

## ВЕСТНИК ВОРОНЕЖСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

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 Объединенном каталоге «Пресса России» - 41891.

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. Малоюкова** – 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

**Издатель:** ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»

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

© ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», 2024

12+

## BULLETIN OF VORONEZH STATE TECHNICAL UNIVERSITY

The journal is registered by the Federal service for supervision of communications, information technology, and mass media (registration 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 United catalog "Russian Press" - 41891.

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

**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

Синтез систем высокого порядка с сигнальной адаптацией <b>С.Л. Подвальный, Е.М. Васильев.....</b>	<b>7</b>
Частотное представление как перспективный метод оценивания качества изображений <b>А.А. Нечаев, А.Н. Зейн, М.А. Орлова, М.А. Дурова.....</b>	<b>15</b>
Инструменты визуализации компьютерных игр <b>Г.В. Петрухнова, А.Б. Жерелин.....</b>	<b>24</b>
Численный метод нахождения математического ожидания решения задачи Коши для дифференциального уравнения со случайным процессом <b>Г.С. Тихомиров.....</b>	<b>30</b>
Анализ применения параметрических функций вознаграждения в алгоритмах обучения с подкреплением <b>В.В. Кашко, С.А. Олейникова, Ю.С. Акинина.....</b>	<b>37</b>
Моделирование и анализ устойчивости системы преобразования энергии солнечной батареи космической станции <b>А.К. Тищенко, Е.М. Васильев, А.О. Тищенко.....</b>	<b>44</b>
Моделирование испарения при ИК-облучении: точное решение задачи Робена <b>Д.С. Сайко, Д.Г. Андреев, С.А. Титов, Е.Ю. Фурсова.....</b>	<b>52</b>
Исполнение SQL-подобных запросов в распределенных гетерогенных системах на базе Apache Hadoop <b>А.Д. Данилов, М.О. Саввин, А.Е. Карачевцев.....</b>	<b>58</b>
Построение модели многоэтапного технологического процесса в виде сети Петри <b>А.М. Корнеев, Т.В. Лаврухина, Т.А. Сметанникова, Л.К. Ерохин.....</b>	<b>64</b>
Параметрическая идентификация температурно-инвариантной характеристики вязкости неньютоновских сред <b>А.А. Хвостов, А.А. Журавлев, А.В. Ряжских, А.В. Бараков.....</b>	<b>71</b>
Клиент-серверная архитектура системы «умный дом» <b>Г.В. Петрухнова, А.А. Чёлник.....</b>	<b>77</b>

### Радиотехника и связь

Модифицированная патч-антенна на основе воздушной подложки с выделенным слоем линии питания <b>А.В. Ашихмин, Е.А. Ищенко, К.Ю. Пашенко, С.М. Фёдоров.....</b>	<b>83</b>
Методика подавления шума на изображении беспилотных летательных аппаратов с помощью вейвлет-преобразования и нейронной сети <b>М.В. Хорошайлова, А.В. Кузнецов, А.С. Демихова.....</b>	<b>90</b>
Программно-аппаратный комплекс обнаружения и идентификации беспилотных летательных аппаратов <b>В.Д. Мартынюк, Д.А. Рыбников, А.И. Сукачев, Е.А. Сукачева.....</b>	<b>97</b>
Согласующая система укороченной антенны коротковолнового диапазона <b>О.И. Бирюков, Н.А. Гилев, Ю.О. Филимонова, К.А. Лайко.....</b>	<b>103</b>
Оценка влияния фиксирующих стоек на характеристики антенны на основе воздушной подложки <b>А.В. Ашихмин, Е.А. Ищенко, С.М. Фёдоров.....</b>	<b>109</b>



Методика настройки оптимальных параметров ПИД-регулятора для управления траекторией беспилотного летательного аппарата с использованием нейронных сетей <b>А.В. Башкиров, М.В. Хорошайлова, И.В. Свиридова.....</b>	<b>115</b>
Методика получения и обработки данных оптической инспекции топологии электронных компонентов <b>М.А. Ромащенко, Д.В. Васильченко.....</b>	<b>122</b>
Исследование зависимости напряженности магнитного поля от формы спирали планарного излучателя <b>Н.М. Калинин, А.И. Сукачев, Е.А. Сукачева, Д.А. Рыбников.....</b>	<b>128</b>
Атмосферная оптическая линия связи с применением помехоустойчивого кодирования <b>Р.П. Краснов.....</b>	<b>132</b>
Алгоритм методики анализа данных характеристик ближнего поля печатных модулей <b>В.В. Глотов, Н.Д. Майков, Д.Ю. Решетников.....</b>	<b>141</b>
Низкопрофильная двухполяризованная антенная решетка Вивальди <b>И.Н. Бобков.....</b>	<b>147</b>
Исследование зависимости величины коэффициента направленного действия антенны на основе воздушной подложки от числа патчей <b>А.В. Ашихмин, Е.Д. Егорова, Е.А. Ищенко, С.М. Фёдоров, Д.А. Шершов.....</b>	<b>154</b>
Технические характеристики двухпроводной направляющей линии передачи в подземном квазиодномерном сооружении <b>Д.В. Федосов, А.В. Колесников, А.В. Николаев.....</b>	<b>159</b>
Оптимизация хранения матрицы с использованием многоуровневого декодера <b>М.В. Хорошайлова, Э.Э. Каграманов, В.С. Карташов, С.С. Иванова.....</b>	<b>163</b>
Методика разработки и исследование микрополосковых фильтров для модуля приемного устройства <b>И.С. Бобылкин, В.Р. Тимошилова, А.М. Безрукавый, Е.М. Ивашкина.....</b>	<b>169</b>

#### Машиностроение и машиноведение

Определение параметров искажений форм геометрии маложестких крупногабаритных деталей с учетом влияния на них силы собственного веса и условий закрепления <b>С.А. Антипин, А.А. Пыхалов, А.А. Пашков.....</b>	<b>175</b>
Выявление особенностей протекания процессов в межэлектродном рабочем объеме электролита для металлов, склонных к пассивационным явлениям на их поверхности <b>И.М. Винокурова, В.С. Бородина.....</b>	<b>185</b>

CONTENTS

**Informatics, computer engineering and control**

Synthesis of high-level systems with signal adaptation <b>S.L. Podvalny, E.M. Vasil'ev</b> .....	7
Frequency representation as a promising method for evaluating image quality <b>A.A. Nechaev, A.N. Zein, M.A. Orlova, M.A. Durova</b> .....	15
Computer game visualization tools <b>G.V. Petrukhnova, A.B. Zherelin</b> .....	24
Numerical method for passing the mathematical expectation of the solution to the Cauchy problem for a differential equation with a random process <b>G.S. Tikhomirov</b> .....	30
Analysis of the application of parametric reward functions in reinforcement learning algorithms <b>V.V. Kashko, S.A. Oleinikova, Yu.S. Akinina</b> .....	37
Modeling and analysis of system stability for solar battery energy conversion in a space station <b>A.K. Tishchenko, E.M. Vasil'ev, A.O. Tishchenko</b> .....	44
Modeling evaporation due to IR irradiation: exact solution of Robin's problem <b>D.S. Saiko, D.G. Andreev, S.A. Titov, E.Yu. Fursova</b> .....	52
Execution of SQL-like queries in distributed heterogeneous systems based on Apache Hadoop <b>A.D. Danilov, M.O. Savvin, A.E. Karachevtsev</b> .....	58
Modeling a multistage technological process in the form of a Petri net <b>A.M. Korneev, T.V. Lavrukhina, T.A. Smetannikova, L.K. Erokhin</b> .....	64
Parametric identification of temperature-invariant viscosity characteristics of non-newtonian media <b>A.A. Khvostov, A.A. Zhuravlev, A.V. Ryazhskikh, A.V. Barakov</b> .....	71
Client-server architecture of the smart home system <b>G.V. Petrukhnova, A.A. Chelnik</b> .....	77

**Radio engineering and communication**

Modified patch antenna based on an air substrate with a dedicated power line layer <b>A.V. Ashikhmin, E.A. Ishchenko, K.Yu. Pashchenko, S.M. Fedorov</b> .....	83
The technique of noise suppression in the image of unmanned vehicles aircraft using the wavelet transform and neural network <b>M.V. Khoroshailova, A.V. Kuznetsov, A.S. Demikhova</b> .....	90
Software and hardware complex for the detection and identification of unmanned aerial vehicles <b>V.D. Martynyuk, D.A. Rybnikov, A.I. Sukachev, E.A. Sukacheva</b> .....	97
Matching system of shortened shortwave antenna <b>O.I. Biryukov, N.A. Gilev, Yu.O. Filimonova, K.A. Layko</b> .....	103
Assessment of the effect of fixing racks on the characteristics of an aerial-based antenna <b>A.V. Ashikhmin, E.A. Ishchenko, S.M. Fedorov</b> .....	109
The technique of setting the optimal parameters of the PID controller for controlling the trajectory of an unmanned aerial vehicle using neural networks <b>A.V. Bashkirov, M.V. Khoroshailova, I.V. Sviridova</b> .....	115

Methodology for obtaining and processing data from optical inspection of electronic component topology <b>M.A. Romashchenko, D.V. Vasilchenko</b> .....	122
Investigation of the dependence of the magnetic field strength on the shape of the spiral of a planar radiator <b>N.M. Kalinin, A.I. Sukachev, E.A. Sukacheva, D.A. Rybnikov</b> .....	128
Free-space optical communication line using forward error correction coding <b>R.P. Krasnov</b> .....	132
The algorithm of the methodology for analyzing the data of the characteristics of the near field printed modules <b>V.V. Glotov, N.D. Maikov, D.Yu. Reshetnikov</b> .....	141
Low-profile dual-polarized Vivaldi antenna array <b>I.N. Bobkov</b> .....	147
Investigation of the dependence of the directional coefficient of an aerial-based antenna on the number of patches <b>A.V. Ashikhmin, E.D. Egorova, E.A. Ishchenko, S.M. Fedorov, D.A. Shershov</b> .....	154
Technical characteristics of a bifilar transmission line in an underground quasi-one-dimensional structure <b>D.V. Fedosov, A.V. Kolesnikov, A.V. Nikolaev</b> .....	159
Optimization of matrix storage using a multi-level decoder <b>M.V. Khoroshailova, E.E. Kagramanov, V.S. Kartashov, S.S. Ivanova</b> .....	163
Methodology for the development and research of microstrip filters for the receiver module <b>I.S. Bobylkin, V.R. Timoshilova, A.M. Bezrukavy, E.M. Ivashkina</b> .....	169
<b>Mechanical engineering and science of machines</b>	
Defining geometry shape distortion parameters of low-rigidity large-sized parts, taking into account the influence on them the force of their own weight and fastening conditions <b>S.A. Antipin, A.A. Pykhalov, A.A. Pashkov</b> .....	175
Identification of the features of the processes in the interelectrode working volume of the electrolyte for metals prone to passivation phenomena on their surface <b>I.M. Vinokurova, V.S. Borodina</b> .....	185

**СИНТЕЗ СИСТЕМ ВЫСОКОГО ПОРЯДКА С СИГНАЛЬНОЙ АДАПТАЦИЕЙ**

С.Л. Подвальный, Е.М. Васильев

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

**Аннотация:** решается задача построения систем с сигнальной адаптацией для автоматического управления нестационарными объектами высокого динамического порядка. Показано, что основной трудностью синтеза таких систем является противоречие между стремлением увеличить глубину адаптации системы и необходимостью обеспечить её устойчивость во всём диапазоне нестационарных параметров объекта. Предложен способ преодоления указанной трудности, основанный на коррекции частотных характеристик объекта и использовании концепции многоальтернативного управления, в частности, принципа разделения функций. В качестве таких функций в рассматриваемой задаче выделены функции обеспечения качества переходного процесса, адаптации, обеспечения устойчивости системы и точности в установившемся режиме. Составлена функциональная схема системы, обеспечивающая раздельное выполнение перечисленных функций, и раскрыто содержание соответствующих процедур синтеза. Даны рекомендации по выбору порядка эталонной модели и коэффициента передачи в цепи обратной связи контура адаптации. Показана целесообразность определения параметров корректирующего каскада путём постановки и решения задачи математического программирования, обеспечивающей требуемые запасы устойчивости в системе. Отмечено, что повышение точности системы путём увеличения порядка её астатизма предполагает введение в систему дополнительного контура регулирования по отклонению, содержащего звено изодрома. Приведён полный числовой пример синтеза системы регулирования, и на имитационной модели продемонстрировано достижение у неё высоких адаптивных свойства с одновременным обеспечением требуемых запасов её устойчивости

**Ключевые слова:** нестационарный объект, высокий динамический порядок, устойчивость системы, явная эталонная модель, сигнальная адаптация

**Введение**

Системы с сигнальной адаптацией относятся к классу пассивных систем с управлением по выходу с большим коэффициентом передачи в обратной связи [1, 2, 3, 4]. В частности, к таким системам относятся системы с эталонной моделью, функциональная схема которых имеет вид, показанный на рис. 1, где  $k$  — коэффициент передачи обратной связи [5].

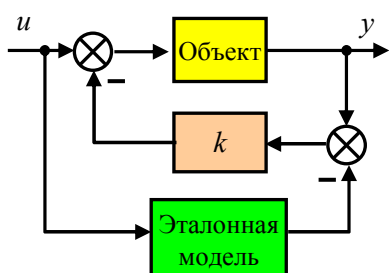


Рис. 1. Функциональная схема системы сигнальной адаптации с эталонной моделью

По сравнению с активными видами адаптации [6, 7, 8] сигнальная адаптация характеризуется относительной простотой реализации и практической безынерционностью адаптирующей

части воздействия [9]. Последнее обстоятельство делает этот вид адаптации предпочтительным при управлении объектами или процессами с быстроизменяющимися параметрами — изменении рабочей среды, выгрузка или загрузка сырья, внезапный отказ части совместно работающих агрегатов и т.п.

Вместе с тем, существенным недостатком систем с сигнальной адаптацией является невысокие адаптивные возможности, т.е. малая глубина адаптации, что сужает область практического применения этих систем [10].

Причина этого недостатка заключается в том, что расширение адаптивных возможностей системы обеспечивается непосредственным увеличением значения коэффициента  $k$  (рис. 1), рост которого приводит к быстрому снижению запаса устойчивости по амплитуде, т.е. система становится неустойчивой. Особенно часто эта ситуация встречается при управлении объектами высокого порядка с изначально малыми запасами устойчивости.

Для устранения указанной причины в работе [11, 12] предложено воспользоваться принципами многоальтернативного управления, указывающими в данном случае на необходимость физического разделения объекта управления на динамически звенья (подсисте-

мы) первого и второго порядков, для каждого из которых устойчивость звена сохраняется при любых значениях коэффициента  $k$ .

В статье [9] для смягчения проблемы неустойчивости предлагается совместить сигнальную адаптацию с модальным управлением по координатам состояния объекта, измеряемым в его физически доступных точках между каскадами низкого порядка, т.е. также предполагается возможность конструктивного разделения объекта управления.

Задачей предлагаемой работы является разработка метода построения систем с сигнальной адаптацией, гарантирующих устойчивость управления объектом высокого порядка по его выходу, и не нуждающихся в физическом выделении в объекте узлов с низким динамическим порядком.

### Метод синтеза

В качестве теоретической базы разрабатываемого метода синтеза воспользуемся принципом разнообразия и разделения функций [12, 13, 14], позволяющим реализовать каждую функцию системы отдельными, сравнительно простыми средствами и одновременно обеспе-

чить высокое качество их выполнения. Выделим следующие функции:

1) функция обеспечения монотонного характера переходного процесса и заданного времени регулирования. Эта функция реализуется выбором эталонной модели с соответствующей передаточной функцией  $W_3(s)$ ;

2) функция адаптации системы к нестационарным параметрам объекта — обеспечивается контуром адаптации с выбором достаточно большого значения коэффициента  $k$  обратной связи;

3) функция обеспечения устойчивости контура сигнальной адаптации — выполняется дополнительным корректирующим звеном с передаточной функцией  $W_k(s)$ , включаемым последовательно с объектом, описываемым передаточной функцией  $W_{об}(s)$ ;

4) функция обеспечения точности в установившемся режиме — реализуется дополнительным контуром регулирования по отклонению, содержащим пропорционально-интегральный (ПИ) регулятор необходимого порядка.

В результате функциональная схема синтезируемой системы регулирования примет вид, показанный на рис. 2.

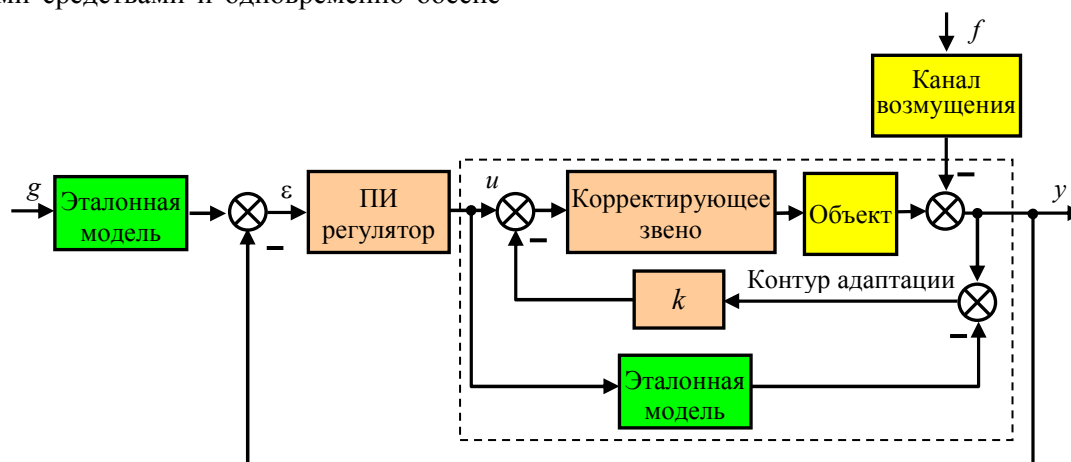


Рис. 2. Полная функциональная схема синтезируемой системы управления

Рассмотрим способы реализации перечисленных выше функций системы.

#### 1. Выбор эталонной модели.

Традиционно задаваемый монотонный вид переходной характеристики синтезируемой системы указывает на выбор эталонной модели в виде инерционного звена первого порядка с единичным коэффициентом передачи и постоянной времени  $T$ , определяемой требуемым временем  $t_p$  регулирования системы.

Однако учитывая, что переходная характеристика инерционного звена первого порядка

характеризуется скачком её первой производной, а также то обстоятельство, что в реальных системах существуют ограничения на предельно допустимые значения скоростей и ускорений тех или иных физических величин, в качестве эталонной модели целесообразно выбрать инерционное звено второго порядка:

$$W_3(s) = \frac{1}{(Ts + 1)^2}, \quad (1)$$

переходная характеристика которой не содержит скачков первой производной, а постоянная времени  $T$  определяется из соотношения [15]:

$$T = \frac{t_p}{4,8}, \text{ с.} \quad (2)$$

2. *Выбор значения коэффициента  $k$  в контуре адаптации.*

Значение коэффициента  $k$  определяет эффективность адаптационного механизма системы. Для количественной оценки этого значения воспользуемся выражением для передаточной функции  $W_a(s)$  контура адаптации, связывающей сигналы  $u(s)$  и  $y(s)$  по рис. 1 [11]:

$$W_a(s) = \frac{y(s)}{u(s)} = \frac{W_{об}(s)(1+kW_3(s))}{1+kW_{об}(s)}. \quad (3)$$

Из (3) следует, что если выбрать значение  $k$  таким, что в области рабочих частот системы будут обеспечены неравенства:

$$k \cdot |W_{об}(j\omega)| \gg 1 \text{ и } k \cdot |W_3(j\omega)| \gg 1, \quad (4)$$

то теоретически можно достичь сколь угодно близкого приближения передаточной функции контура адаптации к передаточной функции эталонной модели:

$$W_a(s, k) \underset{k \rightarrow \infty}{=} W_3(s). \quad (5)$$

Принимая верхнюю границу рабочих диапазонов объекта и эталонной модели, ограниченной уровнем (-20 дБ), т.е. 0,1 о.е., получаем, что значение  $k = 100$  обеспечивает выполнение неравенств (4) по меньшей мере с 10-кратным запасом.

3. *Выбор корректирующего звена  $W_k(s)$  в контуре адаптации.*

Поскольку задачей корректирующего звена  $W_k(s)$  является обеспечение устойчивости рассматриваемого контура, то выбор вида и параметров этого звена должен быть подчинён следующим требованиям:

создание необходимого запаса устойчивости по амплитуде:

$$\Delta L(\omega_\pi) \geq 20 \text{ дБ} \quad (6)$$

на частоте  $\omega_\pi$ , обеспечивающей выполнение равенства:

$$\arg((W_k(j\omega_\pi)W_{об}(j\omega_\pi) \cdot k) = -180 \text{ град}; \quad (7)$$

создание необходимого запаса устойчивости по фазе:

$$\Delta\varphi(\omega_{ср}) \geq 40 \text{ град} \quad (8)$$

на частоте  $\omega_{ср}$  среза, отвечающей условию:

$$20 \log(|W_k(j\omega_{ср})W_{об}(j\omega_{ср}) \cdot k|) = 0; \quad (9)$$

создание достаточного запаса устойчивости по фазе  $\Delta\varphi(\omega)$  град на частотах  $\omega \leq \omega_{ср}$  в соответствии с условием:

$$\min_{\omega \leq \omega_{ср}} (\arg((W_k(j\omega)W_{об}(j\omega) \cdot k)) \geq -140 \text{ град}, \quad (10)$$

смысл которого заключается в недопустимости появления фазовых отставаний больших 180 град в разомкнутом контуре на частотах  $\omega \leq \omega_{ср}$  во всём диапазоне нестационарных параметров объекта. Такие отставания, появляющиеся на небольшом участке частот, не превышающих частоту среза (рис. 3), характерны для систем высокого порядка и в реальных устройствах, имеющих нелинейности типа «насыщение», приводят к возникновению автоколебаний с частотой  $\omega_{ак}$  [16].

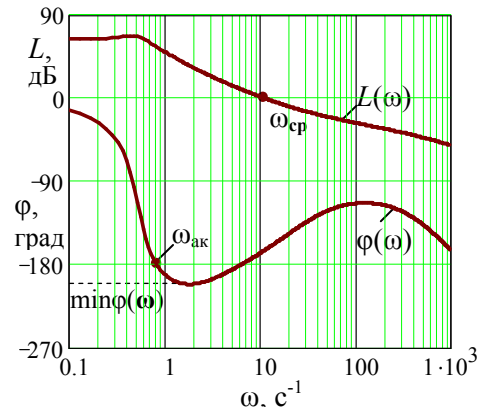


Рис. 3. Вид частотной характеристики, приводящей к возникновению автоколебаний на частоте  $\omega_{ак}$

Для выполнения требований (6) и (8) относительный порядок знаменателя передаточной функции объекта  $W_{об}(s)$  и числителя передаточной функции корректирующего звена  $W_k(s)$  должен быть равен единице. Например, если порядок объекта равен трём, то порядок числителя  $W_k(s)$  должен быть равен двум, и корректирующее звено будет иметь вид:

$$W_k(s) = \frac{(b_{k1}s + 1)(b_{k2}s + 1)}{(a_{k1}s + 1)(a_{k2}s + 1)}. \quad (11)$$

Таким образом, возникает задача определения неизвестных параметров  $a_{k1}$ ,  $a_{k2}$ ,  $b_{k1}$ ,  $b_{k2}$



корректирующего звена, а также значения частоты  $\omega_\pi$ , удовлетворяющих условиям (6)-(10).

Сформулируем эту задачу как задачу математического программирования:

$$\min_{\omega \leq \omega_{cp}} (\arg((W_k(j\omega)W_{об}(j\omega) \cdot k)) \rightarrow \max, \quad (12)$$

при ограничениях:

$$\Delta L(\omega_\pi) \geq 20 \text{ дБ}; \quad (13)$$

$$\Delta\varphi(\omega_{cp}) \geq 40 \text{ град}; \quad (14)$$

в которых частоты  $\omega_\pi$ ,  $\omega_c$  и параметры корректирующего звена удовлетворяют равенствам (7) и (9), а также условиям физической реализуемости:

$$\omega_\pi > \omega_c; b_{k1} > 0; b_{k2} > 0; a_{k1} > 0; a_{k2} > 0. \quad (15)$$

Значение частоты  $\omega_{cp}$  среза задаётся априорно исходя из требований к быстродействию контура адаптации, обычно во много раз больше частоты 1/T сопряжения частотной характеристики выбранной эталонной модели (1) [17].

Если решение задачи (12)-(15) не обеспечивает выполнение неравенства (10), следует отказаться от априорного задания значения частоты среза контура адаптации и включить величину  $\omega_{cp}$  в число неизвестных переменных, подлежащих определению в процессе поиска экстремума (12).

4. *Обеспечение заданной точности системы в установившемся режиме.*

В том случае, если контур адаптации представляет собою статическую систему регулирования (например, рис. 3), но по техническому требованию необходимо обеспечить нулевую установившуюся ошибку по постоянному задающему воздействию, т.е. астатизм первого порядка, то это требование целесообразно реализовать отдельным дополнительным контуром регулирования (рис. 2), содержащим звено издромы с передаточной функцией  $W_{пи}(s)$  (пропорционально-интегральный — ПИ-регулятор). Для полного воспроизведения системой в переходных режимах свойств эталонной модели, эту модель следует дополнительно ввести в канал задающего воздействия на входе системы, рис. 2. При этом параметры эталонной модели в контуре сигнальной адаптации могут быть выбраны теперь только из соображений обеспечения быстродействия этого контура, т.е. эти две эталонные модели не обязательно должны быть одинаковыми.

**Пример синтеза**

Рассмотрим нестационарный объект с передаточной функцией третьего порядка:

$$W_{об}(s) = \frac{1}{s^3 + c_2s^2 + c_1s + c_0}, \quad (16)$$

параметры которой изменяются в соответствии с табл. 1.

При замыкании объекта отрицательной обратной связью с коэффициентом  $k$ , характеристический полином полученного контура примет вид:

$$W_{об}(s) = s^3 + c_2s^2 + c_1s + c_0 + k, \quad (17)$$

и условие устойчивости по Гурвицу:

$$c_2c_1 > c_0 + k \quad (18)$$

при значениях  $k$ , равных или больших 0,55 не выполняется для всех вариантов из табл. 1.

Таблица 1  
Варианты параметров нестационарного объекта

Вариант параметров	$c_2$	$c_1$	$c_0$
1	0,3	2,0	0,05
2	1,0	0,5	0,20
3	3,0	0,2	0,50

Переходные характеристики указанных вариантов объекта представлены на рис. 4 и существенно отличаются.

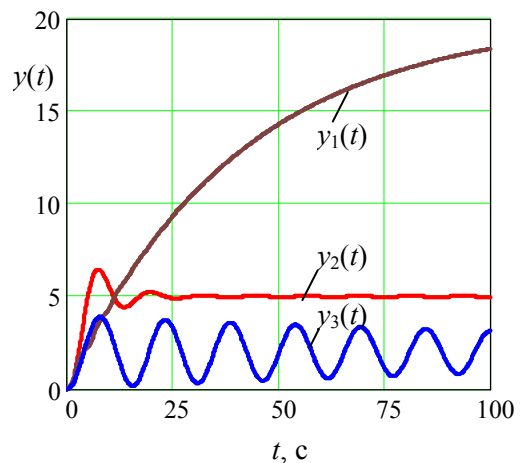


Рис. 4. Переходные характеристики нестационарного объекта

Для выбора эталонной модели зададимся монотонным характером переходной характе-

ристики и временем регулирования  $t_p = 4,8$  с. Из (2) получаем  $T = 1$  с, и передаточная функция (1) эталонной модели примет вид:

$$W_3(s) = \frac{1}{(s+1)^2}. \quad (19)$$

Коэффициент  $k$  передачи контура адаптации, в соответствии с изложенными выше доводами, принимаем  $k = 100$ .

Корректирующее звено для объекта третьего порядка имеет вид (11).

Зададимся частотой среза  $\omega_{cp}$  контура адаптации в 100 раз выше частоты  $1/T$  сопряжения эталонной модели, т.е. примем  $\omega_{cp} = 100$ .

Ставим задачу (12)-(15), и получаем её решение:

$$b_{k1} = 1,046; \quad a_{k1} = 5,333 \cdot 10^{-3};$$

$$b_{k2} = 1,083; \quad a_{k2} = 8,301 \cdot 10^{-5};$$

$$\Delta L(\omega_\pi) = 40 \text{ дБ}; \quad \Delta\varphi(\omega_{cp}) = 61 \text{ град}; \quad \omega_\pi = 1480 \text{ с}^{-1};$$

$$\min_{\omega \leq \omega_{cp}} (\arg((W_k(j\omega)W_{об}(j\omega) \cdot k))) = -119 \text{ град},$$

которое удовлетворяет всем условиям поставленной задачи.

Частотные характеристики объекта  $W_{об}(s)$  (для варианта 2) и для разомкнутого контура  $W_{ca}(s) = W_k(j\omega)W_{об}(j\omega) \cdot k$  сигнальной адаптации представлены на рис. 5.

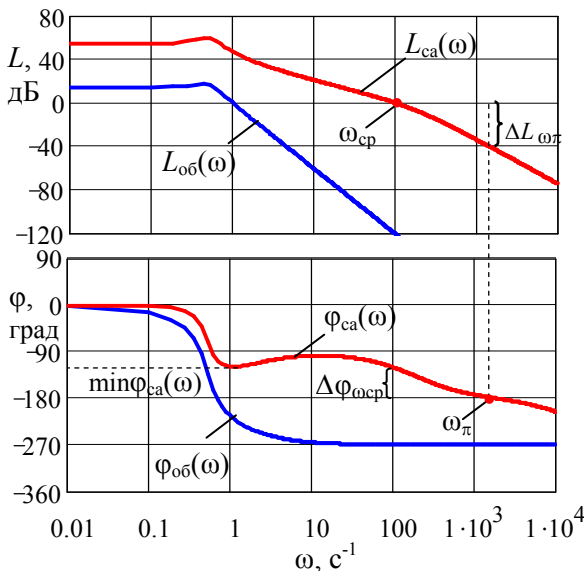


Рис. 5. Частотные характеристик исходного объекта и синтезированного контура сигнальной адаптации

Синтез контура регулирования со звеном изодрома  $W_{ПИ}(s)$ , обеспечивающего первый порядок астатизма системы, осуществляется по частотной характеристике замкнутой подси-

стемы сигнальной адаптации по типовым методам частотного синтеза [17].

Например, для  $W_{ПИ}(s)$  вида:

$$W_{ПИ}(s) = \frac{d(T_d s + 1)}{s} \quad (20)$$

для данной задачи можно выбрать параметры:  $d \geq 10$ ;  $T_d = 1$ .

### Проверка показателей качества системы

Проверка адаптивных свойств системы проводилась имитационным моделированием с получением переходных характеристик  $y(t)$  при подаче на вход единичного ступенчатого управляющего воздействия  $u(t)$  (рис. 2). Полученные результаты для трёх вариантов объекта (табл. 1) представлены на рис. 6 и свидетельствуют о высокой эффективности рассматриваемой схемы сигнальной адаптации.

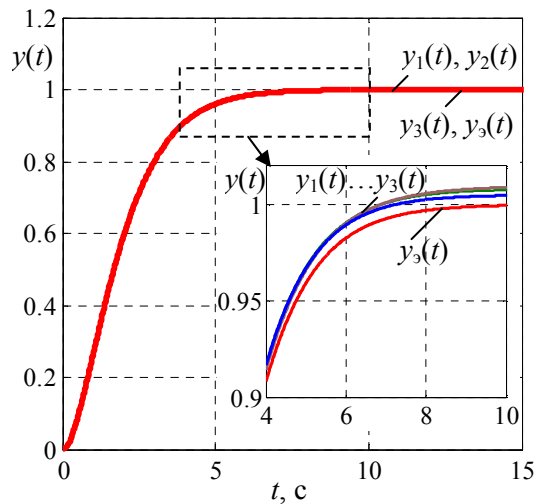


Рис. 6. Проверка адаптивных свойств системы

Для всех трёх вариантов нестационарных параметров объекта обеспечивается монотонный характер переходного процесса с заданным временем регулирования  $t_p = 4,8$  с. В силу нулевого порядка астатизма системы в установившемся режиме присутствует ошибка, не превышающая 1% для всех вариантов объекта.

Для количественной оценки адаптивных свойств системы проведено исследование её нулей и полюсов, результаты которого приведены в табл. 2.

Практически не изменяющееся в области нестационарности параметров расположение корней, в первую очередь — доминирующих (два нуля и четыре полюса, выделенные в табл. 2



заливкой), свидетельствует о высоких адаптивных возможностях системы, в том числе о сохранении корневого запаса устойчивости (полнос

$s_1$ ) и доминирующего влияния на характер переходного процесса вещественных полюсов.

Таблица 2

Вариант объекта	Нули			Полюсы					
	$z_1, z_2$	$z_3$	$z_4$	$s_1$	$s_2$	$s_3$	$s_4$	$s_5, s_6$	$s_7$
1	$-1 \pm 10j$	-923	-956	-0,81	-1	-1	-1,11	$-92,1 \pm 112j$	-12049
2	$-1 \pm 10j$	-923	-956	-0,81	-1	-1	-1,11	$-92,1 \pm 112j$	-12049
3	$-1 \pm 10j$	-923	-956	-0,90	-1	-1	-0,99	$-92,4 \pm 112j$	-12049

Помимо адаптивных свойств системы, целесообразно рассмотреть такую её общетехническую характеристику, как способность парировать внешние возмущающие воздействия.

В соответствии с функциональной схемой на рис. 2 передаточная функция  $F(s)$  системы по возмущению  $f$  имеет вид:

$$F(s) = \frac{y(s)}{f(s)} = \frac{W_f(s)}{1 + kW_{об}(s)W_k(s)}, \quad (21)$$

в котором  $W_f(s)$  — передаточная функция канала поступления в систему возмущающего воздействия.

Из (21) следует, что чувствительность системы к возмущениям снижается с ростом значения  $k$ . Поскольку, как было показано ранее, увеличение  $k$  повышает адаптивные возможности системы, то задачи адаптации и нечувствительности к внешним возмущениям системы при её синтезе решаются совместно.

На рис. 7 показана отработка системой возмущающего воздействия  $f(t) = 0,5$ , поданного в момент времени  $t = 10$  с, при значениях  $k = 20$  и  $k = 100$ .

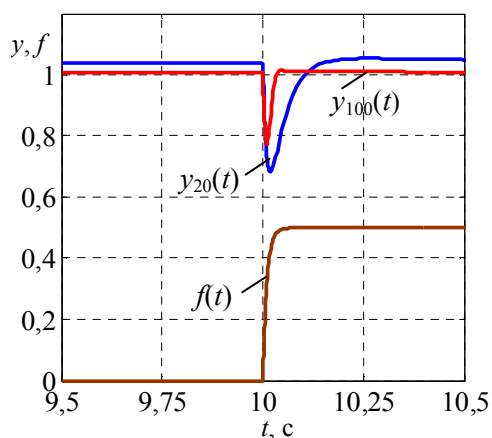


Рис. 7. Проверка способности системы парировать возмущающие воздействия:  $y_{20}(t)$  — при значении  $k = 20$ ;  $y_{100}(t)$  — при значении  $k = 100$

Следует заметить, что в теоретическом плане внешние возмущающие воздействия на систему могут быть приведены к некоторой эквивалентной внутренней нестационарности, т.е. решение задачи параметрической адаптации одновременно обеспечивает в определённой степени и инвариантность адаптивной системы к возмущениям [18]. Например, введение возмущающего воздействия  $f(t) = 0,5$  при единичном задании  $u(t) = 1$  эквивалентно увеличению параметра  $c_0$  объекта вдвое.

### Выводы

1. Основным препятствием практического использования быстродействующей сигнальной адаптации в системах высокого порядка является существование в них принципиального противоречия: с увеличением глубины адаптации системы снижаются запасы её устойчивости.

2. Разрешить указанное противоречие возможно введением в канал управления объектом последовательной частотной коррекции, структура и параметры которой могут быть выбраны не единственным образом.

3. Нахождение оптимального набора параметров такой коррекции осуществляется путём постановки и решения задачи математического программирования по критерию максимальной фазовой частотной характеристики разомкнутой системы с ограничениями, накладываемыми заданными запасами устойчивости по амплитуде и фазе, а также условиями физической реализуемости.

4. Обеспечение необходимой глубины адаптации, заданных запасов устойчивости, качества переходных процессов в системе и точности регулирования целесообразно осуществлять на основе многоальтернативного принципа разделения функций, позволяющего упростить реализацию и повысить качество выполнения каждой из них.

### Литература

1. Annaswamy A.M., Fradkov A.L. A historical perspective of adaptive control and learning // *Annual Reviews in Control*. 2021. Vol. 52. pp. 18-41.
2. Бакланов А.С., Вохрышев В.Е. Робастные самонастраивающиеся линейные и нелинейные системы управления динамическими объектами с сигнальной адаптацией // *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. 2014. Т. 16. № 6. С. 66-70.
3. Dogan K.M., Yucelen T., Muse J.A. Adaptive control systems with unstructured uncertainty and unmodelled dynamics: a relaxed stability condition // *International Journal of Control*. 2022. Vol. 95, no. 8. pp. 2211-2224.
4. Сигнально-адаптивная система управления асинхронным электроприводом / Е.С. Кучер, А.А. Блинов, Г.С. Сидоров, Н.С. Попов // *Электротехника*. 2022. № 5. С. 24-29.
5. Кунинин П.Н., Романов А.Р. Системы с эталонной моделью и сигнальной адаптацией // *Автоматизированный электропривод и промышленная электроника*. Тр. Четвертой Всеросс. научн.-практич. конф. Под общ. ред. В.Ю. Островлянича. Новокузнецк: Изд-во СибГИУ, 2010. С. 60-68.
6. Васильев Е.М., Гусев К.Ю. Модальное управление нестационарными системами // *Вестник Воронежского государственного технического университета*. 2008. № 8. С. 46-54.
7. Глущенко А.И., Петров В.А., Ласточкин К.А. Адаптивная система управления с переменным коэффициентом усиления закона настройки на основе рекурсивного метода наименьших квадратов // *Автоматика и телемеханика*. 2021. № 4. С. 77-95.
8. Синтез адаптивной цифровой системы управления с заданным запасом устойчивости / В.С. Кудряшов, М.В. Алексеев, А.В. Иванов, О.А. Орловцева, И.В. Иванова // *Вестник Воронежского государственного технического университета*. 2019. Т. 15, № 3. С. 42-50.
9. Второв В.Б., Карев А.В. Понижение порядка эталонной модели в системе с сигнальной адаптацией // *Известия Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ»*. Серия Автоматизация управления. 2014. № 5. С. 29-33.
10. Жмудь В.А. Адаптивные системы автоматического управления с единственным основным контуром // *Автоматика и программная инженерия*. 2014. № 2(8). С. 106-122.
11. Подвальный С.Л., Васильев Е.М. Многоуровневая сигнальная адаптация в нестационарных системах управления // *Вестник Воронежского государственного технического университета*. 2022. Т. 18. № 5. С. 38-47.
12. Подвальный С.Л., Васильев Е.М. Системы многоальтернативного управления. Эволюционный подход. Старый Оскол: Изд-во ТНТ, 2023. 380 с.
13. Подвальный С.Л., Васильев Е.М. Модели многоальтернативного управления и принятия решений в сложных системах // *Системы управления и информационные технологии*. 2014. Т. 56. № 2.1. С. 169-173.
14. Podvalny S.L., Vasiljev E.M. A multi-alternative approach to control in open systems: origins, current state, and future prospects // *Automation and Remote Control*. 2015. Vol. 76. No. 8. pp. 1471-1499.
15. Дорф Р., Бишоп Р. *Современные системы управления*. М.: Лаборатория Базовых Знаний, 2002. 832 с.
16. Теория автоматического управления / Под ред. В.Б. Яковлева. М.: Высшая школа, 2003. 567 с.
17. Никулин Е.А. *Основы теории автоматического управления*. Частотные методы анализа и синтеза систем. СПб: БХВ-Петербург, 2015. 632 с.
18. Слита О.В., Ушаков А.В. Обеспечение инвариантности выхода непрерывной системы относительно экзогенных сигнальных и эндогенных параметрических возмущений: алгебраический подход // *Изв. РАН. Теория и системы управления*. 2008. № 4. С. 24-32.

Поступила 22.05.2024; принята 03.09.2024

### Информация об авторах

**Подвальный Семён Леонидович** – д-р техн. наук, профессор, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: spodvalny@yandex.ru, ORCID: 0000-0003-1260-4883  
**Васильев Евгений Михайлович** – канд. техн. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: vgtu-aits@yandex.ru, ORCID: 0000-0002-9008-5364

## SYNTHESIS OF HIGH-LEVEL SYSTEMS WITH SIGNAL ADAPTATION

S.L. Podvalny, E.M. Vasil'ev

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

**Abstract:** the problem of constructing systems with signal adaptation for automatic control of non-stationary objects of a high dynamic order is solved. It is shown that the main difficulty in the synthesis of such systems is the contradiction between the desire to increase the depth of adaptation of the system and the need to ensure its stability over the entire range of non-stationary parameters of the object. A way to overcome this difficulty is proposed, based on correcting the frequency characteristics of the object and using the concept of multi-alternative control, in particular, the principle of separation of functions. As such functions in the problem under consideration, the functions of ensuring the quality of the transient process, adaptation, ensuring system stability and accuracy in steady state are distinguished. A functional diagram of the system has been compiled that ensures separate execution of the listed functions, and the content of the corresponding synthesis procedures has been disclosed. Recommendations are given for choosing the order of the reference model of the transmission coefficient in the feedback circuit of the adaptation loop. The feasibility of determining the parameters of the correction cascade by setting and solving a mathematical programming problem that provides the required stability margins in the system is shown. It is noted that increasing the accuracy of the system by increasing the order of its astatism involves introducing into the system an additional

deviation control loop containing an isodrome link. A complete numerical example of the synthesis of a control system is given, and the simulation model demonstrates the achievement of its high adaptive properties while simultaneously ensuring the required reserves of its stability

**Key words:** non-stationary object, high dynamic order, system stability, explicit linear model, signal adaptation

### References

1. Annaswamy A.M., Fradkov A.L. "A historical perspective of adaptive control and learning", *Annual Reviews in Control*, 2021, vol. 52, pp. 18-41.
2. Baklanov A.S., Vokhryshev V.E. "Robust self-adjusting linear and non-linear control systems for dynamic objects with signal adaptation", *The Bulletin of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences (Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk)*, 2014, vol. 16, no. 6, pp. 66-70.
3. Dogan K.M., Yucelen T., Muse J.A. "Adaptive control systems with unstructured uncertainty and unmodelled dynamics: a relaxed stability condition", *International Journal of Control*, 2022, vol. 95, no. 8, pp. 2211-2224.
4. Kucher E.S., Blinov A.A., Sidorov G.S., Popov N.S. "Signal-adaptive control system for asynchronous electric drive", *Electrical engineering. (Elektrotehnika)*, 2022, no. 5, pp. 24-29.
5. Kuninin P.N., Romanov A.R. "Systems with a reference model and signal adaptation", *Automated electric drive and industrial electronics. Proceedings of the Fourth All-Russian scientific-practical conf. (Avtomatizirovannyi elektroprivod i promyshlennaya elektronika. Tr. Chetvertoy Vseross. nauchn.-praktich. konf.)*, Novokuznetsk, SibGIU, 2010, pp. 60-68.
6. Vasil'ev E.M., Gusev K.Yu. "Modal control of non-stationary systems", *The Bulletin of Voronezh State Technical University, (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2008, no. 8, pp. 46-54.
7. Glushchenko A.I., Petrov V.A., Lastochkin K.A. "Adaptive control system with a variable gain of the tuning law based on the recursive method of least squares", *Automation and Remote Control (Avtomatika i telemekhanika)*, 2021, no. 4, pp. 77-95.
8. Kudryashov V.S., Alekseyev M.V., Ivanov A.V., Orlovtsseva O.A., Ivanova I.V. "Synthesis of an adaptive digital control system with a given stability margin", *The Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2019, vol. 15, no 3, pp. 42-50.
9. Vtorov V.B., Karev A.V. "Reducing the order of the reference model in a system with signal adaptation", *News of St. Petersburg State Electro-Technical University. Series Automation control, (Izvestiya Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo elektrotekhnicheskogo universiteta. Seriya Avtomatizatsiya upravleniya)*, 2014, no. 5, pp. 29-33.
10. Zhmud' V.A. "Adaptive automatic control systems with a single main circuit", *Automation and software engineering (Avtomatika i programmnaya inzheneriya)*, 2014, no. 2(8), pp. 106-122.
11. Podvalny S.L., Vasil'ev E.M. "Multilevel signal adaptation in non-stationary control systems", *The Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2022, vol. 18, no. 5, pp. 38-47.
12. Podvalny S.L., Vasil'ev E.M. "Multialternative control systems. Evolutionary approach", ("Sistemy mnogoal'ternativnogo upravleniya. Evolyutsionnyy podkhod"), Stary Oskol, Izd-vo TNT, 2023, 380 p.
13. Podvalny S.L., Vasil'ev E.M. "Models of multialternative control and decision-making in complex systems", *Control systems and information technologies, (Sistemy upravleniya i informatsionnyye tekhnologii)*, 2014, vol. 56, no. 2.1, pp. 169-173.
14. Podvalny S.L., Vasil'ev E.M. "A multialternative approach to control in open systems: origins, current state, and future prospects", *Automation and Remote Control*, 2015, vol. 76, no. 8, pp. 1471-1499.
15. Dorf R., Bishop R. "Modern control systems" ("Sovremennyye sistemy upravleniya"), Moscow, Laboratoriya Bazovykh Znaniy, 2002, 832 p.
16. "Theory of automatic control" ("Teoriya avtomaticheskogo upravleniya"), ed. by V.B. Yakovlev, Moscow, Vysshaya shkola, 2003, 567 p.
17. Nikulin E.A. "Fundamentals of the theory of automatic control. Frequency methods of analysis and synthesis of systems" ("Osnovy teorii avtomaticheskogo upravleniya. Chastotnyye metody analiza i sinteza sistem"), St. Petersburg, BHV-Petersburg, 2015, 632 p.
18. Slita O.V., Ushakov A.V. "Ensuring the invariance of the output of a continuous system with respect to exogenous signal and endogenous parametric disturbances: an algebraic approach", *News of the RAS. Theory and control systems (Izvestiya RAN. Teoriya i sistemy upravleniya)*, 2008, no. 4, pp. 24-32.

Submitted 22.05.2024; revised 03.09.2024

### Information about the authors

**Semen L. Podvalny** - Dr. Sc. (Technical), Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Ochyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: spodvalny@yandex.ru, ORCID: 0000-0003-1260-4883

**Eugeniy M. Vasil'ev** - Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Ochyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: vgtu-aits@yandex.ru, ORCID: 0000-0002-9008-5364

## ЧАСТОТНОЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ КАК ПЕРСПЕКТИВНЫЙ МЕТОД ОЦЕНИВАНИЯ КАЧЕСТВА ИЗОБРАЖЕНИЙ

А.А. Нечаев, А.Н. Зейн, М.А. Орлова, М.А. Дурова

Национальный исследовательский университет «МЭИ», г. Москва, Россия

**Аннотация:** задача сравнения изображений и повышения качества сходства между ними является актуальной. С одной стороны, разработчики стремятся применить разные методы сжатия изображений с целью снижения трафика в сети, а с другой стороны, повышается потребность в точности распознавания и анализа изображений из сети интернет. Проведённое исследование отражает результаты исследования эталонных оценок качества изображения, получаемых при вычислении средних степенных значений в различных областях. Предметом исследования являлись значения объективных эталонных метрик качества изображения, степень их сходства с экспертными оценками и способы приблизить их к экспертным оценкам. Принцип исследования заключается в вычислении характеристик изображений и использовании их в качестве признаков при использовании методов машинного обучения. Для реализации указанной задачи была разработана программа на языке Delphi в среде Embarcadero RAD Studio (для преобразования изображений в различные области и вычисления средних степенных значений) и скрипты на языке Python с использованием библиотеки машинного обучения scikit-learn (для обучения, и тестирования различных моделей линейной регрессии). Результаты этого исследования могут использоваться для дальнейших исследований в области эталонного оценивания качества изображений

**Ключевые слова:** дискретное косинусное преобразование, качество изображений, линейная регрессия, машинное обучение

**Благодарности:** исследование выполнено в рамках проекта «Разработка информационной системы для программного обеспечения для моделирования режимов работы энерготехнологического оборудования и тепловых схем энерготехнологических объектов с использованием динамических элементов» при поддержке гранта НИУ «МЭИ» на реализацию научно-исследовательской программы «Приоритет 2030: Технологии будущего в 2022-2024 годах»

### Введение

Во время обработки, сжатия, хранения, передачи и воспроизведения цифровые изображения подвержены внесению многих видов искажений, которые могут привести к ухудшению визуального качества [1]. Например, искажения вносятся при сжатии изображений по алгоритмам JPEG и JPEG2000. Искажения могут быть внесены применением различных цифровых фильтров (например, низкочастотных фильтров, которые используются для удаления высокочастотных шумов). Передача по каналу связи под воздействием помех тоже вносит искажения в изображение. Внесение искажений в изображения порождает задачу оценивания этих искажений по некоторой шкале.

Методы оценивания качества изображений можно разделить на эталонные (full-reference), неэталонные (no-reference) и полуэталонные (reduced-reference) [2]. Всего на данный момент существует не менее 60 метрик качества изображения [3]. Помимо такого разделения (на эталонные, неэталонные и полуэталонные метрики) существуют и другие классификации

метрик качества изображения. Например, классификация на метрики, основанные на: различиях пикселей, корреляции, качестве границ, спектральных расстояниях, контексте, визуальной системе человека (HVS — Human Visual System) [4]. Таким образом, тематика разработки и исследований объективных метрик качества изображения является актуальной и востребованной. Объектом исследования являются изображения с различными видами искажений, а также различные числовые характеристики этих изображений, используемые затем как признаки в машинном обучении. Предметом исследования является методика оценки качества изображений на основе анализа средних степенных значений в различных цветовых пространствах и областях представлений изображений. Научная новизна данной статьи заключается в более углублённом анализе часто используемой для эталонного оценивания качества изображений метрики RMSE (root mean squared error), использовании средних степенных значений как её обобщения для произвольной размерности, проведении вычислений в различных представлениях изображений и цветовых пространствах и комбинировании их результатов с помощью регрессионных моделей.



### Описание задачи исследования

Исследование в этой работе проведено следующим образом. Найдена база изображений, содержащая исходные изображения, искажённые изображения и экспертные оценки качества искажений. Затем для каждого искажённого изображения этой базы вычислены значения средних степенных для пикселей исходного изображения, пикселей искажённого изображения и модулей разности между соответствующими пикселями исходного и искажённого изображений. Эти вычисления выполнены по отдельности для каждого из цветовых компонентов в каждом из используемых цветовых пространств. Помимо обычного пространственного представления (двумерные массивы кодов цветов пикселей) эти значения вычислены в некоторых других пространственных и частотных представлениях. Далее полученные одномерные массивы чисел использованы как признаки (features) в машинном обучении, целевой переменной (target) при этом является массив экспертных оценок (являющийся частью базы изображений). Все числа каждого из этих массивов (признаков) разделены на 3 части: обучающую (train), валидационную (valid) и тестовую (test). Для получения лучшей модели желательно, чтобы между используемыми в этой модели признаки и целевой переменной была как можно более сильная корреляционная зависимость. Помимо самих признаков в модель можно включать новые признаки, являющиеся комбинациями исходных признаков и функциями от исходных признаков [5]. В этой работе для каждого из признаков помимо его самого включены значения некоторых функций одной переменной от этого признака.

Далее из всего множества признаков выбрана порция (1024 признака, у которых наиболее сильная корреляция на обучающих данных с целевой переменной). После этого для каждого из используемых видов регрессионных моделей выполнены обучение, валидация и тестирование. Лучшая модель выбирается из итогового множества полученных моделей по наибольшему значению метрики на тестовой выборке. В [6] в качестве одного из возможных подходов написано так: «разделить выборку на тренировочную, валидационную и тестовую части, для каждой модели выбирать гиперпараметры».

Помимо гиперпараметров, задаваемых для каждой из моделей, в этом исследовании в качестве гиперпараметра используется число, определяющее множество включаемых в модель признаков. Поясним, что это означает. Так

как из всех признаков (вычисленных и полученных как функции от вычисленных) выбирается 1024 таких признака, которые имеют наиболее сильную линейную корреляцию с целевой переменной, а каждый из этих 1024 признаков может в модель входить или не входить, общее число возможных комбинаций того, какие из этих 1024 признаков входят в модель, равно  $2^{1024}-1$  (единица вычитается, чтобы формально не учитывать вырожденный случай, когда ни один из признаков не входит в модель). Какие именно признаки из этих 1024 входят в модель, будем задавать числом размером 1024 бита или как строку из 256 шестнадцатеричных цифр.

Из-за большого количества комбинаций признаков в совокупности с наборами гиперпараметров (гиперпараметр – это параметр, который устанавливается до начала процесса обучения [7]) невозможно выполнить их полный перебор. Поэтому в этой работе используется случайный поиск (random search).

Максимизация метрики на валидационном наборе и окончательное сравнение моделей по тестовым метрикам в соответствии с [6] позволяет избежать переобучения. Итогом исследования должна стать выбранная в результате окончательного сравнения модель, её параметры и характеристики.

### База изображений для расчёта корреляций

Для определения корреляции между значениями какой-либо метрики и экспертными оценками необходимо иметь базу изображений, которая содержит некоторое количество искажённых изображений, соответствующих им исходных изображений и экспертные оценки качества. В случае использования методов машинного обучения можно представить все полученные результаты в виде электронной таблицы, в которой каждая строка будет содержать значения всех числовых характеристик (признаков) и целевой переменной (экспертной оценки качества) для одного искажённого изображения, а каждый столбец будет содержать значения одного признака для всех изображений (последний столбец будет содержать значения целевой переменной). Необходимо, чтобы в базе изображений содержалось достаточное количество образцов (искажённых изображений) для деления на обучающую, валидационную и тестовую части. При слишком малом количестве образцов велика вероятность переобучения, при котором вместо нахождения общих закономерностей модель

будет выучивать обучающую выборку.

На данный момент существует несколько баз изображений с экспертными оценками качества. Разные базы могут отличаться между собой количеством искажённых изображений (то есть образцов), количеством исходных изображений, количеством представленных типов искажений, шкалой оценивания. К наиболее известным базам относятся: Laboratory for Image & Video Engineering Public-Domain Subjective Image Quality Database (2 версии: Release 1 и Release 2) [8], TID2008 [9], TID2013 [10]. В этой работе используется база TID2013, поэтому рассмотрим её подробнее. В базе TID2013 содержится 3000 искажённых изображений, 25 исходных изображений, 24 типа искажений (среди них: высокочастотный шум, сжатие JPEG, сжатие JPEG2000, гауссов шум, изменение насыщенности цвета и другие). Экспертными оценками качества в этой базе изображений являются значения MOS (Mean Opinion Score). Существует несколько методов оценки визуального качества изображения. Например, наблюдателей могут попросить оценить абсолютное качество изображения или сходство с исходным изображением. В таком случае каждая оценка выражается по некоторой шкале. Например, в [8] используется шкала от 1 до 5 (“Bad”, “Poor”, “Fair”, “Good”, “Excellent”), которая затем масштабирована (преобразована) в шкалу от 0 до 100. Недостатком этого способа является сложность для наблюдателя давать оценки искажённым изображениям, особенно в начале эксперимента, когда у наблюдателя мало опыта [11]. Поэтому при сборе оценок для TID2013 был использован другой метод. Каждый раз наблюдателю показывали 3 изображения: одно исходное и два искажённых. Наблюдатель выбирал, какое из этих двух искажённых изображений больше похоже на исходное. После получения результатов всех попарных сравнений наиболее отклоняющиеся результаты были удалены, оставшиеся результаты были масштабированы в шкалу от 0 до 9, где оценка 0 обозначала наименьшее сходство с исходным изображением (то есть самые сильные искажения), оценка 9 обозначала полное сходство (то есть отсутствие каких-либо искажений).

