANNING TECHNOLOGY TO CREATE DIGITAL TWINS OF MACHINING FACILITIES**

**O.A. Ryabinina, A.I. Boldyrev, A.A. Boldyrev, D.Yu. Levin**

**Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia**

**Abstract:** the paper describes the possibility of using three-dimensional scanning technology to create a digital twin of the machining facilities and its further use in the process of technological manufacturing preparation. A digital twin is a tool to optimize the work of specialists, it allows to recreate the infrastructure and logic of operations of a physical object. Digital models obtained in this way can be used in the future in automated enterprise management systems, as well as in the competent design of production area and production flows in three-dimensional space, where the twin will act as a 3D template of equipment for more optimal organization of the manufacturing process. These are software and hardware complexes designed for training in the skills of working on CNC machine. Such systems can use a digital twin to create and simulate CNC programs on a computer. Being a complete virtual prototype of a real machine, it allows not only to teach how to work with CNC systems, but also, without working time of the machine, to debug previously developed machining programs, eliminating with its help possible collisions of machine units, eliminating defects and inaccuracies of programs, optimizing operating modes. The article presents the algorithm of three-dimensional scanning of machining facilities and explanations to it. The application of these technologies is aimed at reducing the time of technological preparation of production by creating a digital library of machining facilities

**Key words:** digital twins; 3D scanning; machining facilities; digital manufacturing procedure; jigs, fixtures and tools; technological tooling

**References**

1. Ryabinina O.A., Boldyrev A.I., Boldyrev A.A., Levin D.Y. “Analysis of problems arising in the automated design of technological tooling”, *The Bulletin of Tula State University (Vestnik Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta)*, Automation: problems, ideas, solutions: coll. of scientific works of the National Scientific and Technical Institute *APIR-28*, 2023, pp. 176-180.
2. Luo W, Hu T, Zhang C, Wei Y. “Digital twin for CNC machine tool: modeling and using strategy”, *J Ambient Intell Humaniz Comput.*, 2018, no.10, pp. 2–5.
3. Ponomarev K.S., Feofanov A.N. “Digital twin of production as a tool for digitalization of enterprise technological processes”, *Current trends and prospects for the development of science, technology, technology (Aktual'nyye trendy i perspektivy razvitiya nauki, tekhniki, tekhnologii)*, coll. of scientific works based on materials from international scientific-practical conf., Belgorod, ANI, 2019, pp. 141-145.
4. Curless B. “From range scans to 3D models”, *ACM SIGGRAPH Computer Graphics*, 2000, vol. 33, no. 4, pp. 38-41.
5. Boldyrev A.A., Levin D.Y., Ryabinina O.A., Boldyrev A.I. “On the question of reduced mass articles technological effectiveness in aviation and rocket-space equipment accessed with degenerative design”, *Voronezh Scientific and Technical Bulletin (Voronezhskiy nauchno-tekhnicheskiy vestnik)*, 2021, no. 4 (38), pp. 29-35.
6. Aleksandrova V.V., Zaitseva A.A., Bryskovskiy G.V.. “Digital programmable 3D technologies”, proc. of conf. *Information technologies in management (Informatsionnyye tekhnologii v upravlenii)*, 2012, pp. 547-553.

Submitted 05.03.2024; revised 13.05.2024

**Information about the authors**

**Olga A. Ryabinina** – Postgraduate student, Voronezh State Technical University, (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: ryabinina\_olya@mail.ru

**Alexander I. Boldyrev** – Dr. Sc. (Technical), Professor, Voronezh State Technical University, (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: aiboldyrev@mail.ru

**Alexander A. Boldyrev** – Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University, (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: alexboldyrev@yandex.ru

**Dmitry Y. Levin** – Senior Lecturer, Voronezh State Technical University, (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: levin\_du@cst-eg.ru