### Эталонная метрика

В этой работе в качестве эталонной метрики качества изображения используются средние степенные значения (power mean). Средние степенные значения [12] вычисляются по формуле (1):

$$M_k = \sqrt[k]{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i^k}, \quad (1)$$

где  $M_k$  — значение среднего степенного;

$N$  — количество чисел;

$x_i$  — неотрицательные числа;

$k$  — порядок (любое число). Средние степенные значения с некоторыми значениями  $k$  имеют отдельные названия, например, при  $k=1$  это среднее арифметическое, при  $k=-1$  это среднее гармоническое, при  $k=2$  это среднее квадратическое. В пределе при  $k=+\infty$  среднее степенное значение набора чисел равно наибольшему из этих чисел, при  $k=-\infty$  оно равно наименьшему из этих чисел. В этой работе средние степенные значения вычисляются для трёх массивов чисел: исходного сигнала, искажённого сигнала и модулей сигнала ошибки. Сигнал ошибки [13] определяется как  $e_i=x_i-y_i$ , где  $x_i$  — отсчёт исходного сигнала,  $y_i$  — отсчёт искажённого сигнала,  $e_i$  — отсчёт сигнала ошибки. При вычислении средних степенных значений берутся модули сигнала ошибки, так как необходимо, чтобы все числа набора были неотрицательными.

При  $x_i > 1$  с увеличением  $k$  значения каждого элемента суммы ( $x_i^k$ ) будут экспоненциально увеличиваться. При больших значениях  $k$  это может привести к переполнению разрядной сетки чисел с плавающей запятой одинарной и даже двойной точности. Если все значения  $x_i$  принадлежат отрезку  $[0.0; 1.0]$ , то для любого положительного  $k$  величина  $x_i^k$  тоже принадлежит отрезку  $[0.0; 1.0]$ . По этой причине нормализация всех значений  $k$  диапазону  $[0; 1]$  при обработке изображений является более предпочтительной, чем  $k$  диапазону  $[0; 255]$  и используется в этой работе.

### Цветовые пространства

Изначально все изображения базы TID2013 (как исходные, так и искажённые) хранятся в формате BMP с глубиной цвета 24 бита на пиксель. В таком формате каждый пиксель кодируется тремя однобайтовыми беззнаковыми числами, которые являются значениями интенсивностей в пространстве RGB для красного (Red), зелёного (Green) и синего (Blue) цветов, квантованными по 256 уровням (от 0 до 255). Однако существуют и другие цветовые пространства (помимо RGB). Всего в этой работе средние степенные значения вычислены в 10 цветовых пространствах.

### Представления изображений

Каждый компонент любого цветового пространства изображения представляет собой дискретный двумерный сигнал. Этот сигнал можно записать как двумерный массив чисел (целых или вещественных в зависимости от квантования). В этой работе для преобразования изображения из пространственной в частотную область используется двумерное ДКП (дискретное косинусное преобразование). Это преобразование можно применять к прямоугольному блоку  $M \times N$  отсчётов, но обычно его применяют к квадратному блоку  $N \times N$ . Например, его применяют при сжатии по алгоритму JPEG с размерами блоков  $8 \times 8$ . В результате применения двумерного ДКП к блоку из  $N \times N$  пространственных отсчётов на выходе получается блок из  $N \times N$  отсчётов в частотной области. Важным свойством двумерного ДКП является то, что если все числа на входе являются вещественными, то и все числа на выходе тоже будут вещественными.

Всего в этом исследовании используется 24 представления изображения в различных пространствах. Одно в пространственной области, 9 в частотной области нормализованных к диапазону  $[0;1]$  коэффициентов двумерного ДКП, 9 в пространственной области значений пикселей, нормированных суммами значений пикселей их блока, 5 в областях выделения границ различными фильтрами (разностным амплитудным, максимальным разностным амплитудным, Робертса, Превитта и Собеля).

### Функции преобразования

После вычисления каждого из средних степенных значений получается некоторое число в диапазоне  $[0;1]$ . Значения этих чисел потом используются как признаки для выполнения различных видов линейной регрессии. Для получения тех результатов, у которых будет более высокая корреляция с целевой переменной на обучающей выборке, в качестве признаков помимо самих этих чисел используются функции одной переменной от этих чисел. Используется 40 функций ( $\text{func}_1, \text{func}_2, \dots, \text{func}_{40}$ ), все эти функции выбраны так, чтобы удовлетворять одному условию: для любого аргумента  $x$  из отрезка  $[0;1]$  значение функции принадлежит отрезку  $[0;1]$ . Используемые функции заданы формулами (2-12):

$$\text{func}_1(x) = x, \quad (2)$$

$$\text{func}_2(x) = \sqrt{x}, \quad (3)$$

$$\text{func}_3(x) = x^2, \quad (4)$$

$$\text{func}_{4-7}(x) = \frac{\ln(ax+1)}{\ln(a+1)}, \quad (5)$$

$$\text{func}_8(x) = \frac{\sin(\pi x + 0.001)}{\pi x + 0.001}, \quad (6)$$

$$\text{func}_9(x) = \frac{\cos(\pi x) + 1}{2}, \quad (7)$$

$$\text{func}_{10-17}(x) = \begin{cases} 0, & x < a \\ x - a, & x \geq a \end{cases}, \quad (8)$$

$$\text{func}_{18-21}(x) = \frac{\text{arctg}(ax)}{\pi/2}, \quad (9)$$

$$\text{func}_{22-29}(x) = \exp\left(-\frac{x^2}{2a^2}\right), \quad (10)$$

$$\text{func}_{30-34}(x) = \frac{1}{1 + e^{a(1-2x)}}, \quad (11)$$

$$\text{func}_{35-40}(x) = \frac{e^{ax} - 1}{e^a - 1}, \quad (12)$$

где  $a$  — параметр, изменение значения которого задаёт несколько функций (отличающихся только значением этого параметра). В функциях 4-7 параметр  $a$  принимает значения 101, 102, 103, 104 соответственно. Чем больше  $a$ , тем быстрее возрастает функция вблизи нуля. В функциях 10-17 параметр  $a$  принимает значения от 0.1 до 0.8 с шагом 0.1 соответственно. Чем больше значение  $a$ , тем при большем значении  $x$  функция начинает возрастать (эти функции являются функциями пороговых значений). В функциях 18-21 параметр  $a$  принимает значения 1, 5, 10, 100 соответственно. Чем больше  $a$ , тем быстрее возрастает функция вблизи нуля. В функциях 22-29 параметр  $a$  принимает значения от 0.05 до 0.4 с шагом 0.05 соответственно. Эти функции являются частным случаем функции Гаусса с математическим ожиданием 0 и максимальным значением функции, равным 1. Чем меньше  $a$  (для положительных  $a$ ), тем быстрее убывает функция вблизи нуля. В функциях 30-34 параметр  $a$  принимает значения от 2.5 до 4.5 с шагом 0.5 соответственно. Каждая из этих функций отображает всё множество действительных чисел на интервал  $(0;1)$ , является монотонно возрастающей при  $-\infty < x < +\infty$  и её график проходит через точку  $(0.5;0.5)$ . При увеличении значения  $a$  увеличивается быстрота изменения функции вблизи точки  $(0.5;0.5)$ . В функциях 35-40 параметр  $a$  принимает значения -10, -5, -2, 2, 5, 10 соответственно. Графики функций  $\text{func}_4(x), \dots, \text{func}_{40}(x)$  показаны на рис. 1.

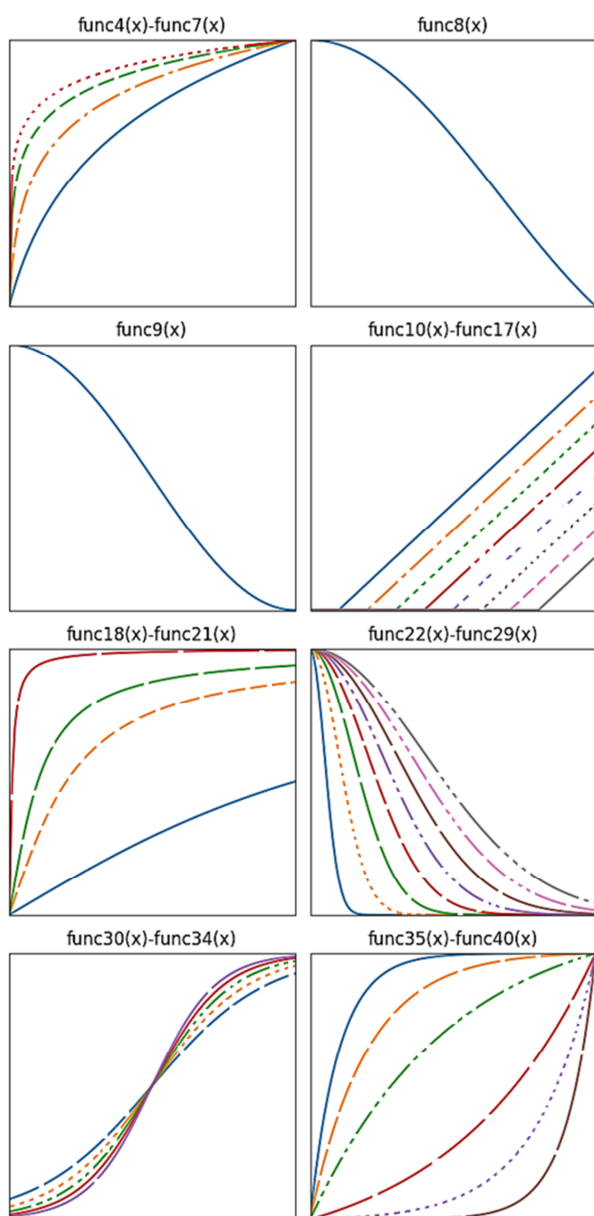


Рис. 1. Графики используемых функций

Каждая из этих функций является монотонно возрастающей на отрезке  $[0;1]$ , проходит через точки  $(0;0)$  и  $(1;1)$ . При положительных значениях  $a$  график такой функции на интервале  $(0;1)$  расположен ниже прямой  $y=x$ , при отрицательных  $a$  — выше. Чем больше модуль  $a$ , тем сильнее график функции отклоняется от прямой  $y=x$ .

Применение различных функций к результатам вычислений средних степенных значений позволяет увеличить линейную корреляцию между значениями признаков и целевой переменной.

До применения 40 функций к результатам вычислений общее количество признаков было равно 43200. Средние степенные значения вы-

числялись для исходных изображений, искажённых изображений и модулей сигналов ошибки (что даёт по 3 признака). Применение этого к каждому из трёх компонентов каждого из 10 цветовых пространств даёт  $3 \cdot 30 = 90$  признаков. Вычисление средних степенных значений для 20 значений  $k$  (от 1 до 20 с шагом 1) даёт  $90 \cdot 20 = 1800$  признаков. Проведение этих вычислений в 24 представлениях изображения даёт  $1800 \cdot 24 = 43200$  признаков. Из этих признаков наибольшее значение модуля коэффициента линейной корреляции с MOS (для первых 1800 изображений, то есть train выборки) равно 0.7672. После применения 40 функций к этим признакам общее количество признаков стало равным  $43200 \cdot 40 = 1728000$ . Из этих признаков наибольшее значение модуля коэффициента линейной корреляции с MOS равно 0.7785, то есть увеличение на 0.0113 или на 1.47 %.

### Регрессионные модели

В этой работе в качестве алгоритмов машинного обучения используются различные типы моделей линейной регрессии. Всего используется 15 типов моделей, обозначим их как  $t_1, \dots, t_{15}$ . Все эти модели взяты из библиотеки для машинного обучения scikit-learn языка программирования Python. Так как общее количество имеющихся признаков в результате применения функций  $func_1, \dots, func_{40}$  увеличилось до 1728000, а количество элементов обучающей выборки равно 1800, использование всех имеющихся признаков для обучения модели было бы неправильным. Из всех этих признаков были выбраны 32768 тех, у которых наибольшие значения модуля коэффициента линейной корреляции с MOS для train выборки (при отборе признаков по корреляции учитывалась только обучающая выборка, так как использование для отбора признаков ещё и валидационной и тестовой выборок привело бы к смещённости оценок). Но и использование всех 32768 признаков при 1800 образцах обучающей выборки является чрезмерным. Поэтому перед обучением каждой модели выбиралось случайное число признаков в диапазоне от 2 до 180 (чтобы на каждый признак приходилось не менее 10 обучающих образцов). В данной работе эксперименты проведены с 8 различными максимальными количествами коррелированных признаков: 256 ( $X_1, \dots, X_{256}$ ), 512 ( $X_1, \dots, X_{512}$ ), 1024, 2048, 4096, 8192, 16384 и 32768 (то есть с выбором случайного подмножества признаков из всех 32768 признаков). В совокупности с 15 типами моделей регрессии



это даёт  $15 \cdot 8 = 120$  экспериментов.

Каждый из этих 120 экспериментов проводится следующим образом. Перебирается набор из 1000 моделей с различными комбинациями случайно выбранных значений гиперпараметров (включая число, обозначающее подмножество используемых признаков), из этого набора выбирается та модель, у которой максимальное значение метрики на валидационной выборке, эта модель выбирается в качестве лучшей модели набора и её результаты (значения всех используемых гиперпараметров и значения метрики для train, valid и test) записываются в лог (текстовый файл). Затем таким же способом перебирается ещё некоторое количество наборов из 1000 моделей (конкретное количество таких наборов может меняться для разных типов регрессии  $t_1, \dots, t_{15}$  и для разных максимальных количеств признаков от 256 до 32768 из-за того, что времена обучения одной модели для различных экспериментов из этих 120 не всегда равны или хотя бы приблизительно равны между собой). После выполнения 120 экспериментов для каждого из них становятся из-

вестны результаты для некоторого количества моделей. Окончательное сравнение моделей проводится по тестовым метрикам в соответствии с [6]. В результате этого для каждого из 120 экспериментов определяется лучшая модель и её гиперпараметры, результаты этих экспериментов сравниваются между собой, из этих 120 моделей выбирается лучшая, делаются выводы о том, какой из типов регрессии лучше всего подходит для этой задачи. В табл. 1 приведены результаты этих экспериментов. Для каждого из экспериментов указан наибольший модуль коэффициента линейной корреляции для тестовой выборки (указаны первые 4 цифры после запятой в десятичной записи этого числа после округления, чтобы не тратить место в каждой ячейке на "0.", при такой записи не теряется никакая информация, так как модуль коэффициента линейной корреляции всегда принадлежит отрезку  $[0;1]$  и если он после округления до четырёх десятичных цифр после запятой будет равен 1.0000, что крайне маловероятно, это будет указано отдельно).

Таблица 1

Результаты экспериментов

	$2^8$	$2^9$	$2^{10}$	$2^{11}$	$2^{12}$	$2^{13}$	$2^{14}$	$2^{15}$	Max
t1	8060	8055	8211	8316	8140	8294	8423	8500	8500
t2	7460	7495	7490	7489	8103	8197	8302	8455	8455
t3	8008	8033	8176	8234	8431	8531	8580	<b>8744</b>	8744
t4	7706	7706	7707	7745	7745	7729	7706	7727	7745
t5	7764	7766	7755	7732	7734	7711	7553	7671	7766
t6	8146	8116	8289	8226	8467	8455	8405	8457	8467
t7	7706	7706	7706	7746	7744	7731	7706	7739	7746
t8	8051	8141	8374	8380	8447	8367	8408	8544	8544
t9	8034	8207	8325	8323	8445	8613	8591	8693	8693
t10	7956	7885	8105	8068	8011	8029	7785	8434	8434
t11	8053	8097	8309	8402	8596	8632	8710	8728	8728
t12	7878	8139	8170	8275	8396	8554	7847	8377	8554
t13	7715	7735	7664	7778	7674	7831	7856	7910	7910
t14	7820	7816	7771	7817	7931	8040	8118	8131	8131
t15	7721	7755	7718	7724	7724	7572	7664	7478	7755
max	8146	8207	8374	8402	8596	8632	8710	8744	8744

В табл. 1 показаны лучшие результаты проведённых экспериментов. По вертикали обозначены типы регрессионных моделей ( $t_1, \dots, t_{15}$ ), по горизонтали обозначены максимальные количества используемых признаков (от  $2^8=256$  до  $2^{15}=32768$ ). В строке "max" записаны максимальные значения корреляции для каждого из максимальных количеств признаков. В столбце "max" записаны максимальные значения корреляции для каждого из типов регрессии. Видно, что для любых двух ячеек строки "max" большее значение корреляции соответствует большему значению максимального количества признаков. Это можно объяс-

нить тем, что чем больше максимальное количество признаков, из которых случайным образом выбирается от 2 до 180 признаков для регрессии, тем меньше между этими признаками будет проявляться мультиколлинеарность.

Лучшая из моделей показала следующие значения модуля коэффициента линейной корреляции между истинными и предсказанными значениями: 0.9066 на train, 0.9040 на valid, 0.8744 на test. Эта модель использует тип регрессии  $t_3$  (Ridge, гребневая регрессия, регрессия с использованием регуляризации  $l_2$ ). Найденная лучшая модель использует 162 признака (выбранных случайным образом из

32768) и значение гиперпараметра  $\alpha$ , равное 0.104491. Диаграммы рассеяния для train, valid и test для этой модели показаны на рис. 2.

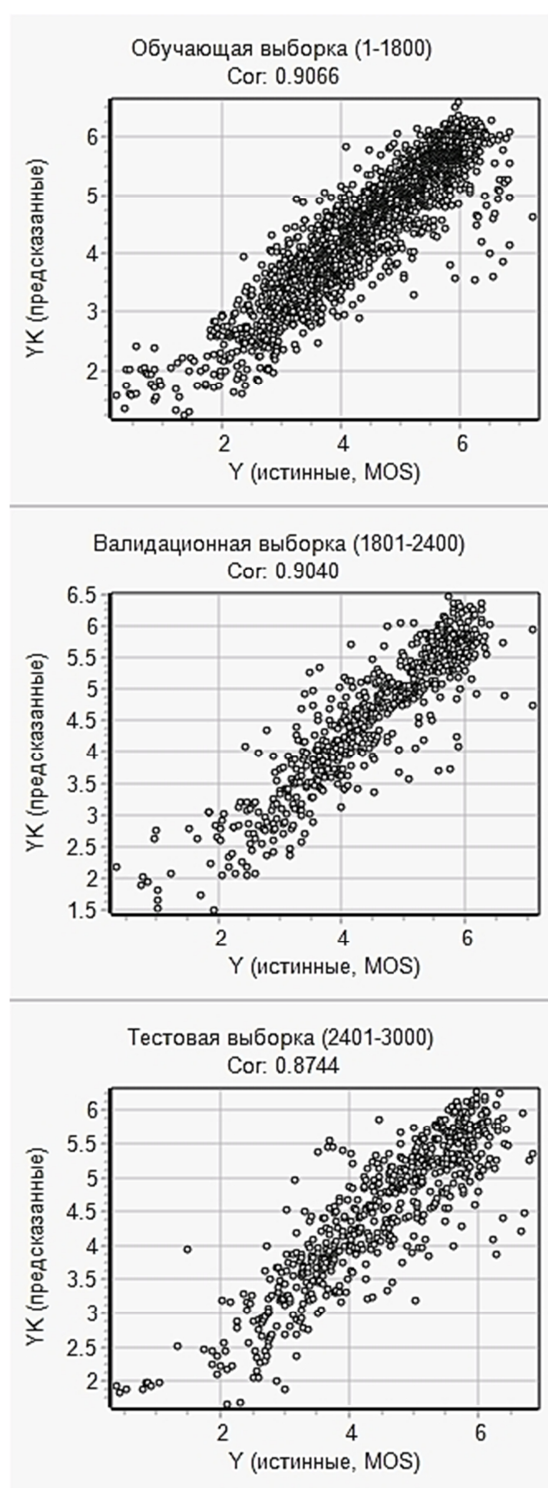


Рис. 2. Диаграммы рассеяния для обучающей, валидационной и тестовой выборок лучшей модели

На рис. 2 видно, насколько сильно предсказанные значения отличаются от истинных (то есть насколько точки отклоняются от воображаемой прямой  $y=x$ ). Диаграммы рассеяния позво-

ляют определить это визуально, количественно же это определяет метрика RMSE. Для train RMSE=0.5245, для valid RMSE=0.5362, для test RMSE=0.5987. При переходе от train к test значение RMSE увеличилось на 0.0742 или на 14.15 %.

### Анализ результатов

Использование регрессионных моделей позволило значительно увеличить линейную корреляцию между числовыми характеристиками изображений и экспертными оценками качества.

Во всех из 32768 наиболее коррелированных признаков средние степенные значения вычисляются для модулей разности между соответствующими пикселями исходного и искажённого изображения. Это означает, что вычисление средних степенных значений для пикселей исходного изображения и для пикселей искажённого изображения самих по себе оказались малополезными. Теперь необходимо дать ответ на вопросы о том, насколько использование различных цветовых пространств, различных представлений изображения и функций преобразования результатов улучшило итоговый результат. 5188 из 32768 признаков вычислены в цветовом пространстве  $cs1$  (то есть RGB). Предположение о том, что есть смысл попробовать вычислять характеристики в других цветовых пространствах ( $cs2 - cs9$ ) оказалось правильным (так как в этих пространствах вычислены 27580 или 84.17 % наиболее коррелированных признаков), хотя и из всех 10 цветовых пространств доля у  $cs1$  наибольшая (15.83 %). 1435 из 32768 признаков вычислены в представлении  $dom1$  (представление изображения в пространственной области). Это свидетельствует о том, что использование представлений изображения в других областях оказалось очень полезным (на них пришлось 31333 или 95.62 % наиболее коррелированных признаков). 1279 признаков были получены без использования функций преобразования (то есть с использованием функции  $func1(x)=x$ ). Это означает, что около 96.10 % от 32768 признаков получено с использованием различных функций  $func2 - func40$ .

Из 32768 наиболее коррелированных признаков только 8 получены в цветовом пространстве  $cs1$  с использованием представления  $dom1$  и функции  $func1$  (то есть 1/4096 или около 0.024 %). Это свидетельствует о том, насколько значительный вклад в получение полезных (то есть имеющих высокую линейную корреляцию с целевой переменной – MOS) признаков внесло использование различных цветовых пространств,

различных представлений изображения и различных функций преобразования.

В найденной лучшей модели все 163 коэффициента  $K$  (используемые в выражении для вычисления предсказанных моделью значений целевой переменной  $YK=K_0+K_1*X_1+\dots+K_N*X_N$ ) находятся в диапазоне от  $K_{2391}=-8.643$  до  $K_{27801}=5.595$ . То есть значения всех найденных весовых коэффициентов не превышают по модулю десяти. Это достигнуто в результате регуляризации  $L_2$ , при которой к целевой функции помимо суммы квадратов отклонений предсказанных значений от истинных прибавляется сумма квадратов найденных коэффициентов модели. Это улучшает обобщающую способность модели, мешает модели переобучиться и подобрать большие по модулю коэффициенты (порядка 103 – 106 или даже больше) для максимального соответствия обучающей выборке.

### Заключение

Поставленная цель достигнута, а именно проведено исследование и предложена методика, которая увеличивает значение коэффициента линейной корреляции и повышает качество распознавания изображений. Использование метода регрессионных моделей для частотного представления изображений повышает коэффициент линейной корреляции на 64 %.

Использование описанного в этом исследовании подхода или отдельных его частей с другими метриками качества изображения может привести в дальнейшем к значительному улучшению качества моделей, предсказывающих воспринимаемое человеком качество изображения.

Таким образом, предложенная методика продемонстрировала свою способность значительно приблизить получаемые моделью оценки

качества искажённых изображений к истинным.

### Литература

1. Image quality assessment: from error visibility to structural similarity / Z. Wang, A. Bovik, H. Sheikh, E. Simoncelli // IEEE Transactions on Image Processing. 2004. Vol. 13. Issue 4. Pp. 600-612.
2. Pedersen M., Hardeberg J.Y. Full-reference image quality metrics: Classification and evaluation // Found. Trends. Comp. Graphics and Vision. 2012. Vol. 7. No. 1. pp. 1-80.
3. Pedersen M. Evaluation of 60 full-reference image quality metrics on the CID: IQ // Proc. IEEE Int. Conf. Image Process. (ICIP). Sep. 2015. Pp. 15881-1592.
4. Avcibas I., Sankur B., Sayood K. Statistical evaluation of image quality measures // Journal of Electronic Imaging. 2004. Vol. 11. Pp. 206-223.
5. Миронов А.М. Машинное обучение часть 1. Москва, Механико-математический факультет МГУ. 84 с. URL: [http://intsys.msu.ru/staff/mironov/machine\\_learning\\_vol1.pdf](http://intsys.msu.ru/staff/mironov/machine_learning_vol1.pdf) (Дата обращения: 04.03.2024).
6. Подбор гиперпараметров <https://education.yandex.ru/handbook/ml/article/podbor-giperparametrov> (дата обращения: 06.03.2024).
7. What is a hyperparameter? <https://deeplai.org/machine-learning-glossary-and-terms/hyperparameter> (Дата обращения: 06.03.2024).
8. LIVE Image Quality Assessment Database Release 2 / H.R. Sheikh, Z. Wang, L. Cormack, A.C. Bovik // <https://www.live.ece.utexas.edu/research/quality/subjective.htm> (дата обращения: 10.03.2024).
9. TAMPERE IMAGE DATABASE 2008 TID2008, version 1.0 <https://ponomarenko.info/tid2008.htm> (дата обращения: 10.03.2024).
10. TAMPERE IMAGE DATABASE 2013 TID2013, version 1.0 <https://ponomarenko.info/tid2013.htm> (дата обращения: 15.03.2024).
11. Image database TID2013: Peculiarities, results and perspectives / N. Ponomarenko, L. Jin, O. Ieremeiev, V. Lukin, K. Egiazarian, J. Astola et al. // Signal Processing: Image Communication. 2015. Vol. 30. Pp. 57-77.
12. Мироновский Л.А., Слаев В.А. Оценивание результатов измерений по малым выборкам // Информационно-управляющие системы. 2011. № 1. С. 69-78.
13. Z. Wang and A. C. Bovik, "Mean Squared Error: Love It or Leave It?" IEEE Signal Processing Magazine, vol. 9, Pp. 98-117, Jan. 2009.

Поступила 12.04.2024; принята к публикации 03.09.2024

### Информация об авторах

**Нечаев Александр Александрович** – магистрант кафедры вычислительных машин систем и сетей, Национальный исследовательский университет «МЭИ» (111250, Россия, г. Москва, ул. Красноказарменная, 14), e-mail: [nechaev1228@mail.ru](mailto:nechaev1228@mail.ru), ORCID: 0009-0003-0447-051X

**Зейн Али Нажиевич** – канд. техн. наук, доцент кафедры вычислительных машин систем и сетей, Национальный исследовательский университет «МЭИ» (111250, Россия, г. Москва, ул. Красноказарменная, 14), e-mail: [zeynaln@mpei.ru](mailto:zeynaln@mpei.ru), ORCID: 0000-0003-1725-6865

**Орлова Маргарита Андреевна** – доцент кафедры вычислительных машин систем и сетей, сетевой инженер Информационно-вычислительного центра, администратор академии Cisco, Национальный исследовательский университет «МЭИ» (111250, Россия, г. Москва, ул. Красноказарменная, 14), e-mail: [OrlovaMA@mpei.ru](mailto:OrlovaMA@mpei.ru), ORCID: 0000-0002-8214-4117

**Дурова Мария Александровна** – ассистент кафедры вычислительных машин, систем и сетей, ассистент кафедры безопасности и информационных технологий, Национальный исследовательский университет «МЭИ» (111250, Россия, г. Москва, ул. Красноказарменная, 14), e-mail: [DurovaMA@mpei.ru](mailto:DurovaMA@mpei.ru), ORCID: 0009-0005-8309-4982

## FREQUENCY REPRESENTATION AS A PROMISING METHOD FOR EVALUATING IMAGE QUALITY

**A.A. Nechaev, A.N. Zein, M.A. Orlova, M.A. Durova**

**National Research University “Moscow Power Engineering Institute”, Moscow, Russia**

**Abstract:** the task of comparing images and improving the quality of similarity between them is relevant. On the one hand, developers strive to apply different methods of image compression in order to reduce network traffic, and on the other hand, the need for accuracy in recognition and analysis of images from the Internet is increasing. The conducted study reflects the results of the study of reference image quality assessments obtained by calculating average power values in various areas. The subject of the study was the values of objective reference metrics of image quality, the degree of their similarity with expert assessments and ways to bring them closer to expert assessments. The principle of the study is to calculate the characteristics of images and use them as features when using machine learning methods. To implement this task, a program was developed in Delphi in the Embarcadero RAD Studio environment (for converting images into different areas and calculating average power values) and Python scripts using the scikit-learn machine learning library (for training and testing various linear regression models). The results of this study can be used for further research in the field of reference image quality assessment

**Key words:** discrete cosine transform, image quality, linear regression, machine learning

**Acknowledgments:** the research was carried out within the framework of the project “Development of an information system for software for modeling the operating modes of energy technological equipment and thermal schemes of energy technological objects using dynamic elements” with the support of a grant from NRU “MPEI” for implementation of scientific research programs “Priority 2030: Technologies of the future in 2022-2024”

### References

1. Wang Z., Bovik A., Sheikh H., Simoncelli E. “Image quality assessment: from error visibility to structural similarity”, *IEEE Transactions on Image Processing*, 2004, vol. 13, iss. 4, pp. 600-612.
2. Pedersen M., Hardeberg J.Y. “Full-reference image quality metrics: Classification and evaluation”, *Found. Trends. Comp. Graphics and Vision*, 2012, vol. 7, no. 1, pp. 1-80.
3. Pedersen M. “Evaluation of 60 full-reference image quality metrics on the CID: IQ”, *proc. IEEE Int. Conf. Image Process. (ICIP)*, sept. 2015, pp. 15881592.
4. Avciabas I., Sankur B., Sayood K. “Statistical evaluation of image quality measures”, *Journal of Electronic Imaging*, 2004, vol. 11, pp. 206–223.
5. Mironov A.M. “Machine learning, part 1”, Moscow, Faculty of Mechanics and Mathematics, Moscow State University. 84 p., available at: [http://intsys.msu.ru/staff/mironov/machine\\_learning\\_vol1.pdf](http://intsys.msu.ru/staff/mironov/machine_learning_vol1.pdf) (accessed 04.03.2024).
6. “Selection of hyperparameters”, available at: <https://education.yandex.ru/handbook/ml/article/podbor-giperparametrov> (accessed 06.03.2024).
7. “What is a hyperparameter?”, available at: <https://deeppai.org/machine-learning-glossary-and-terms/hyperparameter> (accessed 06.03.2024).
8. Sheikh H.R., Wang Z., Cormack L., Bovik A.C. “LIVE Image Quality Assessment Database, Release 2”, available at: <https://www.live.ece.utexas.edu/research/quality/subjective.htm> (accessed 10.03.2024).
9. “TAMPERE IMAGE DATABASE 2008 TID2008, version 1.0”, available at: <https://ponomarenko.info/tid2008.htm> (accessed 10.03.2024).
10. “TAMPERE IMAGE DATABASE 2013 TID2013, version 1.0”, available at: <https://ponomarenko.info/tid2013.htm> (accessed 15.03.2024).
11. Ponomarenko N., Jin L., Ieremeiev O., Lukin V., Egiazarian K., Astola J. et al. “Image database TID2013: Peculiarities, results and perspectives”, *Signal Processing: Image Communication*, 2015, vol. 30, pp. 57-77.
12. Мироновский Л.А., Слаев В.А. Оценивание результатов измерений по малым выборкам // Информационно-управляющие системы. 2011. № 1. С. 69-78. Mironovsky L.A., Slaev V.A. “Evaluation of measurement results from small samples”, *Information and control systems (Informatsionno-upravlyayushchiye sistemy)*, 2011, no. 1, pp. 69-78.
13. Wang Z., Bovik A.C. “Mean Squared Error: Love It or Leave It?”, *IEEE Signal Processing Magazine*, jan. 2009, vol. 9, pp. 98–117.

Submitted 12.04.2024; revised 03.09.2024

### Information about the authors

**Aleksander A. Nechaev** – Masters Student Dept. of Computing Machines, Systems and Networks, National Research University “Moscow Power Engineering Institute” (14 Krasnokazarmennaya str., Moscow 111250, Russia), e-mail: [nechaev1228@mail.ru](mailto:nechaev1228@mail.ru), ORCID: 0009-0003-0447-051X

**Ali N. Zein**– Associate Prof., Dept. of Computing Machines, Systems and Networks, National Research University “Moscow Power Engineering Institute” (14 Krasnokazarmennaya str., Moscow 111250, Russia), e-mail: [zeynaln@mpei.ru](mailto:zeynaln@mpei.ru), ORCID: 0000-0003-1725-6865

**Margarita A. Orlova**– Associate Prof., Dept. of Computing Machines, Systems and Networks, DPC Network Engineer, Executive of Cisco MPEI Training Centre, National Research University “Moscow Power Engineering Institute” (14 Krasnokazarmennaya str., Moscow 111250, Russia), e-mail: [RudenkovaMA@mpei.ru](mailto:RudenkovaMA@mpei.ru), ORCID: 0000-0002-8214-4117

**Maria A. Durova** – Assistant, Dept. of Computing Machines, Systems and Networks, Network Engineer, National Research University “Moscow Power Engineering Institute” (14 Krasnokazarmennaya str., Moscow 111250, Russia), e-mail: [DurovaMA@mpei.ru](mailto:DurovaMA@mpei.ru), ORCID: 0009-0005-8309-4982



## ИНСТРУМЕНТЫ ВИЗУАЛИЗАЦИИ КОМПЬЮТЕРНЫХ ИГР

Г.В. Петрухнова, А.Б. Жерелин

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

**Аннотация:** рассматриваются основные этапы визуализации трёхмерного и двухмерного пространства в программных обеспечениях по созданию компьютерных игр (игровых движках). Показано, что игровые движки являются перспективным направлением работы с трёхмерной (3D) графикой. Показаны ключевые инструменты разработки пользовательских интерфейсов. Представлены и детализированы основные этапы визуализации: подготовка сцены, построение примитива объекта, окрашивание объектов, создание проекции экранного пространства, растеризация. Указано, что Unity предлагает три различных конвейера для создания высококачественных визуальных эффектов: универсальный конвейер рендеринга (URP), конвейер рендеринга высокой четкости (HDRP), встроенный (Built-In). Рассмотрены особенности и возможности этих конвейеров. В качестве практического примера демонстрации инструментов визуализации рассмотрено их использование для реализации графического интерфейса приложения «Двойные крестики-нолики». Данная игра является усложнённым вариантом классических «крестиков-ноликов». Классический вариант довольно популярен среди детей и молодёжи, однако его постоянное использование приводит к постепенному угасанию интереса к игровому процессу. В варианте «Двойные крестики-нолики» имеются дополнения к традиционным правилам, благодаря которым усложняется игровой процесс, что позволяет поддерживать интерес к игре. Совместное использование традиционной версии и предлагаемой позволяет сделать игру многоуровневой. Мобильное приложение «Двойные крестики-нолики» выполнено в 2D-режиме с видом сбоку. В качестве конвейера рендеринга был выбран встроенный конвейер Unity. Рассматриваются особенности реализации графического интерфейса данного приложения. Показаны возможности инструментов визуализации игрового движка Unity для разработки графического интерфейса этого мобильного приложения

**Ключевые слова:** игровой движок, 3D-сцена, визуализация, рендеринг, интерполяция, растеризация, Unity, конвейер рендеринга, URP, HDRP, пользовательский интерфейс

### Введение

В настоящее время программные обеспечения по созданию компьютерных игр (игровые движки) являются довольно перспективным направлением работы с трёхмерной (3D) графикой. Сами по себе они не предназначены для создания 3D-моделей. Для этих целей лучше использовать специальные программы моделирования, такие как Blender или же Maxon Cinema 4D. Однако игровые движки содержат в себе большое количество разнообразных инструментов визуализации. С их помощью можно добиваться невероятно реалистичного результата, а возможность запускать сцену позволяет симулировать 3D-пространство в режиме реального времени.

Также важно отметить то, что для большинства пользователей ключевым фактором является качество проработки графической части приложения. Первое впечатление о приложении формируется у пользователя в течение первых минут его использования. Это суждение относится как к графическому интерфейсу, так и к игровому пространству. Поэтому необходимо каждую визуальную часть

разрабатываемого проекта выполнить на максимально высоком уровне проработки. О возможностях визуализации в игровых движках пойдёт речь в этой статье.

Игровой движок — это базовое программное обеспечение компьютерной игры, которое пригодно для повторного использования и расширения. Сам термин «игровой движок» появился в середине 1990-х годов в отношении игр-шутеров от первого лица. Одной из таких игр была Doom, разработанная компанией id Software [1]. В настоящее время основными полями разработки игр являются Unreal Engine, Unity и Cry Engine [2].

Цель данной статьи — показать возможности инструментов визуализации игрового движка Unity для разработки графического интерфейса мобильного приложения.

### Постановка задачи

Любое современное приложение имеет графический интерфейс. Без него было бы невозможно взаимодействие между пользователем и программой. Для мобильных устройств разработка интерфейса усложняется тем, что разработчикам приложения необходимо учитывать соотношение сторон и размер экрана

устройства. Неправильная разметка может привести к нарушению расположения элементов на экране или же к некорректной работе программы. Игровые движки предоставляют большой набор инструментов, с помощью которых возможно создавать и настраивать графическую часть приложения. Задача данной статьи — представить инструменты визуализации игрового движка на примере Unity и, в качестве практического примера, продемонстрировать их использование для реализации графического интерфейса приложения «Двойные крестики-нолики» [3, 4].

### Основные этапы визуализации

Ни один игровой движок невозможен без понятия сцены. Сцена является игровым пространством, в котором расположены объекты игры. Само пространство может быть как двумерным, так и трехмерным [5].

Визуализация или же рендеринг (от англ. rendering) — это процесс создания двумерного растрового изображения на основе двумерных или трехмерных данных. Этот процесс осуществляется при помощи компьютерной программы с учётом заданных параметров: освещения, точки наблюдения, материалов.

Рассмотрим возможности инструментов визуализации игрового движка на примере Unity. Во всех игровых движках уже по умолчанию присутствует процесс рендеринга сцены. Без него было бы невозможно увидеть на экране то, что происходит в игре. Данный процесс включает в себя несколько этапов выполнения, которые позволяют сформировать двумерную проекцию сцены. Алгоритм этих действий следующий:

- 1) подготовка сцены;
- 2) построение примитива объекта;
- 3) окрашивание объектов;
- 4) проекцию экранного пространства;
- 5) растеризация.

Первое с чего начинается рендеринг — это подготовка сцены. Изначально сцена начинается в позиции по умолчанию с моделями, источниками света и т.д., расположенными в базовой манере. Все объекты состоят из некоторого количества вершин, каждая из которых описывается списком чисел. Между ними образуется модель, состоящая из треугольников. Один такой треугольник называется примитивом.

После определения примитивов объектов происходит окрашивание. Самый простой тип

обработки цвета — это интерполяция. Он заключается в том, что происходит построение новых точек данных в пределах диапазона дискретного набора известных точек данных. На рис. 1 показана каркасная и раскрашенная сфера.

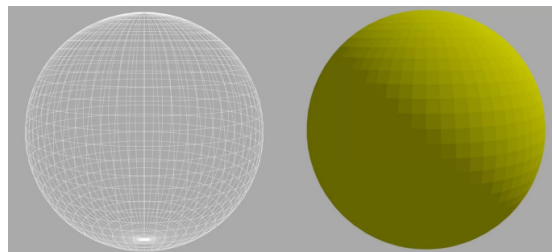


Рис. 1. Каркасная и раскрашенная сфера

До сих пор игра была по-настоящему трехмерной, но финальный кадр не может быть таковым. Чтобы превратить видимый мир из 3D-пространства в 2D-холст необходимо произвести два этапа: построение проекции экранного пространства и растеризацию. На рис. 2 показан пример проекции экранного пространства.

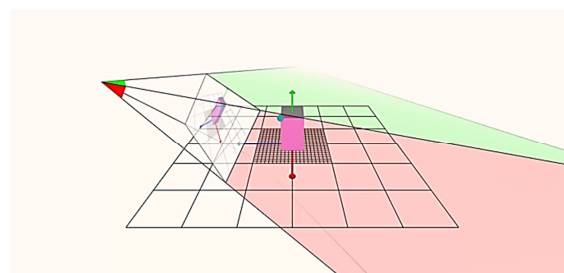


Рис. 2. Проекция экранного пространства

Для создания проекции экранного пространства программа использует большое количество математических методов, основная цель которых состоит в определении объектов, входящих в область видимости камеры, и удалении невидимых примитивов.

Последняя стадия преобразования 3D в 2D — это растеризация. На этой стадии создается пиксельная сетка, и она сравнивается с краями фигуры под ней, и там, где края перекрываются, пиксель помечается для обработки. На рис. 3 показан пример растеризации кадра, содержащего один примитив.

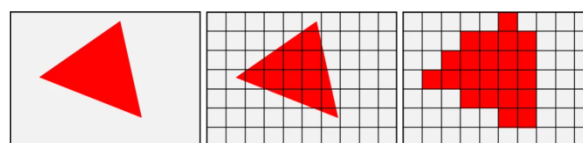


Рис. 3. Растеризация кадра

На рис. 3 конечный результат не очень похож на исходный треугольник, и объясняется такой результат тем, что используются недостаточно пикселей. Данные сложности растеризации решаются путем сглаживания и увеличения разрешения сетки.

Самым ресурсозатратным этапом рендеринга является добавление света. На рис. 4 показана сфера с тем же количеством полигонов, что и сфера на рис. 1, но с применением световых эффектов. В результате применения таких эффектов создаётся впечатление, что объект гладкий и бесшовный [6].

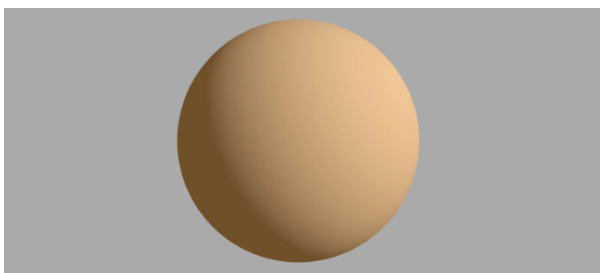


Рис. 4. Сфера с применением световых эффектов

После выполнения всех этапов визуализации 3D-сцена отображается на экране монитора. Весь этот алгоритм создания сцены требует большого количества ресурсов компьютера, а то, насколько много их потребуется, зависит от конкретной сцены и способа рендеринга. Если на сцене присутствует множество сложных объектов, которые ещё и динамически изменяются, то в таком случае нагрузка на компьютер будет больше, чем для создания сцены, состоящей из пары простых статических объектов. Со способом рендеринга дела обстоят несколько сложнее.

В Unity визуализация сцены выполняется на основе последовательности задач, называемой конвейером рендеринга. Он берет различные ресурсы, такие как шейдеры, 3D-модели и источники света, и преобразует их в формат, который легче обрабатывать графическим процессором [7]. Unity предлагает три различных конвейера для создания высококачественных визуальных эффектов:

— универсальный конвейер рендеринга (URP);

— конвейер рендеринга высокой четкости (HDRP);

— встроенный (Built-In).

Universal Render Pipeline (URP) — это упрощенный конвейер. Он предназначен для обеспечения высококачественной графики при сохранении оптимальной производительности. Такой конвейер поддерживает динамическое

освещение, создание экземпляров графического процессора и эффекты постобработки. URP предлагает прямой рендеринг, рендеринг forward+ и отложенный рендеринг. Он совместим с широким спектром платформ, таких как Windows, MacOS, Android и т.д. Конвейер URP является высокоэффективным, но за это ему приходится жертвовать некоторыми функциями. Например, он не включает объемные облака, объемный туман или размытие движения для каждого объекта. URP является самым производительным и довольно простой в использовании конвейером.

High Definition Render Pipeline (HDRP) — это конвейер, предназначенный для обеспечения высококачественной графики для высокопроизводительного оборудования (игровые консоли и высококлассные компьютеры). HDRP является физическим конвейером, который поддерживает новейшие методы рендеринга. Например, он поддерживает трассировку лучей, объемные облака, объемное освещение и освещение HDR. Технология HDRP обеспечивает высокореалистичную графику с точными отражениями.

Конвейер рендеринга HDRP имеет ряд преимуществ, которые делают его идеальным выбором для разработчиков:

— высокореалистичный рендеринг графики в режиме реального времени;

— возможность добавление атмосферных эффектов, таких как дождь, туман или облака;

— поддержка технологии трассировки лучей, которая может реалистично имитировать освещение сцены, визуализируя отражения, тени, преломление и не прямое освещение;

— объёмное освещение.

HDRP идеально подходит для разработчиков, которые хотят создавать высокореалистичную графику для высокопроизводительного оборудования.

Встроенный — это конвейер рендеринга по умолчанию в Unity. Встроенная технология призвана обеспечить баланс между производительностью и качеством [8]. Встроенная поддержка широкого спектра платформ и устройств, включая мобильные устройства и бюджетные компьютеры.

Ключевые достоинства встроенного конвейера следующие:

— совместимость с широким спектром платформ и устройств;

— высокий уровень кастомизации, который предлагает различные настраиваемые параметры путем написания пользовательских шейдеров;

— поддержку динамического освещения и эффектов постобработки, которые могут значительно улучшить визуальное качество игры;

— обеспечивает поддержку как 2D, так и 3D-графики, что делает его универсальным выбором для разработчиков, работающих в обоих жанрах.

### Практический пример демонстрации инструментов визуализации

В качестве практического примера демонстрации инструментов визуализации рассмотрим их использование для реализации графического интерфейса приложения «Двойные крестики-нолики» [3, 4].

Мобильное приложение «Двойные крестики-нолики» выполнено в 2D-режиме с видом сбоку. В качестве конвейера рендеринга был выбран встроенный конвейер игрового движка Unity. Для данного приложения такой выбор является оптимальным, поскольку он поддерживает работу 2D, совместим со многими устройствами и является довольно производительным.

В проекте главным объектом сцены является Canvas. Canvas (полотно) – это область, внутри которой находятся все элементы пользовательского интерфейса (UI). На основе использования этого объекта в приложение выполнено как начальное меню, так и игровая область.

Весь проект поделён на две сцены: начальное меню и собственно сама игра. В сцене меню пользователь осуществляет ознакомление с правилами игры и её настройки (выбирает уровень сложности, режим игры и т.д.). Поэтому было важно реализовать интерфейс таким образом, чтобы на любом устройстве элементы с текстом и иконками были понятны и видны.

Всё меню состоит из текстовых элементов, кнопок и изображений. В самом Unity нет инструмента для создания изображений, поэтому их необходимо импортировать в проект. В проекте они представляются в виде спрайтов. Спрайт — это 2D-графические объекты, которые используются для всех типов двухмерных игр.

Объект спрайта можно напрямую добавить в Canvas, но лучше для этой цели использовать UI элемент Image. Компонент Image позволяет редактировать объект, изменяя его цвет, материал, отступы и тип изображения.

Для большинства кнопок, в данном приложении, дочерним элементов выступает иконка (изображение). Чтобы правильно настроить такую кнопку, был использован

компонент Image и его свойство Color. Поскольку данное свойство смешивает выбранный цвет с цветом спрайта, то для избежания неправильной окраски необходимо импортировать изображение в белом цвете.

Большинство элементов интерфейса в меню необходимо было сделать с скруглёнными углами. В Unity нет встроенного компонента, который мог бы выполнить скругление углов. Для решения поставленной задачи можно использовать несколько способов. Первый — это импортировать изображение уже с скруглёнными краями. При таком способе размеры объекта являются фиксированными, а их изменение вызовет искажение исходного спрайта. Второй способ — это использовать компонента маски. Данный способ хорошо подойдёт, если объект маски имеет прямоугольную форму. Если использовать спрайт с произвольной фигурой, то края маски будут грубыми (хорошо видны пиксели). Третий способ — это нарезать спрайт на части. При таком подходе возможно изменять размер объекта и края скругления будут гладкими. На рис. 5 показаны примеры использования разных способов скругления углов объекта.

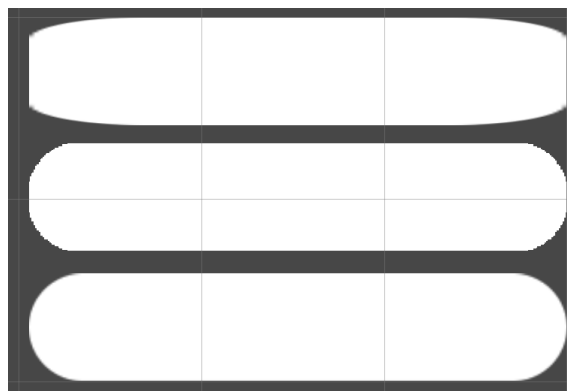


Рис. 5. Примеры использования разных способов скругления углов объекта

Чтобы нарезать спрайт, в Unity используется редактор спрайтов. Нарезка спрайта применяется, когда нужно сохранить пропорции сторон. Выделенные области могут либо растягиваться, либо выкладываться (заполнять недостающие пространство своими копиями). Для создания скругления углов объекта был импортирован спрайт. Он представляет из себя круг белого цвета. Если начать его растягивать без нарезки, то он потеряет свою форму как это было показано на рис. 5. Чтобы избежать деформации фигуры, в редакторе спрайтов границы рамки были выставлены по центру спрайта. Нарезка белого круга показана на рис. 6.



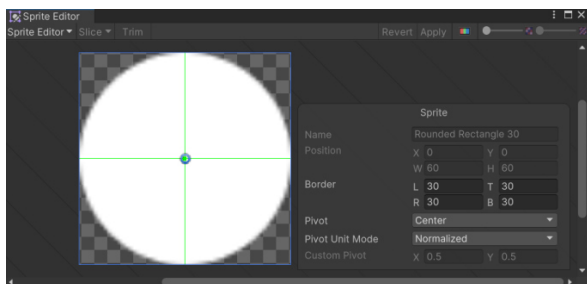


Рис. 6. Нарезка белого круга

Редактор спрайтов имеет ещё одну полезную функцию. Он может разбивать один большой файл спрайта на несколько мелких. Такой подход является более подходящим, чем добавление несколько маленьких файлов. Данная функция имеет несколько режимов нарезки: ручная, с заданием размеров сетки, и автоматическая. Нарезка файла спрайта на несколько частей показана на рис. 7.

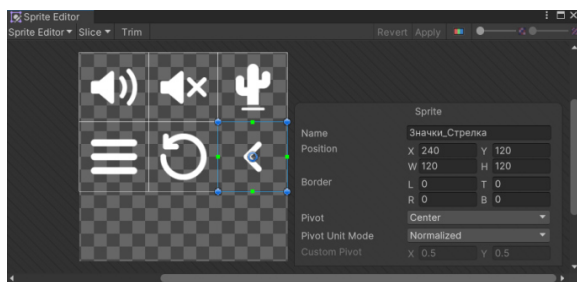


Рис. 7. Нарезки файла спрайта на несколько частей

Подготовить правильно спрайты является важной задачей при разработке интерфейса, но не единственной. Не менее важно сделать адаптивную разметку, чтобы полученный графический интерфейс выглядел одинаково на разных устройствах. Для этого используется компонент Rect Transform. Он является обязательным компонентом для всех объектов. Rect Transform определяет положение, размер и угол наклона объекта.

Благодаря данному компоненту возможно задать привязку объекта к некоторой стороне родительского объекта. Так можно привязать к центру, к верху или к низу, к правому или левому боку.

Для внутренней части диалогового окна определены отступы со всех сторон родительского объекта. Такая привязка позволяет увеличивать или уменьшать размер содержимого окна, не меняя размер его элементов. В разработанном приложении привязкой обладают все элементы интерфейса. Одни подстраиваются под размер окна, другие привязаны к определённой стороне. Такой подход к внутренней части диалогового окна позволяет интерфейсу подстраиваться под различные размеры экранов устройств.

Представленные технологии использовались для разработки мобильного приложения «Двойные крестики-нолики» [3, 4]. Игра является усложнённым вариантом классических «крестиков-ноликов». Классический вариант довольно популярен среди детей и молодёжи, однако его постоянное использование приводит к постепенному угасанию интереса к игровому процессу. Одной из причин являются сравнительно лёгкие правила игры. В варианте «Двойные крестики-нолики» имеются дополнения к традиционным правилам, благодаря которым усложняется игровой процесс. Такое новшество позволяет поддерживать интерес к игре. Совместное использование традиционной версии и предлагаемой позволяет сделать игру многоуровневой.

## Заключение

Цель данной статьи — показать возможности инструментов визуализации игрового движка Unity для разработки графического интерфейса мобильного приложения.

Рассмотрен процесс рендеринга сцены, который включает в себя несколько этапов для формирования двумерной проекции сцены, и сводится к выполнению следующих действий:

- 1) подготовка сцены;
- 2) построение примитива объекта;
- 3) окрашивание объектов;
- 4) проекцию экранного пространства;
- 5) растеризация.

Подробно рассмотрен каждый из этапов процесс рендеринга сцены. Применение данных технологий возможно не только в разработке игр, но и в проектирование промышленных макетах или обучающих тренажёров.

В качестве практического примера демонстрации инструментов визуализации рассмотрено их использование для реализации графического интерфейса приложения «Двойные крестики-нолики» [3, 4], которое является усложнённым вариантом классических «крестиков-ноликов».

## Литература

1. Грегори Джейсон. Игровой движок. Программирование и внутреннее устройство. Третье издание. СПб.: Питер, 2021. 1136 с.
2. Бахтин И.В. Какой игровой движок выбрать? Cryengine, unreal, unity – лучшие игровые движки // Форум молодых ученых. 2019. № 2(30). С. 247-249.
3. Жерелин А.Б., Петрухнова Г.В. Поведение программного оппонента и его методы постановки хода в игре «Двойные крестики-нолики» // Информационные технологии моделирования и управления. 2023. № 2(132). С. 116-120.
4. Свидетельство о государственной регистрации

программы для ЭВМ № 2024617226. Двойные крестик-нолики : № 2024615376/69: заявл. 16.03.2024 : опубл. 29.03.2024 / Жерелин А. Б.

5. Unity Documentation : сайт. – URL: <https://docs.unity3d.com/Manual/index.html> (дата обращения: 29.04.2024).

6. 3D Game Rendering 101 // TECHSPOT URL: <https://www.techspot.com/article/1851-3d-game-rendering-explained/> (дата обращения: 16.03.2024).

7. Unity: Understanding URP, HDRP, and Built-In Render Pipeline // Oc-caSoftware: сайт. – URL: <https://www.occasoftware.com/blog/unity-understanding-urp-hdrp-built-in> (дата обращения: 10.04.2024).

8. What are the different Unity render pipelines? // Educative: сайт. – URL: <https://www.educative.io/answers/what-are-the-different-unity-render-pipelines> (дата обращения: 14.04.2024).

Поступила 06.05.2024; принята к публикации 03.09.2024

#### Информация об авторах

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

**Жерелин Андрей Борисович** – студент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: [zherelin1612@mail.ru](mailto:zherelin1612@mail.ru)

### COMPUTER GAME VISUALIZATION TOOLS

G.V. Petrukhnova, A.B. Zherelin

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

**Abstract:** this article discusses the main stages of visualization of three-dimensional and two-dimensional space in software for creating computer games (game engines). It is shown that game engines are a promising area of work with three-dimensional (3D) graphics. The key user interface development tools are shown. The main stages of visualization are presented and detailed: scene preparation, building a primitive object, coloring objects, creating a projection of screen space, rasterization. It is indicated that Unity offers three different pipelines for creating high-quality visual effects: universal rendering pipeline (URP), high-definition rendering pipeline (HDRP), Built-In. The features and capabilities of these convos are considered. As a practical example of demonstrating visualization tools, their use for implementing the graphical interface of the "Double tic-tac-toe" application is considered. This game is a complicated version of the classic "tic-tac-toe". The classic version is quite popular among children and young people, but its constant use leads to a gradual fading of interest in the gameplay. In the "Double tic-tac-toe" version, there are additions to the traditional rules, which complicate the gameplay, which allows you to maintain interest in the game. The combined use of the traditional version and the proposed one allows you to make the game multilevel. The "Double Tic-tac-toe" mobile application is made in 2D mode with a side view. The built-in Unity pipeline was chosen as the rendering pipeline. The article discusses the features of the implementation of the graphical interface of this application. The possibilities of the visualization tools of the Unity game engine for the development of the graphical interface of this mobile application are shown

**Key words:** game engine, 3D scene, visualization, rendering, interpolation, rasterization, Unity, rendering pipeline, URP, HDRP, user interface

#### References

1. Jason Gregory "Game Engine. Programming and Internals. Third edition" ("Igrovoy dvizhok. Programirovaniye i vnutrenneye ustroystvo", St. Petersburg, Piter, 2021, 1136 p.
2. Bakhtin I.V. "Which game engine to choose? Cryengine, unreal, unity – the best game engines", *Forum of young scientists (Forum molodykh uchenykh)*, 2019, no. 2 (30), pp. 247-249.
3. Zherelin A.B., Petrukhnova G.V. "Behavior of the software opponent and its methods of setting a move in the game "Double tic-tac-toe", *Information technologies of modeling and control (Informatsionnyye tekhnologii mode-lirovaniya i upravleniya)*, 2023, no. 2 (132), pp. 116-120.
4. Certificate of state registration of computer program no. 2024617226, "Double tic-tac-toe" (Zherelin A.B.) no. 2024615376/69, declared 03.16.2024, published 03.29.2024.
5. "Unity Documentation", available at: <https://docs.unity3d.com/Manual/index.html> (accessed 29.04.2024).
6. "3D Game Rendering 101", TECHSPOT, available at: <https://www.techspot.com/article/1851-3d-game-rendering-explained/> (accessed 16.03.2024).
7. "Unity: Understanding URP, HDRP, and Built-In Render Pipeline", Oc-caSoftware, available at: <https://www.occasoftware.com/blog/unity-understanding-urp-hdrp-built-in> (accessed 10.04.2024).
8. "What are the different Unity render pipelines", Educative, available at: <https://www.educative.io/answers/what-are-the-different-unity-render-pipelines> (accessed 14.04.2024).

Submitted 06.05.2024; revised 03.09.2024

#### Information on the authors

**Galina V. Petrukhnova** – Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str. Voronezh 394006, Russia), e-mail: [gvpetruhnova@mail.ru](mailto:gvpetruhnova@mail.ru)

**Andrey B. Zherelin** – Student, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str. Voronezh 394006, Russia), e-mail: [zherelin1612@mail.ru](mailto:zherelin1612@mail.ru)

## ЧИСЛЕННЫЙ МЕТОД НАХОЖДЕНИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОГО ОЖИДАНИЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ КОШИ ДЛЯ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО УРАВНЕНИЯ СО СЛУЧАЙНЫМ ПРОЦЕССОМ

Г.С. Тихомиров

Воронежский государственный университет, г. Воронеж, Россия

**Аннотация:** для описания технологических процессов обычно используются детерминированные и стохастические модели. Предпочтительным является использование стохастических моделей, поскольку их использование позволяет учитывать влияние неконтролируемых возмущений, действующих на эти процессы. При этом случайные процессы обычно описываются одним из известных законов распределения. Рассмотрен численный метод нахождения математического ожидания решения обыкновенного дифференциального уравнения второго порядка с начальными условиями, один из коэффициентов которого является случайным процессом, задаваемым характеристическим функционалом. Уравнение не может быть записано в форме интеграла Ито или Стратоновича. Для получения решения рассматриваемого уравнения оно сводится к детерминированной задаче в обыкновенных и вариационных производных путем введения вспомогательных отображений. Решение полученной детерминированной задачи позволяет найти математическое ожидание искомой функции. Поскольку получение аналитического решения задачи в общем виде является неочевидным, она решается с помощью сеточной аппроксимации. Разработан алгоритм, позволяющий получить численное решение математического ожидания искомой функции в точках временной области. Предложенная методика рассмотрена на примере решения задачи нахождения концентрации радикалов в процессе термомеханической деструкции полимера. Модель процесса описывается уравнением Риккати с заданным начальным условием, которая сводится к линейному неоднородному дифференциальному уравнению второго порядка со случайным процессом. Получено численное решение данной модели, анализ результатов моделирования показал хорошее соответствие между экспериментальными и расчетными значениями концентрации радикалов. Результаты моделирования представлены в графической форме. Предложенный метод реализован в виде прикладной программы на ЭВМ (электронной вычислительной машине)

**Ключевые слова:** дифференциальные уравнения со случайными коэффициентами, характеристический функционал, математическое ожидание, разностный метод, гауссовский случайный процесс, вариационная производная, уравнение с частной и вариационной производными

### Введение

При исследовании технологических процессов методами математического моделирования могут использоваться стохастические и детерминированные модели. Детерминированные модели описываются системами дифференциальных, алгебраических уравнений или аналитическими зависимостями. В тех случаях, когда колебания значений входных и выходных параметров и результатов их измерений незначительны, используются детерминированные модели. Стохастические же модели используют стохастические уравнения, физический смысл которых заключается в описании совокупности различных реализаций процесса. Параметрами этих моделей являются корреляционные зависимости, математическое ожидание, дисперсия и т.д.

Очевидно, что использование стохастических моделей для описания реальных технологических процессов предпочтительно, поскольку в них имеются факторы, не обеспечивающие их прямого измерения (состав и структура ма-

териала), на входные и выходные параметры действуют неконтролируемые возмущения.

Для детерминированных задач Коши хорошо разработаны и находят широкое применение численные методы решения [1]. Задача оценки математического ожидания решения задачи Коши для уравнений со случайным процессом существенно сложнее. В данной работе рассматривается задача Коши

$$\frac{d^2x}{dt^2} + \varepsilon(t)\frac{dx}{dt} + q(t)x = 0, \quad (1)$$

$$x(0) = x_0, \quad (2)$$

$$\frac{dx(0)}{dt} = x_1. \quad (3)$$

Здесь  $t \in \mathbb{R}$  — вещественная переменная;

$x: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$  — искомая функция;

$q: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$  — заданная детерминированная функция;

$\varepsilon$  — случайный процесс;

$x_0, x_1$  — случайные величины.

Положим, что  $\varepsilon$  задан характеристическим функционалом  $\psi(u)$  [2, стр. 165] в виде

$$\psi(u) = E \left[ \exp \left( i \int_T \varepsilon(s) u(s) ds \right) \right],$$

где  $u$  — суммируемая на отрезке  $T$  функция.

В работе рассмотрена задача нахождения математического ожидания  $E[x(t)]$  решения задачи (1)–(3).

В статье приводится алгоритм численного нахождения математического ожидания решения, а также примеры расчетов для конкретного распределения случайного процесса  $\varepsilon$ .

Задача (1)–(3), в которой  $\varepsilon$  является случайным процессом, рассмотрена в [3, стр. 48].

Уравнения Ван-дер-Поля со случайными коэффициентами рассмотрены в работах [4, 5, 6].

### 1. Сведение задачи к детерминированной задаче с обычной и вариационными производными

Умножим равенства (1), (2), (3) на  $w(u) = \exp \left( i \int_T \varepsilon(s) u(s) ds \right)$  и возьмем среднее значение от полученных выражений, получим

$$E \left[ \frac{d^2 x}{dt^2} w(u) \right] + E \left[ \varepsilon(t) \frac{dx}{dt} w(u) \right] +$$

$$+ q(t) E[xw(u)] = 0,$$

$$E[x(0)w(u)] = E[x_0 w(u)], \quad (5)$$

$$E \left[ \frac{dx(0)}{dt} w(u) \right] = E[x_1 w(u)]. \quad (6)$$

Введем отображение  $y(t, u)$

$$y(t, u) = E[xw(u)] \quad (7)$$

Предположим, что случайные величины  $x_0, x_1$  не зависят от  $\varepsilon$ . Задачу (4)–(6) можно записать в виде

$$\frac{\partial^2 y(t, u)}{\partial t^2} + \frac{1}{i} \frac{\delta}{\delta u(t)} \frac{\partial y(t, u)}{\partial t} +$$

$$+ q(t) y(t, u) = 0,$$

$$y(0, u) = E[x_0] \psi(u), \quad (9)$$

$$\frac{\partial y(0, u)}{\partial t} = E[x_1] \psi(u). \quad (10)$$

Здесь  $\frac{\delta}{\delta u(t)}$  обозначает вариационную производную [2, стр. 12].

Отметим, что исходная задача (1)–(3) содержит случайный процесс  $\varepsilon(t)$ . Задача (9), (10) не содержит случайных процессов, причем искомая величина  $E[x(t)]$  легко выражается из (7), а именно

$$E[x(t)] = y(t, 0).$$

Еще одна особенность уравнения (8) состоит в том, что в нем содержится комплексный коэффициент  $\frac{1}{i} = -i$ .

Избавимся от комплексного коэффициента. Введем в рассмотрение отображение

$$Y(t, \xi) = y(t, i\xi).$$

При этом

$$\begin{aligned} \frac{\partial Y(t, \xi)}{\partial t} &= \frac{\partial y(t, i\xi)}{\partial t}, \\ \frac{\delta}{\delta \xi(t)} \frac{\partial Y(t, \xi)}{\partial t} &= \frac{\delta}{\delta \xi(t)} \frac{\partial y(t, i\xi)}{\partial t} = \\ &= \frac{\delta}{\delta(i\xi)} \frac{\partial y(t, i\xi)}{\partial t} i. \end{aligned}$$

В уравнении (8) положим  $u(t) = i\xi(t)$ , тогда его можно представить в виде

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 Y(t, \xi)}{\partial t^2} - \frac{\delta}{\delta \xi(t)} \frac{\partial Y(t, \xi)}{\partial t} + \\ + q(t) Y(t, \xi) = 0. \end{aligned} \quad (11)$$

При этом начальные условия имеют вид

$$Y(0, \xi) = E[x_0] \psi(i\xi), \quad (12)$$

$$\frac{dY(0, \xi)}{dt} = E[x_1] \psi(i\xi). \quad (13)$$

и выполняется равенство

$$Y(t, 0) = E[x(t)].$$

Таким образом, можно численно решить детерминированную задачу (11)–(13) и при этом найти математическое ожидание.

## 2. Сеточная аппроксимация задачи (11)–(13)

Мы не стремимся получить аналитические формулы для оценки математического ожидания  $E[x(t)]$ , а отражаем принципиальную возможность использования разностных методов для нахождения  $E[x(t)]$ .

Вначале рассмотрим вопрос о приближенном вычислении вариационной производной. Пусть  $h$  — приращение переменной  $u$  и  $g(u+h) - g(u) = \Delta g$  — приращение функционала  $g$  по переменной  $u$ ,  $u \in L_1(T)$  [3, стр. 7], тогда, если существует вариационная производная  $\frac{\delta g(u)}{\delta u(t)}$ , то справедливо равенство

$$\Delta g = g(u+h) - g(u) = \int_T \frac{\delta g(u)}{\delta u(s)} h(s) ds + o(h).$$

Пусть теперь

$$h_t(s) = \begin{cases} 1, & \text{при } t \leq s \leq t + \gamma, \\ 0, & \text{иначе,} \end{cases}$$

где  $\gamma$  — достаточно малое число, при этом

$$g(u+h_t) - g(u) = \int_t^{t+\gamma} \frac{\delta g(u)}{\delta u(s)} h_t(s) ds \approx \gamma \frac{\delta g(u)}{\delta u(t)}.$$

Следовательно

$$\frac{\delta g(u)}{\delta u(t)} \approx \frac{g(u+h_t) - g(u)}{\gamma}.$$

Введем обозначения:  $t_k = \tau k$ ,  $\tau$  — шаг по переменной  $t$ ;  $\xi_m = mh_t$ ,  $h_t$  — шаг по переменной  $\xi$ ;  $Y_m^k = Y(t_k, \xi_m)$ .

Заменим производные разностными отношениями

$$\begin{aligned} \left. \frac{dY(t, \xi)}{dt} \right|_{t=t_k, \xi=\xi_m} &= \frac{Y_m^{k+1} - Y_m^k}{\tau}, \\ \left. \frac{d^2 Y(t, \xi)}{dt^2} \right|_{t=t_k, \xi=\xi_m} &= \frac{Y_m^{k+2} - 2Y_m^{k+1} + Y_m^k}{\tau^2}, \\ \left. \frac{\delta}{\delta \xi(t)} \frac{dY(t, \xi)}{dt} \right|_{t=t_k, \xi=\xi_m} &= \left[ \frac{Y_{m+1}^{k+1} - Y_{m+1}^k}{\tau} - \frac{Y_m^{k+1} - Y_m^k}{\tau} \right] \frac{1}{\gamma}. \end{aligned}$$

Подставим эти разностные отношения в уравнение (11), получим

$$\begin{aligned} \frac{Y_m^{k+2} - 2Y_m^{k+1} + Y_m^k}{\tau^2} - \frac{1}{\gamma} \left[ \frac{Y_{m+1}^{k+1} - Y_{m+1}^k}{\tau} - \frac{Y_m^{k+1} - Y_m^k}{\tau} \right] + q^k Y_m^k &= 0. \end{aligned}$$

Отсюда находим  $Y_m^{k+2}$

$$Y_m^{k+2} = Y_m^{k+1} \left[ 2 - \frac{\tau}{\gamma} \right] + \frac{\tau}{\gamma} Y_{m+1}^{k+1} - \frac{\tau}{\gamma} Y_{m+1}^k + \left( \frac{\tau}{\gamma} - q^k \tau^2 - 1 \right) Y_m^k. \quad (14)$$

Выпишем начальные условия

$$Y_m^0 = E[x_0] \psi_m, \quad (15)$$

$$Y_m^1 = Y_m^0 + \tau E[x_1] \psi_m. \quad (16)$$

Мы получили сеточную задачу, при этом нужно найти  $E[x(t_k)]$ , которое равно  $Y_0^k$ .

Отметим, что получена явная разностная схема. Ее шаблон представлен на рис. 1.

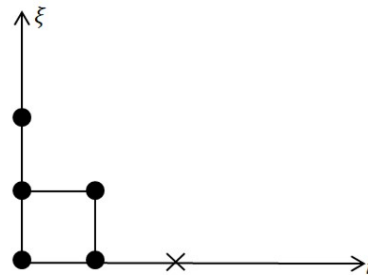


Рис. 1. Шаблон разностной схемы



Чтобы найти значение в точке  $x$  (крестик), нужно знать значение в предыдущих четырех точках.

Пусть нам нужно найти  $N$  значений  $Y_0^k$ ,  $0 \leq k \leq N$ . Используем следующий алгоритм:

1. Выбираем число  $N$  — число точек по оси  $t$ .

2. Вводим  $\tau, N, \gamma, E[x_0], E[x_1]$ .

3. Задаем  $q^k, \psi(u)$ ,  $0 \leq k \leq N$ .

4. В цикле  $0 \leq m \leq N-1$  находим  $Y_m^0 = E[x_0] \psi(imh_0)$ ,  $Y_m^1 = Y_m^0 + \tau E[x_1] \psi(imh_0)$ .

5. В цикле  $0 \leq k \leq N-2$  и внутреннем цикле  $0 \leq m \leq N-2-k$  находим

$$Y_m^{k+2} = Y_m^{k+1} \left[ 2 - \frac{\tau}{\gamma} \right] + \frac{\tau}{\gamma} Y_{m+1}^{k+1} - \frac{\tau}{\gamma} Y_{m+1}^k + \left( \frac{\tau}{\gamma} + q^k \tau^2 - 1 \right) Y_m^k, 0 \leq k \leq N-2.$$

6. Создаем искомый массив  $Y_0^k$  на основе рассчитанных значений  $Y_0^0$ ,  $Y_1^0$ ,  $Y_m^{k+2}$ ,  $0 \leq k \leq N-2$ .

### 3. Примеры расчета математического ожидания

Приведем пример расчетов для задачи описания процесса образования радикалов при термомеханодеструкции полимеров и которая описывается уравнением [7]

$$\frac{dR}{dt} = -k_3 R^2(t) + R(t)(k_2(t, \omega) -$$

$$-k_1) + k_1 P_0, \quad R(0) = 0, \quad (18)$$

где  $R \in \mathbb{R}$  — искомая функция (концентрация радикалов);

$t \in \mathbb{R}$  — время;

$k_2(t, \omega)$  — случайный процесс;

$\omega \in \Omega$ ,  $\Omega$  — пространство событий;

$k_1 \in \mathbb{R}$ ,  $k_3 \in \mathbb{R}$ ,  $P_0 \in \mathbb{R}$  — заданные параметры неравные нулю.

Уравнение (17) является уравнением Риккати [8, стр. 46]. Рассмотрим уравнение Риккати в общем виде

$$y' = p(x)y^2 + q(x)y + r(x), \quad (19)$$

где  $p, q, r$  — заданные известные непрерывные функции.

Введем замену

$$y = -\frac{1}{p(x)} \frac{u'(x)}{u(x)}, \quad (20)$$

где  $u$  — новая искомая функция.

Тогда уравнение (19) примет вид

$$-\left( \frac{u'(x)}{p(x)u(x)} \right)' = \frac{u^2(x)}{p(x)u^2(x)} - \frac{q(x)u'(x)}{p(x)u(x)} + r(x).$$

Выполнив все упрощения получим

$$-u''(x)p(x) + u'(x)(p'(x) + p(x)q(x)) - u(x)r(x)p^2(x) = 0. \quad (21)$$

Мы свели уравнение Риккати (18) к линейному неоднородному уравнению второго порядка (21). В нашей модели  $p(x) = -k_3$ ,  $q(x) = k_2(t, \omega) - k_1$ ,  $r(x) = k_1 P_0$ . Подставим  $p(x), q(x), r(x)$  в соответствии с уравнением (17) и выполним упрощения с учетом, что  $k_3 \neq 0$

$$u''(t) + u'(t)(k_1 - k_2(t)) - u(t)k_3k_1P_0 = 0. \quad (22)$$

Введем обозначения в уравнении (22)

$$k_1 - k_2(t, \omega) = \varepsilon(t), \quad k_3k_1P_0 = c. \quad (23)$$

Тогда, уравнение (22) сводится к уравнению

$$\frac{d^2u}{dt^2} + \varepsilon(t) \frac{du}{dt} - cu = 0. \quad (24)$$

Уравнение (17) имеет вид уравнения (19), то есть переменной  $y$  соответствует переменная  $R$ . Поскольку выполняется условие (18), то положим  $\frac{du(0)}{dt} = 0$ , а  $u(0) = 1$ . Тогда для уравнения (24) получаем задачу с начальными условиями

$$u(0) = u_0 = 1, \quad (25)$$

$$\frac{du(0)}{dt} = u_1 = 0. \quad (26)$$

Заметим, что задача (24)–(26) имеет вид задачи (1)–(3). Для нахождения математического ожидания решения задачи (24)–(26) можно воспользоваться формулами (14)–(16).

Рассмотрим случай, когда  $\varepsilon(t)$  задачи (24)–(26) — гауссовский случайный процесс, который задается характеристическим функционалом [9]

$$\psi(u) = \exp \left[ i \int_T a(s_1) u(s_1) ds_1 - \frac{1}{2} \iint_T b(s_1, s_2) u(s_1) u(s_2) ds_1 ds_2 \right],$$

где  $a(s_1) = E(\varepsilon(s_1))$  — математическое ожидание случайного процесса  $\varepsilon(t)$ ;

$b(s_1, s_2) = E(\varepsilon(s_1)\varepsilon(s_2)) - E(\varepsilon(s_1))E(\varepsilon(s_2))$  — ковариационная функция случайного процесса  $\varepsilon(t)$ ;

$T$  — промежуток, на котором рассматривается задача.

Рассмотрим частный случай, когда  $a(s_1) = a = const$ . Зададим ковариационную функцию случайного процесса  $\varepsilon(t)$  в виде

$$b(s_1, s_2) = \frac{A}{1 + (s_1 - s_2)^2 B^2},$$

где  $A$  и  $B$  — константы.

С учетом всех замен формулы (14)–(16) формулы (24)–(26) принимают вид

$$Y_m^{k+2} = Y_m^{k+1} \left[ 2 - \frac{\tau}{\gamma} \right] + \frac{\tau}{\gamma} Y_{m+1}^{k+1} - \frac{\tau}{\gamma} Y_{m+1}^k + \left( \frac{\tau}{\gamma} + k_3 k_1 P_0 \tau^2 - 1 \right) Y_m^k,$$

$$Y_m^0 = E[u_0] \exp \left[ -m a \gamma + \frac{1}{2} m^2 \gamma^2 b(0, 0) \right],$$

$$Y_m^1 = E[u_0] \exp \left[ -m a \gamma + \frac{1}{2} m^2 \gamma^2 b(0, 0) \right] + E[x_1] \tau \exp \left[ -m a \gamma + \frac{1}{2} m^2 \gamma^2 b(0, 0) \right].$$

Для нахождения математического ожидания воспользуемся алгоритмом из раздела 2. Отметим, что необходимо идентифицировать следующие параметры:  $\gamma, k_3 k_1, A$ . Имея экспериментальные значения из опытов для концентрации радикалов в разные моменты времени, можно выполнить параметрическую идентификацию с помощью генетического алгоритма [10]. Положив  $N = 150, \tau = 0.1, E[u_0] = 1, E[u_1] = 0, P_0 = 0.4$  и проведя параметрическую идентификацию, с помощью которой определены  $\gamma = 0.253, A = 0.00135, k_1 = 2.725 \times 10^{-5}, k_3 = 0.254$ , получено математическое ожидание решения задачи (24)–(26). Графики зависимости математического ожидания концентрации радикалов (17)–(18) с учетом полученных  $Y_0^k$  и замены (20) и экспериментальных значений изменения концентрации радикалов во времени представлены на рис. 2. Анализ полученных результатов показал хорошее соответствие между экспериментальными и расчетными значениями искомой функции. Средняя относительная погрешность между экспериментальными и расчетными значениями составила 3.3 % относительных.

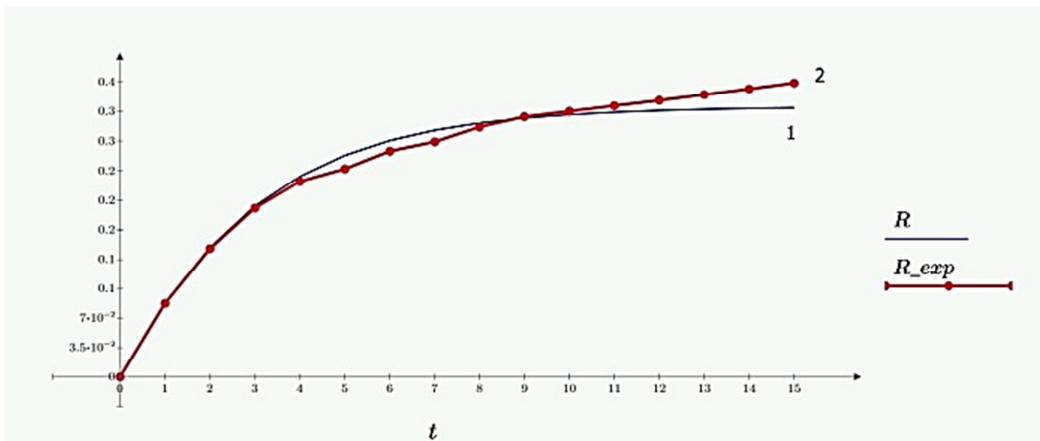


Рис. 2. График математического ожидания решения задачи (17)–(18) и экспериментальных значений

### Заключение

Численные методы нахождения математического ожидания решения дифференциальных уравнений, которые записываются в форме Ито или Стратоновича, встречаются в литературе [4], [11], [12]. Если дифференциальное уравнение не записывается в форме Ито или Стратоновича, то численные методы нахождения математического ожидания решения нам не встречались (исключая простейшие случаи, например, когда случайный процесс дискретный, или является просто случайной величиной). Предложенный метод может быть обобщен на дифференциальные уравнения с двумя случайными процессами и на другие линейные дифференциальные уравнения, коэффициенты которых являются случайными процессами. Результаты расчетов представлены в виде графика.

Автор благодарен своему научному руководителю Задорожному В.Г. за помощь в постановке задачи и обсуждении результатов расчетов.

### Конфликт интересов

Автор декларирует отсутствие потенциальных и явных конфликтов интересов, связанных с публикацией данной статьи.

### Литература

1. Бахвалов Н.С. Численные методы (анализ, алгебра, обыкновенные дифференциальные уравнения). Главная редакция физико-математической литературы издательства «Наука», М., 1975 г. 631 с.
2. Задорожный В.Г. Методы вариационного анализа. М. Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», Институт компьютерных исследований, 2006. 316 с.

3. Задорожный В.Г. Дифференциальные уравнения со случайными коэффициентами: учебное пособие для вузов / В.Г. Задорожный; Воронежский государственный университет. Воронеж: Издательско-полиграфический центр Воронежского государственного университета, 2012. 98 с.

4. Афанасьев В.Н., Колмановский В.Б., Носов В.Р. Математическая теория конструирования систем управления. М.: Издательство «Высшая школа», 1998. 574 с.

5. Задорожный В.Г., Непринцев В.И., Кузнецов А.А. Асинхронные автоколебания в двухконтурном автогенераторе // Вестник Воронежского государственного университета, серия: системный анализ и информационные технологии. 2007. № 1. С. 133.

6. Задорожный В.Г., Купцова Е.В. Об осцилляторе Ван-дер-Поля под действием случайного шума // Новые направления и новые результаты в теории метода регуляризации сингулярных возмущений Ломова: материалы международной конференции, посвященной 100-летию со дня рождения С.А. Ломова. Москва, 24-25 ноября 2022 г. М.: изд. МЭИ, 2022. С. 61-81.

7. Математическое моделирование процесса термомеханической деструкции облученных резин / С.Л. Подвальный, А.А. Хвостов, А.В. Карманов, Г.С. Тихомиров, А.П. Попов // Вестник Воронежского государственного технического университета. Т. 16. № 2. 2020. С. 11.

8. Боровских А.В. Дифференциальные уравнения в 2 ч. Часть I: учебник и практикум для вузов / А.В. Боровских, А.И. Перов. 3-е изд., перераб. и доп. Москва: Издательство Юрайт, 2024. 327 с.

9. Задорожный В.Г. Моментные функции решения уравнения теплопроводности со случайными коэффициентами // Фундаментальная и прикладная математика. 2001. Т. 7. № 2. С. 351-371.

10. Моделирование процесса пиролиза прямогонного бензина с использованием генетического алгоритма / В.К. Битюков, С.Г. Тихомиров, Д.В. Арапов, С.С. Саввин // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. 2015. № 3 (65). С. 79-84.

11. Брайсон А., ХО Ю-Ши. Прикладная теория и оптимальное управление. М.: Мир, 1972. С. 544.

12. Казакевич В.В. Справочник по теории автоматического управления / Под ред. А.А. Красовского. М.: Наука, 1987. 712 с.

Поступила 23.06.2024; принята 03.09.2024

### Информация об авторах

**Тихомиров Герман Сергеевич** — аспирант кафедры системного анализа и управления, Воронежский государственный университет (394018, Россия, г. Воронеж, Университетская площадь, 1), e-mail: tikhomirov.gs@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-6237-4717>

## NUMERICAL METHOD FOR PASSING THE MATHEMATICAL EXPECTATION OF THE SOLUTION TO THE CAUCHY PROBLEM FOR A DIFFERENTIAL EQUATION WITH A RANDOM PROCESS

G.S. Tikhomirov

Voronezh State University, Voronezh, Russia

**Abstract:** deterministic and stochastic models are usually used to describe technological processes. The use of stochastic models is preferable, since their use allows us to take into account the influence of uncontrolled disturbances acting on these processes. In this case, random processes are usually described by one of the known distribution laws. The article discusses a



numerical method for finding the mathematical expectation of a solution to a second-order ordinary differential equation with initial conditions, one of the coefficients of which is a random process specified by the characteristic functional. The equation cannot be written in the form of an Ito or Stratonovich integral. To obtain a solution to the equation under consideration, it is reduced to a deterministic problem in ordinary and variational derivatives by introducing auxiliary mappings. The solution of the resulting deterministic problem allows us to find the mathematical expectation of the desired function. Since obtaining an analytical solution to the problem in general form is not obvious, it is solved using a grid approximation. An algorithm has been developed that makes it possible to obtain a numerical solution to the mathematical expectation of the desired function at points in the time domain. The proposed method is considered using the example of solving the problem of finding the concentration of radicals in the process of thermomechanical destruction of a polymer. The process model is described by the Riccati equation with a given initial condition, which reduces to a second-order linear inhomogeneous differential equation with a random process. A numerical solution to this model was obtained; analysis of the simulation results showed good agreement between the experimental and calculated values of the concentration of radicals. The simulation results are presented in graphical form. The proposed method is implemented in the form of an application program on a computer

**Key words:** differential equations with random coefficients, characteristic functional, mathematical expectation, difference method, Gaussian random process, variational derivative, equation with partial and variational derivatives

### References

1. Bakhvalov N.S. "Numerical methods (analysis, algebra, ordinary differential equations)" ("Chislennyye metody (analiz, algebra, obyknovennyye differentsial'nyye uravneniya)", Moscow, Nauka 1975, 631 p.
2. Zadorozhny V.G. "Methods of variational analysis" ("Metody variatsionnogo analiza"), Izhevsk: Research Center "Regular and Chaotic Dynamics", Institute of Computer Research, 2006, 316 p.
3. Zadorozhny V.G. "Differential equations with random coefficients: a textbook for universities" ("Differentsial'nyye uravneniya so sluchaynymi koeffitsiyentami: uchebnoye posobiye dlya vuzov"), Voronezh, Izd-vo VGU, 2012, 98 p.
4. Afanasyev V.N., Kolmanovsky V.B., Nosov V.R. "Mathematical theory of control systems design" ("Matematicheskaya teoriya konstruirovaniya sistem upravleniya"), Moscow, Izdatel'stvo Vysshaya shkola, 1998, 574 p.
5. Zadorozhny V.G., Nprintsev V.I., Kuznetsov A.A. "Asynchronous self-oscillations in a two-circuit autogenerator", *The Bulletin of Voronezh State University, series: systems analysis and information technology (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta, seriya: sistemnyy analiz i informatsionnyye tekhnologii)*, 2007, no. 1, p. 133.
6. Zadorozhny V.G., Kuptsova E.V. "On the Van der Pol oscillator under the action of random noise", *New directions and new results in the theory of Lomov's singular perturbation regularization method (Novyye napravleniya i novyye rezul'taty v teorii metoda regulyatsii singulyarnykh vozmushcheniy Lomova)*, proc. of the international conference dedicated to the 100th anniversary of the birth of S.A. Lomov, Moscow, November 24-25, 2022, Moscow, Izd-vo MEI, 2022, pp. 61-81.
7. Podvalny S.L., Khvostov A.A., Karmanov A.V., Tikhomirov G.S., Popov A.P. "Mathematical modeling of the process of thermomechanical destruction of irradiated rubber", *The Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2020, vol. 16, no. 2, p. 11.
8. Borovskikh A.V. Perov A.I. "Differential equations in 2 parts. Part 1: textbook and practical course for universities" ("Differentsial'nyye uravneniya v 2 ch. Chast' 1: uchebnik i praktikum dlya vuzov"), Moscow, Yurait, 2024, 327 p.
9. Zadorozhny V.G. "Moment functions for solving the heat equation with random coefficients", *Fundamental and Applied Mathematics (Fundamental'naya i prikladnaya matematika)*, 2001, vol. 7, no. 2, pp. 351-371.
10. Bityukov V.K., Tikhomirov S.G., Arapov D.V., Savvin S.S. "Modeling the process of pyrolysis of straight-run gasoline using a genetic algorithm", *The Bulletin of Voronezh State University of Engineering Technologies (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta inzhenernykh tekhnologiy)*, 2015, no. 3 (65), pp. 79-84.
11. Bryson A., HO Yu-Shi "Applied Theory and Optimal Control" ("Prikladnaya teoriya i optimal'noye upravleniye"), Moscow, Mir, 1972, pp. 544.
12. Kazakevich V.V. "Handbook of Automatic Control Theory" ("Spravochnik po teorii avtomaticheskogo upravleniya"), ed. by A.A. Krasovskiy, Moscow, Nauka, 1987, 712 p.

Submitted 23.06.2024; revised 03.09.2024

### Information about the authors

**German S. Tikhomirov** - Postgraduate Student, Department of System Analysis and Management, Voronezh State University (1 Universitetskaya pl., Voronezh 394018, Russia), e-mail: tikhomirov.gs@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-6237-4717>

## АНАЛИЗ ПРИМЕНЕНИЯ ПАРАМЕТРИЧЕСКИХ ФУНКЦИЙ ВОЗНАГРАЖДЕНИЯ В АЛГОРИТМАХ ОБУЧЕНИЯ С ПОДКРЕПЛЕНИЕМ

В.В. Кашко, С.А. Олейникова, Ю.С. Акинина

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

**Аннотация:** объектом исследования являются интеллектуальные шагающие роботы, работающие с помощью алгоритмов обучения с подкреплением. В данных алгоритмах цель задаётся посредством значений функции вознаграждения, от выбора которой напрямую зависят скорость и результат обучения. Исходя из наличия множества факторов, влияющих на выполнение действий агента, возникает задача подбора каждого параметра, входящего в данную функцию. Данные параметры подбираются, исходя из наилучших с точки зрения лица принимающего решения последствий для агента. Одновременно необходимо принимать решение о стратегии выбора. Исследуются существующие подходы к формированию функции вознаграждения многофакторных систем, выявление проблем, возникающих при выборе «некачественной» функции вознаграждения, анализ применения параметрических функций. Исследование осуществлялось с использованием разработанного приложения, имитирующего действие интеллектуального агента, основанного на обучении с подкреплением с разными функциями вознаграждения. Получение опытных данных производилось с использованием табличного алгоритма Q – обучения на примере симуляции игры «Замёрзшее озеро». Все результаты получены на одних и тех же параметрах алгоритма, но с разными распределениями вознаграждений. Таким образом, проведено экспериментальное исследование, позволяющее сделать выводы о специфике построения функции вознаграждения. Новизна заключается в выработке рекомендаций, позволяющих получить наилучший эффект вознаграждения в алгоритмах обучения с подкреплением

**Ключевые слова:** обучение с подкреплением, функция вознаграждения, параметризация, параметрические функции, Q-обучение, робототехника

### Введение

Любой робот представляет собой многофакторную систему, поскольку для определения состояния окружающей среды (наблюдения) используется множество датчиков [1]. Показания каждого вносят свой вклад в формирование сигналов управления. В предыдущей работе [2], была построена математическая модель универсальной системы управления шагающим роботом и заложены предпосылки к применению методов обучения с подкреплением. Робот был представлен в виде перевёрнутого маятника, а задача управления была сведена к его балансировке. Для реализации локомотивной программы этого не достаточно. Необходимо учитывать изменения координат в нужном направлении движения, отслеживание коллизий, наличие препятствий. Отсюда возникает вопрос о способе задания цели агенту при наличии нескольких параметров.

В данной работе на основании экспериментального исследования были выработаны рекомендации, позволяющие улучшить функцию вознаграждения.

### Существующие подходы к формированию вознаграждения

Классическим вариантом распределения вознаграждения является назначение целевому состоянию единицы при нулевых значениях награды в остальных случаях [3]. Величины варьируются в зависимости от конкретной задачи, но в основном, функция вознаграждения представлена в следующем виде:

$$r_t = R(s, a), \quad (1)$$

где  $s$  — текущее состояние среды,

$a$  — выбранное действие из этого состояния.

В работе [6] адаптивность робота к среде измеряется двумя критериями — курсовая скорость перемещения робота и потребление энергии. Из-за ограничений обучения с подкреплением [4, 5] вознаграждение упрощено, чтобы стимулировать более высокую скорость движения и наказывать за более высокое потребление энергии. В результате оно представлено в следующем виде:

$$r_t = K_v \cdot v_x - K_\varepsilon \cdot (|\tau \cdot \dot{\theta}| + \tau^2), \quad (2)$$

где  $K_v$  и  $K_\varepsilon$  — положительные веса;

$\dot{\theta}$  — следующее состояние робота в виде кортежа углов соединений;

$\tau$  — величина энергопотребления;  
 $v_x$  — курсовая скорость.

В работе [7] решается задача обучения движению шестиногого робота пожарного. Для генерации функции вознаграждения показания камеры (одометрия) объединены с данными гироскопа. Функция имеет следующий вид:

$$R_{total}[t] = R_{gyro} + R_{visual}, \quad (3)$$

где  $R_{total}$  — общее вознаграждение;

$R_{gyro}$  — вознаграждение, полученное на основании данных гироскопа;

$R_{visual}$  — вознаграждение, полученное на основании данных камеры.

В [8] целью робота гексопода, передвигающегося по трассе, состоящей из столбов, состоит в том, чтобы добраться до заданного участка из начальной точки по кратчайшему пути, соблюдая при этом все кинематические и динамические ограничения. Функция вознаграждения представлена в следующем виде:

$$r_t = r_{bt} + r_{kt} + r_{ft} + r_{dt} + r_{gt}, \quad (4)$$

где  $r_{bt}$  — пограничное вознаграждение, налагаемое при выходе за пределы границ окружающей среды;

$r_{kt}$  — наказание за нарушение кинематических ограничений;

$r_{ft}$  — наказание за неосуществимый переход в другое состояние, рассчитанный с помощью модели осуществимости перехода;

$r_{dt}$  — награда за пройденное расстояние (заставляет робота двигаться к намеченной области кратчайшим путем);

$r_{gt}$  — награда за достижение цели.

При рассмотрении вышеописанных примеров, можно сделать вывод о том, что функция вознаграждения представима в виде параметрической функции следующего вида [9, 10]:

$$R_t = \sum_{i=1}^N \alpha_i \cdot R_i. \quad (5)$$

### Описание среды моделирования

Среда моделирования представляет собой сеточный мир, пример которого изображён на рис. 1. Здесь каждая клетка является состоянием. Агент может совершить четыре действия: налево, вниз, направо и вверх. Цель игры — достижение целевого состояния. Для анализа функций вознаграждения реализован метод табличного Q-обучения со следующими пара-

метрами алгоритма: скорость обучения = 0.5, коэффициент обесценивания = 0.95, коэффициент жадной стратегии = 0.2, количество эпох = 5000. На рис. 1 символ S — обозначает стартовое состояние агента, F — целевое состояние агента, X — препятствие (запрещённое состояние) и \* — безопасное состояние.

S	*	X	*	*	*	X
*	*	*	*	*	*	*
X	X	*	X	X	*	*
*	*	*	X	X	*	*
*	*	X	X	X	*	X
*	*	*	*	*	*	*
X	*	*	X	*	*	F

Рис. 1. Карта игры «Замёрзшее озеро»

### Эксперимент для анализа построения функции вознаграждения

Для формирования функции вознаграждения использовались два параметра: расстояние до цели  $R_{goal}$  и расстояние до ближайших препятствий  $R_{cliff}$ , имитирующее показания лидера. При формировании  $R_{cliff}$  агент смотрит по всем направлениям. Если возможное действие приводит к выходу за пределы, то к общему вознаграждению, для состояния, прибавляется 0, если нет препятствия, то 1, в противном случае -1. В результате конечная параметризованная функция вознаграждения примет следующий вид:

$$R_{total} = \alpha \cdot R_{cliff} + \beta \cdot R_{goal}, \quad (6)$$

где  $\alpha$  — коэффициент важности вознаграждения близости препятствий;

$\beta$  — коэффициент важности вознаграждения за близость к цели.

Для анализа управления объектом при различных функциях вознаграждения проведем следующий эксперимент. Будем менять в формуле (6) параметры  $\alpha$  и  $\beta$  и анализировать полученные результаты. Кроме того, сформируем множество разных функций вознаграждения и будем анализировать результирующий путь и его ценность.

Симуляция игры проводилась для следующих комбинаций, представленных в табл. 1.

Таблица 1

Перечень проводимых экспериментов

№	$\alpha$	$\beta$	Функция вознаграждения
1	-	-	Стандартная
2	0.3	0.7	$R_{cliff}$ совместно с положительной $R_{goal}$
3	0.3	0.7	$R_{cliff}$ совместно с положительной $R_{goal}$ с указанием конечному состоянию большего значения
4	0.3	0.7	$R_{cliff}$ совместно с некорректной (первая строка и столбец нулевые, пока остальные отрицательные) отрицательной $R_{goal}$
5	0.3	0.7	$R_{cliff}$ совместно с отрицательной $R_{goal}$
6	0.7	0.3	$R_{cliff}$ совместно с положительной $R_{goal}$ с указанием конечному состоянию большего значения

Среди множества функций вознаграждения, используемых в данном эксперименте, выделим следующие три:

- положительная функция вознаграждения за преодоление расстояния до цели ( $R_{pos\_aim}$ );
- отрицательная функция вознаграждения за преодоление расстояния до цели ( $R_{neg\_aim}$ );
- функция вознаграждения, связанная с расстоянием до ближайших препятствий ( $R_{cliff}$ ).

Без ограничения общности, выберем следующие числовые значения вознаграждения для функции  $R_{pos\_aim}$  (табл. 2).

Таблица 2

Значения функции  $R_{pos\_aim}$

0	0	0	0	0	0	0
0	2	2	2	2	2	2
0	2	4	4	4	4	4
0	2	4	6	6	6	6
0	2	4	6	8	8	8
0	2	4	6	8	10	10
0	2	4	6	8	10	12

Каждая ячейка содержит значение вознаграждения, получаемое агентом при ее достижении. Значения функции вознаграждения  $R_{neg\_aim}$  приведены в табл. 3.

Таблица 3

Значения функции  $R_{neg\_aim}$

-14	-14	-14	-14	-14	-14	-14
-14	-12	-12	-12	-12	-12	-12
-14	-12	-10	-10	-10	-10	-10
-14	-12	-10	-8	-8	-8	-8
-14	-12	-10	-8	-6	-6	-6
-14	-12	-10	-8	-6	-4	-4
-14	-12	-10	-8	-6	-4	1

В табл. 4 можно увидеть значения вознаграждения  $R_{cliff}$ .

Таблица 4

Значения функции  $R_{pos\_aim}$

2	1	-50	1	3	1	-50
1	2	2	2	2	4	1
-50	-50	0	-50	-50	2	3
1	2	0	-50	-50	2	1
3	2	-50	-50	-50	0	-50
1	4	2	0	2	4	1
-50	1	1	-50	1	3	100

### Результаты эксперимента

На основании линейных комбинаций распределений вознаграждений, представленных на рис. 2, была произведена оценка вклада коэффициентов значимости в формирование конечной стратегии следования агента в целевое состояние. Проведены эксперименты, часть из которых представлена в табл. 1. На рис. 3 продемонстрированы траектории агента для некоторых из них.

Стандартная функция вознаграждения (препятствия вознаграждаются значением -1, безопасные состояния – 0, целевое состояние 1) использовалась для проверки работоспособности алгоритма и корректности генерируемых данных в Q-таблице. Второй эксперимент, в котором использовалась положительная функция вознаграждения за близость к цели, показал наличие цели. При этом в четвертом эксперименте намеренно испорчено распределение данной функции. В результате было получено заикливание в области, близкой к старту. Это связано с тем, что по первой строке и столбцу расположены состояния, с вознаграждением равным нулю, тогда как остальные состояния имеют отрицательное вознаграждение. После исправления распределения, заикливание исчезло. Из этого следуют следующие выводы:

- терминальное состояние должно быть в разы больше остальных вознаграждений;
- распределение вознаграждений не должно содержать «тупиковых» зон, приводящих к заикливанию алгоритма.

Как показали экспериментальные данные, коэффициенты значимости вносят свой вклад в формировании стратегии достижения цели. На

рис. 2 показаны перемещения агента из третьего (рис. 2, a), пятого (рис. 2, b) и шестого (рис. 2, c) экспериментов, при которых менялись местами значения соответствующих коэффициентов, а также тип функции вознаграждения. В первых двух случаях наиболее важной была функция расстояния до цели, во втором — дистанция до ближайших препятствий.

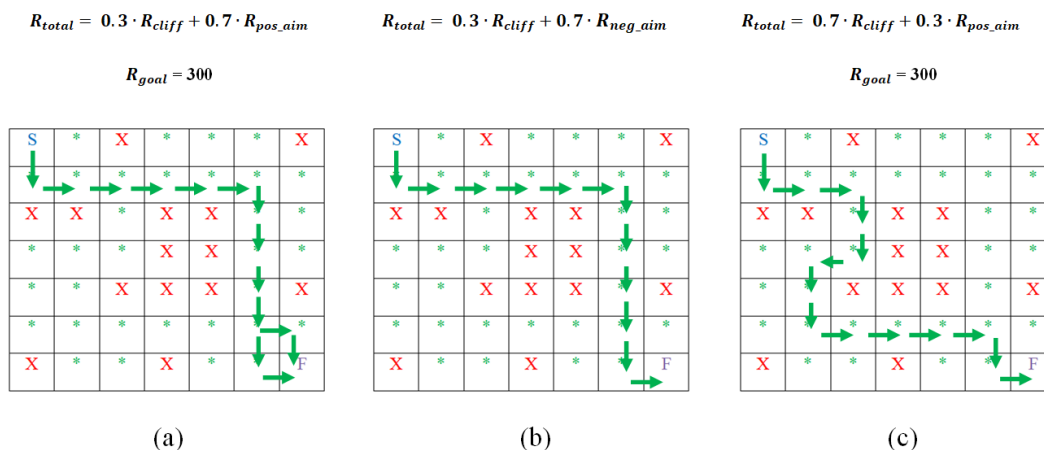


Рис. 2. Стратегии, полученные в результате использования разных коэффициентов значимости

Как видно из рис. 3, a и b, стратегия сформировалась таким образом, что агент выбирает действия, приводящие его в состояния, наиболее близкие к целевому. В случае, представленном на рис. 3, c, стратегия сформирована с расчётом на то, что в состоянии агент будет иметь больше доступных действий. В данном случае могла сформироваться стратегия, как и в вышеописанных случаях, но по причине вклада, вносимого функцией вознаграждения за близость к цели, в состоянии (1,3), агент отдаёт большее предпочтение действию «вниз» нежели «направо», что формирует стратегию с наибольшей длиной пути.

В результате проведения экспериментов была проанализирована зависимость изменения функций вознаграждения. График для стандартной функции  $R_{standart}$  приведен на рис. 3.



Рис. 3. График общего вознаграждения за 5000 эпизодов обучения для стандартной функции вознаграждения



Здесь по оси абсцисс отложены номера эпизодов обучения, а по оси ординат — значение вознаграждения, полученного в этом эпизоде. Рассмотрим случай

$$R_{total} = 0.7 \cdot R_{cliff} + 0.3 \cdot R_{pos\_aim}. \quad (7)$$

График для 5000 эпизодов обучения продемонстрирован на рис. 4.

Зашумлённость связана с использованием операции  $\max$  в алгоритме Q-обучения. Из изображений видно, что при использовании параметрических функций с большими величинами вознаграждений, происходит накопление большей ошибки, чем при использовании простой стандартной функции. В связи с этим, алгоритм медленнее сходится, поскольку присутствует значительный разброс значений.

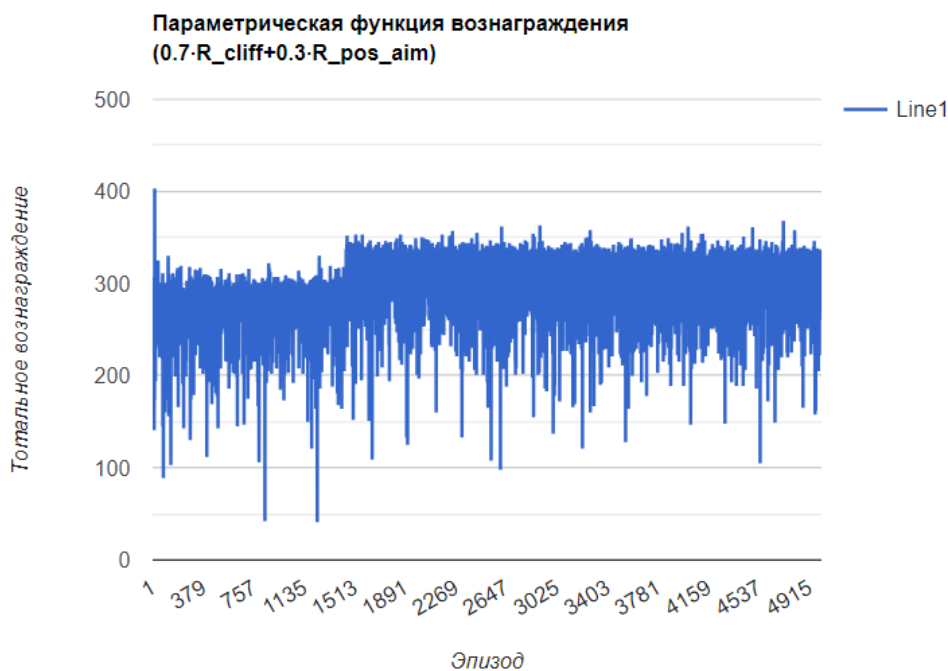


Рис. 4. График общего вознаграждения за 5000 эпизодов обучения для функции вознаграждения  $R_{total} = 0.7 \cdot R_{cliff} + 0.3 \cdot R_{pos\_aim}$

### Заключение

В работе был проведен эксперимент, вследствие которого проанализирован результат прохождения агентом некоторого пути в зависимости от функции вознаграждения, которая влияет на выбор стратегии на каждом шаге. Определён способ объединения нескольких параметров для формирования общего вознаграждения. Произведён анализ параметрических функций с точки зрения коллизий. Выполнено сравнение с простой функцией на предмет сходимости. В результате многочисленных экспериментов сделаны следующие выводы:

- несколько параметров можно объединить в общее вознаграждение, используя формулу (5);
- терминальное состояние должно иметь вознаграждение в разы больше чем остальные;

- распределение вознаграждений не должно содержать коллизий, вызывающих закликивание агента;
- значения вознаграждений (кроме целевого состояния) должны быть по возможности небольшими для ликвидации шумов и лучшей сходимости.
- необходимо корректно подбирать параметры значимости, для обеспечения поиска оптимальной стратегии.

Таким образом, предложены рекомендации для формирования функции вознаграждения, позволяющей обеспечить выбор оптимальных стратегий для подобных задач.

### Литература

1. Юревич Е.И. Основы робототехники. 4-е изд., перераб. и доп.: учебное пособие. СПб.: БХВ-Петербург, 2017. 304 с.



2. Kashko V.V., Oleinikova S.A. Mathematical model of a universal control system for a walking robot based on reinforcement learning methods. *Modeling, Optimization and Information Technology*. 2024.

3. Саттон Р.С., Барто Э.Дж. Обучение с подкреплением: Введение. 2-е изд.: пер. с англ. М.: ДМК Пресс, 2020. 552 с.

4. Проблемы в области глубокого обучения с подкреплением / А.Н. Шарипбаев, Р.Н. Шарипбаев, Б.Т. Абдулазизов, М.Р. Тохиржонова // Форум молодых ученых. 2023. № 6 (82). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/problemy-v-oblasti-glubokogo-obucheniya-s-podkrepleniem> (дата обращения: 05.04.2024).

5. Kober J., Bagnell J., Peters J. Reinforcement Learning in Robotics: A Survey // *The International Journal of Robotics Research*. 2013. 32(11). Pp. 1238-1274.

6. Adaptive Locomotion Control of a Hexapod Robot via Bio-Inspired Learning / W. Ouyang, H. Chi, J. Pang,

W. Liang, Q. Ren // *Frontiers in Neurorobotics*. 2021. No. 15. 627157.

7. Learning to Walk: Spike Based Reinforcement Learning for Hexapod Robot Central Pattern Generation / A. Lele, Y. Fang, J. Ting, A. Raychowdhury // 2nd IEEE International Conference on Artificial Intelligence Circuits and Systems (AICAS). Genova, Italy, 2020, Pp. 208-212.

8. Deep Reinforcement Learning for Multi-contact Motion Planning of Hexapod Robots / H. Fu, K. Tang, P. Li, W. Zhang, X. Wang, G. Deng, T. Wang, C. Chen // *Proceedings of the Thirtieth International Joint Conference on Artificial Intelligence*. 2021. Pp. 2381-2388.

9. Лонца А. Алгоритмы обучения с подкреплением на Python; пер. с англ. А.А. Слинкина. М.: ДМК Пресс, 2020. 286 с.

10. Лю Ю. (Х.) Обучение с подкреплением на PyTorch: сборник рецептов / пер. с англ. А. А. Слинкина. М.: ДМК Пресс, 2020. 282 с.

Поступила 08.05.2024; принята к публикации 03.09.2024

#### Информация об авторах

**Кашко Василий Васильевич** – аспирант, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: [vasya.kashko@mail.ru](mailto:vasya.kashko@mail.ru)

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

**Акинина Юлия Сергеевна** – канд. техн. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: [julakinn@mail.ru](mailto:julakinn@mail.ru)

## ANALYSIS OF THE APPLICATION OF PARAMETRIC REWARD FUNCTIONS IN REINFORCEMENT LEARNING ALGORITHMS

V.V. Kashko, S.A. Oleinikova, Yu.S. Akinina

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

**Abstract:** the object of study in this article is intelligent walking robots working using reinforcement learning algorithms. In these algorithms, the goal is set through the values of the reward function, the choice of which directly determines the speed and result of learning. Based on the presence of many factors influencing the execution of the agent's actions, the task arises of selecting each parameter included in this function. These parameters are selected based on the best consequences for the agent from the point of view of the decision maker. At the same time, it is necessary to decide on the selection strategy. Based on this, the purpose of the work is to study existing approaches to the formation of the reward function of multifactor systems, identify problems that arise when choosing a "low-quality" reward function, and analyze the use of parametric functions. The study was carried out using a developed application that simulates the action of an intelligent agent based on reinforcement learning with different reward functions. Obtaining experimental data was carried out using the tabular Q-learning algorithm using the example of a simulation of the game "Frozen Lake". All results were obtained using the same algorithm parameters, but with different reward distributions. Thus, an experimental study was conducted that allows us to draw conclusions about the specifics of constructing the reward function. The novelty lies in the development of recommendations to obtain the best reward effect in reinforcement learning algorithms

**Key words:** reinforcement learning, reward function, parameterization, parametric functions, Q-learning, robotics

#### References

1. Yurevich E.I. "Fundamentals of Robotics" ("Osnovy robototekhniki"), 4th ed., Saint Petersburg, BHV-Petersburg, 2017, 304 p.
2. Kashko V.V., Oleinikova S.A. "Mathematical model of a universal control system for a walking robot based on reinforcement learning methods", *Modeling, Optimization and Information Technology*, 2024.
3. Sutton R.S., Barto E.J. "Reinforcement learning: introduction" ("Obucheniye s podkrepleniym: Vvedeniye"), 2nd ed., trans. from Eng., Moscow, DMK Press, 2020, 552 p. ISBN 978-5-97060-097-9

4. Shibaev A.N., Sharibaev R.N., Abdulazizov B.T., Tokhirzhonova M.R. “Challenges in Deep Reinforcement Learning”, *Forum of young scientists (Forum molodykh uchenykh)*, 2023, no.6 (82), available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/problemy-v-oblasti-glubokogo-obucheniya-s-podkrepleniem> (accessed 04.05.2024).
5. Kober J., Bagnell J., Peters J. “Reinforcement Learning in Robotics: A Survey”, *The International Journal of Robotics Research*, 2013, no. 32 (11), pp. 1238-1274.
6. Ouyang W., Chi H., Pang J., Liang W., Ren Q. “Adaptive Locomotion Control of a Hexapod Robot via Bio-Inspired Learning”, *Frontiers in Neurorobotics*, 2021, no. 15, 627157.
7. Lele A., Fang Y., Ting J., Raychowdhury A. “Learning to Walk: Spike Based Reinforcement Learning for Hexapod Robot Central Pattern Generation”, *2nd IEEE International Conference on Artificial Intelligence Circuits and Systems (AICAS)*, Genova, Italy, 2020, pp. 208-212.
8. Fu H., Tang K., Li P., Zhang W., Wang X., Deng G., Wang T., Chen C. “Deep Reinforcement Learning for Multi-contact Motion Planning of Hexapod Robots”, *Proceedings of the Thirtieth International Joint Conference on Artificial Intelligence*, 2021, pp. 2381-2388.
9. Lonza A. “Algorithms of reinforcement learning in Python” (“Algoritmy obucheniya s podkrepleniyem na Python”), trans. from Eng. by Slinkin A.A., Moscow, DMK Press, 2020, 286 p. ISBN 978-5-97060-855-5
10. Liu Yu. (H.) “Reinforcement learning in Python: a collection of recipes” (“Obucheniye s podkrepleniyem na PyTorch”), trans. From Eng. by Slinkin A.A., Moscow, DMK Press, 2020, 282 p. ISBN 978-5-97060-853-1

Submitted 08.05.2024; revised 03.09.2024

#### Information about the authors

**Vasiliy V. Kashko** - Postgraduate student, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Octyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: [vasya.kashko@mail.ru](mailto:vasya.kashko@mail.ru)  
**Svetlana A. Oleinikova** – Dr. Sc. (Technical), Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Octyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: [s.a.oleinikova@gmail.com](mailto:s.a.oleinikova@gmail.com). ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0333-2313>  
**Yuliya S. Akinina** – Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Octyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: [julakinn@mail.ru](mailto:julakinn@mail.ru)

## МОДЕЛИРОВАНИЕ И АНАЛИЗ УСТОЙЧИВОСТИ СИСТЕМЫ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ЭНЕРГИИ СОЛНЕЧНОЙ БАТАРЕИ КОСМИЧЕСКОЙ СТАНЦИИ

А.К. Тищенко<sup>1</sup>, Е.М. Васильев<sup>2</sup>, А.О. Тищенко<sup>1</sup>

<sup>1</sup>АО «Орбита», г. Воронеж, Россия,

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

**Аннотация:** решается задача обеспечения устойчивости систем преобразования энергии солнечных батарей космических станций. Проведён анализ содержания решаемой задачи, и отмечено, что в крупных космических аппаратах системы электропитания характеризуются присутствием разветвлённой кабельной сети, обладающей индуктивным сопротивлением, и наличием каскада фильтров низкой частоты, приводящим к высокому динамическому порядку системы регулирования. Указано, что в системах с шунтирующим преобразователем, управляемым широтно-импульсным модулятором, следует учитывать принципиально неустранимую нелинейность его статической характеристики типа «насыщение». Построена имитационная модель системы преобразования энергии с учётом указанных особенностей. Приведён пример синтеза системы на основе её упрощённой линеаризованной модели, подтверждающий, что в рамках этой модели достаточно ограничиться регулятором со звеном изодрома и обеспечить при этом приемлемые запасы устойчивости. Показано, что в случае существования в системе запаздывания по времени, а также при наличии дополнительных корректирующих звеньев в регуляторе полученные на линеаризованной модели оценки устойчивости становятся неверными, и требуется проводить анализ системы с учётом её нелинейности. Получены условия жёсткого возникновения автоколебаний в нелинейной системе, продемонстрирован их характер, и даны рекомендации по формированию частотных характеристик системы, исключающих возникновение этих колебаний

**Ключевые слова:** космическая станция, солнечная батарея, шунтирующий преобразователь, широтно-импульсный модулятор, устойчивость, автоколебания

### Введение

В настоящее время основным источником энергии орбитальных космических аппаратов являются солнечные батареи [1, 2, 3, 4]. Для согласования электрических характеристик солнечных батарей с электрическими характеристиками потребителей космического аппарата в систему его электроснабжения вводится преобразователь (далее, для определённости, будет рассматриваться шунтирующий широтно-импульсный модулятор тока батареи — ШИМ), управляемый системой автоматической стабилизации напряжения питания потребителей [5, 6, 7, 8, 9].

Наибольшую трудность при синтезе указанной системы автоматического регулирования составляет задача обеспечения запасов устойчивости, достаточных для нормального функционирования системы во всём диапазоне изменяющихся токов нагрузки.

Особенность этой задачи заключается в существенной нелинейности статических характеристик собственно солнечной батареи, блокирующего диода на её выходе, а также ШИМ-преобразователя, соответствующего звену с насыщением. В реальных схемах нелиней-

ность преобразователя обладает также неоднозначностью своей характеристики, вызванной гистерезисом. Наличие этих нелинейностей обуславливает принципиальную возможность возникновения в системе нежелательных устойчивых автоколебаний, входящих в полосу рабочих частот системы регулирования.

Кроме того, присутствие в цепях электропитания крупной космической станции распределённых каскадов вспомогательных низкочастотных фильтров, образованных, в том числе, индуктивностями кабелей, и обычно пренебрегаемых при анализе качества системы, существенно повышает динамический порядок системы и создаёт так называемую неучитываемую паразитную динамику, которая в критических случаях может привести к потере устойчивости системы.

Вопросы обеспечения устойчивости рассматриваемых систем затрагиваются в работах, посвящённых проектированию общетехнических систем электропитания с широтно-импульсной стабилизацией напряжения на нагрузке. Например, в [10, 11, 12] рассматриваются обобщённые источники энергии и способы управления ими, эквивалентное приведение к которым характеристик солнечных батарей с шунтирующим управлением представляет собою достаточно сложную задачу. В публика-

циях по системам электропитания космических аппаратов [13, 14] широко используются приёмы аналитической линеаризации и упрощения математических моделей элементов системы, и даётся оценка адекватности результатов этой линеаризации. В то же время в этих работах недостаточное внимание уделяется обеспечению устойчивости синтезируемой системы с учётом нелинейностей, т.е. не рассмотрены вопросы, связанные с тем, что оценка устойчивости системы, полученная на её линеаризованной модели, может оказаться неверной для реальной системы с нелинейными элементами.

В предлагаемой работе решаются следующие задачи:

моделирование системы преобразования энергии солнечной батареи для электроснабже-

ния космической станции с учётом отмеченных выше её особенностей;

сравнительная оценка характеристик полной и эквивалентной моделей системы управления;

анализ условий возникновения устойчивых автоколебаний, возникающих вследствие нелинейностей в системе, и выработка практических рекомендаций по исключению появления этих колебаний во всём рабочем диапазоне токов нагрузки.

### Имитационная модель системы

Рассмотрим функциональную схему системы электропитания космической станции от солнечных батарей [7, 15, 16]:

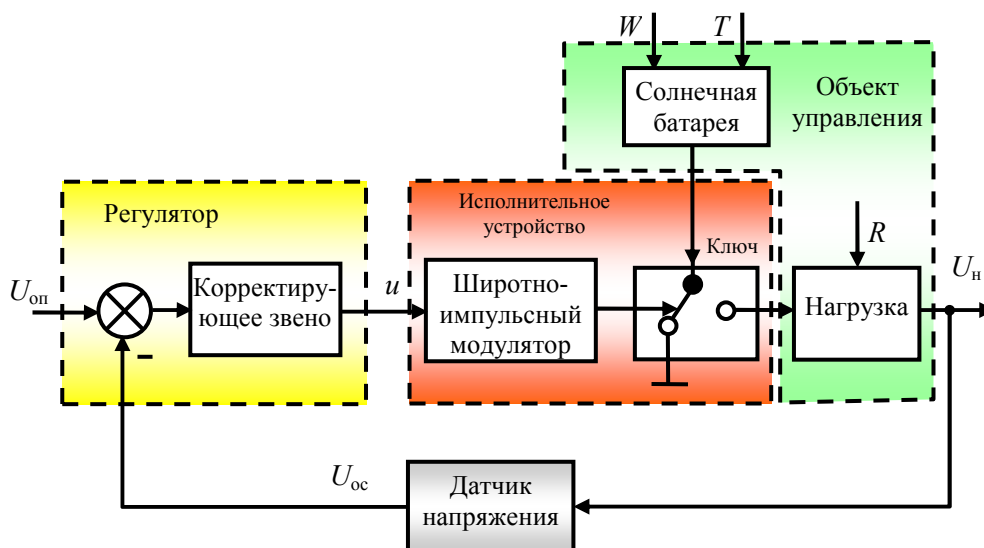


Рис. 1. Функциональная схема системы электропитания космической станции от солнечных батарей

На рис. 1 обозначены:  $U_{оп}$  — опорное напряжение;  $U_n$  — напряжение на нагрузке;  $U_{oc}$  — сигнал обратной связи с выхода датчика напряжения  $U_n$ ;  $R_n$  — сопротивление нагрузки;  $u$  — управляющее напряжение широтно-импульсным модулятором;  $W$  — плотность светового потока, падающего на солнечную батарею;  $T$  — температура элементов солнечной батареи.

В качестве имитационной модели солнечной батареи использована схема, представленная на рис. 2, на котором блок статических характеристик содержит алгебраические уравнения (1)-(5), формирующие статические характеристики батареи, а также указаны последовательное сопротивление  $R_б$ , ёмкость  $C_б$  батареи и блокирующий диод  $D$ , рис. 2 [17, 18].

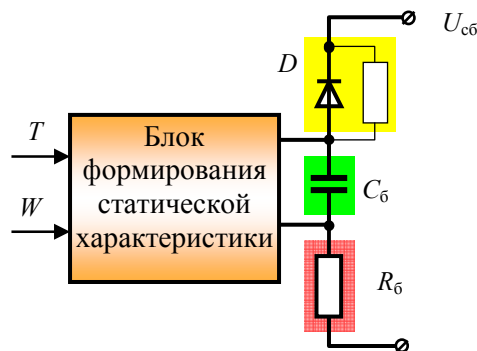


Рис. 2. Имитационная модель солнечной батареи

Блок формирования статических характеристик реализует численное решение системы уравнений (1-5):

$$I = N_{\text{пр}}(I_{\phi} - I_{\text{Д}}) - \frac{U + I \frac{N_{\text{пс}}}{N_{\text{пр}}} \cdot R_{\text{пс}}}{\frac{N_{\text{пс}}}{N_{\text{пр}}} \cdot R_{\text{пр}}}; \quad (1)$$

$$I_{\phi} = \frac{(I_{\text{кз.ном}} + k(T - T_{\text{ном}}))W}{1000}; \quad (2)$$

$$I_{\text{Д}} = I_0 \left[ \frac{q \left( U + I \frac{N_{\text{пс}}}{N_{\text{пр}}} \cdot R_{\text{пс}} \right)}{N_{\text{пс}} \cdot B \cdot T \cdot A} - 1 \right]; \quad (3)$$

$$I_0 = I_{\text{нач}} \left( \frac{T}{T_{\text{ном}}} \right)^3 e^{\left( \frac{1}{T_{\text{ном}}} - \frac{1}{T} \right) \frac{q \cdot E}{B \cdot A}}; \quad (4)$$

$$I_{\text{нач}} = \frac{I_{\text{кз.ном}}}{e^{\frac{q U_{\text{хх.ном}}}{N_{\text{пс}} \cdot B \cdot T \cdot A} - 1}}; \quad (5)$$

где  $I$  — ток батареи, А;

$N_{\text{пр}}$ ,  $N_{\text{пс}}$  — количество фотоэлементов батареи, включённых, соответственно, параллельно и последовательно;

$U$  — напряжение на выходе батареи, В;

$R_{\text{пр}}$  — сопротивление параллельной цепи утечки тока в одном фотоэлементе, Ом;

$R_{\text{пс}}$  — последовательное сопротивление одного фотоэлемента батареи, Ом;

$I_{\text{кз.ном}}$  — номинальное значение тока короткого замыкания, А;

$k$  — коэффициент температурного роста фототока, А/К;

$T_{\text{ном}}$  — номинальная температура фотоэлемента, К;

$I_{\text{нач}}$  — начальный обратный ток р-п-перехода, А;

$q$  — заряд электрона, Кл;

$E$  — барьерная разность потенциалов р-п-перехода фотоэлемента, В;

$B$  — постоянная Больцмана,  $B = 1,381 \cdot 10^{-23}$  Дж/К;

$A$  — эмпирический корректирующий коэффициент;

$U_{\text{хх.ном}}$  — напряжение холостого хода, В.

Статические характеристики батареи, связывающие её ток  $I_{\text{сб}}$  и напряжение  $U_{\text{сб}}$ , в различных условиях работы, показаны на рис. 3.

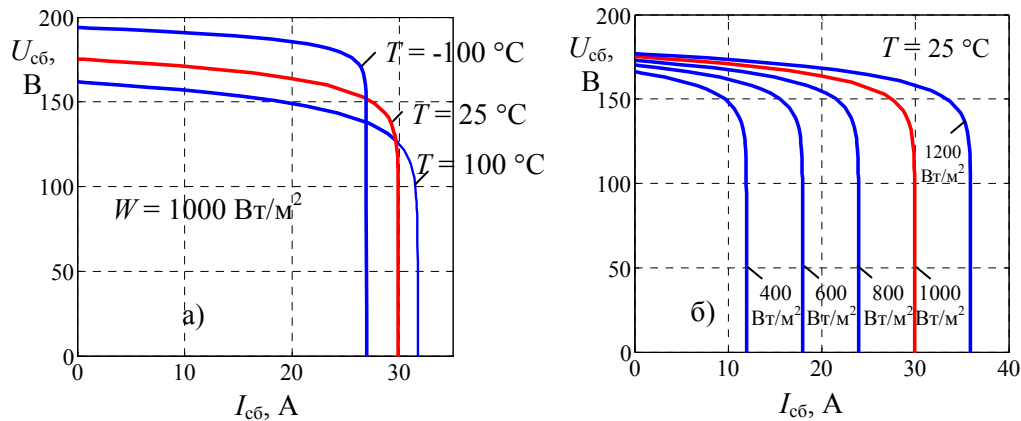


Рис. 3. Статические характеристики солнечной батареи: а) при изменении температуры  $T$ ; б) при изменении плотности светового потока  $W$

В системе используется пилообразный ШИМ симметричного типа, форма сигналов в котором показана на рис. 4, где  $U_{\text{нч}}$  — сигнал несущей частоты,  $U_{\text{ШИМ}}$  — сигнал на выходе модулятора.

Датчик напряжения представляет собою безынерционное звено с фиксированным коэффициентом передачи.



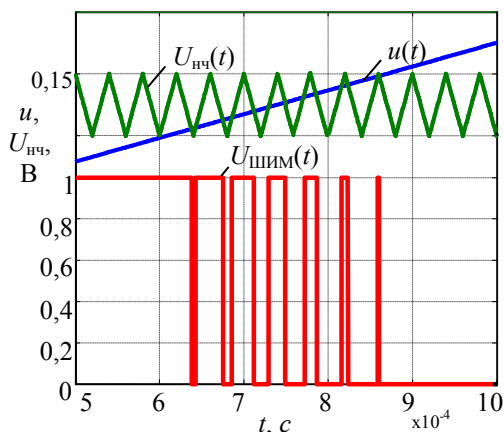


Рис. 4. Формы сигналов в широтно-импульсном модуляторе

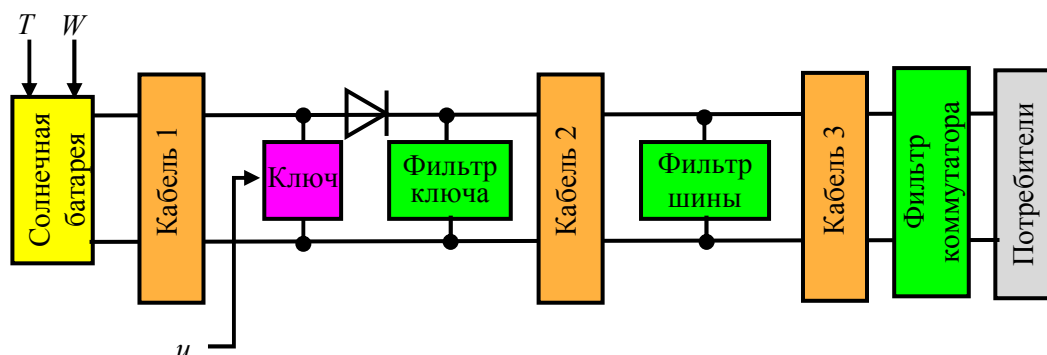


Рис. 5. Схема соединений силовых элементов системы

Линеаризация имитационной модели заключалась в следующих упрощениях:

- из схемы исключались блокирующие диоды на выходах батареи и ключа;
- широтно-импульсный модулятор заменялся безынерционным звеном с насыщением, что позволяет исследовать систему в малом как линейную, а в большом как нелинейную;
- ключ имитировался управляемым аналоговым источником тока.

Нелинейная характеристика солнечной батареи не изменялась.

Таким образом, представленная линеаризация в малом обеспечивает сохранение нелинейных свойств системы в большом и одновременный переход от дискретной модели к непрерывной.

### Анализ устойчивости

В силу значительного количества взаимосвязанных между собою нелинейностей в системе и реактивных сопротивлений в виде фильтров и кабелей, для исследования использовался частотный подход, позволяющий применить для

Схема соединений солнечной батареи, ключа и нагрузки вместе с промежуточными коммутационными устройствами показана на рис. 5. Схемы замещения кабелей содержат последовательно включённые индуктивное и активное сопротивления. Фильтры собраны на конденсаторах, представленных в модели эквивалентным последовательным активным и ёмкостным сопротивлениями.

анализа устойчивости метод гармонического баланса, удобный для экспериментального анализа на имитационной модели. Следует заметить, что гипотеза фильтра, необходимая для использования метода гармонического баланса, обеспечивается относительно высокой несущей частотой модулятора  $f_n = 25000$  Гц, что значительно превышает рабочий диапазон  $0 \dots 100$  Гц системы регулирования.

Частотные характеристики заданной части системы между точками с сигналами  $u$  и  $U_{oc}$  представлены на рис. 6 для разных токов нагрузки.

Достаточно хорошее для практики совпадение частотных характеристик для полной дискретной и линеаризованной непрерывной моделей (на рис. 6 круглые маркеры и сплошные линии соответственно), даёт возможность проводить дальнейший анализ устойчивости по характеристикам линейной системы с использованием классического критерия Найквиста с некоторыми особенностями (см. ниже), которые обусловлены насыщением широтно-импульсного модулятора.

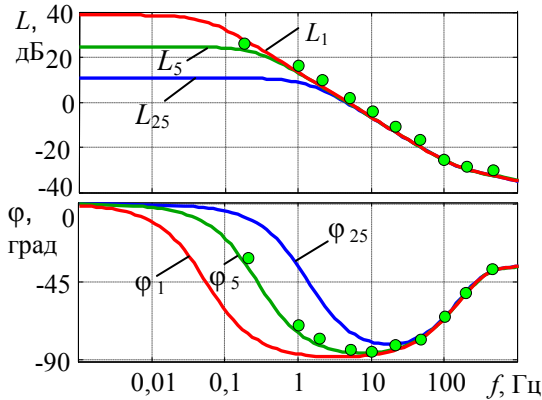


Рис. 6. Амплитудные  $L(f)$  и фазовые  $\varphi(f)$  частотные характеристики заданной части системы для токов нагрузки 1 А, 5 А, 25 А

Из рис. 6 следует, что запас устойчивости системы даже в неблагоприятной режиме с малыми токами нагрузки составляет около 90 град, т. е. весьма значителен.

Сохранение этого запаса устойчивости регулятором с передаточной функцией изодромного корректирующего звена:

$$W(s) = \frac{k(Ts + 1)}{s}, \quad (6)$$

обеспечивает системе астатизм первого порядка (нулевую ошибку в установившемся режиме) с частотой среза частотной характеристики  $\omega_{ср} = 2\pi \cdot 10 \text{ с}^{-1}$ , рис. 7.

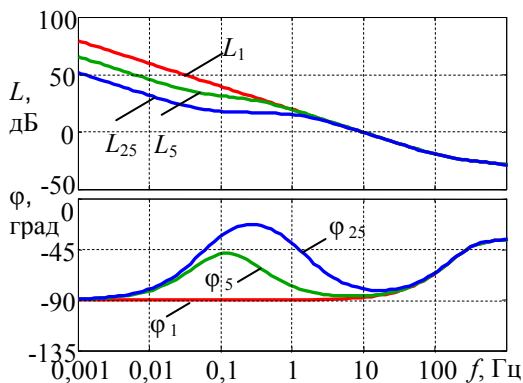


Рис. 7. Амплитудные  $L(f)$  и фазовые  $\varphi(f)$  частотные характеристики скорректированной системы для токов нагрузки 1 А, 5 А, 25 А

### Обсуждение результатов

Проведённый выше анализ показывает, что типовой синтез на основе линеаризованной и упрощённой модели системы регулирования

обеспечивает запасы устойчивости по фазе не менее 90 град, и возникновение автоколебаний невозможно.

Однако, существование упомянутой выше паразитной динамики в виде трудно учитываемых распределённых реактивных элементов, а также наличие запаздываний в элементах схемы (особенно при цифровой реализации регулятора) могут привести к значительному снижению запаса устойчивости системы. Так, запаздывание сигнала в канале управления системы на  $1 \cdot 10^{-3}$  с приводит к уменьшению запаса устойчивости на частоте среза 10 Гц на 3,6 град.

В результате возможна ситуация, при которой линеаризованная система, имеющая по критерию Найквиста устойчивое положение равновесия, переходит в режим автоколебаний из-за наличия ограничений в канале управления: ограничение сигнала уровнем питания электронных компонентов, ограничение ширины импульсов в модуляторе, ограничение по току солнечной батареи.

Существо этой ситуации поясняется годографом разомкнутой системы, представленным на рис. 8. Такой годограф образуется в том случае, если устойчивость системы обеспечена коррекцией её частотной характеристики в небольшом диапазоне частот в области частоты среза, при этом на некотором участке частот, меньших частоты среза, фазовая характеристика системы находится ниже уровня (-180) град. Так, в линейной системе, соответствующей рис. 8, имеется 5-кратный запас устойчивости по амплитуде, а запас устойчивости по фазе близок к 90 град, т.е. запасы устойчивости положения равновесия достаточно велики.

Введём теперь в рассмотрение нелинейность типа насыщения с коэффициентами  $P_n$ ,  $Q_n$  гармонической линеаризации:

$$P_n(A) = k \frac{2\beta + \sin(2\beta)}{\pi};$$

$$\beta = \arcsin \frac{A_{\max}}{A}, \quad (7)$$

$$Q_n(A) = 0,$$

где  $A$  — амплитуда первой гармоники сигнала на входе нелинейности;

$A_{\max}$  — максимальное значение амплитуды первой гармоники на входе нелинейности, не выходящее за пределы линейного участка;

$k$  — коэффициент передачи на линейном участке нелинейности.

Амплитудная характеристика нелинейности имеет вид:

$$W_n(A) = P_n(A). \quad (8)$$

В системе с такими годографами линейной и нелинейной частей возникают устойчивые автоколебания в точке пересечения частотной характеристики эквивалентной линейной части системы и отрицательной инверсной амплитудной характеристикой звена с насыщением  $(-W_n(A)^{-1})$  (рис. 8), т.е. выполняется условие гармонического баланса:

$$W_n(A)W_l(jf) = -1, \quad (9)$$

в котором  $W_l(jf)$  — частотная функция линейной части системы с вещественной и мнимой компонентами  $P(jf)$  и  $Q(jf)$  соответственно.

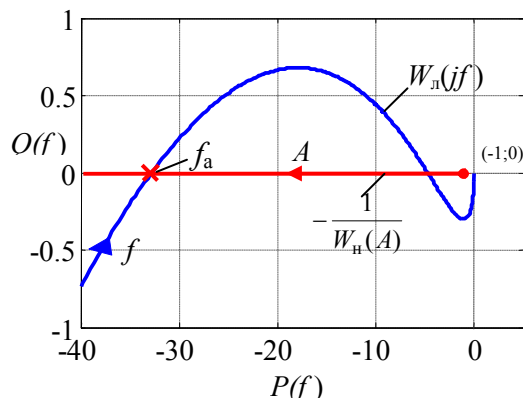


Рис. 8. Годограф системы с режимом автоколебаний с частотой  $f_a$

Пример автоколебаний представлен на рис. 9, из которого следует, что в этом режиме коэффициент заполнения широтно-импульсного сигнала на выходе преобразователя периодически и с низкой частотой изменяется от нуля до единицы, принимая в большей части периода колебаний крайние значения 0 или 1.

Следует отметить, что режим автоколебаний возникает «жестко», т.е. при появлении в системе больших отклонений напряжения от номинального значения, и в определенном диапазоне токов нагрузки — в данном примере при малых токах. Это обстоятельство затрудняет исследование режима автоколебаний на практике и требует тщательного моделирования системы при её синтезе.

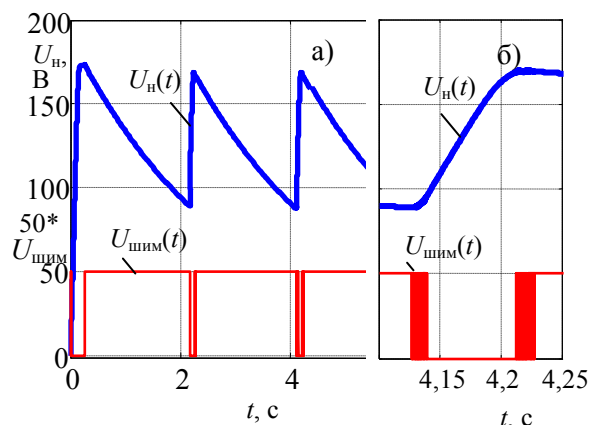


Рис. 9. Иллюстрация режима автоколебаний в системе: а) общий вид сигналов; б) фрагмент рис. 9, а

### Выводы

Результаты моделирования и анализа устойчивости системы преобразования энергии солнечной батареи космической станции позволяют сделать следующие выводы:

1) типовой синтез рассматриваемой системы на линеаризованной и упрощенной модели по её частотным характеристикам ограничивается, как правило, введением корректирующего звена изотропа. При этом обеспечиваются большие запасы устойчивости;

2) в том случае, если в системе имеется распределенная сеть кабелей и промежуточных фильтров, есть временное запаздывание сигналов в электронных устройствах, а также помимо изотропного звена в регулятор системы введены дополнительные корректирующие звенья, обеспечение устойчивости на линейной модели может привести к ошибочному выводу: положение равновесия линеаризованной системы в действительности будет неустойчивым из-за наличия в ней нелинейности с насыщением;

3) неустойчивость положения равновесия системы с насыщением проявляется в появлении в ней незатухающих периодических колебаний с ограниченной, но недопустимой амплитудой отклонений от номинальных значений характеристик работы всех узлов системы;

4) переход в режим автоколебаний происходит в системе только при больших отклонениях напряжения питания от номинального значения, т.е. жестко — при скачках токов нагрузки. Кроме того, они могут появляться в небольшом диапазоне этих токов;

5) для устранения возможности появления автоколебаний необходимо исключить фазовые отставания в системе более 180 град на частотах, меньших частоты среза.

## Литература

1. A review of the recent progress of stand-alone photo-voltaic-battery hybrid energy systems in space and on the ground / J. Xie, Y.-Z. Li, L. Yang, Y. Sun, M. Yuan // *Journal of Energy Storage*. 2022. Vol. 55. Part C. 105735.
2. Casanova-Álvarez M., Navarro-Medina F., Tommasini D. Feasibility study of a solar electric propulsion mission to Mars // *Acta Astronautica*. 2024. Vol. 216. pp. 129-142.
3. Иванов Е.Е. История развития систем электропитания космических аппаратов // *Матрица научного познания*. 2023. № 8-1. С. 32-42.
4. Быков В.В. Системы электропитания космических аппаратов. история и перспективы развития // *Инженерия для освоения космоса*. Томск: Изд-во Национального исследовательского Томского политехнического университета. 2016. С. 21-29.
5. Chernaya M.M., Shinyakov Y.A., Osipov A.V. Spacecraft power system // *Conference Paper, IEEE 17th International Conference of Young Specialists on Micro / Nanotechnologies and Electron Devices (EDM)*. 2016. pp. 589–593.
6. Подвальный С.Л., Васильев Е.М. Принципы многоальтернативного управления критическими объектами авиационно-космического назначения // *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. 2016. Т. 18. №2(3). С. 869-874.
7. Тищенко А.К., Васильев Е.М., Тищенко А.О. Многоальтернативное управление критическими режимами системы электроснабжения космической станции // *Вестник Воронежского государственного технического университета*. 2015. Т. 11. № 2. С. 101-106.
8. Системы электроснабжения космических аппаратов / Л.Р. Варенбуд, Ф.Г. Власов, А.М. Знов, Г.Д. Лившин, А.К. Тищенко // *Энергия - XXI век*. 2011. №2-3 (80-81). С. 29-47.
9. Данилов А.Д., Тищенко А.О. Исследование энергоберегающих систем электроснабжения космических аппаратов // *Вестник Воронежского государственного технического университета*. 2014. Т. 10. № 5-1. С. 82-84.
10. Ловчиков А.Н., Носкова Е.Е. Анализ и синтез широтно-импульсных систем // *Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. акад. М.Ф. Решетнева*. Математика, механика, информатика. 2010. №4. С. 57-61.
11. Ловчиков А.Н. Устойчивость широтно-импульсного стабилизатора в режиме прерывистых токов // *Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. акад. М.Ф. Решетнева*. Математика, механика, информатика. 2012. № 5. С. 71-74.
12. Гусев А.В., Феофилов С.В., Козырь А.В. Устойчивость периодических движений в системах управления с ШИМ-регулятором // *Известия ТулГУ. Технические науки*. 2016. Вып. 2. С. 71-79.
13. The method of synthesis of the digital controller for a solar energy conversion channel of the solar battery in the power supply system of a spacecraft / V.N. Shkolnyi, V.D. Semenov, V.A. Kabirov, M.P. Sukhorukov, D.S. Torgaeva // *Siberian Aerospace Journal*. 2019. Vol. 20. No. 1. pp. 74-86.
14. Лесных А.Н., Ловчиков А.Н., Лукьяненко М.В. Методы моделирования и синтеза систем электропитания космических аппаратов. Красноярск: Издательство Сибирского государственного аэрокосмического университета им. акад. М.Ф. Решетнева, 2015. 120 с.
15. Автономная система электропитания: пат. 2152069 Российская Федерация: МПК G05F1/59, H02J7/34, H02J9/00 / А.К. Тищенко, П.Т. Ганкевич, В.В. Савенков и др.; заявитель и патентообладатель Общество с ограниченной ответственностью "Орбита". №98119125/09; заявл. 21.10.1998; опубл. 27.06.2000, Бюл. № 18(II ч.). С. 439.
16. Автономная система электропитания: пат. 2211479 Российская Федерация: МПК G05F1/66, H02J7/34 / А.К. Тищенко, П.Т. Ганкевич, В.В. Савенков и др.; заявитель и патентообладатель Общество с ограниченной ответственностью "Орбита". №2001100777/09; заявл. 09.01.2001; опубл. 27.08.2003, Бюл. № 24 (III ч.). С. 796.
17. Tishchenko A.K., Vasiljev E.M., Tishchenko A.O. Analysis and synthesis of control systems for spacecraft solar arrays // *Machines*. 2020. Vol. 8. Iss. 4(64). pp. 1-24.
18. Тищенко А.К., Васильев Е.М., Тищенко А.О. Анализ динамических свойств солнечных батарей для космических аппаратов // *Вестник Воронежского государственного технического университета*. 2020. Т. 16. № 1. С. 39-44.

Поступила 14.05.2024; принята к публикации 03.09.2024

## Информация об авторах

**Тищенко Анатолий Константинович** – канд. техн. наук, начальник отдела АО «Орбита» (394038, Россия, Воронеж, ул. Пеше-Стрелецкая, 88), e-mail: vgtu-aits@yandex.ru, тел. (473) 243-77-20

**Васильев Евгений Михайлович** – канд. техн. наук, доцент кафедры электропривода, автоматики и управления в технических системах, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: vgtu-aits@yandex.ru, тел. (473) 243-77-20, ORCID: 0000-0002-9008-5364

**Тищенко Артём Олегович** – старший научный сотрудник АО «Орбита» (394038, Россия, Воронеж, ул. Пеше-Стрелецкая, 88), e-mail: vgtu-aits@yandex.ru, тел. (473) 243-77-20

## MODELING AND ANALYSIS OF SYSTEM STABILITY FOR SOLAR BATTERY ENERGY CONVERSION IN A SPACE STATION

A.K. Tishchenko<sup>1</sup>, E.M. Vasil'ev<sup>2</sup>, A.O. Tishchenko<sup>1</sup>

<sup>1</sup>JSC "Orbita", Voronezh, Russia,

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

**Abstract:** the problem of ensuring the stability of energy conversion systems for solar batteries of space stations is being solved. An analysis of the content of the problem being solved was carried out, and it was noted that in large spacecraft, power supply systems are characterized by the presence of an extensive cable network with inductive reactance, and the presence of a cascade of low-frequency filters, leading to a high dynamic order of the control system. It is indicated that in systems with a shunt converter controlled



by a pulse-width modulator, the fundamentally irremovable nonlinearity of its static characteristic of the “saturation” type should be taken into account. A simulation model of the energy conversion system was built taking into account these features. An example of system synthesis based on its simplified linearized model is given, confirming that within the framework of this model it is sufficient to limit ourselves to a regulator with an isodrome link, and at the same time ensure acceptable stability margins. It is shown that if there is a time delay in the system, as well as if there are additional corrective links in the controller, the stability estimates obtained on the linearized model become incorrect, and it is necessary to analyze the system taking into account its nonlinearity. The conditions for the severe occurrence of self-oscillations in a nonlinear system are obtained, their nature is demonstrated, and recommendations are given for the formation of frequency characteristics of the system that exclude the occurrence of these oscillations

**Key words:** space station, solar battery, shunt converter, pulse-width modulator, stability, self-oscillations

#### References

1. Xie J., Li Y.-Z., Yang L., Sun Y., Yuan M. “A review of the recent progress of stand-alone photovoltaic-battery hybrid energy systems in space and on the ground”, *Journal of Energy Storage*, 2022, vol. 55, part C, art. 105735.
2. Casanova-Álvarez M., Navarro-Medina F., Tommasini D. “Feasibility study of a solar electric propulsion mission to Mars”, *Acta Astronautica*, 2024, vol. 216, pp. 129-142.
3. Ivanov E.E. “History of the development of power supply systems for spacecraft”, *Matrix of scientific knowledge (Matritsa nauchnogo poznaniya)*, 2023, no. 8-1, pp. 32-42.
4. Bykov V.V. “Spacecraft power supply systems. history and development prospects”, *Engineering for space exploration (Inzheneriya dlya osvoyeniya kosmosa)*, Tomsk, Publishing house of the National Research Tomsk Polytechnic University, 2016, pp. 21-29.
5. Chernaya M.M., Shinyakov Y.A., Osipov A.V. “Spacecraft power system”. *Conference Paper, IEEE 17th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM)*, 2016, pp. 589-593.
6. Podval'ny S.L., Vasil'ev E.M. “Principles of multi-alternative control of critical objects for aerospace purposes”, *News of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences (Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk)*, 2016, vol. 18, no. 2(3), pp. 869-874.
7. Tishchenko A.K., Vasil'ev E.M., Tishchenko A.O. “Multi-alternative control of critical modes of a space station's power supply system”, *Bulletin of the Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2015, vol. 11, no. 2, pp. 101-106.
8. Warenbud L.R., Vlasov F.G., Znov A.M., Livshin G.D., Tishchenko A.K. “Power supply systems for spacecraft”, *Energy - XXI century (Energiya - XXI vek)*, 2011, no. 2-3(80-81), pp. 29-47.
9. Danilov A.D., Tishchenko A.O. “Study of energy-saving power supply systems for spacecraft”, *The Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2014, vol. 10, no. 5-1, pp. 82-84.
10. Lovchikov A.N., Noskova E.E. “Analysis and synthesis of pulse-width systems”, *The Bulletin of the Siberian State Aerospace University named after. acad. M. F. Reshetnev. Mathematics, mechanics, computer science (Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta im. akad. M. F. Reshetneva. Matematika, mekhanika, informatika)*, 2010, no. 4, pp. 57-61.
11. Lovchikov A.N. “Stability of a pulse-width stabilizer in intermittent current mode”, *The Bulletin of the Siberian State Aerospace University named after. acad. M. F. Reshetnev. Mathematics, mechanics, computer science (Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta im. akad. M. F. Reshetneva. Matematika, mekhanika, informatika)*, 2012, no. 5, pp. 71-74.
12. Gusev A.V., Feofilov S.V., Kozyr A.V. “Stability of periodic movements in control systems with a PWM controller”, *News of Tula State University. Technical science (Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta . Tekhnicheskiye nauki)*, 2016, issue 2, pp. 71-79.
13. Shkolnyi V.N., Semenov V.D., Kabirov V.A., Sukhorukov M.P., Torgaeva D.S. “The method of synthesis of the digital controller for a solar energy conversion channel of the solar battery in the power supply system of a spacecraft”, *Siberian Aerospace Journal*, 2019, vol. 20, no. 1, pp. 74-86.
14. Lesnykh A.N., Lovchikov A.N., Lukyanenko M.V. “Methods for modeling and synthesis of spacecraft power supply systems” (“Metody modelirovaniya i sinteza sistem elektropitaniya kosmicheskikh apparatov”), Krasnoyarsk, Izdatel'stvo Sibirskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta im. akad. M.F. Reshetneva, 2015, 120 p.
15. Tishchenko A.K., Gankevich P.T., Savenkov V.V. et al. “Autonomous power supply system” (“Avtonomnaya sistema elektropitaniya”), patent of RF 2152069: IPC G05F1/59, H02J7/34, H02J9/00; applicant and patent holder Limited Liability Company "Orbita", no. 98119125/09; appl. 10.21.1998; publ. 06.27.2000, bulletin no. 18 (II part), p. 439.
16. Tishchenko A.K., Gankevich P.T., Savenkov V.V. and others “Autonomous power supply system” (“Avtonomnaya sistema elektropitaniya”), pat. 2211479 Russian Federation: IPC G05F1/66, H02J7/34; applicant and patent holder Limited Liability Company "Orbita", no. 2001100777/09; appl. 01.09.2001; publ. 08.27.2003, bulletin no. 24 (III part), p. 796.
17. Tishchenko A.K., Vasiljev, E.M., Tishchenko A.O. “Analysis and synthesis of control systems for spacecraft solar arrays”, *Machines*, 2020, vol. 8, iss. 4 (64), pp.1-24.
18. Tishchenko A.K., Vasiliev E.M., Tishchenko A.O. “Analysis of the dynamic properties of solar batteries for spacecraft”, *The Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2020, vol. 16, no. 1, pp. 39-44.

Submitted 14.05.2024; revised 03.09.2024

#### Information about the authors

**Anatoly K. Tishchenko** – Cand. Sc. (Technical), Orbita JSC (88 Peshe-Streletskaaya str., Voronezh 394038, Russia), e-mail: vgtu-aits@yandex.ru, tel. (473) 243-77-20

**Eugeniy M. Vasil'ev** – Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Octyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: vgtu-aits@yandex.ru, tel. (473) 243-77-20, ORCID 0000-0002-9008-5364

**Artyom O. Tishchenko** – Senior Researcher, Orbita JSC (88 Peshe-Streletskaaya str., Voronezh 394038, Russia), e-mail: vgtu-aits@yandex.ru, tel. (473) 243-77-20



**МОДЕЛИРОВАНИЕ ИСПАРЕНИЯ ПРИ ИК-ОБЛУЧЕНИИ:  
ТОЧНОЕ РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ РОБЕНА**Д.С. Сайко<sup>1</sup>, Д.Г. Андреев<sup>2</sup>, С.А. Титов<sup>2</sup>, Е.Ю. Фурсова<sup>3</sup><sup>1</sup>Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия<sup>2</sup>Воронежский государственный университет инженерных технологий, г. Воронеж, Россия<sup>3</sup>Воронежский государственный профессионально-педагогический колледж, г. Воронеж, Россия

**Аннотация:** рассматривается моделирование процесса теплопередачи при инфракрасном облучении поверхности жидкости в виде решения неоднородного уравнения теплопроводности на полупрямой в том случае, если на границе заданы условия Ньютона-Рихмана. Неоднородность выбрана в экспоненциальной форме. Задача для полубесконечной среды с краевыми условиями 1 и 2 рода в явном виде с представлением через функции ошибок была решена ранее. Однако, для задачи 3 типа обычно используется решение в виде ряда Фурье, плохо сходящееся при малых временах. Для данной задачи известно только общее решение в интегральной форме. Впервые записано явное представление решения в виде линейной комбинации функций ошибок, что существенно упрощает анализ зависимости решения от времени и координаты в приграничной области при малых временах. Путем численного сравнения полученного решения и интегральной формы записи решения из справочника показано, что эти решения совпадают. С целью показать, что аналогичные результаты отсутствуют, анализируются литературные данные по третьей краевой задаче для одномерного уравнения теплопроводности. Решение будет использовано при обработке результатов экспериментов по испарению жидкости под воздействием инфракрасного облучения

**Ключевые слова:** одномерное уравнение теплопроводности, неоднородное уравнение параболического типа, третья краевая задача, задача Робена, аналитическое решение, экспоненциальная неоднородность, функция ошибок

**Введение**

В последние годы при исследовании процессов теплопередачи в жидкостях и газах развиваются подходы, связанные с многомасштабностью проблемы (МНТР — multiscale heat transfer problem), в частности, предполагается решение макроскопических уравнений теплопередачи параллельно с описанием фоновых процессов, то есть решением кинетического уравнения Больцмана ([2] и цитированная в статье литература). Для этого необходимо решение уравнения теплопроводности в аналитическом виде. В настоящее время решение третьей краевой задачи уравнения теплопроводности (задачи Робена) в интегральном виде [1, 3] хорошо известно. Однако, на практике чаще используется решение в виде рядов [4, 5, 6]. Последнее решение хорошо сходится при достаточно больших временах (числах Фурье). При относительно малых временах решение задач МНТР требует вычленения явной зависимости решения задачи Робена от параметров для эффективного учета фоновых механизмов теплопередачи. Поэтому при малых значениях числа Фурье интегральная форма решения является предпочтительной, поскольку обеспечи-

вает в этой области большую эффективность в процедуре оптимизации параметров задачи при сравнении с экспериментом. Цель работы состоит в получении аналитической формы решения третьей краевой задачи неоднородного уравнения теплопроводности с экспоненциальной правой частью, отвечающей, например, простейшей модели рассеяния фотонов в приповерхностном слое. Такое рассеяние инициирует процессы преобразования энергии падающих фотонов в многомасштабных механизмах коллективных возбуждений [7].

**Постановка задачи**

Стандартная задача теплопередачи от нагретой жидкости к окружающей газообразной среде в виде состоит в том, что используется условие Ньютона-Рихмана. Эти граничные условия в совокупности с уравнением теплопроводности называют краевой задачей Робена или 3 краевой задачей [4, 5, 6]. Поскольку в исследуемом случае процесс испарения происходит под воздействием инфракрасного излучения, поскольку решение необходимо искать для неоднородного уравнения теплопроводности, функция в правой части уравнения определяется как раз интенсивностью падающего на поверхность жидкости излучения.

Из справочника [1, 1.1.2-4] известно, что краевая задача Робена для неоднородного уравнения теплопроводности

$$w_t = aw_{xx} + \Phi(x, t), x \geq 0, t \geq 0; \quad (1)$$

$$w(x, 0) = f(x); \quad (2)$$

$$(w_x - kw)|_{x=0} = g(t). \quad (3)$$

имеет решение:

$$w(x, t) = \int_0^\infty f(\xi)G(x, \xi, t) d\xi - a \int_0^t g(\tau)G(x, 0, t - \tau) d\tau + \int_0^t \int_0^\infty \Phi(\xi, \tau)G(x, \xi, t - \tau) d\xi d\tau, \quad (4)$$

где функция Грина

$$G(x, \xi, t) = \frac{1}{2\sqrt{\pi at}} \left\{ e^{-\frac{(x-\xi)^2}{4at}} + e^{-\frac{(x+\xi)^2}{4at}} - 2k \int_0^\infty e^{-\frac{(x+\xi+\eta)^2}{4at} - k\eta} d\eta \right\}. \quad (5)$$

Для частного случая  $\Phi(x, t) = e^{-\alpha x}$  выберем  $f(x)=0, g(t)=0$ . Решение (4) имеет вид:

$$w(x, t) = \int_0^\infty e^{-\alpha \xi} \int_0^t G(x, \xi, t - \tau) d\tau d\xi \quad (6)$$

Функция Грина в этом случае может быть вычислена непосредственно

$$G(x, \xi, t) = \frac{1}{\sqrt{4\pi at}} \left( e^{-\frac{(x-\xi)^2}{4at}} + e^{-\frac{(x+\xi)^2}{4at}} \right) - k e^{k^2 at + k|x+\xi|} \operatorname{erfc} \left( \frac{2kat + |x+\xi|}{\sqrt{4at}} \right). \quad (7)$$

Несмотря на это, прямые вычисления решения (4) затруднительны. Проще оказалось непосредственное решение задачи. Отметим, что явное решение задачи (1) с  $\Phi(x, t) = e^{-\alpha x}$  в случае граничных условий первого рода приведено в учебнике А.В. Лыкова [8], однако явное решение указанной задачи Робена в книге отсутствует.

#### Решение задачи для частного случая $\Phi(x, t) = \phi(x)$

Рассмотрим систему с граничными и начальными условиями:

$$w_t = aw_{xx} + \phi(x), \quad w(x, 0) = 0, \quad (8)$$

$$w_x(0, t) - k w(0, t) = 0,$$

которая эквивалентна системе:

$$u_t - au_{xx} = 0, \quad (9)$$

$$u(x, 0) + \Phi(x) = 0, \quad (10)$$

$$u_x(0, t) - ku(0, t) = B. \quad (11)$$

Здесь

$$B = \Phi_x(0) - k \Phi(0), \quad w = u + \Phi(x), \quad \Phi_{xx} = -\frac{\phi(x)}{a}. \quad (12)$$

Формальное решение задачи (9)-(11) при условии  $B=0$  приведено в справочнике [6]:

$$u(x, t) = \frac{2}{\pi} \int_0^\infty d\beta e^{-a\beta^2 t} \frac{X(\beta, x)}{\beta^2 + k^2} \int_0^\infty dx' X(\beta, x') \Phi(x')$$

где  $X(\beta, x) = \beta \cos \beta x + k \sin \beta x$ .

Положим  $\phi(x) = e^{-\alpha x}$ , тогда, с учетом (12), можно выбрать  $\Phi(x) = -\frac{1}{\alpha^2 a} \left( e^{-\alpha x} + \frac{\alpha+k}{k} \right)$  и убедиться, что  $\int_0^\infty dx' X(\beta, x') \Phi(x')$  для такой функции расходится, хотя исходная краевая задача очевидно имеет решение при конечных значениях координаты и времени.

Решение (9)-(11) будем искать с ядром преобразования [3]:

$$u(x, t) = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \int_0^\infty \frac{r \cos(rx) + k \sin(rx)}{k^2 + r^2} U(r, t) dr - \frac{B}{k}$$

После подстановки получим уравнение

$$ar^2 U(r, t) + U_t = 0.$$

Решение запишем в виде  $U(r, t) = F(r)e^{-ar^2 t}$ . Тогда

$$u = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \int_0^\infty \frac{(r \cos(rx) + k \sin(rx))F(r)e^{-ar^2 t}}{k^2 + r^2} dr - \frac{B}{k} \quad (13)$$

Из условий (10), (12) получим

$$\int_0^\infty \frac{\sin(rx) F(r)}{k^2 + r^2} dr \quad (14)$$

$$= e^{-kx} \int_0^x \psi(y) e^{ky} dy$$

где  $\psi(x) = -\sqrt{\frac{\pi}{2}} \left( \Phi(x) + \Phi(0) - \frac{\Phi'(0)}{k} \right)$

Выразив  $F(r)$  из уравнения (14) с использованием синус-преобразования Фурье, получим

$$u = -\frac{B}{k} + \frac{2}{\pi^2}$$

$$\int_0^\infty \left( \frac{-\sqrt{2\pi}}{(4at)^{\frac{3}{2}}} e^{-\frac{x^2+z^2}{4at} - kz} \int_0^z \psi(y) e^{ky} dy \right. \quad (15)$$

$$\left. - 2z \cosh\left(\frac{xz}{2at}\right) + (2x - 4kat) \sinh\left(\frac{xz}{2at}\right) \right) dz$$

Выберем

$$\phi(x) = e^{-\alpha x}, \quad \Phi(0) = \frac{Q}{a}, \quad \Phi'(0) = \frac{A}{a}$$

Тогда:

$$\Phi(x) = -\frac{e^{-\alpha x}}{\alpha^2 a} + \frac{(A\alpha - 1)x}{\alpha a} + \frac{Q\alpha^2 + 1}{\alpha^2 a} \quad (16)$$

$$\psi(x) = -\frac{\sqrt{2\pi} \left( -e^{-\alpha x} k - A\alpha^2 + (1 + (Ax + 2Q)\alpha^2 - \alpha x)k \right)}{2\alpha^2 a k} \quad (17)$$

$$B = \frac{1}{\alpha a} + \frac{A\alpha - 1}{\alpha a} + k \left( \frac{1}{\alpha^2 a} - \frac{Q\alpha^2 + 1}{\alpha^2 a} \right) \quad (18)$$

Подставим (16)-(18) в уравнение (15). Получим

$$w(x, t) = \frac{1}{a\alpha^2} \left( \frac{k + \alpha}{k} \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{\sqrt{4at}}\right) + \frac{e^{\alpha^2 at}}{2} \left( e^{-\alpha x} \operatorname{erfc}\left(\frac{2at\alpha - x}{\sqrt{4at}}\right) + \frac{\alpha + k}{\alpha - k} e^{\alpha x} \operatorname{erfc}\left(\frac{2at\alpha + x}{\sqrt{4at}}\right) - \frac{\alpha^2 e^{k^2 at + kx} \operatorname{erfc}\left(\frac{2kat + x}{\sqrt{4at}}\right)}{k(\alpha - k)} - e^{-\alpha x} \right) \right) \quad (19)$$

Функция (19) решает следующую задачу:

$$w_t = aw_{xx} + e^{-\alpha x}, \quad w(x, 0) = 0, \quad (w_x - kw)|_{x=0} = 0. \quad (20)$$

На рис. 1 приведен пример графика поверхности  $w=w(x,t)$  и сечений (рис. 2) при указанных значениях параметров.

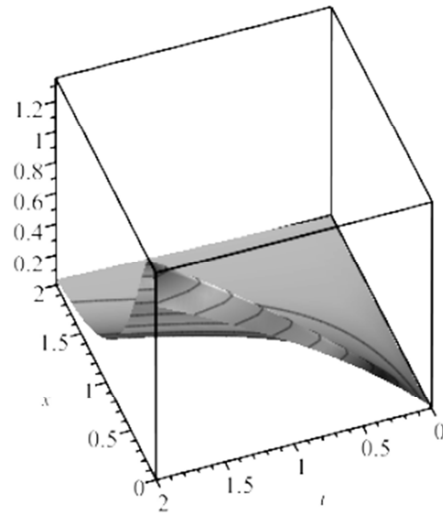


Рис. 1. График решения задачи (20) при значениях параметров  $a = 0.01, \alpha = 2, k = 4, A = 1, Q = 0.25$

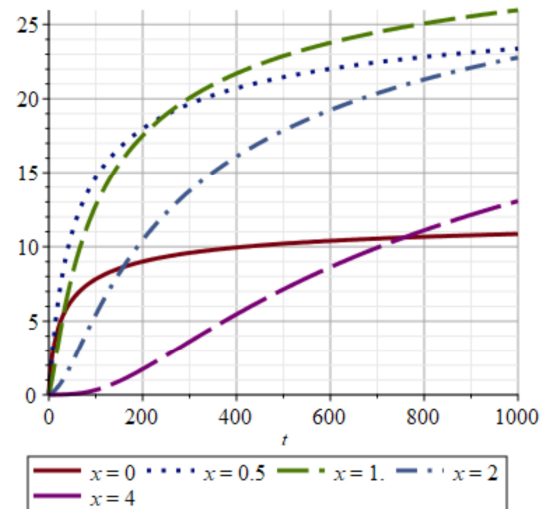


Рис. 2. Сечения графика на рис. 1

### Сравнение решений

Для того, чтобы проверить справедливость полученных результатов были произведены численные оценки решений при значениях параметров  $a = 1E - 4, \alpha = 1E3, k = 10, A = k \cdot Q$ . Заметим, что выбор параметров не имеет привязки к реальным задачам, учитывалась

скорость сходимости и устойчивость получаемых результатов.

На рис. 3 показана зависимость подынтегральной функции  $e^{-\alpha\xi}G(x, \xi, t - \tau)$  решения (6). По мере увеличения параметра  $(t - \tau)$  происходит характерное «расплывание» функции вдоль оси  $x$  и «сжатие» к 0 вдоль оси  $y$ . Пользуясь этим, а также ограниченностью области, в которой значения функции существенно отличаются от нуля, сделаны численные оценки интегральной формы решения.

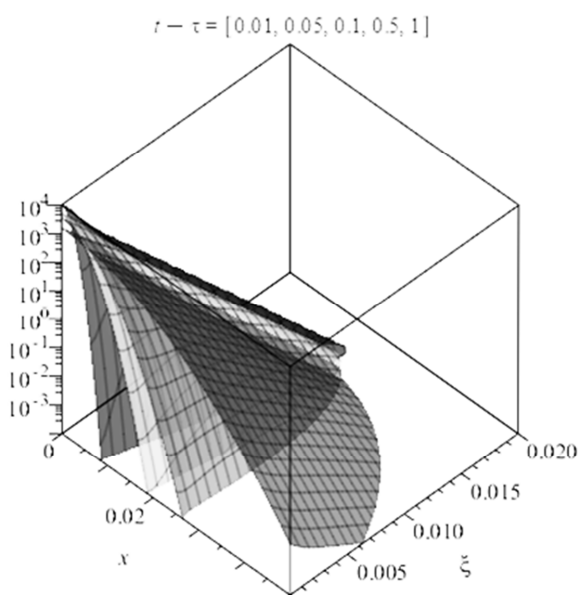


Рис. 3. Подынтегральная функция решения (6). Параметры указаны на рисунке

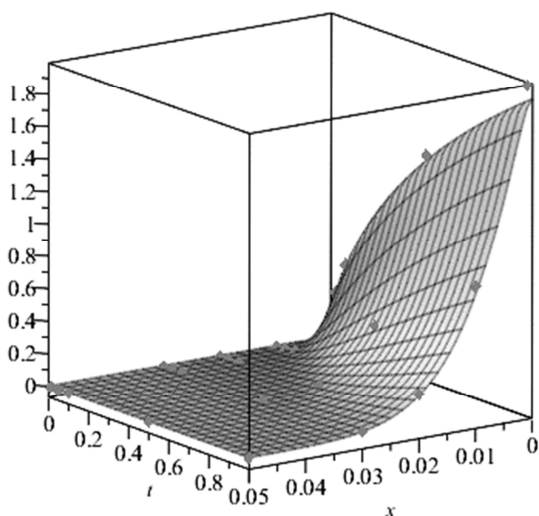


Рис. 4. Сравнение решений: (16)-(20)(19)(поверхность) и (6) (точки) при различных значениях  $x$

На рис. 4 численные оценки показаны точка-ми. На рисунке показано также решение (16)-(20). Заметные отличия вблизи осей  $x$  и  $t$  связаны со сложностями равномерной аппроксимации интегралов в указанной области. В связи с этим, минимальные значения по осям координат выбраны равными 0.001.

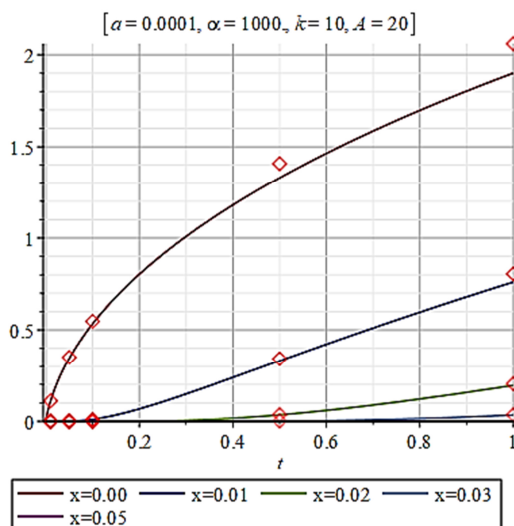


Рис. 5. Сравнение решений (16)-(19)(линии) и (6) (точки) при различных значениях  $x$ . Параметры указаны на рисунке

На рис. 5 приведено сравнение решений при других значениях параметров. Так же, как и в предшествующем случае, при малых значениях параметров  $x$  и  $t$  численное решение совпадает с полученным аналитическим. По мере увеличения параметра  $t$  расхождение становится заметным, поскольку область, где подынтегральная функция отлична от нуля «размывается», и аппроксимация функции становится неудовлетворительной.

Приведенные оценки показывают совпадение найденного решения с интегралом в справочнике [1].

### Заключение

Цель настоящей работы состояла в получении адекватного математического инструментария для исследования поглощения инфракрасного облучения поверхностью жидкости и тепловых потоков в окрестности границы раздела фаз в условиях достаточно коротких времен, то есть существенно нестационарного режима.

Для этого записана стандартная модель теплопереноса на границе сред в виде неоднородного уравнения теплопроводности с граничными

условиями Ньютона – Рихмана (краевая задача Робена) и решена для частного случая экспоненциальной неоднородности в правой части. Вид неоднородности определяется характером поглощения падающего излучения. Решение проверено путем непосредственного численного сравнения с имеющимися интегральными формами представления решения и получено полное соответствие.

Таким образом, получено в явном виде аналитическое решение третьей краевой задачи неоднородного уравнения теплопроводности с экспоненциальной правой частью. Данное решение, использующее стандартные специальные функции, позволяет получать асимптотические приближения как при малых, так и при больших значениях параметра Фурье. Особенно важной является полученная явная зависимость от входных параметров, что значительно облегчает обработку экспериментальных данных при малых временах облучения.

Полученный результат далее будет использован при оценке изменения параметров жидко-

сти вблизи границы с газовой фазой в нестационарном режиме.

#### Литература

1. Полянин А.Д. Справочник по линейным уравнениям математической физики: справочник / А. Д. Полянин. Москва: ФИЗМАТЛИТ, 2007. 592 с.
2. Zhang C., Guo Z., Chen S. Unified implicit kinetic scheme for steady multiscale heat transfer based on the phonon Boltzmann transport equation // *Physical Review E* 96. 2017. 063311.
3. Будак Б.М. Сборник задач по математической физике: учебное пособие для студентов университетов / Б.М. Будак, А.А. Самарский, А.Н. Тихонов. Изд. 2-е, испр. Москва: Наука, Физматлит, 1972. 687 с.
4. Карслоу Г., Егер Д. Теплопроводность твердых тел. М., 1964. 488 с.
5. Лыков А.В. Тепломассообмен. М.: Энергия, 1978. 480 с.
6. Ozisik M.Necati. Heat conduction / M.N. Ozisik. 2<sup>nd</sup> ed. 1993 by John Wiley & Sons Inc., New York. 692 p.
7. Kargar F., Balandin A.A. Advances in Brillouin–Mandelstam light-scattering spectroscopy // *Nature Photonics*. 33. 2021. pp. 720-731.
8. Лыков А.В. Теория теплопроводности. М.: Высшая Школа, 1967. 600 с.

Поступила 13.06.2024; принята к публикации 03.09.2024

#### Информация об авторах

**Сайко Дмитрий Сергеевич** – д-р физ.-мат. наук, профессор кафедры высшей математики и физико-математического моделирования, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: dmsajko@mail.ru

**Андреев Данила Геннадьевич** – аспирант кафедры физики теплотехники и теплоэнергетики, Воронежский государственный университет инженерных технологий (394036, Россия, г. Воронеж, пр. Революции, д. 19), e-mail: as\_scalemodel@mail.ru

**Титов Сергей Александрович** – д-р физ.-мат. наук, профессор кафедры физики теплотехники и теплоэнергетики, Воронежский государственный университет инженерных технологий (394036, Россия, г. Воронеж, пр. Революции, д. 19), e-mail: 125\_titov@mail.ru

**Фурсова Елизавета Юрьевна** – преподаватель, Воронежский государственный профессионально-педагогический колледж (394016, Россия, г. Воронеж, пер. Ученический, д. 1), e-mail: lizochka\_\_@mail.ru

### MODELING EVAPORATION DUE TO IR IRRADIATION: EXACT SOLUTION OF ROBIN'S PROBLEM

D.S. Saiko<sup>1</sup>, D.G. Andreev<sup>2</sup>, S.A. Titov<sup>2</sup>, E.Yu. Fursova<sup>3</sup>

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

<sup>2</sup>Voronezh State University of Engineering Technologies, Voronezh, Russia

<sup>3</sup>Voronezh State Professional and Pedagogical College, Voronezh, Russia

**Abstract:** a model of the heat transfer process under infrared irradiation of a liquid surface is used in the form of solving an inhomogeneous heat conduction equation on a half-line in the case of Newton-Richmann boundary conditions. The heterogeneity is chosen in exponential form. The problem for a semi-infinite medium with boundary conditions of the 1st and 2nd kind was solved earlier in an explicit form with representation through error functions. However, for problems of the 3rd kind, a solution in the form of a Fourier series is usually used, which converges poorly at short times. For this problem, only a general solution in integral form is known. This article presents an explicit form of the solution in the form of a linear combination of error functions, which significantly simplifies the analysis of temperature as a function of time and coordinates in the immediate vicinity of the boundary at short times. By numerical comparison of the obtained solution and the known integral form of the solution from the reference book, it is shown that these solutions coincide. To prove the absence of such results, the literature data on the third boundary value problem for the one-dimensional heat equation was analyzed. The solution will be used when processing the results of experiments on the evaporation of liquid under the influence of infrared radiation.



**Key words:** one-dimensional heat equation, inhomogeneous equation of parabolic type, third kind boundary condition, Robin problem, analytical solution, exponential inhomogeneity, error function

#### References

1. Polyanin A.D. “Handbook on linear equations of mathematical physics: reference book” (“Spravochnik po lineynym uravneniyam matematicheskoy fiziki”), Moscow: FIZMATLIT, 2007, 592 p.
2. Zhang C., Guo Z., Chen S. “Unified implicit kinetic scheme for steady multiscale heat transfer based on the phonon Boltzmann transport equation”, *Physical Review E* 96, 2017, 063311. DOI: 10.1103/PhysRevE.96.063311
3. Budak B.M., Samarsky A.A., Tikhonov A.N. “Collection of problems in mathematical physics: textbook for university students” (“Sbornik zadach po matematicheskoy fizike: uchebnoye posobiye dlya studentov universitetov”), 2nd ed., Moscow, Nauka, Fizmatlit, 1972, 687 p.
4. Karslow G., Eger D. “Thermal conductivity of solids” (“Teploprovodnost' tverdykh tel”), Moscow, 1964, 488 p.
5. Lykov A.V. “Heat and mass transfer” (“Teplomassoobmen”), Moscow, Energiya, 1978, 480 p.
6. Ozisik M.N. Heat conduction, 2nd ed., New York, John Willey & Sons Inc., 1993, 692 p.
7. Kargar F., Balandin A.A. “Advances in Brillouin–Mandelstam light-scattering spectroscopy”, *Nature Photonics*, 2021, no. 33, pp. 720-731.
8. Lykov A.V. “Theory of thermal conductivity” (“Teoriya teploprovodnosti”), Moscow, Vysshaya Shkola, 1967, 600 p.

Submitted 13.06.2024; revised 03.09.2024

#### Information about the authors

**Dmitry S. Saiko** – Professor, Department of Higher Mathematics and Physical and Mathematical Modeling, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: dmsajko@mail.ru

**Danila G. Andreev** - Postgraduate Student, Department of Physics of Heat Engineering and Thermal Power Engineering, Voronezh State University of Engineering Technologies (19 Revolyutsii prosp., Voronezh 394036, Russia), e-mail: as\_scalemodel@mail.ru

**Sergey A. Titov** - Professor of the Department of Physics of Heat Engineering and Thermal Power Engineering, Voronezh State University of Engineering Technologies (19 Revolyutsii prosp., Voronezh 394036, Russia), e-mail: 125\_titov@mail.ru

**Elizaveta Yu. Fursova**– Lecturer, Voronezh State Professional and Pedagogical College (1 Uchenicheskiy per., Voronezh 394016, Russia), e-mail: lizochka\_\_@mail.ru

## ИСПОЛНЕНИЕ SQL-ПОДОБНЫХ ЗАПРОСОВ В РАСПРЕДЕЛЕННЫХ ГЕТЕРОГЕННЫХ СИСТЕМАХ НА БАЗЕ APACHE HADOOP

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

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

**Анотация:** современные информационные системы оперируют большим количеством разнородных (гетерогенных) данных, которые необходимо не только эффективно хранить, но и записывать с достаточной скоростью, чтобы поспевать за высокими темпами появления новой информации в многочисленных первоисточниках, которые обеспечивают систему данными. Необходимость быстрой записи и дальнейшего хранения поступающих данных привела к появлению в структуре систем обработки больших данных выделенного слоя «сырых» данных, которые зачастую имеют непостоянную и гетерогенную структуру. Хранение таких данных в классических системах управления базами данных (СУБД) в исходных объемах не только неэффективно с точки зрения стоимости памяти хранилища, но и зачастую невозможно ввиду строгих требований к структуре, которые предъявляются к записываемым данным. Для решения этих проблем появились системы хранения разнородных данных, которые предъявляют гораздо меньшие требования к качеству записываемой информации, а иногда и вовсе ее не проверяют. С другой стороны, уход от реляционных СУБД создал необходимость использования низкоуровневых движков для выполнения запросов в их исходном виде. Рассмотрена проблема написания задач в распределенной среде Hadoop и существующие для этого решения SQL-On-Hadoop. Анализ инструментов трансляции SQL-подобных запросов продемонстрировал их преимущества с точки зрения уменьшения порога входа для пользователя, которое достигается с сохранением всех сильных сторон фреймворка Hadoop, таких как механизмы репликации, отказоустойчивость и параллельное выполнение задач в распределенной среде. В заключение сделан вывод о том, какие преимущества и недостатки есть у рассмотренных инструментов и в каких сценариях лучше отдавать предпочтение каждому из них, для того чтобы строить эффективную архитектуру платформы обработки больших данных

**Ключевые слова:** обработка больших данных, гетерогенная информация, распределенные вычисления, программно-технические средства

### Введение

Современные подходы к хранению и обработке больших данных формировались под влиянием темпов, с которыми данные генерируются пользователями многочисленных сервисов и услуг. С ростом этих темпов наступил момент, когда приведение данных к структурированному виду в реальном времени стало технически сложным или даже невозможным, и перед архитекторами и инженерами систем хранения и обработки информации встала задача формирования нового подхода к хранению данных. Так произошел переход от Data Warehouse (DWH) [1] к Data Lake [2-4] в компаниях, которым необходимо хранить и обрабатывать огромное количество информации.

Ядром многих систем хранения гетерогенных данных является стек Apache Hadoop. В нем в качестве системы хранения выступает Hadoop Data File System или HDFS [5].

HDFS имеет свои специфичные принципы и подходы к представлению данных, которые требуют использования специальных движков

для исполнения задач получения информации: первично нативным для Hadoop является Hadoop MapReduce – движок для распределенных вычислений в рамках одноименной парадигмы, оперирующий парами «ключ – значение» [6, 7]. Позже появился Spark, который способен значительно ускорить процесс обработки некоторых классов задач за счет минимизации операций чтения/записи с дисков и приоритизации в сторону использования более быстрой оперативной памяти [8].

Проблемой применения этих движков в их исходном виде, а особенно, самого низкоуровневого – MapReduce, является относительно высокий порог входа, который определен сложностью написания запросов и их значительным отличием от привычного для многих языка запросов к СУБД – SQL.

Решением этой проблемы можно считать появление и развитие инструментов трансляции SQL-подобных запросов в задачи в системах распределенного хранения гетерогенных данных [9, 10]. В данной статье представлен анализ и сравнение двух таких фреймворков: Apache Hive и Apache Impala.

Стоит отметить, что эти инструменты дают альтернативный и в чем-то более простой вариант взаимодействия с Hadoop системой, но не способны полностью заменить прямое использование упомянутых выше движков, так как имеют меньше возможностей для ручной настройки и оптимизации.

### Архитектурные особенности Data Lake на примере Apache Hadoop

Главным отличием Data Lake от DWH является то, что в DWH данные обычно хранятся в структурированном виде и могут непосредственно использоваться для аналитики и ad-hoc запросов. В Data Lake же большую роль играет уровень сырых (Raw) данных, в котором они хранятся в том виде, в котором они были получены из различных первоисточников. При этом структурированные данные также присутствуют в отдельных слоях внутри Data Lake и выступают базой данных для аналитических платформ и инструментов [11].

Использование Raw слоя позволяет системе непрерывно получать и записывать данные, что особенно важно в условиях высоких темпов поступления новой информации. Этот подход обеспечивает возможность пересмотра и повторного использования алгоритмов обработки данных, что увеличивает гибкость системы. Однако хранение сырых данных требует дополнительных ресурсов и объемов памяти, так как невозможно заранее предсказать, какие данные будут полезны в будущем. Более того, сырые данные могут иметь нестабильную структуру и быть представлены в различных форматах.

Для эффективного управления и хранения данных в Data Lake часто используется HDFS, который позволяет хранить данные в исходном виде, разбивая их на блоки фиксированного размера. Эти блоки реплицируются на различных узлах кластера, что повышает сохранность данных и сокращает время доступа к ним благодаря принципу Data Locality.

Так как HDFS используется для хранения как структурированных [12, 13], так и неструктурированных данных, при работе с ним пользователь может столкнуться с различными форматами, начиная от текстовых или бинарных файлов и заканчивая более сложными с точки зрения структуры форматами, например, Parquet или ORC:

– текстовые файлы – наиболее простые и доступные для чтения человеком файлы, в то же время могут использоваться для хранения би-

нарных данных, например, изображений. Сюда же можно отнести и JSON-файлы, но работа с ними требует обработки более сложных структур;

– Parquet – ключевым отличием этого формата является хранение данных не в строчном, а в колоночном виде. Это позволяет читать не все данные, а только необходимые атрибуты, что уменьшает время обработки запроса. Также файл содержит метаданные со статистикой по колонкам, которая помогает в оптимизации операций чтения и фильтрации. Поддерживает сжатие данных с различной степенью;

– помимо этого, могут использоваться и другие форматы, например, ORC (Optimized Row Columnar) и Avro.

С точки зрения самого HDFS, нет значительной разницы между этими форматами, а ключевой характеристикой для эффективного хранения является возможность разделить файл на части, т.н. splittable форматы.

Работа с широким разнообразием форматов файлов, хранящихся в HDFS, отличается от работы с реляционными базами данных (БД), а это, в свою очередь, означает невозможность явного использования SQL, который стал стандартом в анализе данных. Для решения этой проблемы используются SQL-On-Hadoop инструменты, такие как Apache Hive и Apache Impala, которые обеспечивают SQL-подобный синтаксис запросов.

Рассмотрим ключевые преимущества их использования, а также концепции и механизмы, которые позволяют Hive и Impala справляться с задачами обработки больших объемов данных, обеспечивая высокую производительность и гибкость в условиях меняющихся требований.

### Этапы обработки SQL-подобных запросов

Перед непосредственным обсуждением инструментов необходимо понять, что именно происходит с исходным запросом и какие этапы он должен пройти для того, чтобы превратиться в задачу в распределенной среде.

1. Parsing. Так как SQL-запрос в общем виде представляет из себя текстовую строку, то первым этапом обработки должен стать синтаксический анализ или Parsing. На этом этапе проверяются правила грамматики SQL и происходит преобразование запроса в Abstract Syntax Tree (AST).

2. Разбор AST. После генерации AST необходимо его дальнейшее преобразование в

блоки запроса (QueryBlock). QueryBlock – это простейший блок SQL, который включает в себя вход, обработку и выход. Процесс генерации блоков является рекурсивным проходом по AST-дереву с обработкой соответствующих токенов.

3. Преобразование QueryBlock в Operation Tree. Задачи MapReduce, создаваемые Hive, состоят из Operation Tree. Каждый оператор отвечает за выполнение конкретной операции на этапах Map и Reduce. Например, в Hive определены следующие операторы: TableScanOperator, SelectOperator, FilterOperator, GroupByOperator, JoinOperator, ReduceSinkOperator.

4. Построение планов запроса и оптимизация. После определения списка задач выполняются этапы оптимизации логического, а затем и физического планов выполнения.

Физический план включает в себя конкретные методы и алгоритмы доступа к данным, сортировки и слияния, а его оптимизация может включать в себя распределение операций по узлам кластера с учетом особенностей системы и данных.

Логический план же представляет из себя высокоуровневое описание операций, которые необходимо выполнить для получения результата запроса. В его оптимизации может быть задействована такая структура данных, как направленный ациклический граф или DAG (Directed Acyclic Graph). DAG представляет собой направленный граф, в котором узлы представляют задачи, а рёбра определяют зависимости между этими задачами. В обработке запросов, особенно в распределенных вычислениях, DAG используются для оптимизации выполнения запросов и управления параллелизмом. На рис. 1 представлен визуализированный пример такого графа.

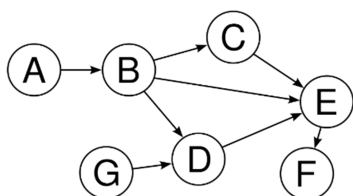


Рис. 1. Направленный ациклический граф (DAG)

DAG позволяет представить запрос в виде графа задач, где каждая задача представляет отдельный самостоятельный блок – этап выполнения запроса. Оптимизатор запросов может анализировать граф и применять различные оптимизации, такие как реорганизация по-

рядка выполнения задач, удаление избыточных задач или объединение задач в одну для улучшения производительности. Также DAG позволяет идентифицировать независимые задачи, которые могут быть выполнены параллельно.

В составе SQL-On-Hadoop инструментов есть компоненты, отвечающие за выполнение всех перечисленных этапов, и особенности реализации этих этапов определяют и особенности самого инструмента, а вместе с тем, и сценарии его применения.

Перейдем к сравнению Apache Hive и Apache Impala.

### Apache Hive

Hive – это SQL-интерфейс доступа к данным, который позволяет взаимодействовать с информацией, расположенной в HDFS, как с классическими реляционными СУБД.

Для правильной интерпретации данных Hive содержит в своей структуре компонент под названием Metastore – хранилище метаданных для каждой из таблиц. Эти метаданные состоят из схемы данных, расположения файлов и их структуры и являются главным требованием к работе Hive, т.к. именно эти метаданные позволяют связать множество файлов внутри HDFS с их структурированным представлением в виде строк, колонок и таблиц. В качестве хранилища метаданных Hive используется реляционная СУБД (рис. 2) [14, 15].

### Apache Hive Architecture

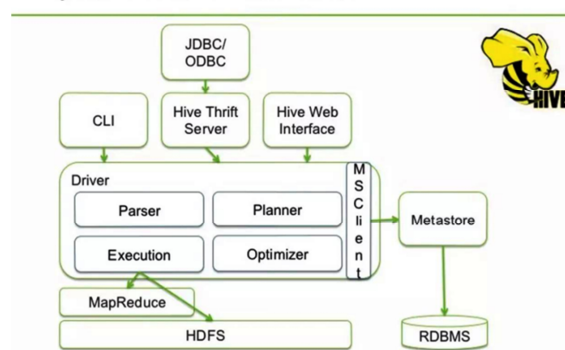


Рис. 2. Основные компоненты фреймворка Apache Hive

Запрос, написанный пользователем, транслируется в Java-код для задач в одном из трех движков MapReduce, Spark или Tez. Один или несколько запросов создаются и исполняются на кластере для формирования запрашиваемых данных.

Сам процесс генерации задач следует общей схеме, описанной в предыдущем разделе, и происходит внутри Hive-драйвера.

Важной особенностью Hive, которая в дополнение к преимуществам HDFS обеспечивает, также, высокую отказоустойчивость выполняемых запросов, является использование механизма кеширования. Hive поддерживает как кеширование результатов запроса, так и промежуточных данных, формируемых в процессе прохода по графу исполнения. Такой механизм не только обеспечивает сохранность промежуточных данных, но и ускоряет выполнение запроса, если эти данные будут применяться в нескольких последующих операциях.

Таким образом Hive особенно эффективен для выполнения сложных ETL процессов благодаря своей способности к масштабированию и отказоустойчивости. Использование кеширования данных и оптимизация запросов на основе DAG обеспечивают высокую производительность и стабильность даже при обработке больших объемов данных.

### Apache Impala

Impala – это массивно параллельный (MPP) SQL-движок для интерактивной работы с HDFS, который запускается на различных узлах кластера для параллельного выполнения запросов. Несмотря на зависимость от Hive Metastore для получения информации о структуре данных, Impala использует свой собственный процесс оптимизации и выполнения запросов. Так же, как и Hive, Impala использует схожий с SQL синтаксис.

После получения запроса от клиента процесс Impala становится координирующим и определяет задачи для других процессов. Для этого производится анализ SQL-запроса и построение оптимального плана выполнения.

Распределенные по сети процессы, в свою очередь, работают со своими локальными данными на узле кластера и отправляют результат координирующему процессу. После чего координирующий узел выполняет финальную обработку данных и возвращает результат клиенту.

Impala обеспечивает низкую задержку и высокую скорость выполнения запросов, что делает его идеальным для интерактивного анализа данных и ad-hoc задач. Благодаря своей архитектуре, Impala позволяет обрабатывать запросы в режиме реального времени, предоставляя пользователям возможность быстро получать доступ к необходимой информации.

Параллельное выполнение запросов и распределение задач между узлами кластера значительно сокращают время отклика и повышают эффективность работы с большими данными.

### Заключение

В данной статье авторы рассмотрели класс задач SQL-On-Hadoop, описали причины и предпосылки, которые способствовали появлению специализированных инструментов. Также были рассмотрены процессы и механизмы, способствующие трансляции и оптимизации запросов.

Было показано, что Использование Hadoop в паре с такими инструментами, как Hive и Impala, позволяет преодолевать ограничения традиционных реляционных СУБД и эффективно справляться с вызовами, связанными с обработкой больших объемов данных. А простота и доступность их применения позволяют значительно расширить круг пользователей системы, включив в них не только архитекторов и инженеров, но и аналитиков, владеющих SQL.

В завершение было проведено сравнение двух популярных инструментов, которые на первый взгляд, решают одну и ту же задачу, но их особенности определяют наиболее эффективное применение для каждого из инструментов. Так как Hive использует кеширование данных, то скорость выполнения запросов не так велика, но это значительно повышает его стабильность. С другой стороны, в случае потери одного из процессов, не опирающийся на кеширование данных Impala перезапустит его и начнет выполнение части задачи сначала.

### Литература

1. W. Inmon, Building the data warehouse, Fourth Edition, 2005. 575 p.
2. R. Hai, C. Quix, M. Jarke. Data lake concept and systems: a survey. 2021. 25 p.
3. Ali S.M.F., Wrembel R. From conceptual design to performance optimization of ETL workflows: current state of research and open problems, 2017. The VLDB Journal, 26(6): pp. 777–801.
4. Towards Information Profiling: Data Lake Content: Metadata Management / A. Alserafi, A. Abello, O. Romero, T. Calders // IEEE 16th International Conference on Data Mining Workshops. 2016. pp. 953-961.
5. Shvacko K., Kuang H., Cransler R. The Hadoop Distributed File System // 26th Symposium on Mass Storage Systems and Technologies (MSST). 2010. pp. 1-10.
6. Dean J., Ghemawat S. MapReduce: simplified data processing on large clusters // Communications on the ACM. 2008. Vol. 51. pp. 107-113.



7. Синюков Д.С., Данилов А.Д., Кравец О.Я. Управление транзакциями с оперативным контентом на основе распределенного кэширования. Воронеж: Научная книга, 2023. 152 с.
8. Spark: Cluster Computing with Working Sets / M. Zaharia, M. Chowdhury, M.J. Franklin, S. Shenker, I. Stoica // Proceedings of the 2nd USENIX conference on Hot topics in cloud computing. 2010. Vol. 10. No. 10–10. P. 95. URL: <https://amplab.cs.berkeley.edu/wpcontent/uploads/2011/06/Spark-Cluster-Computing-with-Working-Sets.pdf>.
9. HAWQ: A massively parallel processing SQL engine in Hadoop / Chang L., Wang Z., T. Ma, L. Jian // SIGMOD International Conference of Management of Data, 2014. PP. 1223-1234.
10. Chang L. Massively Parallel Processing SQL Engine in Hadoop // ACM SIGMOD, 2014. PP. 1223-1234.
11. Данилов А.Д., Терехов Д.В. Сравнительный анализ СУБД для выбора операционной базы данных // Системы управления и информационные технологии. 2019. № 3 (77). С. 56-63.
12. Abadi D., Boncz P., Harizopoulos S. Column oriented Database Systems // Proc. VLDB Endow. 2009. Vol. 2. PP. 1664-1665. URL: [https://www.researchgate.net/publication/220538392\\_Column\\_oriented\\_Database\\_Systems](https://www.researchgate.net/publication/220538392_Column_oriented_Database_Systems)
13. Abadi D., Bonez P., Harizopoulos S. Column oriented Database Systems // Proceedings of the VLDB, 2009. 2(2). pp.1664-1665.
14. Floratou A., Patel J.M., Shekita E.J., Tata S. Column-oriented Storage Techniques for MapReduce, 2011. PVLDB, 4(7), pp. 419–429.
15. Терехов Д.В., Данилов А.Д. Хранение данных процесса в информационных системах специального назначения // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2019. Т. 15. № 1. С. 48-56.
16. Программный комплекс для проверки динамических связей технологических схем и баз данных / Д.С. Синюков, А.Д. Данилов, Д.А. Денисов, М.Е. Ушков // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2022. Т. 18. № 4. С. 15-24.

Поступила 16.06.2024; принята к публикации 03.09.2024

#### 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](mailto: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](mailto: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](mailto:alex.carachevtsev@gmail.com)

## EXECUTION OF SQL-LIKE QUERIES IN DISTRIBUTED HETEROGENEOUS SYSTEMS BASED ON APACHE HADOOP

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

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

**Abstract:** modern information systems operate with a large amount of heterogeneous data, which must not only be stored, but also recorded at a sufficient speed to keep up with the high rates of new information appearing in numerous primary sources that provide the system with data. The need for fast recording and further storage of incoming data has led to the emergence of a dedicated layer of "raw" data in the structure of big data processing systems, which often have an unstable and heterogeneous structure. Storing such data in classical DBMS in initial volumes is not only inefficient in terms of the cost of a storage unit, but is also often impossible due to the strict structure requirements imposed on the recorded data. To solve these problems, heterogeneous data storage systems were created, which place much lower demands on the quality of recorded information, and sometimes do not check it at all. On the other hand, moving away from relational databases has created the need to use low-level engines to execute queries in their original form. In this article, the authors examined the problem of writing tasks in a distributed Hadoop environment and the existing SQL-On-Hadoop solutions for this. The analysis of SQL-like query translation tools presented in the article demonstrated their advantage in terms of reducing the user's entry threshold, which is achieved while preserving all the advantages of the Hadoop framework, such as replication mechanisms, fault tolerance and parallel task execution in a distributed environment. In conclusion, it is demonstrated what advantages and disadvantages the considered tools have and in which scenarios it is better to give preference to each of them in order to build an effective architecture of the big data processing platform

**Key words:** big data processing, heterogeneous information, distributed computing, software and hardware

#### References

1. Inmon W. "Building the data warehouse", Fourth Edition, 2005, 575 p.
2. Hai R., Quix C., Jarke M., "Data lake concept and systems: a survey", 2021, 25 p.
3. Ali S.M.F., Wrembel R. "From conceptual design to performance optimization of ETL workflows: current state of research and open problems", *The VLDB Journal*, 2017., no. 26 (6), pp. 777–801.

4. Alserafi A., Abell'o A., Romero O., Calders T. "Towards Information Profiling: Data Lake Content: Metadata Management", *IEEE 16th International Conference on Data Mining Workshops*, 2016, pp. 953-961
5. Shvacko K., Kuang H., Cransler R. "The Hadoop Distributed File System", 2010, pp. 1-10.
6. Dean J., Ghemawat S. "MapReduce: simplified data processing on large clusters", *Communications on the ACM*, 2008., vol. 51, pp. 107-113.
7. Sinyukov D.S., Danilov A.D., Kravets O.Ya. "Managing transactions with live content based on distributed caching" ("Upravleniye tranzaktsiyami s operativnym kontentom na osnove raspredelenogo keshirovaniya", Voronezh, Nauchnaya kniga, 2023, 152 p.
8. Zaharia M., Chowdhury M., Franklin M. "Spark: Cluster Computing with Working Sets", *proc. of the 2nd USENIX conference on Hot topics in cloud computing*, 2010.
9. Chang L. "Massively Parallel Processing SQL Engine in Hadoop", *ACM SIGMOID*, 2014, pp. 1223-1234.
10. Danilov A.D., Terekhov D.V. "Comparative analysis of DBMS for selecting an operational database", *Management systems and information technologies (Sistemy upravleniya i informatsionnyye tekhnologii)*, 2019, no. 3 (77), pp. 56-63.
11. Terekhov D.V., Danilov A.D., Kravets O.Ya. "Data flow management 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, Nauchnaya kniga, 2017, 156 p.
12. Abadi D., Benez P., Harizopoulos S. "Column oriented Database Systems", *PVLDB*, 2009, no. 2 (2).
13. Floratou A., Patel J.M., Shekita E.J., Tata S. "Column-oriented Storage Techniques for MapReduce", *PVLDB*, 2011, no. 4 (7), pp. 419-429.
14. Terekhov D.V., Danilov A.D. "Storing process data in special-purpose information systems", *The Bulletin of the Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2019, vol. 15, no. 1, pp. 48-56.
15. Sinyukov D.S., Danilov A.D., Denisov D.A., Ushkov M.E. "Software package for checking dynamic connections of technological schemes and databases", *The Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2022, vol. 18, no. 4, pp. 15-24.

Submitted 16.06.2024; revised 03.09.2024

#### 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

## ПОСТРОЕНИЕ МОДЕЛИ МНОГОЭТАПНОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА В ВИДЕ СЕТИ ПЕТРИ

А.М. Корнеев, Т.В. Лаврухина, Т.А. Сметанникова, Л.К. Ерохин

Липецкий государственный технический университет, г. Липецк, Россия

**Аннотация:** рассматриваются вопросы описания многоэтапных производственных процессов иерархических итеративных сетей и сетей Петри. Отдельные стадии обработки представляются в виде клеток итеративной сети, характеризующихся набором входов, выходов и состояний. Для каждой клетки выполняется кодирование информации, формируются алфавиты входов, выходов и состояний. Рассмотрена иерархия клеток дискретной итеративной сети. Использование сетей Петри делает возможным моделировать взаимодействие алфавитов отдельных факторов и исследовать переходы из одного состояния в другое. Сочетания алфавитов рассматриваемых технологических параметров каждой клетки формируют позиции сети Петри, соответствующие описываемому этапу обработки. При моделировании можно представить сеть Петри, которая состоит из набора «слоев». Каждый из них содержит свой набор позиций и переходов и отражает завершение одного этапа и начало следующего. Поскольку обрабатывается статистическая информация, то следует добавить «слой», отвечающий за перемещение от исходных данных к данным первого этапа, и аналогичный – от второго этапа к выходным значениям. В общем виде каждый «слой» содержит сведения об очередном этапе процесса, которые разбиты на заданные наборы. Каждый набор представляет определенную позицию, в которой значение отражает долю данных, соответствующих ему. Из каждой позиции исходят стрелки в переходы, обозначающие наборы статистических данных следующего этапа производственного процесса. Количество указанных стрелок в каждый переход соответствует количеству зафиксированных процессов соответствующего набора очередного этапа, перешедших в определенном переходом набор следующего этапа. При исследовании сложных систем и выборе методов управления ими, учитываются функциональные связи между алфавитами факторов и выходных свойств. Описаны подходы моделирования сложных объектов с учетом иерархии клеток с использованием итеративных сетей и сетей Петри

**Ключевые слова:** сеть Петри, дискретные итеративные сети, иерархия клеток, алфавиты факторов, клетка итеративной цепи, параметры сети Петри

### Введение

Важным этапом моделирования сложных производственных систем является создание функциональных блоков, описывающих отдельные стадии обработки. Отдельный блок представляется в виде клетки итеративной сети, характеризующейся набором входов, выходов и состояний. Исследуемый сложный производственный процесс представляется в виде набора отдельных клеток. Далее анализируются условия взаимодействия клеток между собой. При моделировании сложных технологических процессов формируется итеративная сеть, включающая иерархию клеток, соответствующих отдельным стадиям обработки [1-3]. Для каждой клетки выполняется кодирование информации, формируются алфавиты входов, выходов и состояний.

### Теория вопроса

Любая стадия обработки (клетка итеративной цепи  $k_s$ ) содержит заданный набор величин  $x(k_s, t, l_{k_s})$ , где  $l_{k_s} = 1_{k_s}, \dots, L_{k_s}$ ;  $L_{k_s}$  — общее число факторов, описываемых на стадии обработки  $k_s$ .

Для исследуемых величин создаются алфавиты. Диапазон изменения технологической величины  $l_{k_s}$  определенной клетки  $k_s$ , входящей в состав внутренней цепи и отражающий единицу времени  $t$ , подразделяется на набор отрезков, отражающих элементы алфавитов факторов):

$$b(k_s, l_{k_s}, 1_{l_{k_s}}, t), b(k_s, l_{k_s}, 2_{l_{k_s}}, t), \dots, \\ b(k_s, l_{k_s}, j_{l_{k_s}}, t), \dots, b(k_s, l_{k_s}, J_{l_{k_s}}, t), \quad (1)$$

где  $j_{l_{k_s}} = 1_{l_{k_s}}, \dots, J_{l_{k_s}}$  — отрезки, составляющие алфавит фактора;

$J_{l_{k_s}}$  — размер алфавита  $l_{k_s}$ -го входа исследуемой цепи.

Элементы наборов алфавитов технологических величин  $\chi(k_s, t, l_{k_s})$  клетки  $k_s$  в момент времени  $t$ :

$$\chi_\beta(k_s, t) = b(k_s, 1_{k_s}, j_{1_{k_s}}, t), \dots, b(k_s, l_{k_s}, j_{l_{k_s}}, t), \dots, b(k_s, L_{k_s}, j_{L_{k_s}}, t). \quad (2)$$

Использование сетей Петри делает возможным моделировать взаимодействие алфавитов отдельных факторов и исследовать переходы из одного состояния в другое [4-6]. Иерархия клеток дискретной итеративной сети приведена на рис. 1.

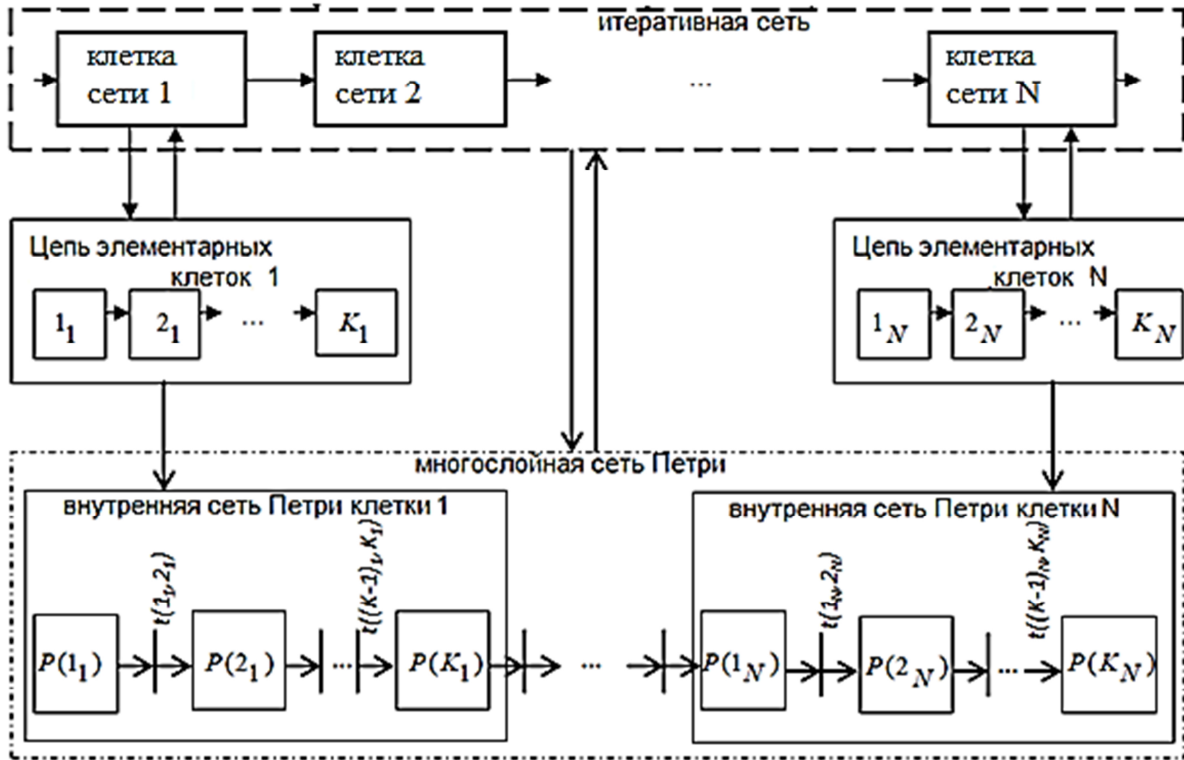


Рис. 1. Иерархия клеток дискретной итеративной сети сложного производственного процесса

Для исследования сети Петри формируется определенное множество позиций  $P = (P_{1_s}, P_{k_s}, \dots, P_{K_s})$  [7-9]. Любое состояние  $P_{k_s}$  сети Петри описывается формируемым набором атрибутов  $P\{K_s, \chi_\beta(k_s, t)\}$ .

Сочетания алфавитов  $\chi_\beta(k_s, t)$  рассматриваемых технологических параметров  $\chi(k_s, t, l_{k_s})$  каждой клетки формируют позиции сети Петри, соответствующие описываемому этапу обработки

$$P_{k_s} = P(k_s, \chi_1), \dots, P(k_s, \chi_\beta), \dots, P(k_s, \chi_B). \quad (3)$$

Число позиций каждой клетки цепи

$$B = \{\chi_\beta(k_s, t), \beta = 1, \dots, B, B = \prod_{l_{k_s}=1}^{L_{k_s}} J_{l_{k_s}}\}. \quad (4)$$

Пример перехода между отдельными переделами изображен на рис. 2.

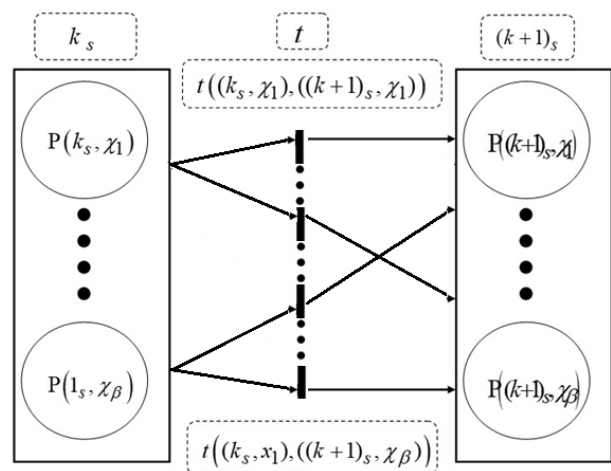


Рис. 2. Иерархия клеток дискретной итеративной сети сложного производственного процесса

Переход описывается в виде  $t((K_s, \chi_1), ((k+1)_s, \chi_\beta))$ , где  $K$  – номер передела.

Позиции выступают в виде сочетания алфавитов, относящихся к исследуемому переделу. Пример значений позиций представлен на рис. 3.

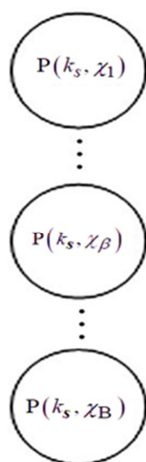


Рис. 3. Пример описания позиций

### Методика проведения эксперимента

Имеющиеся входные данные были разбиты на три набора для каждого этапа. Разбиение осуществлялось следующим образом. Имеющийся набор параметров  $X_1, X_2, X_3, X_4, X_5, X_6$ , были представлены каждый как наборы чисел в определённом диапазоне. Что бы разбить на наборы данные, были найдены *Min* и *Max*, а их разность, взятая по модулю, была поделена на 3, таким образом была получена длина  $d$  для каждого диапазона в каждом наборе чисел.

$$d = |\text{Min}(x1) - \text{Max}(x1)| / 3$$

Данные от *Min* до  $\text{Min} + d$  получали значение 0.

Данные от  $\text{Min} + d$  до  $\text{Min} + 2d$  получали значение 1.

Данные от  $\text{Min} + 2d$  до *Max* получали значение 2.

Столбцы с данными были взяты попарно:  $X_1 X_2, X_3 X_4, X_5 X_6$ , были получены следующие наборы: 00, 01, 02, 11, 22, 10, 20, 12, 21.

Пример переходов из позиций одного этапа обработки в другой приведен в табл. 1. В ней отражено количество меток каждого сочетания

алфавитов и их переход в метки сочетаний следующего набора позиций.

Таблица 1

Пример переходов из позиций одного этапа обработки в другой

Вход P1	Сумма переходов	Вход в набор (P2)	Кол-во переходов, P2
P1,0 1	51	T00	8
		T10	22
		T20	14
		T12	1
		T11	4
P1,1 0	10	T00	8
		T20	2
P1,1 1	218	T10	75
		T20	68
		T00	70
		T01	4
		T11	1
P1,1 2	124	T10	29
		T00	26
		T20	68
		T21	1
P1,2 1	39	T10	18
		T20	6
		T00	12
		T11	1
		T01	2
P1,2 2	48	T20	16
		T10	26
		T00	6
P1,0 2	14	T00	5
		T20	2
		T10	7

Переходы из определенной позиции приведены на рис. 4.

Аналогичный переход из набора позиций второго уровня в третий приведен в табл. 2.

При моделировании можно представить сеть Петри, которая состоит из набора «слоев». Каждый из них содержит свой набор позиций и переходов и отражает завершение одного этапа и начало следующего. Поскольку обрабатывается статистическая информация, то следует добавить «слой», отвечающий за перемещение от исходных данных к данным первого этапа, и аналогичный – от второго этапа к выходным значениям. Таким образом, сеть Петри будет состоять из четырёх «слоев» схожей структуры.



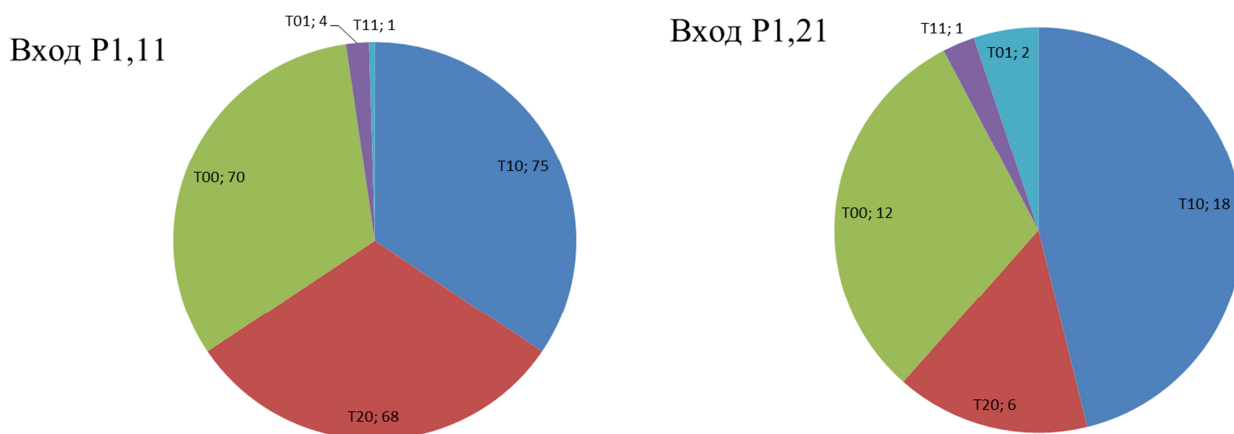


Рис. 4. Переходы из наборов входных значений в наборы выходных значений

Таблица 2  
Пример переходов из позиций второго уровня в третий

Вход P2	Сумма переходов	Вход в набор (P3)	Кол-во переходов, P3
P2,00	135	T11	13
		T21	65
		T20	22
		T12	23
		T22	4
		T02	2
		T10	6
P2,01	8	T10	2
		T11	1
		T20	1
		T21	4
P2,10	177	T12	32
		T11	40
		T21	80
		T20	10
		T22	9
		T10	6
P2,11	6	T11	1
		T21	1
		T20	4
P2,12	1	T21	1
P2,20	176	T21	67
		T20	18
		T12	19
		T11	62
		T22	3
P2,21	1	T21	1

В общем виде каждый «слой» содержит сведения об очередном этапе процесса, где све-

дения об очередном этапе процесса разбиты на  $n$  наборов. Каждый набор представляет определенную позицию, в которой значение отражает долю данных, соответствующих ему. Из каждой позиции исходят стрелки в  $k$  переходов, обозначающих наборы статистических данных следующего этапа производственного процесса. Количество указанных стрелок в каждый переход соответствует количеству зафиксированных процессов соответствующего набора очередного этапа, перешедших в определённый переходом набор следующего этапа.

Обозначения в данной сети Петри:

- В нулевом слое:
  - начальную позицию P0.
- переходы T1,01, T1,10, T1,11, T1,12, T1,21, T1,22, T1,02;
- В первом слое:
  - входные позиции P1,01, P1,10, P1,11, P1,12, P1,21, P1,22, P1,02;
  - переходы T2,00, T2,01, T2,02, T2,10, T2,11, T2,12, T2,20, T2,21;
- Во втором слое:
  - входные позиции P2,00, P2,01, P2,10, P2,11, P2,12, P2,20, P,21;
  - переходы T3,02, T3,10, T3,11, T3,12, T3,20, T3,21, T3,22;
- В третьем слое:
  - входные позиции P3,02, P3,10, P3,11, P3,12, P3,20, P3,21, P3,22;

Рассмотрены участки сети Петри, показывающие количество переходов наблюдаемых данных от одного этапа к другому по разным наборам, соответствующие табл. 2. Так же на рисунках видно сколько всего переходов в P2 (1Этап) по каждому набору. На рис. 5 представлена описываемая сеть Петри сложного производственного процесса.

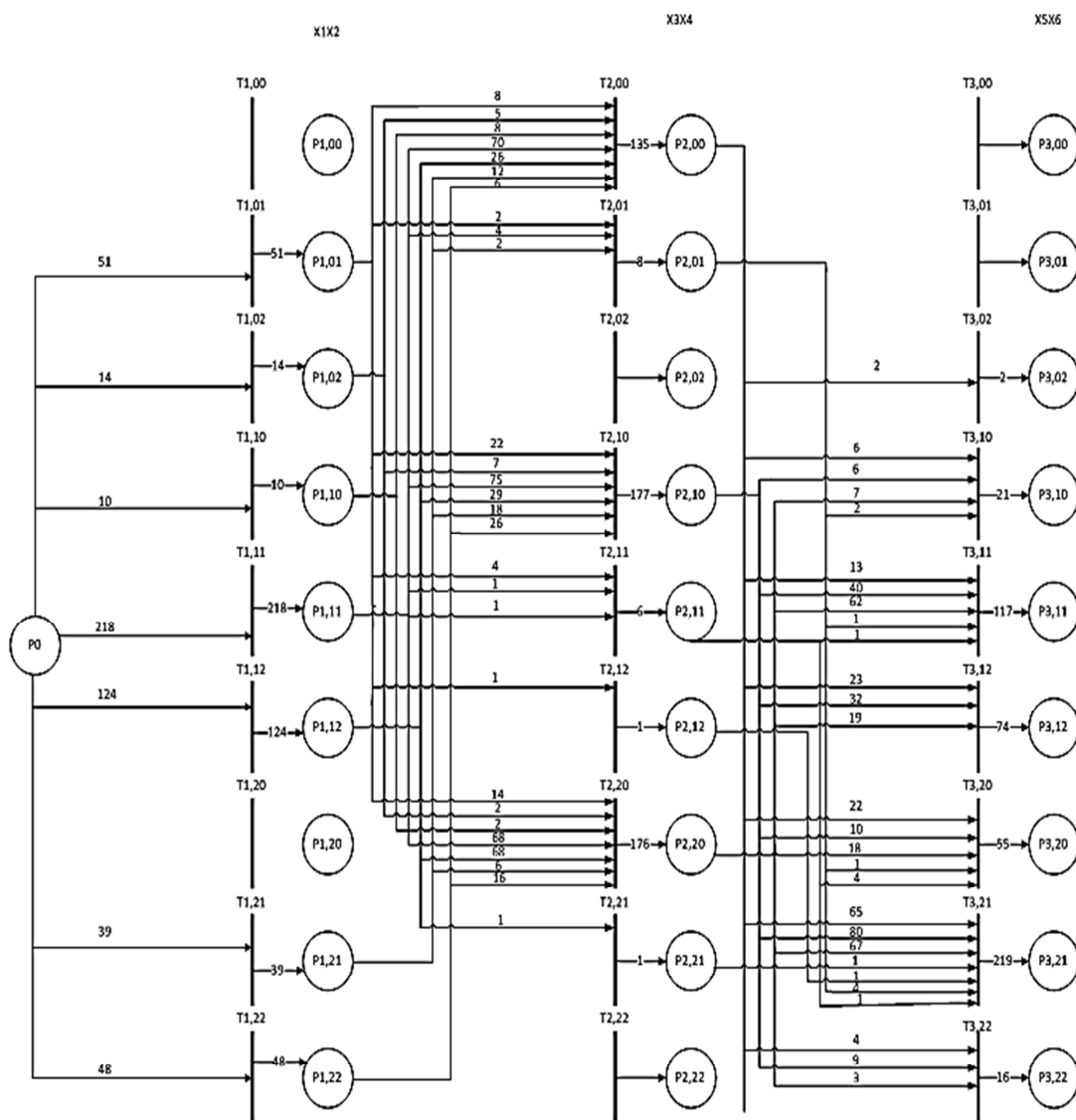


Рис. 5. Сеть Петри сложного производственного процесса

### Обсуждение результатов

Анализ сложных технологических процессов показал, что выбранные технологические цепочки удобно моделировать с применением иерархических сетей Петри. В работе рассмотрены подходы формирования алфавитов технологических величин, формирующих позиции и переходы многослойных сетей Петри. Каждая рассматриваемая стадия реализации многоэтапного технологического процесса включает ряд операций, характеризующихся наличием определенного набора реализуемых технологических факторов.

Разрабатываемая иерархическая сеть Петри учитывает особенности клеток и алфавитов случайных величин соответствующей итеративной сети. Это дает возможность формировать вложенные сети Петри, которые модели-

руют процесс функционирования каждой стадии обработки. Применяя данный подход к многостадийному производственному процессу, иерархия дает возможность учесть сложность выполняемых переходов между выбранными слоями состояний, которые соответствуют определенным переделам.

### Заключение

При исследовании сложных систем и выборе методов управления ими, учитываются функциональные связи между алфавитами факторов и выходных свойств. Описаны подходы моделирования сложных объектов с учетом иерархии клеток с использованием итеративных сетей и сетей Петри.

Целью применения итеративных сетей Петри является совершенствование процессов

моделирования и управления режимами функционирования сложных производственных систем.

Предлагаемый метод характеризуется применением клеточной интерпретации исследуемых процессов и дает возможность представлять сложные многостадийные системы в виде иерархии клеток. Анализируемые режимы функционирования описываются в виде сочетаний алфавитов рассматриваемых технологических параметров, которые каждой клетке формируют позиции сети Петри, соответствующие описываемому этапу обработки.

При моделировании рассматривается сеть Петри, которая состоит из набора «слоев». Каждый из них содержит свой набор позиций и переходов и отражает завершение одного этапа и начало следующего.

В результате приведен пример моделирования сложной производственной системы с использованием сетей Петри.

В итоге, использование дискретных итеративных сетей и сетей Петри дает возможность находить оптимальные режимы функционирования и анализировать динамику их коррекции.

#### Литература

1. Identification of complex production systems with using iterative networks / A.M. Korneev, L.S. Abdullakh, A.B. Sukhanov, S.D. Antar, Kh.M. Al-jonid // International Journal of Engineering & Technology. 2018. Vol. 7(3.5). Pp. 37-39.

2. Automated control system functions for complex structured technological processes / A.M. Korneev, T.A. Smetannikova, T.V. Lavrukina, F.A. Al-Saeedi // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Volume 1155, III International Scientific Conference: Modernization, Innovations, Progress: Advanced Technologies in Material Science, Mechanical and Automation Engineering (MIP-III 2021), Krasnoyarsk, Russian Federation. Mater. Sci. Eng. 1155 012048.

3. Blocks of cell-hierarchical identification and optimization of complex spatially distributed production systems / A. Korneev, T. Lavrukina, T. Smetannikova, M. Pantyushin // Proceedings - 2023 5th International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency, SUMMA 2023. Pp. 664-668.

4. Ломазова И.А. Вложенные сети Петри и моделирование распределенных систем. Москва: Наука. Физматлит, 2004. С. 337-352.

5. Блюмин С.Л., Шмырин А.М., Седых И.А. Сети Петри с переменной недетерминированностью как окрестностные системы // Системы управления и информационные технологии. 2008. № 3. 2 (33). С. 228-233.

6. Kuzmuk V.V., Supronenko O.O. Modified Petri net and parallel process simulation device. K.: Maklout, 2010. 260 p.

7. Седых И.А., Стеганцев Н.В. Моделирование цементного производства на основе систем массового обслуживания с использованием GPSS // Вестник Липецкого государственного технического университета. 2016. № 3 (29). С. 28-33.

8. Седых И.А., Анисеев Е.С. Применение раскрашенных временных сетей Петри для моделирования цементного производства // Вестник Донского государственного технического университета. Ростов-на-Дону, 2016. № 4(87). С. 140-145.

9. Ломазова И.А. Вложенные сети Петри: моделирование и анализ систем с распределенной структурой. М.: Научный мир, 2004. 208 с.

Поступила 19.04.2024; принята к публикации 03.09.2024

#### Информация об авторах

**Корнеев Андрей Матиславович** — д-р техн. наук, профессор кафедры общей механики, Липецкий государственный технический университет (398055, Россия, г. Липецк, ул. Московская, 30), e-mail: weenrok@mail.ru, ORCID: 0000-0003-3829-9709

**Лаврухина Тамара Владимировна** — канд. техн. наук, доцент кафедры автоматизированных систем управления, Липецкий государственный технический университет (398055, Россия, г. Липецк, ул. Московская, 30), e-mail: lavrukina\_tv@mail.ru, ORCID: 0000-0003-0677-4501

**Сметанникова Татьяна Андреевна** — канд. техн. наук, доцент кафедры дизайна и художественной обработки материалов, Липецкий государственный технический университет (398055, Россия, г. Липецк, ул. Московская, 30), e-mail: aveenrok@mail.ru, ORCID: 0000-0002-0821-8034

**Ерохин Лев Константинович** – аспирант кафедры общей механики, Липецкий государственный технический университет (398055, Россия, г. Липецк, ул. Московская, 30), e-mail: erokhin.lk@gmail.com

## MODELING A MULTISTAGE TECHNOLOGICAL PROCESS IN THE FORM OF A PETRI NET

A.M. Korneev, T.V. Lavrukina, T.A. Smetannikova, L.K. Erokhin

Lipetsk State Technical University, Lipetsk, Russia

**Abstract:** the issues of description of multistage production processes of hierarchical iterative networks and Petri nets are considered. Separate processing stages are represented as cells of an iterative network characterized by a set of inputs, outputs and states. For each cell information coding is performed, alphabets of inputs, outputs and states are formed. The paper

considers the hierarchy of cells of a discrete iterative network. The use of Petri nets makes it possible to model the interaction of alphabets of individual factors and to study transitions from one state to another. Combinations of alphabets of considered technological parameters of each cell form Petri net positions corresponding to the described processing stage. In modeling it is possible to present a Petri net, which consists of a set of "layers". Each of them contains its own set of positions and transitions and reflects the completion of one stage and the beginning of the next. Since statistical information is processed, a "layer" should be added, which is responsible for moving from the input data to the data of the first stage, and a similar one - from the second stage to the output values. In general, each "layer" contains information about the next step of the process, where information about the next step of the process is divided into given sets. Each set represents a certain position, where the value reflects the fraction of data corresponding to it. From each position there are arrows to the transitions, indicating sets of statistical data of the next stage of the production process. The number of indicated arrows to each transition corresponds to the number of fixed processes of the corresponding set of the next stage that have passed to the set of the next stage defined by the transition. In the study of complex systems and the choice of methods for their control, functional relations between alphabets of factors and output properties are taken into account. Approaches of modeling complex objects taking into account the hierarchy of cells using iterative networks and Petri nets are described

**Key words:** Petri net, discrete iterative networks, cell hierarchy, alphabets of factors, cell of iterative chain, Petri net parameters

### References

1. Korneev A.M., Abdullakh L.S., Sukhanov A.B., Antar S.D., Al-jonid Kh.M. "Identification of complex production systems with using iterative networks", *International Journal of Engineering & Technology*, 2018, vol. 7 (3.5), pp. 37-39.
2. Korneev A.M., Smetannikova T.A., Lavrukhina T.V., Al-Saeedi F.A. "Automated control system functions for complex structured technological processes", *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 1155, III International Scientific Conference: Modernization, Innovations, Progress: Advanced Technologies in Material Science, Mechanical and Automation Engineering (MIP-III 2021), Krasnoyarsk, Russian Federation. Mater. Sci. Eng. 1155 012048 DOI 10.1088/1757-899X/1155/1/012048.
3. Korneev A., Lavrukhina T., Smetannikova T., Pantyushin M. "Blocks of cell-hierarchical identification and optimization of complex spatially distributed production systems", *proc. of the 5th International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency, SUMMA*, 2023, pp. 664–668.
4. Lomazova I.A. "Nested Petri nets and modeling of distributed systems" ("Vlozhennyye seti Petri i modelirovaniye raspredelennykh system"), Moscow, Nauka. Fizmatlit, 2004, pp. 337–352.
5. Blyumin S.L., Shmyrin A.M., Sedykh I.A. "Petri nets with variable non-determinism as neighborhood systems", *Control systems and information technologies (Sistemy upravleniya i informatsionnyye tekhnologii)*, 2008, no. 3. 2 (33), pp. 228-233
6. Kuzmuk V.V., Supronenko O.O. "Modified Petri net and parallel process simulation device", Kiev, Maklout, 2010, 260p.
7. Sedykh I.A., Stegantsev N.V. "Modeling of cement production based on queuing systems using GPSS", *The Bulletin of the Lipetsk State Technical University (Vestnik Lipetskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, no. 3 (29), 2016, pp. 28-33.
8. Sedykh I.A., Anikeev E.S. "Application of colored temporary Petri nets for modeling cement production", *The Bulletin of the Don State Technical University (Vestnik Donskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2016, no. 4 (87), pp. 140-145.
9. Lomazova I.A. "Nested Petri nets: modeling and analysis of systems with a distributed structure" ("Vlozhennyye seti Petri: modelirovaniye i analiz sistem s raspredelennoy strukturoy"), Moscow, Nauchnyy mir, 2004, 208 p.

Submitted 19.04.2024; revised 03.09.2024

### Information about the authors

**Andrey M. Korneev** – Cand. Sc. (Technical), Professor, Department of Theoretical Mechanics, Lipetsk State Technical University (30 Moskovskaya street, Lipetsk 398055, Russia), e-mail: weenrok@mail.ru, ORCID: 0000-0003-3829-9709

**Tamara V. Lavrukhina** - Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Department of Automated Control Systems, Lipetsk State Technical University (30 Moskovskaya street, Lipetsk 398055, Russia), e-mail: lavrukhina\_tv@mail.ru, ORCID: 0000-0003-0677-4501

**Tatyana A. Smetannikova** - Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Department of Design and Artistic Processing of Materials, Lipetsk State Technical University (30 Moskovskaya street, Lipetsk 398055, Russia), e-mail: korneeva@mail.ru, ORCID: 0000-0002-0821-8034

**Lev K. Erokhin** – Postgraduate Student, the Department of General Mechanics, Lipetsk State Technical University (30 Moskovskaya street, Lipetsk 398055, Russia), e-mail: erokhin.lk@gmail.com

## ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ ИДЕНТИФИКАЦИЯ ТЕМПЕРАТУРНО-ИНВАРИАНТНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВЯЗКОСТИ НЕНЬЮТОНОВСКИХ СРЕД

А.А. Хвостов<sup>1</sup>, А.А. Журавлев<sup>2</sup>, А.В. Ряжских<sup>1</sup>, А.В. Бараков<sup>1</sup>

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

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

**Аннотация:** рассматриваются вопросы обработки и обобщения результатов сдвиговой вискозиметрии неньютоновских сред, полученных при различных температурах. Приведено обоснование важности учета влияния скорости сдвига и температуры на вязкость жидкообразных сред при реализации гидромеханических, тепло- и массообменных процессов. Исследовалась модельная жидкообразная биопищевая среда. Первичные результаты натурного реологического эксперимента в виде изотермических зависимостей вязкости от скорости сдвига позволили выявить аномалию вязкости при сдвиговом течении и установить влияние скорости сдвига и температуры на изменение вязкости жидкообразной биопищевой среды при ее сдвиговой деформации. Для аппроксимации экспериментальных данных использовано четырех-параметрическое уравнение Карро, учитывающее наличие предельных ньютоновских вязкостей. Параметрическая идентификация реологической модели Карро проведена с использованием алгоритма регуляризации А.Н. Тихонова на основе численной модели течения нелинейно-вязкой жидкообразной среды в измерительной системе вискозиметра. Показано, что с применением принципа температурно-временной аналогии (в котором роль временного фактора играет скорость сдвига) имеется возможность обобщения экспериментальных данных в единую температурно-инвариантную характеристику вязкости. Температурно-инвариантное представление скоростной зависимости вязкости жидкообразной биопищевой среды достигается за счет введения в уравнение Карро фактора приведения, который является функцией температуры. Отмечены достоинства и практическая значимость аналитического описания вязкостных свойств в форме, не зависящей от температуры

**Ключевые слова:** вязкость, неньютоновская жидкость, модель Карро, аномалия вязкости, температурно-временная аналогия, идентификация

### Введение

Важнейшим реологическим показателем жидкообразных сред является вязкость, величина которой косвенно характеризует качество конечного продукта, определяет кинетику и динамику гидромеханических, тепло- и массообменных процессов. Значительная часть вязкого сырья и готовой продукции (растворы полимеров, биологические жидкости, жидкообразные биопищевые среды и пр.) являются неньютоновскими средами, вязкость которых существенно зависит от величины скорости (напряжения) сдвига. Помимо условий деформации, существенное влияние на вязкость оказывает температура, которая определяется условиями проведения многих тепловых процессов (нагревание, охлаждение, пастеризация и пр.), а также диссипативными явлениями, которыми, в ряде случаев, сопровождается сдвиговое течение [1-5].

Основным методом выражения вязкостных свойств аномальновязких сред в широком

интервале температур и скоростей сдвига является реологическая кривая, получаемая по результатам сдвиговой вискозиметрии. При этом измерения необходимо проводить в широком интервале изменения скорости сдвига, охватывающем несколько порядков, включая предельные случаи. Однако существующие методы ротационной и капиллярной вискозиметрии в силу известных ограничений и недостатков, характерных для каждого метода, этого не позволяют [1, 3-6].

В этой связи практический интерес представляет построение вязкостной характеристики (инвариантной относительно температуры) для того, чтобы одним реологическим измерением при определенной температуре можно было получить сведения о вязкости в широком интервале температур и скоростей сдвига.

### Экспериментальная часть

Объектом исследования явилась модельная неньютоновская жидкообразная биопищевая среда. Рецепттура, способ ее приготовления и методика проведения реологического эксперимента приведены в [7].



Результаты вискозиметрии жидкообразной биопищевой среды в виде изотермических зависимостей вязкости  $\mu$  от скорости сдвига  $\dot{\gamma}$  представлены на рис. 1 [7]. Экспериментальные данные демонстрируют аномалию вязкости, проявляющуюся в нелинейном снижении вязкости при увеличении скорости сдвига (рис. 1, а). Увеличение температуры вызывает снижение вязкости во всем интервале изменения скорости сдвига. В двойных логарифмических координатах (рис. 1, б) реологические кривые  $\mu(\dot{\gamma})$ , полученные при разных температурах, подобны, имеют постоянный угол наклона, что указывает на отсутствие влияния температуры на характер нелинейности реологической кривой.

Более полное объяснение механизма аномально-вязкого поведения жидкообразных биопищевых сред при сдвиговом течении в рамках структурной теории аномалии вязкости П.А. Ребиндера представлено в работах [2, 7].

Результаты реологического эксперимента (рис. 1, а, б) указывают на существенную зависимость динамической вязкости от скорости сдвига в отличие от аналогичной зависимости от температуры. Так, в температурном диапазоне от 323 до 343 К изменение скорости сдвига на 10 единиц шкалы вызывает снижение вязкости в среднем на 100 Па·с. В свою очередь, при постоянной скорости сдвига, температурные эффекты проявляются в меньшей степени (увеличение температуры на 10 К приводит к уменьшению вязкости в среднем на 20 Па·с).

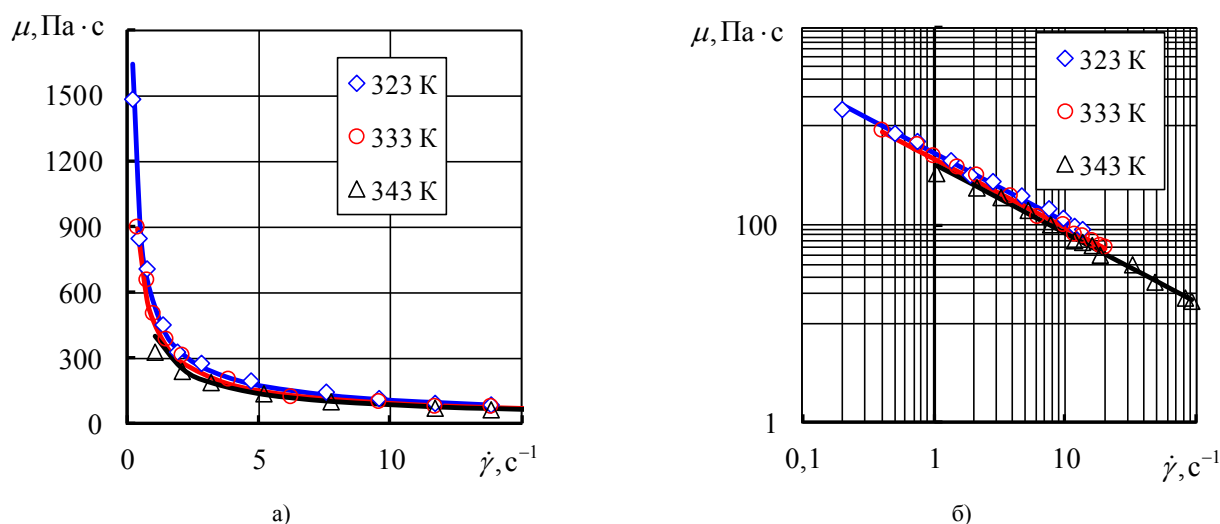


Рис. 1. Зависимость вязкости от скорости сдвига в линейных (а) и логарифмических (б) координатах

### Методика

Экспериментальные данные были аппроксимированы четырех-параметрическим уравнением Карро [7-9], учитывающим наличие предельных ньютоновских вязкостей  $\lim_{\dot{\gamma} \rightarrow 0} \mu(\dot{\gamma}) = \mu_0$

и  $\lim_{\dot{\gamma} \rightarrow \infty} \mu(\dot{\gamma}) = \mu_\infty$

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

где  $\mu_0$ ,  $\mu_\infty$  — соответственно наибольшая и наименьшая ньютоновская вязкость, Па·с;

$\dot{\gamma}$  — скорость сдвига,  $\text{с}^{-1}$ ;

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

$\lambda$  — время релаксации, с.

Параметрическая идентификация реологической модели Карро проведена с использованием алгоритма регуляризации А.Н. Тихонова [10, 11] на основе численной модели течения нелинейно-вязкой жидкообразной среды в измерительной системе вискозиметра. Алгоритм идентификации представлен в источнике [7], там же приведены физическая интерпретация реологических коэффициентов модели (1) и их численные значения (табл. 1).

Таблица 1

Параметры реологической модели Карро (1)

T, K	$\mu_0$ , Па·с	$\mu_\infty$ , Па·с	$\lambda$ , с	$m$
323	24000	1,08	238,9	0,301
328	19300	1,05	192,2	0,301
333	16000	1,04	155,6	0,301
338	13100	1,0	126,7	0,301
343	11000	0,99	103,8	0,301

Анализ экспериментальных данных (рис. 1, б) показал, что опытные точки удовлетворительно располагаются вдоль осредняющей линии для всех температур, имевших место при проведении эксперимента, что указывает на возможность применения к кривым вязкости принципа температурно-временной аналогии (ТВА), в котором роль временного фактора играет скорость сдвига [5, 6, 12, 13].

Практическое использование метода ТВА основано на совмещении в логарифмических координатах изотермических зависимостей  $\mu(\dot{\gamma})$ , полученных при различных температурах, путем их параллельного сдвига (приведения) вдоль оси  $\lg \dot{\gamma}$  на величину  $a_T$  до слияния в единую обобщенную зависимость, которая отвечает некоторой произвольно выбранной температуре приведения  $T^*$ . Это означает, что действие температуры на вязкость эквивалентно умножению (делению) шкалы скорости сдвига на коэффициент  $a_T$ , который является функцией температуры.

Развивая теорию ТВА, Ферри показал, что фактор приведения по температуре  $a_T$  представляет собой отношение значений времен релаксации при температуре  $T$  к некоторой температуре приведения  $T^*$  [5, 6]

$$a_T = \frac{\lambda}{\lambda^*} = \frac{\mu_0 \rho^* T^*}{\mu_0^* \rho T}, \quad (2)$$

где  $\lambda$ ,  $\mu_0$ ,  $\rho$  — соответственно, время релаксации, наибольшая ньютоновская вязкость и плотность при температуре  $T$ ;

$\lambda^*$ ,  $\mu_0^*$ ,  $\rho^*$  — эти же величины при температуре приведения  $T^*$ .

Плотность модельной жидкообразной биопищевой среды линейно зависит от температуры [14]

$$\rho = 1969,9 - 1,952T. \quad (3)$$

Расчеты показали, что что величина плотностной поправки  $\frac{\rho^* T^*}{\rho T}$  при любом выборе температуры приведения  $T^*$  незначительно отличается от единицы. Так, отклонения температуры  $\pm 10$  К от температуры приведения  $T^* = 333$  К приводят к изменению величины  $\frac{\rho^* T^*}{\rho T}$  на  $\pm 0,015$  (что составляет 1,5 %), ввиду чего в соотношении (2) множителем  $\frac{\rho^* T^*}{\rho T}$  можно пренебречь.

Тогда фактор приведения по температуре можно представить в виде

$$a_T = \frac{\mu_0}{\mu_0^*} = \frac{\lambda}{\lambda^*}. \quad (4)$$

Как видно из (4), полная аналогия форм температурной зависимости наибольшей вязкости и времени релаксации (выраженных через фактор приведения  $a_T$ ), отражает тот фундаментальный факт, что вязкое течение представляет собой следствие совокупности релаксационных процессов, происходящих в среде, и варьирование их скорости в зависимости от температуры эквивалентным образом отражается на изменении вязкости [5, 6].

Полагая зависимость наибольшей ньютоновской вязкости от температуры в виде уравнения Аррениуса-Френкеля-Эйринга [6, 13], температурную зависимость фактора приведения  $a_T = \frac{\mu_0}{\mu_0^*}$  можно представить в виде функции, инвариантной по отношению к выбору температуры приведения  $T^*$  (рис. 2):

$$a_T = \exp \left[ \frac{E}{R} \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T^*} \right) \right], \quad (5)$$

где  $R$  — универсальная газовая постоянная;

$E$  — энергия активации вязкого течения, кДж/кмоль, определяется как тангенс угла наклона прямой в полулогарифмических координатах  $\lg a_T - \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T^*} \right)$ ,  $E = 38350$  кДж/кмоль.

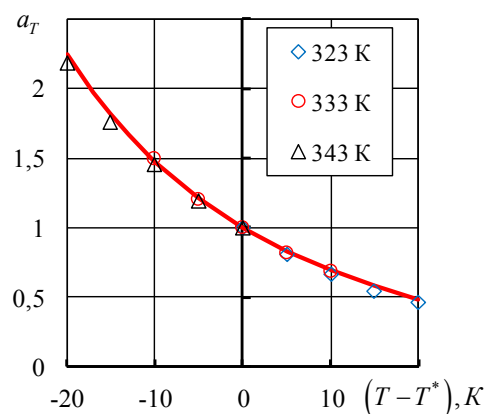


Рис. 2. Зависимость фактора приведения  $a_T$  от разности температур  $(T - T^*)$

Анализ результатов параметрической идентификации (табл. 1) показал, что отноше-

ние  $\frac{\mu_\infty}{\mu_0} \ll 1$ , что позволяет пренебречь значением наименьшей ньютоновской вязкости  $\mu_\infty$  в уравнении Карро. Тогда, с учетом (4), реологическое уравнение Карро (1) примет вид

$$\mu(\dot{\gamma}) = a_T \mu_0^* \left[ 1 + (a_T \lambda^* \dot{\gamma})^2 \right]^{\frac{m-1}{2}}, \quad (6)$$

где наибольшая ньютоновская вязкость  $\mu_0^* = 16000$  Па·с и время релаксации  $\lambda^* = 155,6$  с приняты при температуре приведения  $T^* = 333$  К, показатель кривизны реологической кривой  $m = 0,301$  (табл. 1).

На рис. 3 представлена суперпозиция экспериментальных данных в приведенных координатах  $\lg\left(\frac{\mu}{a_T}\right) - \lg(a_T \dot{\gamma})$ , температура приведения  $T^* = 333$  К. Экспериментальные данные при всех изучаемых температурах (рис. 3), удовлетворительно располагаются вдоль усредненной линии, полученной при температуре приведения, что указывает на температурную инвариантность скоростной зависимости вязкости жидкообразной биопищевой среды в приведенных координатах. Максимальная относительная ошибка предсказания динамической вязкости по уравнению Карро (6) составляет 14,07 %.

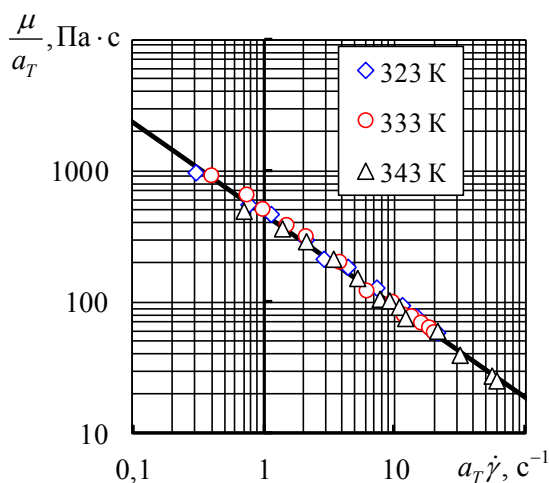


Рис. 3. Температурно-инвариантная характеристика вязкости модельной биопищевой среды

Расчеты показали, что изменение температуры приведения приводит к смещению обоб-

щенной зависимости  $\frac{\mu}{a_T} = f(a_T \dot{\gamma})$  вдоль оси  $\lg(a_T \dot{\gamma})$ , при этом вид функции  $a_T = f(T - T^*)$  не меняется, смещается лишь начало отсчета. Таким образом, формы обеих функций инвариантны по отношению к выбору температуры приведения, а функции  $\frac{\mu}{a_T} = f(a_T \dot{\gamma})$  и  $a_T = f(T - T^*)$  являются представительными характеристиками вязких свойств, передающими все особенности поведения функции двух аргументов  $\mu(\dot{\gamma}, T)$ .

### Заключение

Описание вязкостных свойств в форме, не зависящей от температуры, имеет важное практическое значение, так как не требует знания множества расчетных и графических зависимостей для каждой температуры, что существенно облегчает расчет вязкости среды в более широком диапазоне скоростей сдвига, чем позволяют инструментальные методы (включая их предельные значения).

Располагая температурной зависимостью фактора приведения и значениями реологических параметров (наибольшая ньютоновская вязкость и время релаксации) при температуре приведения, реологическое уравнение Карро позволяет расчетным способом определить динамическую вязкость при любом промежуточном значении скорости сдвига и температуры, что избавляет от необходимости ее опытного определения.

Рассмотренный метод обобщения экспериментальных данных позволяет единообразно оценивать состояние неньютоновских сред при установившихся режимах течения и может быть использован как инструмент проверки согласования между собой экспериментальных данных, полученных различными методами сдвиговой вискозиметрии.

### Литература

1. Инженерная реология. Физико-механические свойства и методы обработки пищевого сырья: учеб. пособие / Ю.М. Березовский, С.А. Бредихин, В.Н. Андреев, А.Н. Мартеха; под ред. В. Н. Андреева. СПб.: Лань. 2021. 192 с.
2. Муратова Е.И., Смолихина П.М. Реология кондитерских масс : монография. Тамбов : ТГТУ. 2013. 187 с.

3. Toledo R.T. Fundamentals of Food Process Engineering / R.T. Toledo, R.K. Singh, F. Kong. Springer International Publishing. 2018. 458 p.
4. Heldman D. Handbook of Food Engineering / D. Heldman, D. Lund, C. Sabliov. Taylor & Francis Group. 2019. 1231 p.
5. Hasan W., Khan M.N. Rheological characterization of vegetable oil blends: Effect of shear rate, temperature, and short - term heating // Journal of Food Process Engineering. 2020. Vol. 43, e13396.
6. Малкин А.Я., Исаев А.И. Реология: концепции, методы, приложения. СПб: Профессия. 2007. 560 с.
7. Параметрическая идентификация реологической модели Карро с использованием регуляризации А.Н. Тихонова на основе CFD-модели / А.А. Хвостов, Г.О. Магомедов, В.И. Рязских, А.В. Ковалев, А.А. Журавлев, М.Г. Магомедов // Техника и технология пищевых производств. 2021. Т. 51. № 3. С. 615-627.
8. Matveenko, V.N., Kirsanov E.A. Structural Rationale of a Non-Newtonian Flow // Moscow University Chemistry Bulletin. 2017. Vol. 72. № 2. pp. 69-91.
9. Sochi T. Analytical solutions for the flow of Carreau and Cross fluids in circular pipes and thin slits // Rheologica Acta. 2015. Vol. 54. № 8. pp. 745-746.
10. Kirsch A. An Introduction to the Mathematical Theory of Inverse Problems. Springer Nature Switzerland. 2021. 412 p.
11. Duda P. Solution of inverse heat conduction problem using the Tikhonov regularization method // Journal of Thermal Science. 2017. Vol. 26. pp. 60-65.
12. Вязкоупругие свойства геосинтетических материалов / Н.Н. Алексеев, И.А. Коваленко, О.Н. Столяров, Б.Е. Мельников // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2017. № 5 (56). С. 17-32.
13. Pigeonneau F., Xu D., Vincent M., Agassant, jean-francois. Heating and flow computations of an amorphous polymer in the liquefier of a material extrusion 3D printer. Additive Manufacturing, 2019, pp. 101001.
14. Термогидродинамический анализ работы валковой формующей машины кондитерского производства на основе CFD-подхода / А.А. Хвостов, О.Р. Дорняк, А.А. Журавлев, Е.А. Татаренков, О.А. Ткачев // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2021. № 3 (347). С. 117-130.

Поступила 22.05.2024; принята 03.09.2024

#### 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: <https://orcid.org/0000-0002-3836-9407>

**Журавлев Алексей Александрович** – канд. техн. наук, доцент кафедры математики, Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия им. профессора Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина» (394064, Россия, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54 а), e-mail: zhuraal@rambler.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2194-767X>

**Рязских Александр Викторович** – 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: ryazshkihav@bk.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9823-3165>

**Барakov Александр Валентинович** – д-р техн. наук, профессор кафедры теоретической и промышленной теплоэнергетики, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: abarakov@cchgeu.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8351-2778>

## PARAMETRIC IDENTIFICATION OF TEMPERATURE-INVARIANT VISCOSITY CHARACTERISTICS OF NON-NEWTONIAN MEDIA

A.A. Khvostov<sup>1</sup>, A.A. Zhuravlev<sup>2</sup>, A.V. Ryazhskikh<sup>1</sup>, A.V. Barakov<sup>1</sup>

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

<sup>2</sup>Military Educational and Scientific Center of the Air Force “N.E. Zhukovsky and Yu.A. Gagarin Air Force Academy”, Voronezh, Russia

**Annotation:** The paper considers the issues of processing and generalization of the results of shear viscometry of non-Newtonian media obtained at different temperatures. The substantiation of the importance of taking into account the influence of shear rate and temperature on the viscosity of liquid-like media in the implementation of hydromechanical, heat and mass transfer processes is given. The object of the study was a model liquid-like biofood medium. The primary results of a full-scale rheological experiment in the form of isothermal dependences of viscosity on the shear rate made it possible to identify an anomaly of viscosity during shear flow and to establish the influence of shear rate and temperature on the change in viscosity of a liquid-like biofood medium during its shear deformation. To approximate the experimental data, the four-parametric Carreau equation was used, taking into account the presence of limiting Newtonian viscosities. Parametric identification of the rheological Carreau model was carried out using the regularization algorithm of A.N. Tikhonov based on a numerical model of the flow of a nonlinear viscous liquid-like medium in the measuring system of a viscometer. It is shown that using the principle of temperature-time analogy (in which the shear rate plays the role of the time factor), it is possible to generalize experimental data into a single temperature-invariant viscosity characteristic. A temperature-invariant representation of the velocity dependence of the viscosity of a liquid biofood medium is achieved by introducing a reduction factor into the Carreau equation, which

is a function of temperature. The advantages and practical significance of the analytical description of viscous properties in a form independent of temperature are noted.

**Keywords:** viscosity, non-Newtonian fluid, model Carreau, viscosity anomaly, temperature-time analogy, identification.

#### References

1. Berezovsky Yu.M., Bredikhin S.A., Andreev V.N., Martekha A.N. "Engineering rheology. Physical and mechanical properties and methods of processing food raw materials: textbook" ("Inzhenernaya reologiya. Fiziko-mekhanicheskiye svoystva i metody obrabotki pishchevogo syr'ya: ucheb. Posobiye"), ed. by V.N. Andreev, St. Petersburg, Lan, 2021, 192 p.
2. Muratova E.I., Smolikhina P.M. "Rheology of confectionery masses: monograph" ("Reologiya konditerskikh mass: monografiya"), Tambov, TGTU, 2013, 187 p.
3. Toledo R.T., Singh R.K., Kong F. "Fundamentals of Food Process Engineering", Springer International Publishing, 2018, 458 p.
4. Heldman D., Lund D., Heldman D., Sabliov C. "Handbook of Food Engineering", Taylor & Francis Group, 2019, 1231 p.
5. Hasan W., Khan M.N., "Rheological characterization of vegetable oil blends: Effect of shear rate, temperature, and short-term heating", *Journal of Food Process Engineering*, 2020, vol. 43, e13396.
6. Malkin A.Ya., Isaev A.I. "Rheology: concepts, methods, applications" ("Reologiya: kontseptsii, metody, prilozheniya"), St. Petersburg, Professiya, 2007, 560 p.
7. Khvostov A.A., Magomedov G.O., Ryazhskikh V.I., Kovalev A.V., Zhuravlev A.A., Magomedov M.G. "Parametric identification of the Carreau rheological model using A.N. Tikhonov's regularization based on the CFD model", *Equipment and technology of food production (Tekhnika i tekhnologiya pishchevykh proizvodstv)*, 2021, vol. 51, no. 3, pp. 615-627.
8. Matveenko V.N., Kirsanov E.A. "Structural Rationale of a Non-Newtonian Flow", *Moscow University Chemistry Bulletin*, 2017, vol. 72, no. 2, pp. 69-91.
9. Sochi T. "Analytical solutions for the flow of Carreau and Cross fluids in circular pipes and thin slits", *Rheologica Acta*, 2015, vol. 54, no. 8, pp. 745-746.
10. Kirsch A. "An Introduction to the Mathematical Theory of Inverse Problems", Springer Nature Switzerland, 2021, 412 p.
11. Duda P. "Solution of inverse heat conduction problem using the Tikhonov regularization method", *Journal of Thermal Science*, 2017, vol. 26, pp. 60-65.
12. Alekseev N.N., Kovalenko I.A., Stolyarov O.N., Melnikov B.E. "Viscoelastic properties of geosynthetic materials", *Construction of unique buildings and structures (Stroitel'stvo unikal'nykh zdaniy i sooruzheniy)*, 2017, no. 5 (56), pp. 17-32.
13. Pigeonneau F., Xu D., Vincent M., "Agassant, jean-francois. Heating and flow computations of an amorphous polymer in the liquefier of a material extrusion 3D printer", *Additive Manufacturing*, 2019, pp. 101001.
14. Khvostov A.A., Dorniyak O.R., Zhuravlev A.A., Tatarenkov E.A., Tkachev O.A. "Thermohydrodynamic analysis of the operation of a roller forming machine for confectionery production based on the CFD approach", *Fundamental and Applied Problems of Engineering and Technology*, 2021, no. 3 (347), pp. 117-130.

Submitted 22.05.2024; revised 03.09.2024

#### Information about the authors

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

**Alexey A. Zhuravlev** – Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, 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: <https://orcid.org/0000-0002-2194-767X>.

**Alexander V. Ryazhskikh** – Cand. Sc. (Physical and Mathematical), Associate Professor, Department of Applied Mathematics and Mechanics, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: ryazhskihav@bk.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9823-3165>

**Alexander V. Barakov** – Dr. Sc. (Technical), Professor, Department of Theoretical and Industrial Thermal Power Engineering, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: abarakov@cchgeu.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8351-2778>



## КЛИЕНТ-СЕРВЕРНАЯ АРХИТЕКТУРА СИСТЕМЫ «УМНЫЙ ДОМ»

Г.В. Петрухнова, А.А. Чёлник

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

**Аннотация:** разработка программного обеспечения и использование микроконтроллеров для умного дома – это актуальная тенденция в области современных технологий. Рассматривается инновационный подход к взаимодействию различных устройств системы «Умный дом», основанный на клиент-серверной архитектуре. Данный подход обеспечивает интеграцию умного дома в единую систему, позволяя устройствам согласованно взаимодействовать и функционировать. Ключевыми отличительными особенностями этого подхода являются гибкость и адаптивность программного обеспечения, позволяющего настраивать систему под различные режимы, условия и потребительские потребности. Проведен сравнительный анализ возможностей разработанной системы и возможностей умного дома с Алисой и системы i-Tone. В качестве ядра аппаратного обеспечения разрабатываемой системы использовался микроконтроллер Espressif ESP-32, имеющий обширный набор интерфейсов для подключения к широкому спектру внешних периферийных устройств и низкое энергопотребление. Архитектура системы включает в себя WEB-сервер на базе микрокомпьютера Orange PI Zero 3, роутер и несколько устройств на базе ESP-32. Данная система имеет типичную клиент-серверную архитектуру, где клиент (смартфон, компьютер) общается с веб-сервером, а сервер, в свою очередь, взаимодействует с устройствами. В качестве протокола для передачи данных от устройств к серверу был выбран протокол Message Queueing Telemetry Transport (MQTT). Для управления сервисами в разработанной системе используется контейнеризация с помощью Docker и оркестрация контейнеров с помощью Docker Compose. В качестве брокера сообщений MQTT выбран Eclipse Mosquitto. Для обработки полученных данных был создан сервис на Java Spring Boot, который подписывается на все устройства умного дома, полученные сообщения сервер обрабатывает и сохраняет в базу данных. Для удобства пользователя добавлена визуализация полученных данных. Веб-интерфейс разработан с использованием библиотеки React

**Ключевые слова:** умный дом, клиент-серверная архитектура, обмен данными, протокол MQTT, микроконтроллер ESP-32, микрокомпьютера Orange PI Zero 3

### Введение

Системы умного дома начали широко распространяться последние 10–15 лет. В настоящее время в связи с быстрым развитием технологий домашняя автоматизация становится все более и более популярной. При этом пользователям предлагаются уникальные возможности автоматизации и управления различными аспектами повседневной жизни. Самыми распространенными являются контроль температуры и влажности, управление бытовой техникой, включение/отключение электричества и некоторые другие. Помимо выполнения заложенных в «Умный дом» возможностей системы могут обучаться и выполнять различные сценарии. Можно составлять список дел на день и поручать их выполнение своему электронному помощнику.

Системы «Умный дом» в зависимости от пожеланий пользователя могут иметь различную комплектацию аппаратных средств. Комплектация системы определяет функциональные возможности системы, а также стоимость.

Помимо аппаратной части основой для эффективной работы системы умного дома являются программные средства, позволяющие управлять устройствами, интегрированными в эту систему. Разработка программных средств для управления устройствами в рамках системы умного дома представляет одно из важных направлений в области информационных технологий. Отечественными аналогами представляемой системы являются умный дом «Яндекс. Алиса» и умный дом компании i-Tone. Умный дом с Алисой ориентирован на голосовое управление устройствами. i-Tone представляет проводное и беспроводное комплексное решение, где управление может осуществляться с помощью различных выключателей, пультов управления, телефонов. Каждая из этих систем представляет собой для пользователя средство автоматизации бытового оборудования и не допускает возможности подключения собственных разработанных пользователем устройств и систем.

Целью данной статьи является анализ современных подходов к разработке программных средств, способных обеспечить взаимодействие и управление разнообразными устройствами в системах умного дома и

представление архитектуры системы умного дома, допускающей подключение устройств пользователя. В этом контексте в статье рассматриваются принципы организации обмена сообщениями, использование технологий HTTP (HyperText Transfer Protocol) и MQTT для взаимодействия между устройствами, а также применение библиотек и фреймворков для разработки и управления устройствами в системе умного дома.

Стоит отметить, что предлагаемый в статье подход обеспечивает интеграцию умного дома в единую систему, позволяя устройствам, как базовым, так и разработанным пользователем, согласованно взаимодействовать и функционировать. Ключевыми отличительными особенностями этого подхода являются гибкость и адаптивность программного обеспечения, позволяющего настраивать систему под различные режимы, условия и потребительские потребности.

### Постановка задачи

Управление устройствами в системе «Умный дом», помимо аппаратной части, сводится к разработке программных средств для микроконтроллеров и сервисов для обработки данных (сервера) [1]. Основной задачей, рассматриваемой в статье, является представление клиент-серверной архитектуры системы «Умный дом», допускающей подключение, помимо базового оборудования, подсистем, разработанных пользователем.

Для создания такой системы необходимо:

- осуществить выбор аппаратной части системы;
- разработать алгоритмы и программное обеспечение для микроконтроллеров, обеспечивающих эффективное управление и взаимодействие с устройствами системы «Умный дом»;
- разработать программные средства, которые способны интегрировать различные типы устройств и обеспечить их эффективную совместную работу в рамках единой системы умного дома;
- разработать серверные программные сервисы для осуществления мониторинга и удаленного управления устройствами системы умного дома;
- разработать алгоритмы обработки данных, полученных от устройств, с целью анализа и принятия решений.

Выбор базового аппаратного и программного обеспечения, а также разработанные программные и аппаратные средства для реализации системы и будут представлены в статье.

### Базовое программное и аппаратное обеспечение

В процессе создания системы была осуществлена разработка программных средств для управления разнообразными устройствами в системе «Умный дом». Реализованные решения позволили создать алгоритмы управления устройствами, обеспечивающие их взаимодействие и функционирование в различных сценариях, включая взаимосвязь и обмен данными между устройствами внутри системы.

В качестве ядра аппаратного обеспечения использовался микроконтроллер Espressif ESP-32, имеющий обширный набор интерфейсов для подключения к широкому спектру внешних периферийных устройств и низкое энергопотребление. ESP-32 обеспечивает удобство программирования и высокую производительность благодаря двухъядерному процессору и поддержке беспроводных технологий Wi-Fi и Bluetooth.

Для разработки программного обеспечения использовались следующие продукты:

- Clion — кроссплатформенная IDE для разработки на C и C++;
- ESP-IDF — официальная платформа программного обеспечения для Интернета вещей от Espressif [2];
- языки программирования C, C++, Java;
- фреймворк Spring Boot, позволяющий легко создавать веб-сервисы, обеспечивая удобное управление и интеграцию с устройствами умного дома;
- протокол Eclipse Mosquitto, реализующий модель издатель-подписчик для передачи сообщений поверх протокола TCP/IP;
- JavaScript-библиотека React для разработки пользовательских интерфейсов.

### Схема взаимодействия основных узлов системы

Архитектура системы включает в себя WEB-сервер на базе микрокомпьютера Orange PI Zero 3, роутер и несколько устройств на базе ESP-32.

Данная система имеет типичную клиент-серверную архитектуру, где клиент (смартфон, компьютер) общается с веб-сервером, а сервер,

в свою очередь, взаимодействует с устройствами ESP32 для обмена данными. Схема взаимодействия представлена на рис. 1.

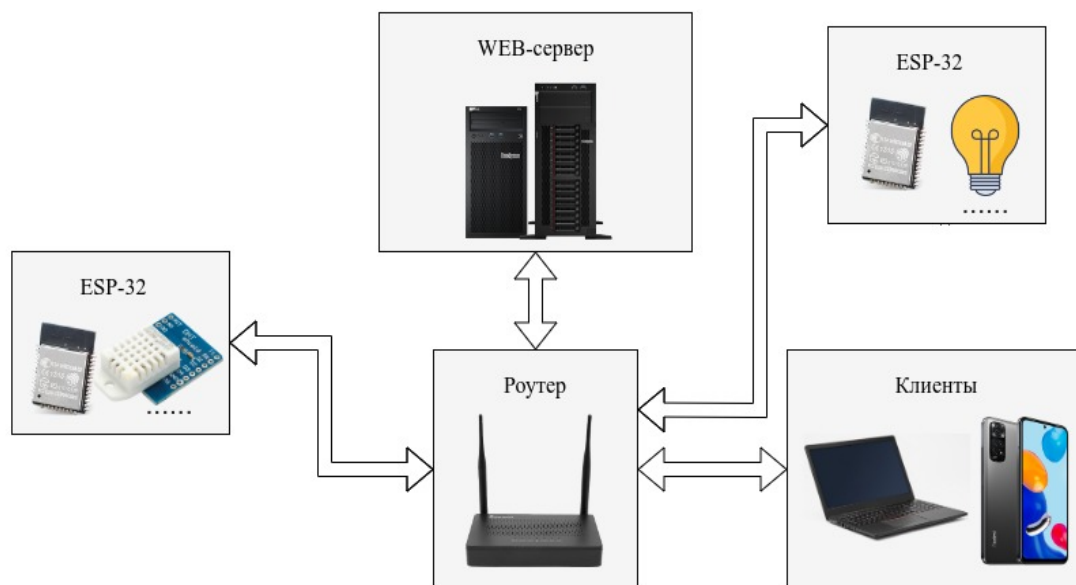


Рис. 1. Схема взаимодействия

Для функционирования устройства, разработанного пользователем, необходимо к системе подключить микроконтроллер ESP32 с подключенным к нему датчиком и с прошитой в микроконтроллер программой управления соответствующим устройством, а также «сообщить» микроконтроллеру идентификатор беспроводной сети и пароль от роутера.

### Программные средств для функционирования микроконтроллера Espressif ESP32

Для подключения устройства к WIFI сети необходимо «сообщить» ему идентификатор для беспроводной сети (SSID) и пароль. Для этого создана точка беспроводного доступа (AP) на устройстве. Данная технология позволяет пользователю со смартфона или с компьютера подключаться к системе и открывать веб-страницу в браузере (рис. 2).

Пользователь вводит идентификатор SSID, а также пароль от роутера, и устройство оказывается подключенным к сети (рис. 2).



Рис. 2. Web-страница на ESP-32

В качестве протокола для передачи данных от устройств к серверу был выбран протокол Message Queueing Telemetry Transport (MQTT). Данный протокол реализует обмен сообщениями по модели publisher-subscriber (издатель-подписчик) в реальном времени. Так как протокол легковесный, то его часто применяют для устройств с ограниченными ресурсами (в частности, для IoT – Интернета вещей). Остальное программное обеспечение зависит от подключенных датчиков к микроконтроллеру.

Таким образом, интеграция технологий точки доступа и MQTT в систему умного дома предоставляет пользователю возможность не только управлять устройствами удаленно, но и повышать уровень контроля и мониторинга различных аспектов жилищной среды.

### Реализация серверного и клиентского приложения

На данном этапе разрабатывалось программное обеспечение для реализации взаимодействия внешних периферийных устройств, обеспечивающее их совместную работу в рамках единой системы.

Основной акцент был сделан на применение передовых технологий контейнеризации с использованием Docker и оркестрации контейнеров с помощью Docker Compose [3]. Эти инструменты не только обеспечивают высокую эффективность управления распределенными сервисами, но и гарантируют быстрое развертывание и масштабирование приложений, поддерживая при этом высокий уровень безопасности и надежности системы благодаря изоляции сервисов.

Для обеспечения надежной передачи данных от устройств к серверу выбран протокол MQTT, с использованием брокера сообщений Eclipse Mosquitto [4]. Этот подход позволяет эффективно фильтровать и передавать входящие сообщения, что особенно актуально для IoT-устройств и умных домов, также этот протокол позволяет подключать любые устройства, поддерживающие взаимодействие по сети. Для обработки полученных данных был создан сервис на Java Spring Boot, который подписывается на все устройства умного дома, полученные сообщения сервер обрабатывает и сохраняет в базу данных [5].

Для повышения удобства использования системы пользователем внедрена современная визуализация данных с использованием библиотеки React (веб-интерфейс представлен на рис. 3).

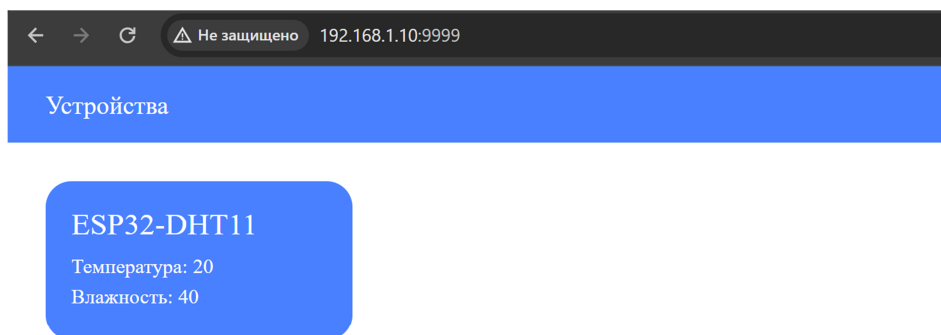


Рис. 3. Веб-интерфейс

### Обзор и сравнение с аналогами

Проанализируем и сравним возможности разработанной системы с возможностями умного дома с Алисой и возможностями системы i-Tone.

Разработанная система умного дома предоставляет возможности удаленного управления, мониторинга и анализа данных, в то время как умный дом с Алисой ориентирован на голосовое управление различными «умными» устройствами. i-Tone представляет проводное и беспроводное комплексное решение.

В плане поддерживаемых внешних периферийных устройств разработанная система предлагает ряд преимуществ по сравнению с аналогами, такими как умный дом с Алисой и система i-Tone. В отличие от умного дома с Алисой, ориентированного на голосовое управление устройствами, и системы i-Tone, разработанная система обеспечивает возмож-

ность подключения собственных разработанных устройств на базе любого микроконтроллера с поддержкой взаимодействия по сети и протоколу MQTT. Это расширяет функциональные возможности системы, делая её более гибкой и адаптивной к различным потребностям пользователей.

Интеграция с голосовыми ассистентами в разработанной системе не реализована, в то время как умный дом с Алисой предоставляет такую возможность. i-Tone также не обеспечивает интеграцию с голосовыми ассистентами.

В плане поддерживаемых технологий разработанная система использует TCP, MQTT и WIFI. Обеспечение надежной передачи данных от устройств к серверу обеспечивает протокол MQTT, с использованием брокера сообщений Eclipse Mosquitto [4]. Эти программные средства обеспечивают возможность подключения устройств пользователя. Аппаратно такая возможность поддерживается на осно-

ве микроконтроллера Espressif ESP32, имеющего обширный набор интерфейсов для подключения широкого спектра внешних периферийных устройств и низкое энергопотребление, а также поддерживающего беспроводные технологии Wi-Fi и Bluetooth.

Умный дом с Алисой поддерживает протоколы TCP (Transmission Control Protocol), Zigbee и Bluetooth. i-Tone поддерживает протоколы RF (Radio Frequency), WIFI, IR (InfraRed) и TCP.

С позиций простоты установки и настройки все три системы сопоставимы. Разработанная система предоставляет достаточно простую процедуру установки и настройки, что также справедливо отметить и для умного дома с Алисой. i-Tone также обладает относительной простотой установки и настройки.

Стоимость разработанной системы умного дома зависит от комплектации и функциональности, и может быть различной, начиная от нескольких тысяч рублей и выше. По сравнению с представленной системой умный дом с Алисой имеет ценовой диапазон от нескольких тысяч до десятков тысяч рублей, в то время как i-Tone имеет цену от нескольких десятков тысяч рублей и выше.

### Сфера использования системы

Разработанная система представляет комплексное решение для управления устройствами умного дома. Система обеспечивает эффективное взаимодействие и согласованность между компонентами. Функционал системы дает возможность дистанционного контроля и мониторинга устройств умного дома через веб-интерфейс, а также обеспечивает эффективный обмен данными между устройствами.

Архитектура разработанной системы обеспечивает гибкость и масштабируемость разработанной системы. Это значит, что новые или уже существующие устройства могут быть легко интегрированы в систему умного дома, используя разработанные программные и аппаратные компоненты. Такая архитектура позволяет расширять функциональные возможности системы, добавлять новые устройства и интегрировать их в единую управляемую среду без необходимости пересмотра основной архитектуры, что способствует созданию гибкой и адаптивной инфраструктуры для умного дома.

Развитие данной системы предполагает создание сценариев автоматизации, основанной на анализе данных, полученных от датчиков, – примером может служить автоматическое управление освещением в зависимости от времени

суток или управление климатическим оборудованием при изменениях температуры окружающей среды.

### Заключение

Целью данной статьи является анализ современных подходов к разработке программных средств, способных обеспечить взаимодействие и управление разнообразными устройствами в системах умного дома и представление архитектуры системы умного дома, допускающей подключение устройств пользователя.

В статье рассмотрены следующие вопросы:

- используемое базовое программное и аппаратное обеспечение;
- схема взаимодействия основных узлов разработанной системы;
- программные средства для функционирования микроконтроллера Espressif ESP32;
- реализация серверного и клиентского приложения;
- обзор и сравнение с аналогами представленной системы;
- сфера использования системы.

Отличие представленной системы от ее аналогов состоит в возможности подключать к ней устройства пользователя.

Полученные результаты подтверждают значимость использования современных аппаратных средств и технологий, таких как микроконтроллер ESP-32, микрокомпьютер Orange PI Zero 3 и брокера сообщений Eclipse Mosquitto в создании интеллектуальной среды обитания. Применение протокола MQTT для передачи данных между устройствами и сервером демонстрирует высокую эффективность и надежность в реальном времени.

В результате разработано программное обеспечение для систем умного дома, которое обеспечивает управление и взаимодействие с устройствами, содействует их интеграции и совместной работе. Данная разработка и ее исследование открывают новые возможности для развития технологий умного дома и их успешной интеграции в повседневную жизнь пользователей, а также предоставляют новые перспективы для автоматизации и оптимизации бытовых процессов.

### Литература

1. Чёлник А.А., Петрухнова Г.В. Организация обмена мгновенными сообщениями в системе «Умный дом» // Фундаментальные и прикладные исследования:



объединение академической экспертизы и инновационных решений: сб. науч. тр. по материалам Междунар. науч.-практ. конф. (г. Нижний Новгород), 20 августа 2023г., НОО «Профессиональная наука». С. 26-30.

2. ESP-IDF Programming Guide. URL: <https://docs.espressif.com/projects/esp-idf/en/latest/esp32> (дата обращения: 25.01.2024).

3. Gkatzouras E.A Developer's Essential Guide to Docker Compose // Packt Publishing, 2022, с. 44-55.

4. Eclipse Mosquitto. URL: <https://mosquitto.org/> (дата обращения: 25.01.2024).

5. Spring Boot Reference Documentation. URL: <https://docs.spring.io/spring-boot/docs/current/reference/htmlsingle/> (дата обращения: 25.01.2024).

Поступила 07.05.2024; принята к публикации 03.09.2024

### Информация об авторах

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

**Чёлник Александр Александрович** — студент бакалавриата, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: [chelnik.chaa@yandex.ru](mailto:chelnik.chaa@yandex.ru)

## CLIENT-SERVER ARCHITECTURE OF THE SMART HOME SYSTEM

G.V. Petruhnova, A.A. Chelnik

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

**Abstract:** software development and the use of microcontrollers for a smart home is an actual trend in the field of modern technologies. The article presents an innovative approach to interaction of various devices for a smart home, based on a client-server architecture. This approach ensures the integration of a smart home into a single system, allowing devices to interact and function in a coordinated manner. The key distinguishing features of this approach are the flexibility and adaptability of the software, which allows you to customize the system to different modes, conditions and consumer needs. A comparative analysis of the capabilities of the developed system and the capabilities of the smart home with Alice and the i-Tone system is carried out. The Espressif ESP-32 microcontroller was used as the core of the hardware of the system under development, which has an extensive set of interfaces for connecting to a wide range of external peripherals and low power consumption. The system architecture includes a WEB server based on the Orange PI Zero 3 microcomputer, a router and several ESP-32-based devices. This system has a typical client-server architecture, where the client (smartphone, computer) communicates with a web server, and the server, in turn, interacts with devices. The Message Queuing Telemetry Transport (MQTT) protocol was chosen as the protocol for transmitting data from devices to the server. To manage services in the developed system, containerization using Docker and container orchestration using Docker Compose are used. Eclipse Mosquitto has been selected as the MQTT message broker. To process the received data, a Java Spring Boot service was created, which subscribes to all smart home devices, the server processes the received messages and saves them to the database. Visualization of the received data has been added for the convenience of the user. The web interface is designed using the React library

**Key words:** smart home, client-server architecture, data exchange, MQTT protocol, ESP-32 microcontroller, Orange PI Zero 3 microcomputer

### References

1. Chelnik A.A., Petruhnova G.V. "Organization of instant messaging in the Smart Home system", Collection of scientific papers on the materials of the International Scientific and Practical Conference *Fundamental and Applied Research: combining academic expertise and innovative solutions*, Nizhny Novgorod, Professional'naya nauka, 2023, pp. 26-30.

2. "ESP-IDF Programming Guide", available at: <https://docs.espressif.com/projects/esp-idf/en/latest/esp32> (accessed 25.01.2024).

3. Gkatzouras E. "A Developer's Essential Guide to Docker Compose", Packt Publishing, 2022, pp. 44-55.

4. "Eclipse Mosquitto", available at: <https://mosquitto.org/> (accessed 25.01.2024).

5. "Spring Boot Reference Documentation", available at: <https://docs.spring.io/spring-boot/docs/current/reference/htmlsingle/> (accessed 25.01.2024).

Submitted 07.05.2024; revised 03.09.2024

### Information on the authors

**Galina V. Petruhnova** – Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: [gvpetruhnova@mail.ru](mailto:gvpetruhnova@mail.ru)

**Alexandr A. Chelnik** – Undergraduate Student, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: [chelnik.chaa@yandex.ru](mailto:chelnik.chaa@yandex.ru)

## Радиотехника и связь

DOI 10.36622/1729-6501.2024.20.3.012

УДК 621.396

### МОДИФИЦИРОВАННАЯ ПАТЧ-АНТЕННА НА ОСНОВЕ ВОЗДУШНОЙ ПОДЛОЖКИ С ВЫДЕЛЕННЫМ СЛОЕМ ЛИНИИ ПИТАНИЯ

А.В. Ашихмин<sup>1</sup>, Е.А. Ищенко<sup>2</sup>, К.Ю. Пашенко<sup>3</sup>, С.М. Фёдоров<sup>2,4</sup>

<sup>1</sup>ЗАО «ИРКОС», г. Воронеж, Россия

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

<sup>4</sup>Международный институт компьютерных технологий, г. Воронеж, Россия

**Аннотация:** исследуется конструкция направленной антенны на основе патч-излучателей с воздушной подложкой. Рассматриваются две конструкции антенны – когда линия питания и излучатели выполняются в один слой, а также конструкция, когда линия передачи переносится на выделенный (индивидуальный) слой. Полученные результаты показывают, что применение направленных антенн на основе патчей на воздушной подложке позволяет сформировать высоконаправленные антенны с высоким уровнем согласования. Проведенные исследования показали, что применение конструкции антенны с изоляцией линии питания на выделенный слой позволяет улучшить характеристики антенны: повысить уровень согласования, расширить диапазон рабочих частот, улучшить характеристики диаграммы направленности, что особенно важно в реализации систем помехозащищенной связи с роботизированными комплексами, так как реализуется высоконаправленная антенна с веерной диаграммой направленности. Рассмотренные антенны предназначены для работы в диапазоне частот 2.4 ГГц, который является одним из наиболее распространенных и популярных для систем связи с беспилотными комплексами. Рассмотренные конструкции антенн обладают коэффициентом стоячей волны по напряжению (КСВН) в диапазоне рабочих частот менее 2, а также уровнем коэффициента направленного действия (КНД) более 12 дБ, что позволяет значительно улучшить характеристики канала связи и повысить его помехозащищенность

**Ключевые слова:** антенна на воздушной подложке, патч-антенна, направленная антенна, веерная диаграмма направленности

**Благодарности:** работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания "Молодежная лаборатория" № FZGM-2024-0003

#### Введение

Реализация задач помехозащищенной связи является важной и актуальной задачей. Для обеспечения роста дальности связи, а также решения задач направленной защищенной от помех связи. Особый акцент в таких случаях делается на улучшениях конструкции приёмных и передающих антенн, особенно если рассматривается случай работы с роботизированными беспилотными комплексами. Так как приемная и передающая антенна на мобильном объекте для обеспечения связи должна быть всенаправленной, то для достижения наилучших характеристик каналов связи особое внимание стоит уделить именно передающей антенны аппаратуры передачи команд. Для обеспечения направленной связи могут быть использованы разные антенны, например лого-

периодические антенны (ЛПА), антенны Уда-Яги, рефлекторные антенны, однако стоит отметить, что характеристики таких антенн напрямую связаны с их размерами, что усложняет их размещение, а также снижает мобильность пункта управления и передачи данных. Рефлекторные же антенны сильно сужают область работы с мобильным объектом ввиду очень узкой диаграммы направленности, которая формируется зеркалом и облучателем. На основании этого можно сделать вывод, что оптимальным вариантом в таком случае выступает антенна, которая будет обладать веерной диаграммой направленности, при этом обеспечивая высокий уровень коэффициента направленного действия.

Для достижения таких характеристик удобно использовать патч-антенны [1], которые обладают малыми размерами, а также способны реализовывать большой коэффициент усиления, особенно в случаях, когда они объединяются в антенные решетки. Особенностью

патч-антенн также является то, что они могут иметь разную форму, что в свою очередь позволяет добиваться возможностей работы с разнополяризованными электромагнитными волнами [2]. В основе всех планарных (печатных) патч-антенн лежит диэлектрическая подложка, которая служит для передачи электромагнитных волн, а также для обеспечения жесткости и надежности антенны. Типичными материалами являются диэлектрические подложки FR-4, Rogers и другие ламинаты, однако для достижения различных свойств могут применяться и другие подложки, как в [3] использовалась вода. Благодаря таким свойствам, применение патч-антенн для реализации направленных антенн является перспективным, а также значительно упрощает процесс производства.

Одними из наиболее перспективных конструкций таких антенн являются схемы, когда антенна формируется на основе применения воздушных диэлектриков, так как воздух обладает максимально стабильными показателями, а также минимальными потерями. В [4], например, авторы формируют антенную решетку на основе планарных антенн, которые сформированы на печатных диэлектриках, при этом слой заземления (экран) отделен от излучателя воздушной прослойкой. Аналогичная конструкция рассматривается и в работах [5-8], однако недостатком таких конструкций является то, что из-за разницы диэлектриков возникают отражения на разделе сред, что в свою очередь ведет к дополнительным потерям, которые вызваны разницей сред. С точки зрения распространения радиоволн наиболее оптимальным был бы случай, когда диэлектрик под антенной будет однородным, что минимизирует потери. Однако возникает проблема, что закрепление излучающего слоя требует формирования специализированных фиксаторов или диэлектрических ячеек [9].

Помимо выбора диэлектрика, в котором будут распространяться радиоволны, также возникает задача выбора конфигурации антенны – один патч, два или четыре [10]. В рассматриваемой задаче была выбрана конфигурация антенны, когда два патч-излучателя размещались в одну линию, что позволяло сформировать веерную диаграмму направленности. В роли диэлектрика выступал воздух, а также рассматривалось два случая – когда антенные элементы (излучатели) размещались в один слой, а также когда линия передачи располагалась на слой ниже для минимизации влияния на излучаемые волны.

### Конструкция и характеристики антенны с линией питания, реализованной в один слой с излучателями

Рассмотрим базовую реализацию направленной антенны на основе патчей с воздушной подложкой. В процессе исследования рассматривалась антенна, которая состоит из двух симметричных патч-излучателей, которые запитывались на основе делителя сопротивлений. Целевая частота работы антенны составляла 2.4 ГГц, так как этот диапазон является одним из наиболее распространенным в системах передачи данных. Выбранная конструкция антенны на основе воздушной подложки позволяет изготавливать антенны путем применения лазерной резки металлов. Так в процессе исследований было отмечено, что антенна может быть выполнена даже из стали, так как ее проводимости достаточно для обеспечения эффективного протекания токов. Базовая конструкция антенны, когда линия передач выполняется на одном слое, приводится на рис. 1.

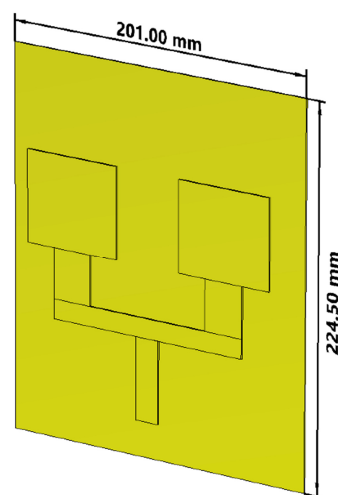


Рис. 1. Вид антенны на основе двух патчей на основе воздушной подложки, выполненной в один слой

Рассматриваемая конструкция антенны состоит из трех основных частей – экранирующего (единого) слоя заземления размерами 201x224.5 мм, который служит для отражения электромагнитных волн и формирования направленного излучения; двух патч-излучателей размерами 62x54 мм (наибольший размер составляет 0.496), которые служат резонансными источниками излучения электромагнитных волн в пространство; линии питания, которая используется для передачи электромагнитных волн от источника к излучателям. Так как линия питания должна в данном случае выступать в роли делителя, то для мак-

симизации эффективности выполнялась оптимизация размеров линии передачи. В результате проведенных расчетов были получены следующие размеры:

1) участок от генератора до делителя имеет длину 48 мм (0.384) и ширину 15 мм (соответствует сопротивлению 101 Ом);

2) участок деления сопротивлений для двух соседних патчей, который имеет полную длину в 130 мм (1.04) и ширину 11.5 мм (соответствует сопротивлению 116 Ом);

3) участок подключения к патч излучателям длиной 30 мм (0.24) и ширину 25 мм (соответствует сопротивлению 76 Ом).

Особенностью данной антенны является то, что излучатели и линия передачи выполняются единой деталью, что упрощает процесс изготовления, после чего они закрепляются на высоте 9.5 мм от экранирующего слоя. Таким образом, данная антенна обладает малыми размерами и проста в изготовлении. Для фиксации слоев на требуемой высоте могут быть использованы аддитивно изготовленные (3D печать) проставки или может быть закреплена на втулки путем использования винтов и гаек или пайки. На рис. 2 приводится вид основных характеристик антенны, которая выполнена с использованием двух патчей на основе воздушной подложки.

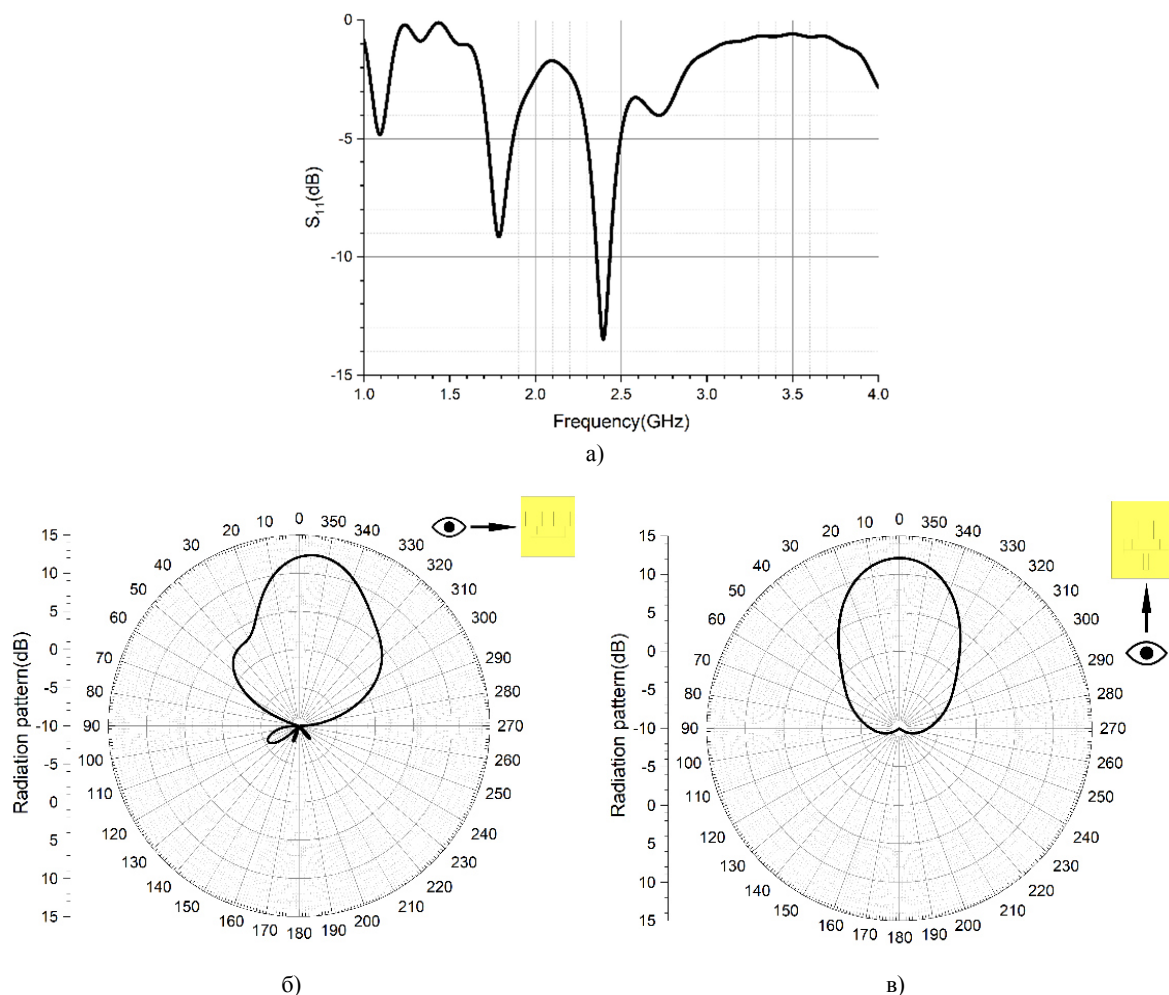


Рис. 2. Характеристики антенны, выполненной по однослойной технологии: а) график возвратных потерь; б), в) срезы диаграмм направленности на частоте 2.4 ГГц

Полученные результаты показывают, что разработанная антенна работает в диапазоне частот от 2.36 до 2.43 ГГц, что соответствует целевой частоте 2.4 ГГц, при этом значение возвратных потерь на частоте 2.4 ГГц составляет 13.4 дБ, что соответствует высокому

уровню согласования. Ширина лепестков антенны в вертикальной плоскости составила 39.5 и 35.9, а пик КНД 12.4 дБ. Таким образом, можно отметить, что антенна позволяет обеспечить высоконаправленную связь с высоким уровнем согласования. Полученная антенна



позволит обеспечить высоконаправленную помехозащищенную связь, что является важной и актуальной задачей для реализации систем связи с роботизированными комплексами. Рассмотрим модификацию антенны, когда линия передачи будет перенесена на отдельный слой – промежуточный.

### Многослойная патч-антенна на основе воздушной подложки

Применение патч антенн на основе воздушной подложки позволяет значительно повысить эффективность излучения, а также обеспечить помехозащищенную систему передачи данных. Для улучшения характеристик антенны рассмотрим случай, когда линия питания выделяется в отдельный (независимый) слой. Благодаря такому размещению с точки зрения распространения электромагнитных волн стоит ожидать, что появится возможность улучшить согласование, так как снизится паразитный эффект влияния излучателей на линию передач, а также повысится уровень КНД и снизится паразитное излучение, так как будет отсутствовать переизлучение от линии питания. На рис. 3 приводится вид многослойной антенны на основе воздушного диэлектрика.

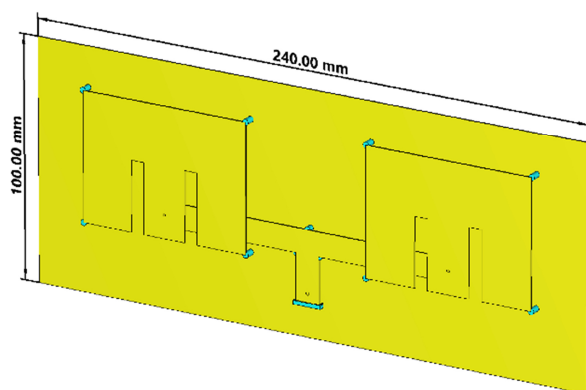


Рис. 3. Конструкция многослойной антенны на основе воздушного диэлектрика

Как видно, антенна с такой конструкцией значительно уже изначальной, однако ввиду необходимости дополнительного разнесения элементов слой заземления стал немного шире. В таком случае размер слоя заземления составил 240x100 мм. Вторым слоем в такой конструкции выступает линия питания и согласования для антенных элементов, которая представляет

из себя T-образный делитель сопротивлений, который расположен на высоте 2 мм от слоя заземления, состоящий из двух участков:

1) от приёмника (передатчика) до делителя сопротивлений – имеет длину 20 мм (0.16) и ширину 10 мм (49.37 Ом);

2) делитель сопротивлений – имеет длину 134 мм (1.072) и ширину 10 мм (49.37 Ом). Такая конструкция возможна благодаря изоляции линии питания от патч-излучателей.

На самом верхнем слое располагаются два патч-излучателя, которые имеют размеры 71.5x53.5 мм (наибольший размер 0.572), а также имеют вырезы, которые позволяют обеспечить расширение диапазона рабочих частот, а также повысить направленные свойства антенны [11]. Размеры щелей составляют 29x5.5 мм, а их смещение относительно центра патча 9 мм. Высота расположения патчей 3.5 мм относительно слоя заземления. Также важно отметить, что в модели учитывалось влияние поддерживающих структур, которые выполняются на основе пластика для 3D печати или фотополимерной смолы (при использовании SLS печати). Основные характеристики антенны с модифицированной конструкцией приводятся на рис. 4.

Полученные результаты показывают, что антенна с модифицированной конструкцией обладает диапазоном рабочих частот от 2.38 до 2.48 ГГц (рост полосы на 30%), при этом также наблюдается значительное улучшение согласования (максимальные возвратные потери составили 33.4 дБ), так на частоте 2.4 возвратные потери составили 15.2 дБ (рост на 1.8 дБ). Ширина лепестков диаграммы направленности составила 25.5 и 61.4 с пиковым значением КНД в 12.8 дБ (рост на 0.4 дБ). При этом стоит отметить, что вид диаграммы направленности стал намного более сглаженным, а также ее характеристики стали максимально веерными (в одной плоскости среза обеспечивается широкий луч, в другой узкий луч). Благодаря таким характеристикам обеспечивается максимальная эффективность антенны, наиболее оптимальное использование канала, что позволяет дополнительно повысить помехозащищенность канала связи благодаря подавлению приема дополнительных шумовых характеристик в направленном канале связи.



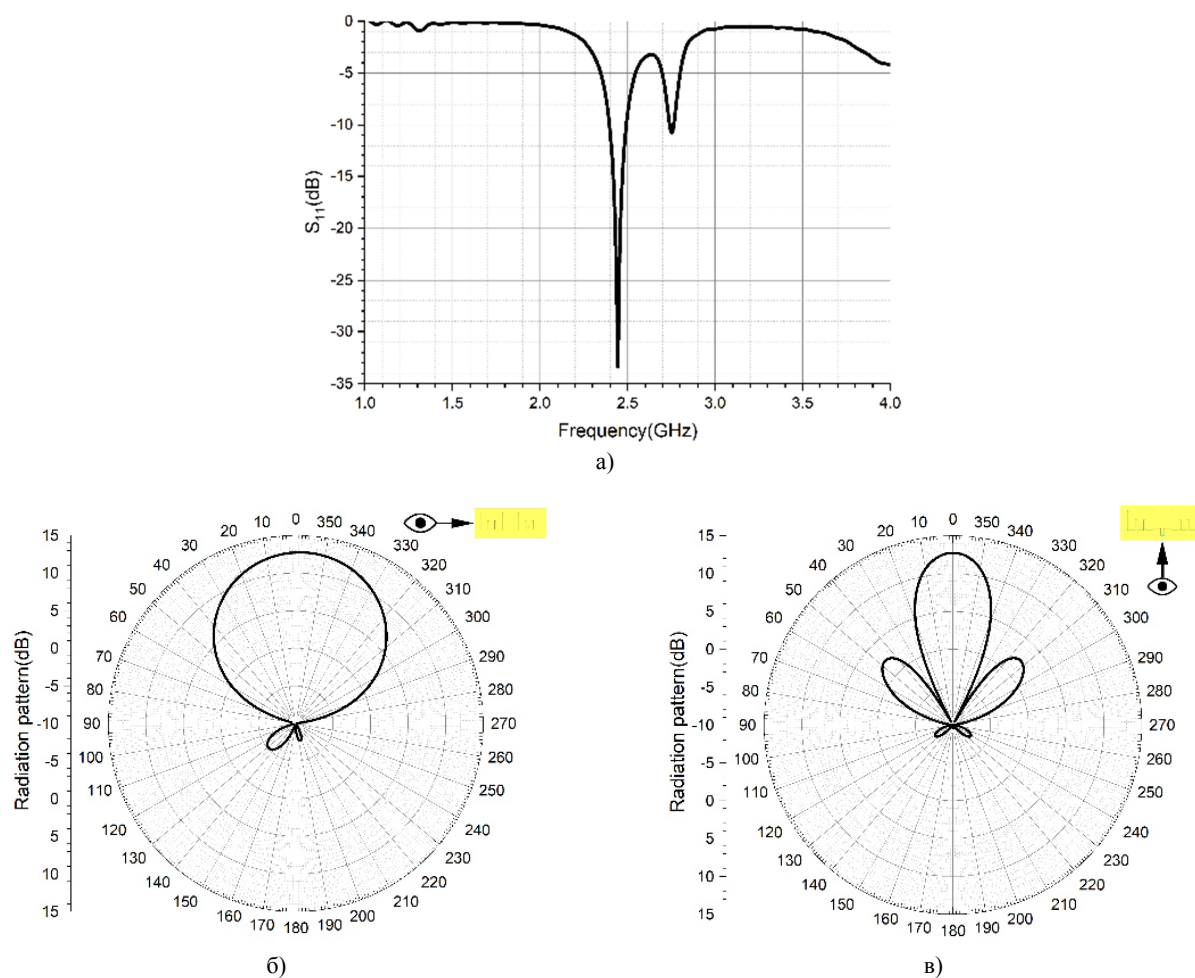


Рис. 4. Характеристики антенны с модифицированной конструкцией: а) график возвратных потерь; б), в) срезы диаграмм направленности на частоте 2.4 ГГц

### Заключение

В процессе исследования были рассмотрены две конструкции патч-антенн на основе воздушной подложки. Было показано, что применение антенны с двумя патчами, объединенными в решетку, позволяет сформировать направленную связь, при этом антенна обладает высоким согласованием, что позволяет минимизировать потери при прохождении сигналов от источника к излучателям, при этом в процессе сравнения конструкции было отмечено, что исполнение антенны в виде единого слоя (расположение линии передачи и излучателей в один слой) приводит к искажениям диаграммы направленности и рассеянию главного лепестка, при этом удается сохранить высокий уровень КНД. Изоляция же слоя линии питания на дополнительный слой (выделенный для нее) позволила повысить уровень согласования, расширить диапазон рабочих частот, улучшить направленные свойства антенны.

Достижение таких характеристик стало возможно благодаря тому, что слой питания оказывает минимальное влияние на излучаемые электромагнитные волны, так как он оказывается ограничен дополнительной воздушной прослойкой. Таким образом, применение антенн на основе воздушных подложек позволяет повысить качественные характеристики антенн, снизить потери в диэлектриках, при этом модификация их конструкций позволяет улучшить характеристики излучения, что является важной задачей в обеспечении помехозащищенной высоконаправленной связи, особенно в задачах взаимодействия с беспилотными роботизированными комплексами.

### Литература

1. Soily S., Mazumder R.K., K. Ali Design and simulation of two conformal arrays with dual patch and quadruple patch antenna elements // 2015 IEEE Conference on Antenna Measurements & Applications (CAMA), Chiang Mai, Thailand, 2015. PP. 1-3.

2. Motevasselian A., Whittow W. G. Miniaturization of a Circular Patch Microstrip Antenna Using an Arc Projection // *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*. 2017. Vol. 16. PP. 517-520.
3. Li Y., Luk K. -M. A transparent water dielectric patch antenna. 2015 IEEE 4th Asia-Pacific Conference on Antennas and Propagation (APCAP), Bali, Indonesia, 2015. PP. 319-320.
4. High Gain and Low-Profile Stacked Magneto-Electric Dipole Antenna for Phased Array Beamforming / H. -J. Dong, Y. -B. Kim, J. Joung, H. L. Lee // *IEEE Access*. 2020. Vol. 8. PP. 180295-180304.
5. Ozenc K., Aydemir M. E., Öncü A. Design of a 1.26 GHz high gain microstrip patch antenna using double layer with airgap for satellite reconnaissance. 2013 6th International Conference on Recent Advances in Space Technologies (RAST), Istanbul, Turkey, 2013. PP. 499-504.
6. Matsumoto H., Tanikawara M. Circularly polarized microstrip antenna with an airgap for multi-GNSS applications. 2017 IEEE-APS Topical Conference on Antennas and Propagation in Wireless Communications (APWC), Verona, Italy, 2017. PP. 150-151.
7. A Capacitive Fed Microstrip Patch Antenna with Air Gap for Wideband Applications (RESEARCH NOTE) / A. Azadi, P. Rezaei, M. M. Fakharian, M. R. Dadras // *International Journal of Engineering*. 2014. 27(5). PP. 715-722.
8. Gain Enhancement of Rectangular Microstrip Patch Antenna using Air Gap at 2.4 GHz / Kharusi, Khalfan Al, Nurulazlina Ramli, S. A. Khan, M. T. Ali and M.H.C. Halim // *October 2020 International Journal of Nano and Biomaterials*. 2020. PP. 211-224.
9. Bhatoo R., Sidhu Roopan and E. Novel high gain air gap directive antenna for X-band satellite to earth downlink applications. 2016 International Conference on Control, Computing, Communication and Materials (ICCCCM), Allahabad, India, 2016. PP. 1-4.
10. Singh S., Tyagi N., Sinha N. Design and analysis of single patch, 2×1 and 4×1 microstrip antenna arrays. International Conference for Convergence for Technology-2014, Pune, India, 2014. PP. 1-5.
11. Wong Kin-Lu, Hsu Wen-Hsis A broad-band rectangular patch antenna with a pair of wide slits // *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 2001. Vol. 49. No. 9. PP. 1345-1347.

Поступила 27.06.2024; принята к публикации 26.08.2024

#### Информация об авторах

**Ашихмин Александр Владимирович** – д-р техн. наук, главный инженер ЗАО «ИРКОС» (394066, Россия, г. Воронеж, Московский Проспект, д. 179 корпус 4), e-mail: info@ircos.ru

**Ищенко Евгений Алексеевич** – ассистент кафедры радиоэлектронных устройств и систем, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, д. 84), e-mail: kursk1998@yandex.ru

**Пашенко Кирилл Юрьевич** – курсант, 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, д. 54А), e-mail: wot.akak@yandex.ru

**Фёдоров Сергей Михайлович** – канд. техн. наук, доцент кафедры радиоэлектронных устройств и систем, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84); доцент кафедры информационной безопасности и систем связи, Международный институт компьютерных технологий (394026, Россия, г. Воронеж, ул. Солнечная, д. 29 б), e-mail: fedorov\_sm@mail.ru, ORCID: 0000-0001-9027-6163

## MODIFIED PATCH ANTENNA BASED ON AN AIR SUBSTRATE WITH A DEDICATED POWER LINE LAYER

A.V. Ashikhmin<sup>1</sup>, E.A. Ishchenko<sup>2</sup>, K.Yu. Pashchenko<sup>3</sup>, S.M. Fedorov<sup>2,4</sup>

<sup>1</sup>CJSC IRCOS, Voronezh, Russia

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

<sup>4</sup>International Institute of Computer Technologies, Voronezh, Russia

**Abstract:** the paper considers the design of a directional antenna based on patch radiators with an air substrate. Two antenna designs are considered – when the power line and radiators are made in one layer, as well as a design when the transmission line is transferred to a dedicated (individual) layer. The results obtained show that the use of directional antennas based on patches on an air substrate makes it possible to form highly directional antennas with a high level of matching. The conducted research has shown that the use of an antenna design with isolation of the power line on a dedicated layer makes it possible to improve the characteristics of the antenna: increase the level of matching, expand the range of operating frequencies, improve the characteristics of the radiation pattern, which is especially important in the implementation of noise-proof communication systems with robotic complexes, since a highly directional antenna with a fan pattern is implemented. The antennas considered are designed to operate in the 2.4 GHz frequency range, which is one of the most common and popular for communication systems with unmanned complexes. The considered antenna designs have VSWR in the operating frequency range of less than 2, as well as a KND level of more than 12 dB, which significantly improves the characteristics of the communication channel and increases its noise immunity

**Key words:** aerial antenna, patch antenna, directional antenna, fan pattern

**Acknowledgements:** The work was carried out with the financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the framework of the state assignment "Youth laboratory" no. FZGM-2024-0003

#### References

1. Soily S., Mazumder R.K., Ali K., "Design and simulation of two conformal arrays with dual patch and quadruple patch antenna elements," *2015 IEEE Conference on Antenna Measurements & Applications (CAMA)*, Chiang Mai, Thailand, 2015, pp. 1-3, doi: 10.1109/CAMA.2015.7428157.
2. Motevasselian A., Whittow W.G., "Miniaturization of a Circular Patch Microstrip Antenna Using an Arc Projection," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 16, pp. 517-520, 2017, doi: 10.1109/LAWP.2016.2586749
3. Li Y., Luk K.-M. "A transparent water dielectric patch antenna," *2015 IEEE 4th Asia-Pacific Conference on Antennas and Propagation (APCAP)*, Bali, Indonesia, 2015, pp. 319-320, doi: 10.1109/APCAP.2015.7374388
4. Dong H.-J., Kim Y.-B., Joung J., H. Lee L. "High Gain and Low-Profile Stacked Magneto-Electric Dipole Antenna for Phased Array Beamforming," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 180295-180304, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3027813
5. Ozenc K., Aydemir M.E., Öncü A. "Design of a 1.26 GHz high gain microstrip patch antenna using double layer with airgap for satellite reconnaissance," *2013 6th International Conference on Recent Advances in Space Technologies (RAST)*, Istanbul, Turkey, 2013, pp. 499-504, doi: 10.1109/RAST.2013.6581259
6. Matsumoto H., Tanikawara M. "Circularly polarized microstrip antenna with an airgap for multi-GNSS applications," *2017 IEEE-APS Topical Conference on Antennas and Propagation in Wireless Communications (APWC)*, Verona, Italy, 2017, pp. 150-151, doi: 10.1109/APWC.2017.8062265
7. Azadi A., Rezaei P., Fakharian M.M., Dadras M.R. "A Capacitive Fed Microstrip Patch Antenna with Air Gap for Wideband Applications (RESEARCH NOTE)", *International Journal of Engineering*, 2014, no. 27 (5), pp. 715-722.
8. Kharusi Kh. Al, Nurulazlina Ramli, Khan S.A., Ali M.T., Halim M.H.C. "Gain Enhancement of Rectangular Microstrip Patch Antenna using Air Gap at 2.4 GHz." *October 2020 International Journal of Nano and Biomaterials*, 2020, pp. 211-224.
9. Bhatoa R., Ecambir S. "Novel E. high gain air gap directive antenna for X-band satellite to earth downlink applications", *2016 International Conference on Control, Computing, Communication and Materials (ICCCCM)*, Allahbad, India, 2016, pp. 1-4.
10. Singh S., Tyagi N., Sinha N. "Design and analysis of single patch, 2×1 and 4×1 microstrip antenna arrays", *International Conference for Convergence for Technology-2014*, Pune, India, 2014, pp. 1-5.
11. Kin-Lu Wong, Wen-Hsis Hsu, "A broad-band rectangular patch antenna with a pair of wide slits," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Sept. 2001, vol. 49, no. 9, pp. 1345-1347, doi: 10.1109/8.951507.

Submitted 27.06.2024; revised 26.08.2024

#### Information about the authors

**Alexander V. Ashikhmin** – Dr. Sc. (Technical), Chief Engineer, CJSC IRKOS (179 korp. 4 Moskovskiy Prospekt, Voronezh 394066, Russia), e-mail: info@ircos.ru

**Evgeny A. Ishchenko** – Assistant, Department of Radioelectronic Devices and Systems, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: kursk1998@yandex.ru

**Kirill Yu. Pashchenko** – Cadet, 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: wot.akak@yandex.ru

**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 Solnechnaya str., Voronezh 39026, Russia), e-mail: fedorov\_sm@mail.ru, ORCID: 0000-0001-9027-6163

## МЕТОДИКА ПОДАВЛЕНИЯ ШУМА НА ИЗОБРАЖЕНИИ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ С ПОМОЩЬЮ ВЕЙВЛЕТ-ПРЕОБРАЗОВАНИЯ И НЕЙРОННОЙ СЕТИ

М.В. Хорошайлова<sup>1</sup>, А.В. Кузнецов<sup>2</sup>, А.С. Демихова<sup>1</sup>

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

<sup>2</sup>АО «ВЦКБ «Полюс», г. Воронеж, Россия

**Аннотация:** предложен улучшенный способ шумоподавления двумерного изображения, основанный на вейвлет-преобразовании и сверточной нейронной сети, позволяющий подавить данные случайного шума, создаваемого внешними или внутренними факторами, снижая резкость изображений с беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). Действительный сигнал отличается от шума после вейвлет-преобразования, и преобразованный сигнал слухит входными данными нейронной сети. Глубокая нейронная сеть используется для непосредственного изучения характеристик шума на изображении, связанных с вейвлет-областью, что позволяет точно и адаптивно оценивать уровень и распределение шума. Сверточная нейронная сеть удаляет шум из сигнала с помощью чистого сигнала, который использует как эталонный в качестве отмеченных данных. Полученные изображения, несущие шум, разложены с использованием 2D-вейвлетов, ранжируя разложенные высокочастотные и низкочастотные коэффициенты, чтобы сформировать набор данных. Результаты моделирования показывают, что предложенный метод обеспечивает более высокую производительность шумоподавления с точки зрения пикового отношения сигнал/шум и среднеквадратической ошибки по сравнению с методами, использующими только нейронные сети. Представлен анализ влияния количества слоев сверточной нейронной сети на эффективность удаления шума нейронной сетью на основе вейвлет-преобразования

**Ключевые слова:** вейвлет-преобразование, шумоподавление, случайный шум, двумерное изображение, нейронная сеть, высокочастотные и низкочастотные коэффициенты

**Благодарности:** работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № FZGM-2024-0006)

### Введение

Беспилотные летательные аппараты (БПЛА) отличаются высокой мобильностью, низкой стоимостью, доступностью и совместимостью со сложной местностью, поскольку они широко используются в разведке поля боя, топографическом картографировании и поисково-спасательных операциях. При получении и передаче изображений с беспилотного летательного аппарата на качество передачи влияют окружающие условия, такие как погодные условия и колебания во время съемки, снижающие качество получаемого изображения и влияющие на последующую их обработку. В настоящее время существует множество методов устранения шумов на изображении, среди которых наиболее часто используемые методы фильтрации, которые включают медианную фильтрацию, фильтрацию по среднему значению и фильтрацию по Вене [1]. Алгоритм вейвлет-преобразования [2,3] может разложить

и восстановить изображение, чтобы избежать потери деталей изображения, вызванных фильтром. Вейвлет-анализ преобразует общую функцию или сигнал на ряд базисных функций, вейвлетов, которые имеют различное местоположение по частоте и времени. Вейвлеты имеют возможность преобразовывать сигнал или временной ряд по разным уровням. В результате это преобразование выявляет структуру основного сигнала, включая периодичности, особенности или скачки, которые невозможно наблюдать в исходном временном ряду.

Для подавления шума на изображениях чаще всего используются сверточные нейронные сети (СНС). Модель нейронной сети использует многослойные перцептроны и содержит один или несколько сверточных слоев, создающих карты признаков, записывающих область изображения, разбитую на прямоугольники и отправленную на нелинейную обработку. Этап предварительной обработки обеспечивает для каждого исходного изображения последовательность блоков, которые затем сжимаются с определенной скоростью,



при этом каждый компонент результирующей последовательности передается в качестве входных данных в нейронную архитектуру.

Таким образом, здесь предлагается метод, объединяющий преимущества вейвлет-преобразования и сверточной нейронной сети для эффективного удаления шума на изображениях, принятых с БПЛА.

### Вейвлеты и обработка изображений

В качестве подхода к анализу области преобразования, аналогичного преобразованию Фурье, вейвлет-преобразование отделяет эффективный сигнал от шума, вычисляя внутреннее произведение базовой функции и сигнала. Для некоторого заданного вейвлета  $F(x)$  базисная вейвлет-функция равна

$$F_{a,b}(x) = \frac{1}{\sqrt{a}} F\left(\frac{x-b}{a}\right), \quad (1)$$

где  $a$  - параметр масштабирования,  $b$  - параметр временного окна,  $a, b \in \mathbb{R}^+$ . То есть базисная вейвлет-функция  $F_{a,b}(x)$  - это сдвиг и масштабное преобразование исходной вейвлет-функции  $F(x)$ .

Вейвлетом называется функция, которая колеблется подобно волне, но быстро затухает. Вейвлет - это функция  $\theta$  от  $L^2(\mathbb{R})$ , которая проверяет следующее условие допустимости

$$C_\theta = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{|\hat{\theta}(\varepsilon)|^2}{|\varepsilon|} d\varepsilon < +\infty. \quad (2)$$

Двумерное дискретное вейвлет-преобразование (ДВП) является простейшей формой обобщения двумерного вейвлета [4]. Оно состоит из стандартного одномерного дискретного вейвлет-преобразования, применяемого к каждой строке, а затем к каждому столбцу, как показано на рис. 1.

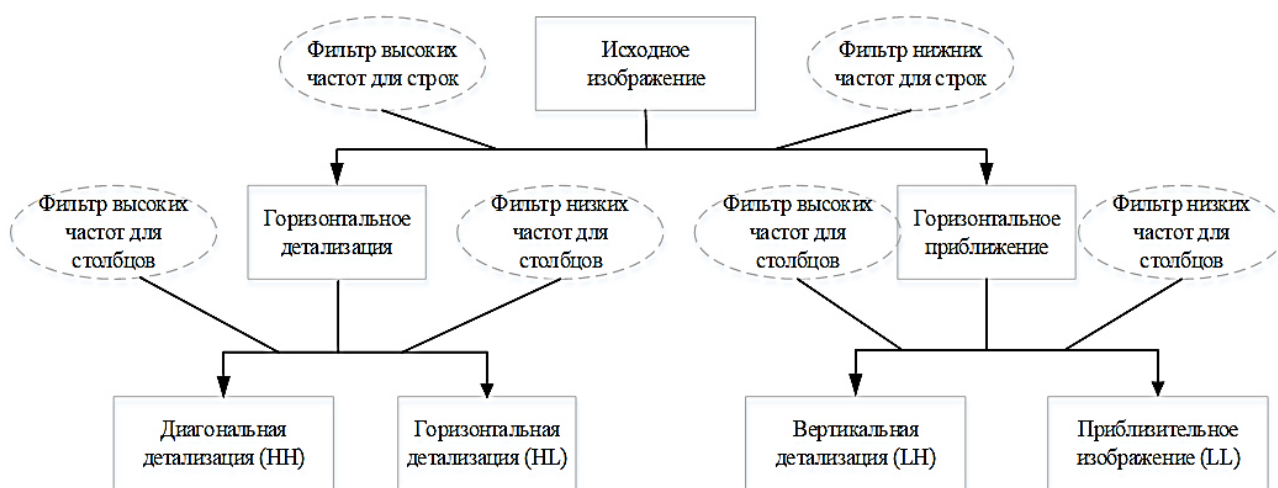


Рис. 1. Структурная схема двумерного дискретное вейвлет-преобразование

На рис. 1 показано, что, если изображение состоит из  $N_1$  строки и  $N_2$  столбца, в результате разложения получаются четыре изображения в четверть размера ( $N_1/2 \times N_2/2$ ): детали (LH, HL, HH) и приближение LL. Аппроксимация LL является результатом работы двух фильтров низких частот и обеспечивает переход к следующему уровню детализации. Восстановление выполняется наоборот: сначала по столбцам, затем по строкам. Разделяемое 2D дискретное вейвлет-преобразование имеет три вейвлет-функции ( $m$  и  $n$  - координаты входного изображения):

$$\theta^1(m, n) = \varphi(m)\theta(n) \text{ LHвейвлет}, \quad (3)$$

$$\theta^2(m, n) = \theta(m)\varphi(n) \text{ HLвейвлет}, \quad (4)$$

$$\theta^3(m, n) = \theta(m)\theta(n) \text{ HHвейвлет}, \quad (5)$$

и одну функцию масштабирования:

$$\varphi^2(m, n) = \varphi(m)\varphi(n), \quad (6)$$

связанную с приближением LL.

Можно выполнить  $N$ -уровневое разложение, в результате чего получится  $3N + 1$  различных частотных диапазонов: LL - это коэффициенты низкой частоты или аппроксимации, а также коэффициенты вейвлет-изображения LH, HL и HH, которые соответствуют, соответственно, вертикальным высоким частотам



(горизонтальные границы), горизонтальным высоким частотам (вертикальные границы) и

высоким частотам в обоих направлениях (углы), как показано на рис. 2.

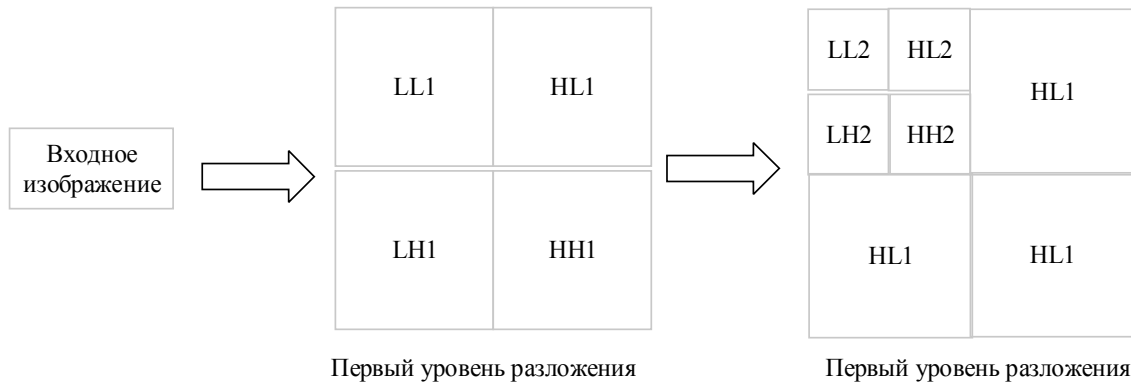


Рис. 2. Полосы частот после двух уровней вейвлет-разложения

Одним из главных преимуществ вейвлетов является то, что они позволяют разложить сложную информацию, такую как изображения, на элементарные формы в различных положениях и масштабах и впоследствии восстановить с высокой точностью. Вейвлет-преобразование обеспечивает разреженное представление для большого класса сигналов и способно выявить аспекты данных, которые другие методы анализа сигналов упускают из виду, например, такие как, точки разбивки и разрывы в высших производных и самоподобие.

Подавление шума представляет большой интерес при цифровой обработке изображений, учитывая, что улучшение качества искаженных изображений имеет существенное значение для большинства областей обработки изображений, включая анализ изображений, определение границ и распознавание образов. Математически проблему подавления шума на изображении можно смоделировать следующим образом:

$$y = x + b, \quad (7)$$

где  $y$  – анализируемое зашумленное изображение,  $x$  – исходное изображение, а  $b$  представляет собой аддитивный белый и однородный гауссовский шум с нулевым средним значением со стандартным отклонением  $\sigma$ .

Принимая зашумленное изображение с помощью вейвлет-преобразования в качестве входных данных нейронной сети, чистые данные  $x$   $R(\text{ДВП}(y); P)$ , т.е.

$$R(\text{ДВП}(y); P) \approx x, \quad (8)$$

где  $P = \{W, B\}$  - параметр нейронной сети, а  $\text{ДВП}(y)$  - результат обработки данных, содержащих шум, после вейвлет-преобразования. Функция потерь нейронной сети равна:

$$l(P) = \sum_{k=1}^Q \|R(\text{ДВП}(y_k); P) - x_k\|_F^2, \quad (9)$$

где  $\text{ДВП}(y)$  обозначает данные о шуме в вейвлет-области  $y_k$ , полученные с помощью двумерного (2D) вейвлет-преобразования,  $x_k$  представляет чистые данные, полученные путем ввода  $y_k$  в нейронную сеть и обучения,  $Q$  - размер пакета данных. Обычно, чем меньше значение  $l(P)$ , тем лучше оптимизация сети и тем выше способность к снижению уровня шума.

### Метод шумоподавления изображений на основе вейвлетов и нейронной сети

Методы, основанные на вейвлет-преобразованиях, доказали свою эффективность в устранении шума. Эти методы в основном основаны на установлении пороговых значений коэффициентов дискретного вейвлет-преобразования, на которые влияет аддитивный белый гауссовский шум [5]. Как показано на рис. 3, основными этапами алгоритма устранения шума, использующие ДВП нейронную сеть, являются:

- дискретное вейвлет-преобразование используется для преобразования зашумленного изображения и получения вейвлет-коэффициентов.

- используется сверточная нейронная сеть для прогнозирования вейвлет-коэффициентов, которая состоит из  $M$  сверточных слоев с остаточной связью.

- для получения изображения без шума к измененным коэффициентам применяется обратное дискретное вейвлет-преобразование.

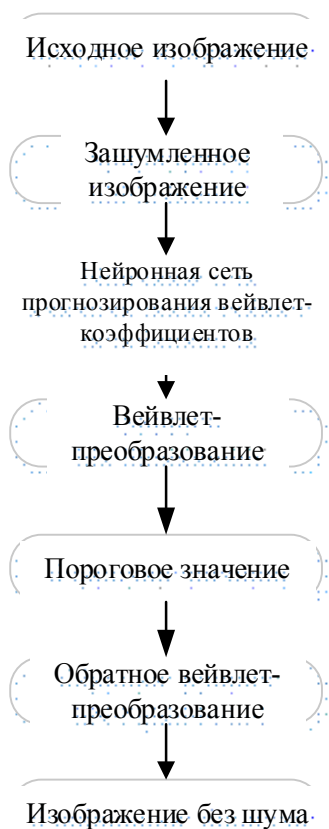


Рис. 3. Базовая структура шумоподавления изображений на основе вейвлет-преобразования и нейронной сети

Архитектура предлагаемой сверточной нейронной сети для удаления шума показана на рис. 4.

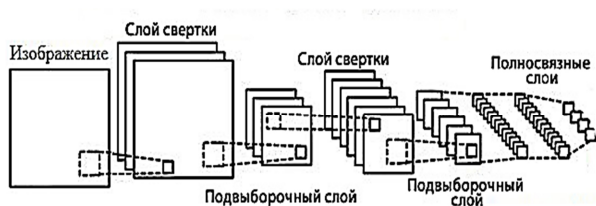


Рис. 4. Архитектура сверточной нейронной сети удаления шума

Имея в наборе готовые строительные блоки, можно собирать различные архитектуры, добавляя слой за слоем. Для улучшения качества изображения [6]. В отличие от других существующих методов удаления шума, основанных на глубоком обучении, рассматриваем удаление шума как задачу прогнозирования коэффициентов преобразования в вейвлет-области.

Сеть прогнозирования вейвлет-коэффициентов состоит из  $M$  сверточных слоев с остаточной связью, в которых все сверточные фильтры имеют одинаковый размер  $3 \times 3$  с шагом 1. Кроме того, используется нулевое заполнение, чтобы каждая карта объектов имела одинаковый размер с входными данными.

### Результаты обработки изображений с БПЛА

Для оценки способности приведенного метода дискретного вейвлет-преобразования с использованием нейронной сети подавлять шум используется показатель соотношения сигнал/шум (SNR), который определяется по формуле

$$SNR = 10 \log_{10} \left\{ \frac{\|x\|_F^2}{\|x - \hat{x}\|_F^2} \right\}, \quad (10)$$

где  $x$  - исходное изображение с БПЛА, используемые в качестве маркерного, а  $\hat{x}$  - зашумленное изображение.

В зависимости от объема данных, подлежащих обработке настроек параметров сети, размер пакета устанавливается равным 100, а начальный диапазон скорости обучения составляет  $[10^{-6}, 9 \times 10^{-6}]$ . В процессе обучения скорость обучения снижается до 90% от исходной каждые 10 эпох.

Для моделирования были выбраны пять часто используемых базисов вейвлетов haar, db, sym, coif, bior, rbio для проверки эффективности снижения шума с разным количеством уровней разложения.

На рис. 5 показаны результаты шумоподавления для каждого базиса вейвлета с вводом зашумленных изображений с разными SNR.

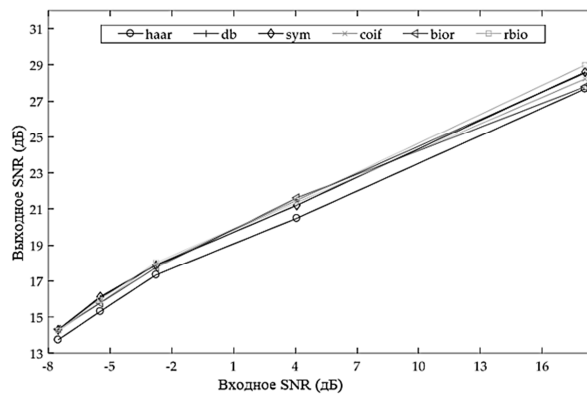


Рис. 5. Тенденция достижения наилучших результатов по снижению шума при различных значениях SNR зашумленных изображений при различных вейвлет-базисных функциях

Можно видеть, что эффекты шумоподавления различных баз вейвлетов сильно различаются при обработке изображений с высоким отношением сигнал/шум, но эффект шумоподавления вейвлетов Хаара и вейвлетов Биора особенно отличается от трех других [7]. По мере уменьшения SNR результаты шумоподавления вейвлета Хаара и других вейвлетов постепенно уменьшаются с 1,312 дБ до 0,595 дБ, в то время как результаты шумоподавления других вейвлетов имеют тенденцию перекрываться, т.е. эффекты шумоподавления различных вейвлетов будут одинаковыми по мере дальнейшего усиления шума.

Использовали вейвлет-преобразование с функции db4 и обработку мягкого порога для шумоподавления предварительно обработанных данных. Затем преобразуем значения параметров в высокочастотные и низкочастотные данные, используя вейвлет-разложение. На рис.6 показаны: (а) низкочастотная составляющая после трехуровневого вейвлет-разложения, (б) высокочастотная составляющая после одноуровневого вейвлет-разложения, (в) вейвлет-компонента после двухуровневого вейвлет-разложения, (г) низкочастотная составляющая после трехуровневого вейвлет-разложения.

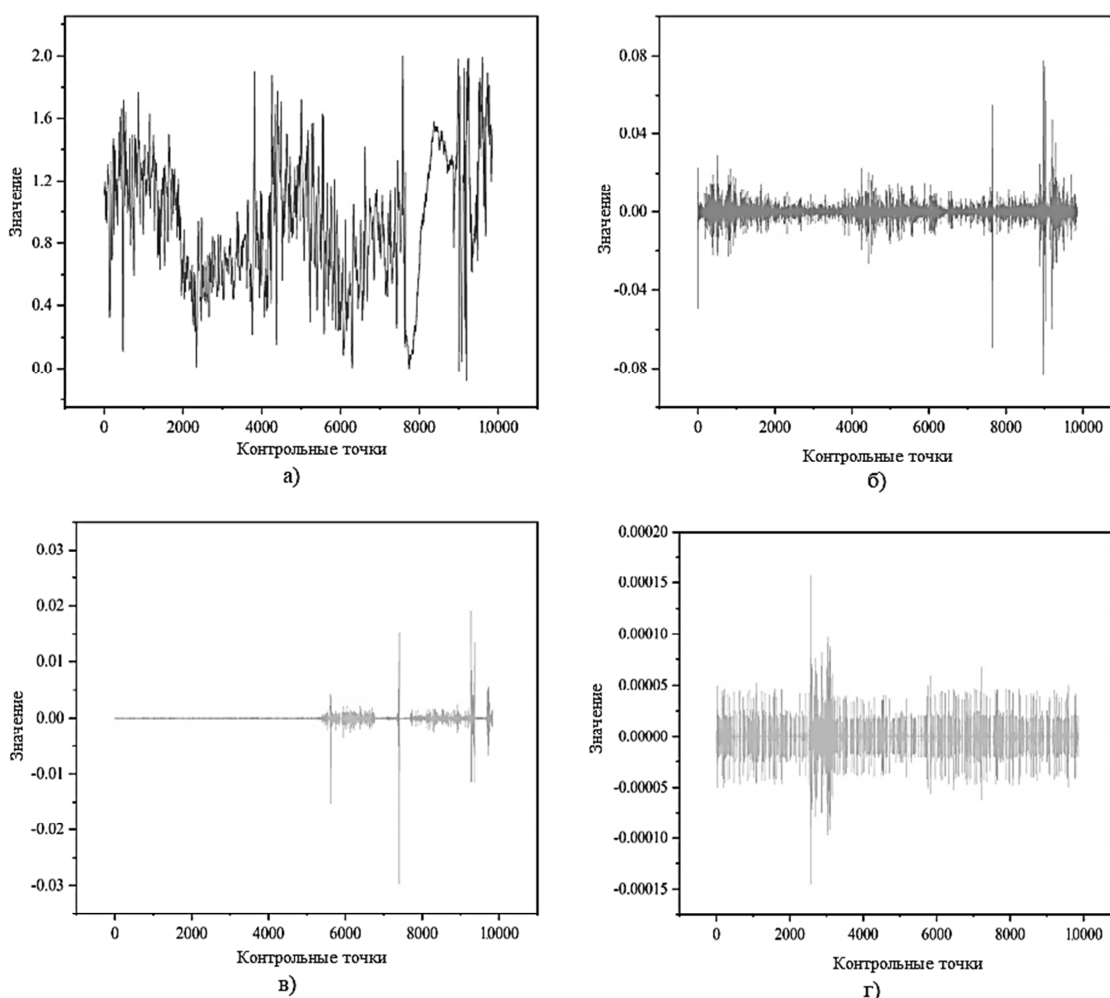


Рис. 6. Примеры графиков вейвлет-разложения

На рис. 6 видно, что исходные данные делятся на высокочастотные и низкочастотные составляющие путем вейвлет-разложения. Высокочастотная составляющая малой амплитуды аналогична гауссову сигналу и содержит менее ценную информацию, которую можно рассматривать как шум, содержащийся в исход-

ных данных. С другой стороны, низкочастотный компонент содержит почти все характеристики и информацию о изменении данных, что делает их чистыми. Кроме того, по мере увеличения количества слоев разделения предельное значение высокочастотной составляющей шума становится все меньше и меньше, а это

означает, что эффект шумоподавления увеличивается с увеличением слоев разделения.

### Заключение

Предложен усовершенствованный метод устранения помех на изображении с использованием вейвлет-преобразования и нейронной сети. Данный метод использует дополнительную информацию между различными поддиапазонами для прогнозирования уровня и распределения шума.

Вейвлет-анализ обеспечивает частотно-временное представление, более полно отражающее внутренние характеристики изображений, и упрощает изучение изображения. В связи с этим результаты моделирования показали, что использование предложенной вейвлетной глубокой нейронной сети (DNN) в качестве предварительной процедуры для повышения производительности классификации изображений и обработки перспективно.

### Литература

1. Seismic random noise reduction using adaptive

threshold combined scale and directional characteristics of shearlet transform / J. Liu, Y. Gu, Y. Chou, J. Gu // *IEEE Geosci. Remote Sens. Lett.* 2019. No. 17. PP.1637–1641.

2. Weighted feature fusion of convolutional neural network and graph attention network for hyperspectral image classification / Dong, Y.; Liu, Q.; Du, B.; Zhang, L. // *IEEE Trans. Image Process.* 2022. No. 31. PP.1559–1572.

3. Ромашенко М.А., Чирков О.Н., Чураков П.П. Эффективный алгоритм оценки канала радиосвязи с пространственной модуляцией // *Радиотехника.* 2021. Т. 85, № 6. С. 52-56.

4. Unsupervised Deep Learning for Single-Channel Earthquake Data Denoising and Its Applications in Event Detection and Fully Automatic Location. *IEEE Trans. Geosci. / O.M. Saad, Y.F. Chen, A. Savvaidis, W. Chen, F.X. Zhang, Y.K. Chen // Remote Sens.* 2022. No. 60. PP.1–10.

5. Башкиров А.В., Хорошайлова М.В., Демихова А.С. Оптимизация системы передачи информации от беспилотного летательного аппарата и повышение пропускной способности канала связи // *Вестник Воронежского института МВД России.* 2023. № 4. С. 140-148.

6. Башкиров А.В., Хорошайлова М.В., Демихова А.С. Методика предварительного кодирования для системы беспилотных летательных аппаратов // *Вестник Воронежского государственного технического университета.* 2023. Т. 19. № 5. С. 106-114.

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 28.06.2024; принята к публикации 26.08.2024

### 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: orcid.org/0000-0001-9167-9538

**Кузнецов Анатолий Васильевич** – канд. техн. наук, генеральный директор АО «ВЦКБ «Полюс» (394019, Россия, г. Воронеж, ул. Краснодарская, 16Б), e-mail: kivr@vorstu.ru

**Демихова Алеся Сергеевна** – аспирант, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия октября, 84), e-mail: kivr@vorstu.ru, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2948-3240

## THE TECHNIQUE OF NOISE SUPPRESSION IN THE IMAGE OF UNMANNED VEHICLES AIRCRAFT USING THE WAVELET TRANSFORM AND NEURAL NETWORK

M.V. Khoroshailova<sup>1</sup>, A.V. Kuznetsov<sup>2</sup>, A.S. Demikhova<sup>1</sup>

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

<sup>2</sup>JSC "VTsKB "Polus", Voronezh, Russia, Voronezh, Russia

**Abstract:** this article proposes an improved method for noise reduction of a two-dimensional image based on wavelet transform and a convolutional neural network, which allows suppressing random noise data generated by external or internal factors, reducing the sharpness of images from unmanned aerial vehicles (UAVs). The actual signal differs from the noise after the wavelet transform and the transformed signal serves as input data to the neural network. A deep neural network is used to directly study the noise characteristics in an image associated with the wavelet domain, which allows accurate and adaptive assessment of the noise level and distribution. A convolutional neural network removes noise from a signal using a pure signal, which it uses as a reference as marked data. The resulting noise-carrying images are decomposed using 2D wavelets, ranking the decomposed high-frequency and low-frequency coefficients to form a dataset. The simulation results show that the proposed method provides higher noise reduction performance in terms of peak signal-to-noise ratio and RMS error compared with methods using only neural networks. The analysis of the influence of the number of layers of a convolutional neural network on the efficiency of noise removal by a neural network based on a wavelet transform is presented

**Key words:** wavelet transform, noise reduction, random noise, two-dimensional image, neural network, high-frequency and low-frequency coefficients

**Acknowledgements:** the work was carried out with the support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (project no. FZGM-2024-0006)

### References

1. Liu J., Gu Y., Chou Y., Gu, J. “Seismic random noise reduction using adaptive threshold combined scale and directional characteristics of shearlet transform”, *IEEE Geosci. Remote Sens. Lett.*, 2019, no. 17, pp. 1637–1641.
2. Dong Y., Liu Q., Du B., Zhang L. “Weighted feature fusion of convolutional neural network and graph attention network for hyperspectral image classification”, *IEEE Trans. Image Process*, 2022, no. 31, pp. 1559–1572.
3. Romashchenko M.A., Chirkov O.N., Churakov P.P. “An effective algorithm for evaluating a radio communication channel with spatial modulation”, *Radio Engineering (Radiotekhnika)*, 2021, vol. 85, no. 6, pp. 52-56.
4. Saad O.M., Chen Y.F., Savvaidis A., Chen W., Zhang F.X., Chen Y.K. “Unsupervised Deep Learning for Single-Channel Earthquake Data Denoising and Its Applications in Event Detection and Fully Automatic Location”, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 2022, no. 60, pp. 1–10.
5. Bashkirov A.V., Khoroshailova M.V., Demikhova A.S. “Optimization of the information transmission system from an unmanned aerial vehicle and increasing the bandwidth of the communication channel”, *The Bulletin of Voronezh Institute of the Ministry of Internal Affairs of Russia (Vestnik Voronezhskogo instituta MVD Rossii)*, 2023, no. 4, pp. 140-148.
6. Bashkirov A.V., Khoroshailova M.V., Demikhova A.S. “The method of pre-coding for a system of unmanned aerial vehicles”, *The Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2023, vol. 19, no. 5, pp. 106-114.
7. Khoroshailova M.V. “Channel coding architecture based on FPGA for 5G wireless network using high-level synthesis”, *The Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2018, vol. 14, no. 2, pp. 99-105.

Submitted 28.06.2024; revised 26.08.2024

### Information about the authors

**Marina V. Horoshailova** – Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394026, Russia), e-mail: pmv2205@mail.ru, ORCID: orcid.org/0000-0001-9167-9538

**Anatoly V. Kuznetsov** – Cand. Sc. (Technical), General Director of JSC "VTsKB "Polus", Voronezh, Russia, (16B Krasnodonskaya str., Voronezh, 394019, Russia), e-mail: kivr@vorstu.ru

**Alesya S. Demikhova** – Postgraduate Student, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394026, Russia), e-mail: kivr@vorstu.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2948-3240>



## ПРОГРАММНО-АППАРАТНЫЙ КОМПЛЕКС ОБНАРУЖЕНИЯ И ИДЕНТИФИКАЦИИ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

В.Д. Мартынюк, Д.А. Рыбников, А.И. Сукачев, Е.А. Сукачева

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

**Аннотация:** представлена разработка программно-аппаратного комплекса обнаружения и идентификации беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). Парадигма использования таких устройств внедряется все больше и больше во все сферы общественной жизнедеятельности. Именно поэтому такие программно-аппаратные комплексы необходимы для эффективного выявления угрозы, которую может предоставить БПЛА. В статье рассмотрен акустический метод обнаружения дронов, а именно разработка микрофонной решетки на основе высокочувствительных цифровых микрофонов модели INMP441, в сочетании с использованием искусственного интеллекта. Применение систем на основе акустического метода обнаружения позволяет выявлять БПЛА даже в режиме радиомолчания, причем с большей скоростью обнаружения в отличие от радиолокационного и радиотехнического методов контроля. В статье также рассмотрены плюсы и минусы акустического метода контроля. Для разработки системы использовались: ПЛИС (программируемая логическая интегральная схема) модели ZYNQ 7010, микрофонная решетка, фреймворк Qt и сетевой протокол TCP/IP. В заключении было выявлено, что данный программно-аппаратный комплекс позволяет решить проблему эффективного обнаружения БПЛА, а также способен внедряться в уже имеющиеся крупные охраняемые системы как отдельный модуль.

**Ключевые слова:** беспилотный летательный аппарат, акустический метод обнаружения, идентификация дронов

**Благодарности:** работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № FZGM-2024-0006)

### Введение

В настоящее время парадигма использования беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) внедряется во все сферы общественной жизнедеятельности все больше и больше. В связи с этим возникает проблема защиты частных территорий от использования БПЛА потенциальными нарушителями. Например, в связи с СВО, все больше и больше поступают предупреждения об угрозе атаки БПЛА.[1] Некоторые из них добиваются до своей цели назначения, неся за собой разрушительные последствия. Чему свидетельствует атака БПЛА в городе Москве, а именно 30 мая 2024 года один из трех беспилотников попал в жилой дом на улице Атласова. В тот же день несколько БПЛА попали в жилой дом на Ленинском проспекте в Москве. Атака БПЛА бизнес-центра на улице Лихачева, города Москва, 24 июля 2023 года. Падение двух беспилотников 26 мая 2023 года в одном из районов Краснодара. Пожар площадью двух тысяч «квадратов» утром 29 апреля 2023 года в городе Севастополе из-за атаки беспилотников. Атака беспилотниками Псковской области 30 августа 2023 года.

Вышеперечисленные последствия связаны с тем, что большинство БПЛА малогабаритны, а также состоят из композитных материалов. Некоторые из них даже способны осуществлять

полет в режиме радиомолчания, что способствует затруднительным применения метода радиолокации для их обнаружения. В связи с этим возникает необходимость разработать систему, которая позволила бы эффективно обнаружить и идентифицировать такого рода устройства.

В статье рассматривается разработанный программно-аппаратный комплекс для мониторинга воздушного пространства. Работа системы основана на акустическом методе обнаружения БПЛА. То есть, прием и обработка издаваемого двигателем или винтами дрона, после чего идентификация устройства. Приемом и обработкой сигнала будет заниматься аппаратный блок, состоящий из ПЛИС и микрофонной решетки. Идентификация устройства происходит посредством программного модуля, который состоит из нейро-модуля и программного обеспечения для оператора.

Плюсами акустического метода являются:

- скорость обнаружения
- возможность комбинирования с другими методами обнаружения
- дешевизна использования
- простота эксплуатации

Минусами такого метода являются:

Ограниченность расположения на местности. Так как звуковые помехи окружающей среды могут мешать системе правильно идентифицировать БПЛА.

Структурная схема работы программно-аппаратного комплекса представлена на рис. 1.

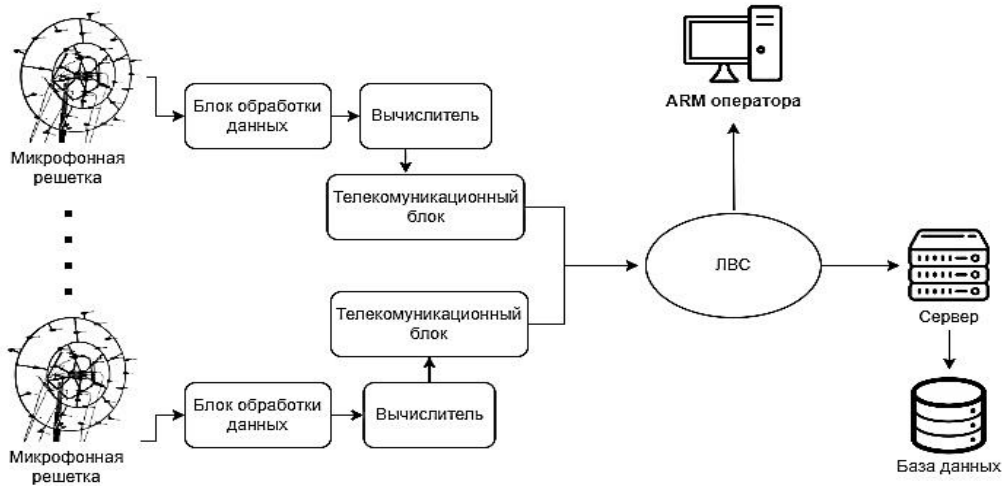


Рис. 1. Структурная схема программно-аппаратного комплекса

### Аппаратный блок

Основой этого блока является ПЛИС фирмы Xilinx – Zynq 7010 (рис. 3) и микрофонная решетка, состоящая из микрофонов INMP441 (рис. 4). Выбор разработки именно микрофонной решетки связан с увеличением расстояния приема сигнала, возможностью формирования определенной направленности звукового сигнала, а также возможностью более эффективного подавления нестационарных шумов, в отличие от одно микрофонных систем [3]. Также при проектировании решетки было принято решение выбрать модель DAS, которая предполагает фиксированное количество микрофонов, с заранее известными и одинаковыми расстояниями между ними [2]. Сама модель представлена на рис. 2. Выбор микрофонов INMP441 основывается на том, что они являются цифровыми MEMS (микро электромеханические системы) устройствами. Структура микрофона представлена на рис. 5.

Чувствительность микрофонов составляет -26 дБ, соотношение сигнал/шум 61 дБ, а диапазон частот от 60 Гц до 15 кГц.

Связаны микрофоны с использованием интерфейса I<sup>2</sup>S – последовательный интерфейс передачи данных, который во многом схож с SPI.

Обобщенная структура программы под ПЛИС представлена на рис. 6.

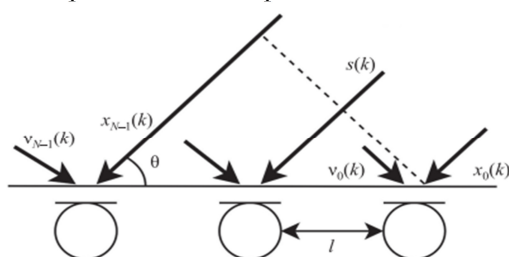


Рис. 2. Модель линейной микрофонной решетки

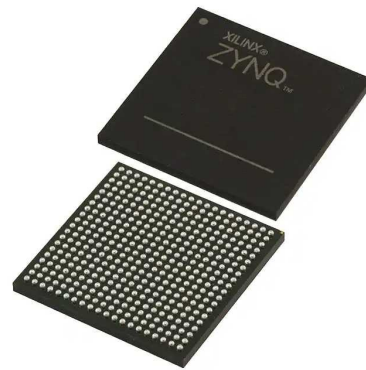


Рис. 3. Zynq 7010



Рис. 4. Микрофон INMP441

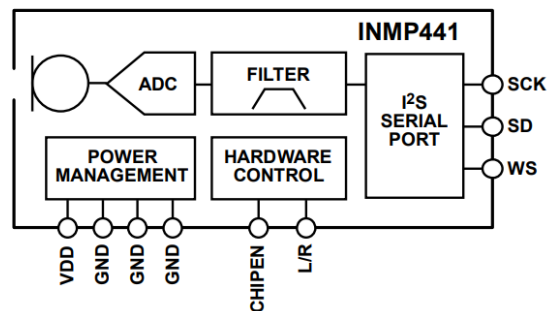


Рис. 5. Структурная схема INMP441

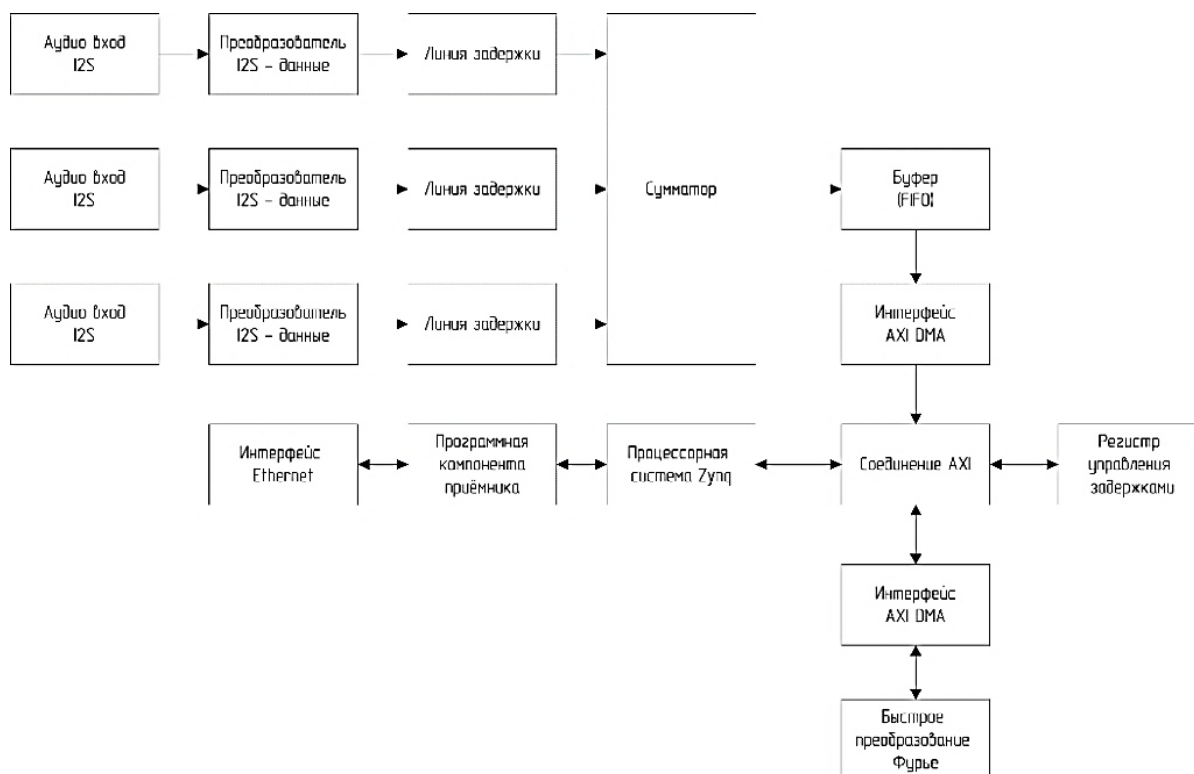


Рис. 6. Обобщенная структурная схема программы под ПЛИС

Первоначально сигнал с каждого микрофона попадает в аудио вход I<sup>2</sup>S. После чего данные преобразовываются и отправляются на линию задержки. Как только все сигналы прошли эти этапы они суммируются и попадают в буфер. Из этого буфера данные проходят обработку с использованием DMA. После чего ПЛИС с использованием БПФ (быстрое преобразование Фурье), размером 1024 точки, вычисляет спектр сигнала и отправляет его на серверную часть системы через Ethernet.

### Программный блок

Как упоминалось ранее, данный блок состоит из нейро-модуля и программного обеспечения для оператора. Рассмотрим подробнее ПО для оператора.

Для того чтобы обезопасить систему от возможного проникновения в нее потенциального нарушителя, было принято решение предоставлять доступ посредством ввода уникального кода сотрудника, который формируется на этапе регистрации пользователя и ПИН кода, причем размер строго ограничен минимальным (не менее восьми) и максимальным (не более десяти) количеством символов (рис. 7, рис. 8).

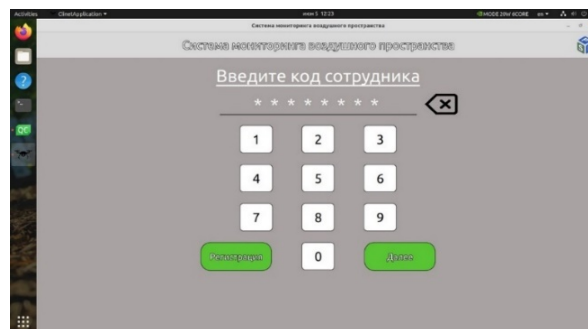


Рис. 7. Интерфейс ввода уникального кода сотрудника

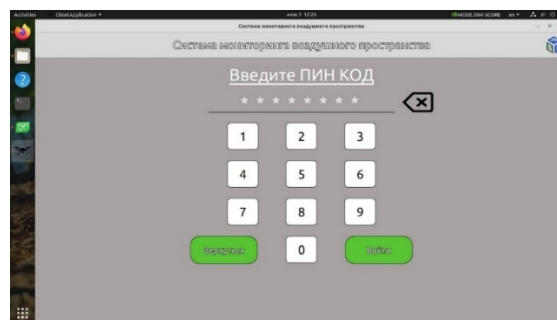


Рис. 8. Интерфейс ввода ПИН кода сотрудника

При неудачной попытке входа для пользователя отображается предупреждение, что введенные данные неверны (рис. 9). Причем количество попыток на ввод ограничено, не более трех. В случае превышения этого количества у пользователя еще имеется шанс попасть в си-

стему, посредством ввода уникального кода администратора (рис. 10).

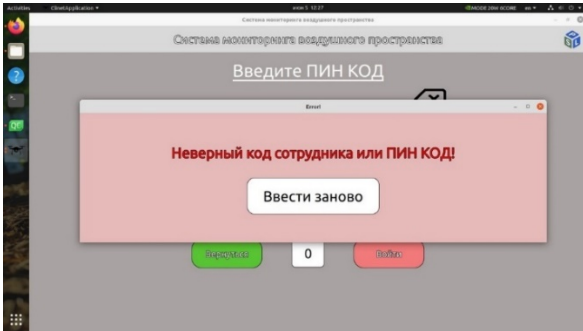


Рис. 9. Интерфейс ошибки введенных данных пользователя

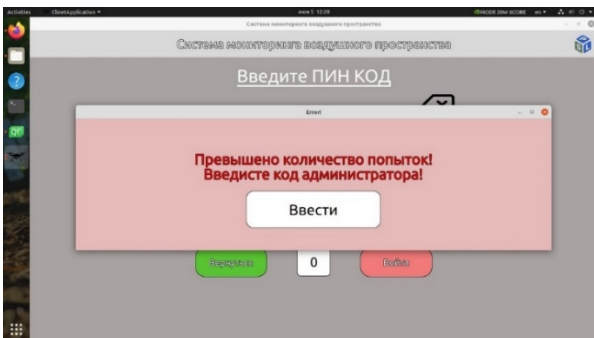


Рис. 10. Интерфейс превышения количества предоставленных попыток

Если же оператор ввел неверный код администратора, то вся база данных о сотрудниках полностью уничтожается и доступ к системе перекрыт полностью.

Если же у оператора нет аккаунта в системе, он может свободно в ней зарегистрироваться, посредством ввода нового кола сотрудника и ПИН кода. Прежде чем данные записать в базу данных они проходят этап хеширования, дабы также обезопасить систему в случае получения данных потенциальным нарушителем.

Если оператор успешно прошел этап аутентификации и авторизации, то он попадает дальше на главный интерфейс ПО (рис. 11).

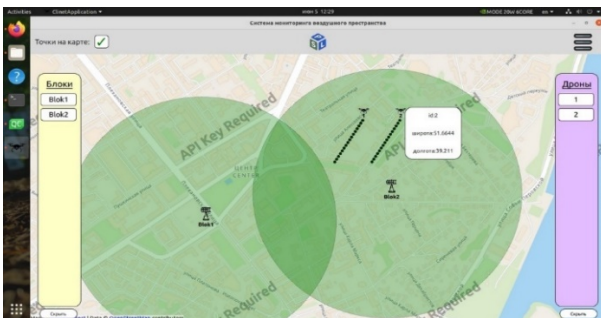


Рис. 11. Основной интерфейс программного обеспечения для администратора

Оператору предоставляется карта местности, на которой отображается текущее расположение аппаратных блоков системы, точки обнаружения БПЛА и само расположение дрона в режиме реального времени. По краям экрана располагаются два списка – это список дронов и список аппаратных блоков.

Представим ситуацию, что оператору необходимо быстро найти, где располагается тот или иной дрон. Благодаря элементам списка он может сделать это, а именно по нажатию на айди дрона карта центрируется относительно него. Тем самым оператор получает практически моментальный поиск по всем элементам карты. Также основной интерфейс обладает функционалом отображения подробной информации о каждом дроне, т. е. по нажатию появляется всплывающее окно с описанием дополнительной информации о конкретном БПЛА.

Представим такую ситуацию, что элементов на карте становится очень много, а следовательно, и точек обнаружения становится очень много. В связи с этим становится трудно понимать ситуацию на карте. Именно поэтому в основной интерфейс была добавлена возможность скрытия точек обнаружения.

В программном обеспечении также предоставляется функционал просмотра истории полетов БПЛА (рис. 12). Это необходимо в случае анализа поведения БПЛА, прогнозирования дальнейшего действия дронов, а также выявления закономерностей.

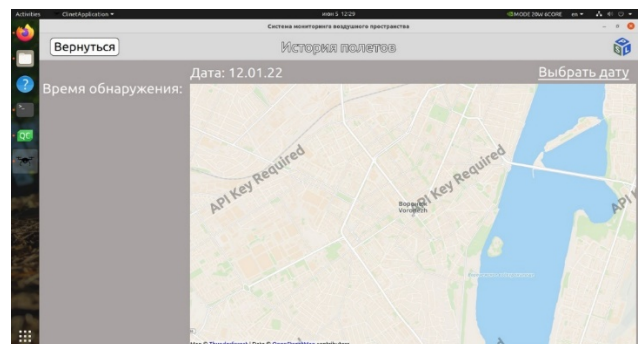


Рис. 12. Интерфейс просмотра истории полетов БПЛА

Для оператора слева будет предоставляться список времен, в которые были зафиксированы какие-либо БПЛА. Но для того, чтобы отобразился список необходимо выбрать дату. По нажатию на кнопку «Выбрать дату» появляется календарь, в котором пользователь выбирает интересующего его дату.



## Нейро-модуль и серверная часть

Идентификация БПЛА осуществляется посредством использования нейронной сети. Для ее разработки используется язык программирования Python и библиотека глубокого машинного обучения PyTorch. Обучение нейронной сети осуществляется с учителем. То есть на каждый запрос есть заранее подготовленный ответ. Но для того, чтобы начать обучение необходимо сформировать датасет. В связи с этим было разработано программное обеспечение для его разметки, которое также выступает как серверная часть системы (рис. 13, рис. 14).

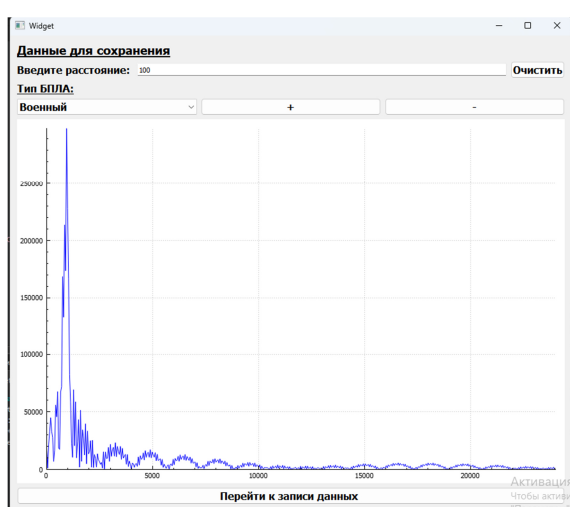


Рис. 13. Интерфейс отображения данных, пришедших с аппаратного блока системы

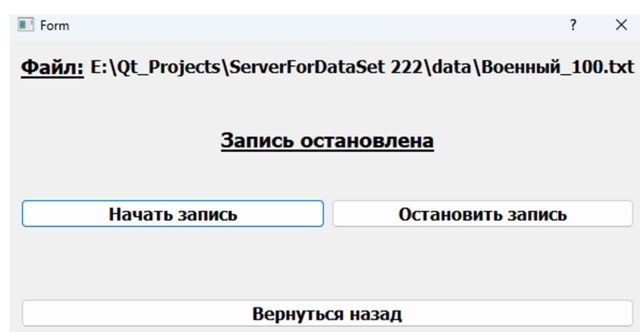


Рис. 14. Интерфейс сохранения данных

Данное программное обеспечение подключается к аппаратному блоку, посредством сетевого TCP/IP протокола. После успешного подключения данные в виде массива байт (QByteArray) попадают в одиночный класс менеджер (ServerManager). Задачей этого класса является «передача прав владения» данными нужным классам. Это сделано в связи с тем, что с аппаратного блока приходит большой поток данных, и копирование их в каждый класс ПО приведет к

быстрому переполнению памяти. Эта проблема решается использованием метода `std::move()` стандартной библиотеки STL C++. Этот метод и отвечает за «передачу прав» владения данным определенным классам системы, посредством изменения указателя одного класса на указатель другого класса и обнуления данных под первым из них. Проблемой такой реализации является невозможность «передавать права» одновременно двум или более классам. Именно поэтому и был разработан класс менеджер, который решает каком из классов в данный момент времени необходимо «передать права владения».

По умолчанию права передаются в класс Widget, который отвечает за отображение данных, полученных с аппаратного блока в виде графика. Как только оператор убедился в корректности приходящих данных, он вводит расстояние от микрофонной решетки до самого дрона, выбирает его тип и нажимает на кнопку «Перейти к записи данных». В момент нажатия класс менеджер «передает права владения» в класс `SaveDataToFileClass`, который отвечает за сохранения данных поступающий с аппаратного блока. Сохранение происходит посредством записи в файл. Название файла, при этом, формируется посредством введенного оператором расстояния и выбранного типа БПЛА. Например, в показанном на рис. 9 случае, файл будет назван «Военный\_100». После того как пользователь убедился в корректности названия файла, он нажимает на кнопку «Начать запись». Начинается потоковая запись в файл при помощи метода `write()`, класса `QFile`, которая будет продолжаться до тех пор, пока оператор не нажмет на кнопку «Остановить запись». Именно так и происходит формирование датасета для дальнейшего обучения нейронной сети.

## Заключение

Данный программно-аппаратный комплекс позволяет решить проблему эффективного обнаружения и идентификации беспилотных летательных аппаратов посредством использования акустического метода обнаружения с использованием нейронной сети для идентификации типа дрона. Такая система позволяет включать ее в уже существующие крупные системы обнаружения и защиты частных территорий.

## Литература

1. Кузьменко, Р. В. Проблемные ситуации открытых систем и пути их разрешения / Р. В. Кузьменко, А. И. Сукачев // Актуальные проблемы деятельности подразделений



уголовно-исполнительной системы: сб. материалов Всерос. науч.-практ. конф. Воронеж: Научная книга, ФКОУ ВО Воронежский институт ФСИН России, 2023. С. 352-356.

2. Глухов А. А. Сравнение алгоритмов формирования диаграмм направленности микрофонных решеток в среде MATLAB // Научно-технический вестник информа-

ционных технологий, механики и оптики. 2020. Т. 20. № 3. С. 455-460.

3. Столбов М. Б. Применение микрофонных решеток для дистанционного сбора речевой информации // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2015. Т. 15. № 3. С. 661-675.

Поступила 16.07.2024; принята к публикации 26.08.2024

#### Информация об авторах

**Мартынюк Владислав Дмитриевич** – студент, инженер, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), тел.: +7(920)219-63-53, e-mail: mag.dip@yandex.ru

**Рыбников Дмитрий Александрович** – студент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), тел.: +7(920)219-63-53, e-mail: mag.dip@yandex.ru

**Сукачев Александр Игоревич** – старший преподаватель, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), тел.: +7(920)219-63-53, e-mail: mag.dip@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0238-5579>

**Сукачева Елена Александровна** – ассистент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), тел.: +7(920)219-63-53, e-mail: mag.dip@yandex.ru

## SOFTWARE AND HARDWARE COMPLEX FOR THE DETECTION AND IDENTIFICATION OF UNMANNED AERIAL VEHICLES

V. D. Martynyuk, D.A. Rybnikov, A.I. Sukachev, E.A. Sukacheva

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

**Abstract:** the article presents the development of a software and hardware complex for the detection and identification of unmanned aerial vehicles (UAVs). The paradigm of using such devices is being introduced more and more into all spheres of public life. That is why such software and hardware complexes are necessary to effectively identify the threat that a UAV can provide. The article considers an acoustic method of drone detection, namely the development of a microphone array based on highly sensitive digital microphones of the INMP441 model, combined with the use of artificial intelligence. The use of systems based on the acoustic detection method makes it possible to detect UAVs even in radio silence mode, and with a higher detection rate, unlike radar and radio engineering control methods. The article also discusses the pros and cons of the acoustic control method. To develop the system, we used FPGA (programmable logic integrated circuit) of the ZYNQ 7010 model, microphone array, Qt framework and TCP/IP network protocol. In conclusion, it was revealed that this software and hardware complex allows solving the problem of effective detection of UAVs and is also capable of being integrated into existing large security systems as a separate module

**Key words:** unmanned aerial vehicle, acoustic detection method, drone identification

**Acknowledgments:** The work was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (project no. FZGM-2024-0006)

#### References

1. Kuzmenko R.V., Sukachev A.I. “Problem situations of open systems and ways to resolve them”, *Actual problems of the activities of divisions of the penal system (Aktual'nyye problemy deyatel'nosti podrazdeleniy ugovolno-ispolnitel'noy sistemy)*, coll. of materials of the All-Russian scientific and practical conference, Voronezh Institute of the Federal Penitentiary Service of Russia, Voronezh, Nauchnaya kniga, 2023, pp. 352-356.

2. Glukhov A.A. “Comparison of beamforming algorithms for microphone arrays in Matlab”, *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2020, vol. 20, no. 3, pp. 455–460. doi: 10.17586/2226-1494-2020-20-3-455-460

3. Stolbov M.B. “Application of microphone arrays for distant speech capture”, *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2015, vol.15, no. 4, pp. 661–675.

Submitted 16.07.2024; revised 26.08.2024

#### Information about the authors

**Vladislav D. Martynyuk** – Student, Engineer, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), tel.: +7(920)219-63-53, e-mail: mag.dip@yandex.ru

**Dmitry A. Rybnikov** - Student, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), tel.: +7(920)219-63-53, e-mail: mag.dip@yandex.ru

**Alexander I. Sukachev** – Senior Lecturer, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), tel.: +7(920)219-63-53, e-mail: mag.dip@yandex.ru (ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0238-5579>)

**Elena A. Sukacheva** – Assistant, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), tel.: +7(920)219-63-53, e-mail: mag.dip@yandex.ru

## СОГЛАСУЮЩАЯ СИСТЕМА УКРОЧЕННОЙ АНТЕННЫ КОРОТКОВОЛНОВОГО ДИАПАЗОНА

О.И. Бирюков, Н.А. Гилев, Ю.О. Филимонова, К.А. Лайко

Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск, Россия

**Аннотация:** рассмотрен способ согласования укороченного варианта штыревой вертикальной несимметричной вибраторной антенны, работающей в коротковолновом диапазоне. Длина излучающей части укороченной антенны составляет 0,1 длины волны. Исследования происходили в относительной полосе частот 20% в диапазоне от 3,6 до 4,4 МГц. Согласование проводилось на частоте 4 МГц. Измерены активная и реактивная части входного сопротивления антенны. Для построения математической модели проведена аппроксимация входного сопротивления. Аппроксимация активной части волнового сопротивления описана с помощью функции косинуса на пьедестале, реактивная часть, имеющая ёмкостной характер — с помощью гиперболической функции. В согласующей системе рассмотрены варианты использования отрезков коаксиального кабеля с различным волновым сопротивлением. В качестве согласующего устройства использовались трансформирующие свойства коаксиального кабеля и подключаемый к нему параллельно короткозамкнутый шлейф. Согласование проводилось с волновым сопротивлением фидера и приёмопередающего устройства 50 Ом. Проведена оптимизация исходных стандартных волновых сопротивлений коаксиального кабеля 50 и 75 Ом по критериям минимальной длины и максимальной полосы рабочих частот антенны. Построены графики коэффициента стоячей волны для различных вариантов согласующих систем. Проведён сравнительный анализ результатов аппроксимации

**Ключевые слова:** несимметричный вибратор, согласование, коаксиальный кабель, волновое сопротивление, коротковолновый диапазон

### Введение

Известны конструкции несимметричных вибраторных антенн или, как их ещё называют, штыревых антенн [1], [2]. Преимущества данного типа антенн — круговая равномерная диаграмма направленности в азимутальной плоскости и направленная в угломестной [3]. В зависимости от особенности конструкции антенны максимум излучения направлен под небольшим углом к горизонту [4]. К преимуществам можно отнести уменьшение линейного размера в 2 раза по сравнению с симметричными вибраторными антеннами, так как роль второго плеча заменяет Земля, а излучающая система состоит из одного плеча вибратора. Также недостатком симметричного вибратора является неравномерная диаграмма направленности в азимутальной и угломестной плоскости, что не позволяет обеспечить устойчивую связь во всех направлениях [5]. Так как Земля в данном диапазоне обладает свойствами схожими с металлом и тангенциальная составляющая вектора электрического поля на поверхности Земли близка к нулю, для обеспечения максимальной эффективности излучения симметричный вибратор необходимо располагать в горизон-

тальной плоскости от земной поверхности на высоте четверти длины волны [6]. На низких частотах выполнить данное требование проблематично. Так на частоте 4 МГц высота подъёма антенны составляет около 18 м, что в полевых условиях реализовать практически невозможно. Штыревую антенну устанавливают непосредственно на земную поверхность и, с целью облегчения конструкции, зачастую укорачивают. В связи с этим возникает проблема согласования антенны с волновым сопротивлением приёмопередающего устройства.

Простейший вариант согласующей системы произвольной нагрузки может быть представлен из отрезков коаксиального кабеля с искомыми волновыми сопротивлениями и длинами [7]. Преимущество данного варианта в том, что данная согласующая система, также будет выполнять функции питающего фидера.

В данной работе решена задача оптимизации значений волновых сопротивлений отрезков кабелей согласующей системы и их минимизация по критерию максимальной полосы частот для заданного уровня коэффициента стоячей волны по напряжению (КСВ). В качестве волновых сопротивлений использованы стандартные значения 50 и 75 Ом.

### Система согласования укороченного штыревого вибратора с волновым сопротивлением радиостанции

В данной работе рассматривается укороченный вариант штыревой антенны с высотой излучающей системы 8 м, что на частоте 4 МГц составляет  $0.1\lambda$ , где  $\lambda$  — длина волны. Гибкая система противовесов длиной  $0.25\lambda$ , что соответствует 18 м. Длина 50-омного фидера не ограничена и соответствует волновому сопротивлению радиостанции Ангара-1М, рис. 1.

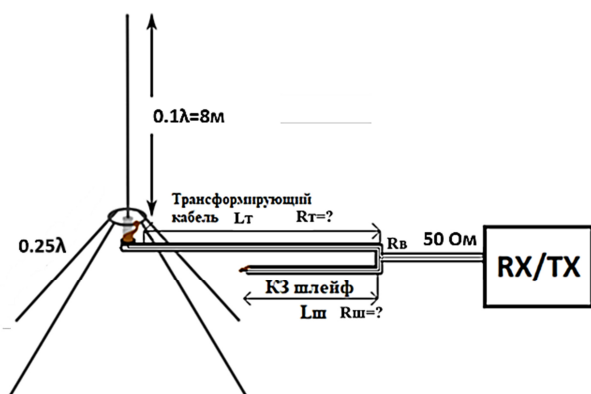


Рис. 1. Схематическое изображение согласующей системы:

$R_t$  — волновое сопротивление трансформирующего кабеля;  $L_t$  — длина трансформирующего кабеля;  $R_{ш}$  — волновое сопротивление короткозамкнутого шлейфа;  $L_{ш}$  — Длина короткозамкнутого шлейфа

В настоящей работе рассмотрены следующие варианты согласующей системы и расчёты с ними.

1. Согласование антенны с помощью 50-омного трансформирующего и 50-омного короткозамкнутого шлейфа.

2. Согласование антенны с помощью 50-омного трансформирующего и 75-омного короткозамкнутого шлейфа.

4. Согласование антенны с помощью 75-омного трансформирующего и 75-омного короткозамкнутого шлейфа.

5. Согласование антенны с помощью 75-омного трансформирующего и 50-омного короткозамкнутого шлейфа.

### Экспериментальные характеристики входного сопротивления укороченной штыревой антенны

Проведены экспериментальные исследования сопротивления предложенной конструкции антенны — длиной  $0.1\lambda$ , на частоте 4 МГц, рис.

1. Исследования проводились с помощью измерительных приборов OBZOR Planar TR 1300/1 и измерителя комплексных коэффициентов передачи Р4-11, результаты представлены на рис. 2.

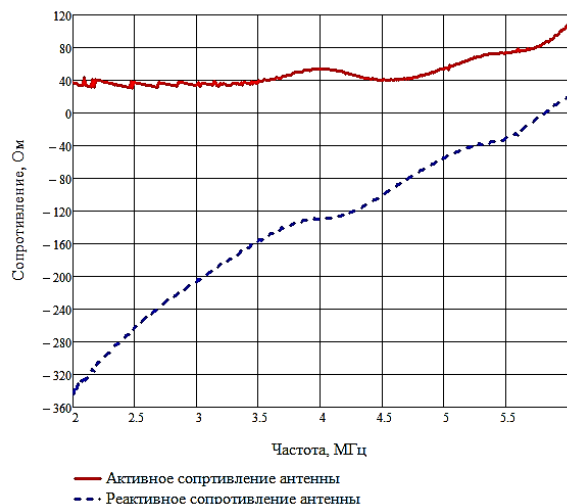


Рис. 2. График входного сопротивления укороченной штыревой антенны в полосе частот 2-6 МГц

### Аппроксимация входного сопротивления

Для решения задачи согласования в заданной полосе частот, требуется математическое описание входного сопротивления. Используя экспериментальные данные, проведем аппроксимацию входного сопротивления.

Для аппроксимации активной составляющей использована функция косинуса на пьедестале (1). Аппроксимация проведена в полосе частот 20%. Погрешность аппроксимации для активной части сопротивления в заданной полосе частот не превышает  $\pm 2\%$ , рис. 3.

$$R(f) = 47 + 6.9 \cos\left(\frac{2\pi}{10^6}(f - 4 \cdot 10^6)\right) \quad (1)$$

где  $R(f)$  — активное сопротивление в полосе частот;

$f$  — текущая частота.

Для аппроксимации реактивной части входного сопротивления антенны использована формула ёмкостной зависимости.

Для нахождения ёмкости аппроксимирующей функции воспользовались формулой (2).

$$C = \frac{1}{2\pi \cdot f_0 \cdot X} \quad (2)$$

где  $X$  — реактивное сопротивление на средней частоте;

$f_0$  — средняя частота.

Результатирующие аппроксимированное выражение входного сопротивления укороченной антенны имеет вид (3)

$$\dot{Z}_{ex}(f) = R(f) + j \frac{1}{2\pi \cdot C \cdot f} \quad (3)$$

Отличие аппроксимирующей характеристики (3) от экспериментальной в той же полосе частот не превышает  $\pm 3\%$ , рис. 4.

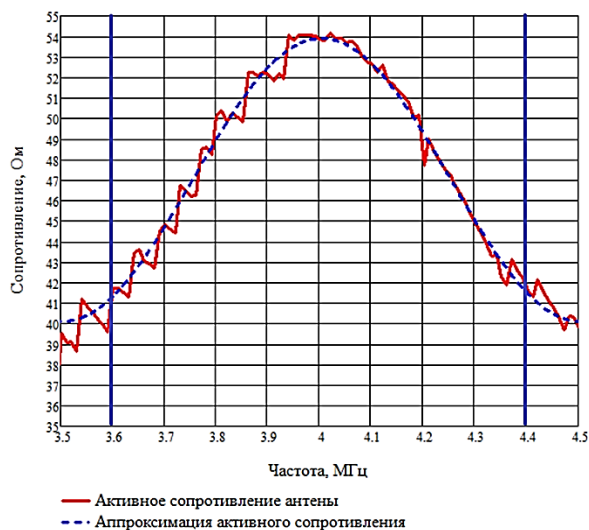


Рис. 3. График сравнения входного активного и аппроксимированного сопротивления антенны в исследуемой полосе частот 20%

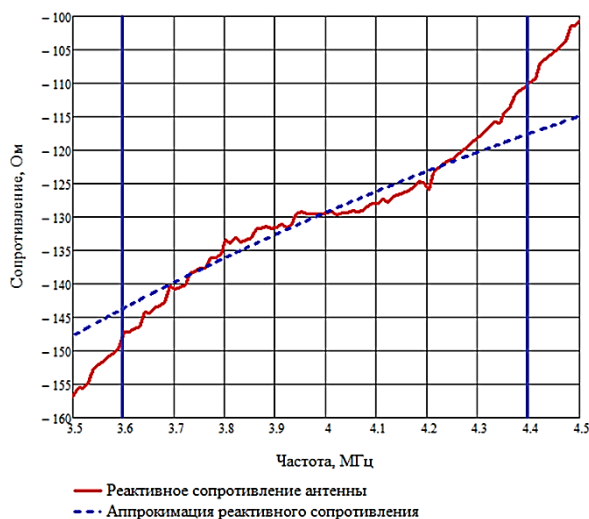


Рис. 4. График сравнения входного реактивного и аппроксимированного сопротивления антенны в исследуемой полосе частот

Для полученной аппроксимации входного сопротивления антенны проведены расчеты коэффициента отражения (4) и КСВ (5) в заданной полосе частот:

$$\dot{\rho}(f) = \frac{\dot{Z}_{ex}(f) - R_P}{\dot{Z}_{ex}(f) + R_P} \quad (4)$$

$$КСВ(f) = \frac{1 + |\dot{\rho}(f)|}{1 - |\dot{\rho}(f)|} \quad (5)$$

где  $\dot{\rho}(f)$  — комплексный коэффициент отражения;

$R_P$  — волновое сопротивление на выходе радиостанции.

Зависимость КСВ, полученного расчётным и экспериментальным путём, в полосе частот показана, рис. 5.

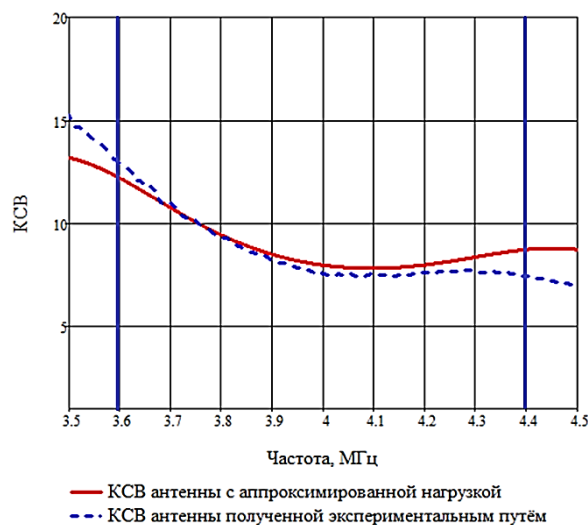


Рис. 5. График сравнения КСВ антенны без согласования, аппроксимированного входным сопротивлением в исследуемой полосе частот

Сравнительный анализ показывает, что КСВ в исследуемой полосе частот отличается не более чем на 6%, рис. 5.

### Согласование с помощью 50-омного трансформирующего и 50-омного короткозамкнутого шлейфа

Используя трансформирующие свойства коаксиального кабеля, найдено место подключения ( $l_T$ ) короткозамкнутого (КЗ) шлейфа. В данном сечении реальная часть нормированного аппроксимированного сопротивления равна 1, рис. 6. Тогда нормированная проводимость трансформации кабеля находится по формуле (6).

$$Y'(l) = \frac{1 + j \left( \frac{R + jX}{R_B} \right) tg(\beta l)}{\frac{R + jX}{R_B} + j \cdot tg(\beta l)} \quad (6)$$

$$\beta = \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{\varepsilon}, \quad (7)$$

где  $R_B$  — волновое сопротивление кабеля;  
 $\beta$  — волновое число;  
 $\lambda$  — длина волны.  
 $\varepsilon$  — диэлектрическая проницаемость диэлектрика, которым заполнен коаксиальный кабель.

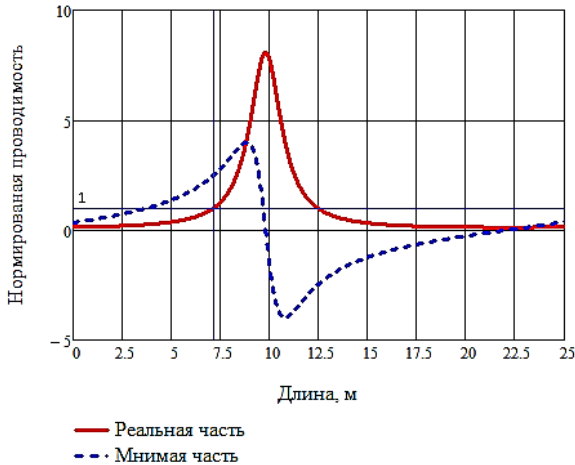


Рис. 6. График нормированной проводимости 50-омного кабеля в зависимости от длины трансформирующего отрезка кабеля

Из графика следует, что для 50-омного коаксиального кабеля трансформирующего отрезка составляет 7.2 м.

Для компенсации паразитной реактивной составляющей на выходе трансформирующего отрезка, которая находится как мнимая составляющая нормированной проводимости ( $Y'(l)$ ), параллельно подключаем КЗ шлейф в данном сечении  $l_T$ .

Длина КЗ шлейфа находится по формуле (8).

$$l_{III} = \frac{\text{arccctg}\left(\text{Im}(Y'(l)) \frac{R_{III}}{R_T}\right)}{\beta}, \quad (8)$$

где  $R_{III}$  — волновое сопротивление КЗ шлейфа;  
 $R_T$  — волновое сопротивление трансформирующего кабеля.

Длина 50-омного КЗ шлейфа составила 2.8 м. Результирующее сопротивление при согласовании в полосе частот находится по формуле (9).

$$Z'_C(f) = \frac{1}{Y'(f) + Y'_{III}(f) \frac{R_T}{R_{III}}}, \quad (9)$$

Используя аналогичный математический аппарат, представленный в пункте 3.1, проведен расчет длин трансформирующего и КЗ кабеля для остальных случаев, результаты представлены в табл. 1.

Таблица 1

Сравнение длин согласующих отрезков кабеля с разным волновым сопротивлением

Трансформирующий кабель		КЗ шлейф	
Волновое сопротивление, Ом	Длина, м	Волновое сопротивление, Ом	Длина, м
50	7,2	50	2,8
50	7,2	75	1,9
75	6,3	75	2,8
75	6,3	50	4

**Сравнительный анализ согласующих систем с разными волновыми сопротивлениями**

Для каждого из рассмотренных вариантов согласования, проведен расчет коэффициента отражения в полосе частот по формуле (10).

$$\rho(f) = \frac{Z'_C(f)R_T - R_B}{Z'_C(f)R_T + R_B}, \quad (10)$$

Подставляя коэффициент отражения в формулу (3), найден КСВ в полосе частот и построен его график рис. 7.



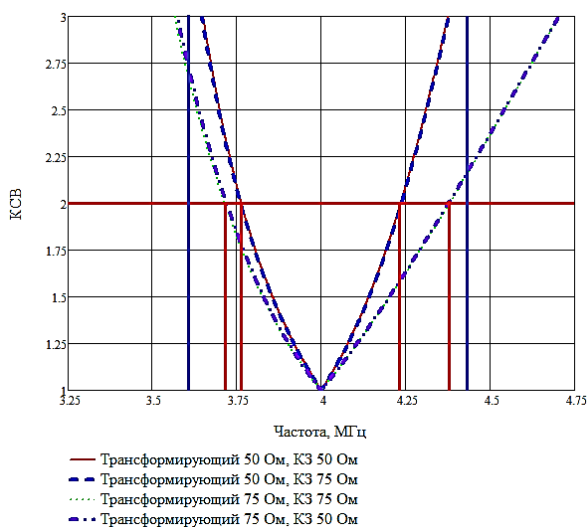


Рис. 7. График сравнения КСВ с различными вариантами согласования в исследуемой полосе частот

Как следует из рис. 7, КЗ шлейф не влияет на ширину полосы частот. Относительная полоса частот по уровню КСВ 2 для 50- и 75-омных трансформирующих кабелей находится по формуле (11)

$$F_{2\%} = \frac{f_{2max} - f_{2min}}{f_{2max} + f_{2min}} \cdot 200\%, \quad (11)$$

где  $f_{2max}$  — максимальная частота по уровню КСВ 2;

$f_{2min}$  — минимальная частота по уровню КСВ 2.

Для 50-омного трансформирующего кабеля относительная полоса диапазона рабочих частот по уровню КСВ 2 составляет 11,3%; для 75-омного — 16,4%, при этом получились меньшие длины согласующих отрезков кабелей.

## Заключение

В работе рассмотрена характеристика входного сопротивления укороченной штыревой антенны. Проведена аппроксимация функции сопротивления антенны в частотном диапазоне 20% с отклонениями не более  $\pm 3\%$ , что соответствует различию расчётного КСВ от измеренного не более  $\pm 6\%$ . Рассмотрены различные варианты согласующих систем укороченной штыревой антенны. Решена задача оптимизации длин отрезков и выбора волнового сопротивления коаксиальных кабелей с использованием различных вариантов согласования. Проведена оценка относительной полосы частот для рассмотренных вариантов.

Результаты исследования позволяют получить оптимальные варианты согласующей системы укороченного штыревого вибратора по критерию максимальной полосы рабочих частот и минимальных длин отрезков коаксиальных кабелей.

## Литература

1. Марков Г.Т., Сазонов Д.М. Антенны. М.: Энергия, 1975. 528 с.
2. Кюн Р. Микроволновые антенны. Л.: Судостроение, 1967. 518 с.
3. Андрусевич Л.К., Ищук А.А., Лайко К.А. Антенны и распространение радиоволн: учебник для вузов. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2006. 393 с.
4. Устройства СВЧ и антенны / Д.И. Воскресенский, В.Л. Гостюхин, В.М. Максимов, Л.И. Пономарев. М., 2006. 376 с.
5. Дробкин А.Л., Зузенко В.Л., Кислов А.Г. Антенно-фидерные устройства. Изд. 2-е, перераб. и доп. М.: Советское радио, 1974. 536 с.
6. Баскаков С.И. Электродинамика и распространение радиоволн. М.: КД Либроком, 2012. 416 с.
7. Сазонов Д.М. Антенны и устройства СВЧ. М.: Высшая школа, 1988. 430 с.

Поступила 16.05.2024; принята к публикации 26.08.2024

## Информация об авторах

**Бирюков Олег Иванович** - студент, Новосибирский государственный технический университет (630073, Россия, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20), тел. (924)714-20-34, e-mail: biryukoff0@yandex.ru

**Гилев Никита Андреевич** - студент, Новосибирский государственный технический университет (630073, Россия, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20), тел. (913)062-12-05, e-mail: nikitagilyov@gmail.com

**Филимонова Юлия Олеговна** - канд. техн. наук, доцент, Новосибирский государственный технический университет (630073, Россия, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20), тел. (383)346-06-33, e-mail: jul7788@mail.ru

**Лайко Константин Алексеевич** - канд. техн. наук, доцент, Новосибирский государственный технический университет (630073, Россия, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20), тел. (383)346-06-33, e-mail: play-byte@mail.ru

## MATCHING SYSTEM OF SHORTENED SHORTWAVE ANTENNA

O.I. Biryukov, N.A. Gilev, Yu.O. Filimonova, K.A. Layko

Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia

**Abstract:** the method of matching of the shortened version of the pin vertical asymmetrical vibrator antenna operating in the short-wave range is considered. The length of the radiating part of the shortened antenna is 0.1 wavelength. The study took place in a relative frequency bandwidth of 20 per cent between 3.6 and 4.4 MHz. The matching was carried out at 4 MHz. The active and reactive parts of the antenna input impedance were measured. An approximation of the input impedance was carried out to build a mathematical model. The approximation of the active part of the wave impedance is described using the pedestal cosine function, the reactive part, which has capacitive character, is described using the hyperbolic function. The use of coaxial cable sections with different wave impedance has been considered in the matching system. The transforming properties of the coaxial cable and a short-circuited loop connected to it in parallel were used as a matching device. The matching was carried out with the wave impedance of the feeder and the receiving and transmitting device of 50 ohms. Optimisation of the initial standard wave impedances of 50- and 75-Ohm coaxial cable was carried out according to the criteria of minimum length and maximum antenna operating frequency bandwidth. Graphs of the standing wave coefficient for different variants of matching systems are plotted. A comparative analysis of the approximation results is carried out.

**Key words:** asymmetrical vibrator, matching, coaxial cable, wave impedance, short-wave range

## References

1. Markov G.T., Sazonov D.M. "Antennas" ("Antenny"), Moscow, Energia, 1975, 528 p.
2. Kuhn R. "Microwave antennas" ("Mikrovolnovyye anteny"), Leningrad, Sudostroenie, 1967, 518 p.
3. Andrushevich L.K., Ishchuk A.A., Laiko K.A. "Antennas and radio wave propagation: textbook for universities" ("Antenny i rasprostraneniye radiovoln: uchebnik dlya vuzov"), Novosibirsk, Novosibirsk, Izd-vo NGTU, 2006, 393 p.
4. Voskresensky D.I., Gostyukhin V.L., Maksimov V.M., Ponomarev L.I. "UHF Devices and Antennas" ("Ustroystva SVCH i anteny"), Moscow, 2006, 376 p.
5. Drabkin A.L., Zuzenko V.L., Kislov A.G. "Antenna-feeder devices. 2nd ed." ("Antenno-fidernyye ustroystva. Izd. 2-ye"), Moscow, Sovetskoye radio, 1974, 536 p.
6. Baskakov S.I. "Electrodynamics and propagation of radio waves" ("Elektrodinamika i rasprostraneniye radiovoln"), Moscow, KD Librokom, 2012, 416 p.
7. Sazonov D.M. "Antennas and microwave devices" ("Antenny i ustroystva SVCH"), Moscow, Vysshaya Shkola, 1988, 430 p.

Submitted 16.05.2024; revised 26.08.2024

## Information about the authors

**Oleg I. Biryukov** - Student, Novosibirsk State Technical University (20 Karla Marksa prosp., Novosibirsk 630073, Russia), tel.: (924)714-20-34, e-mail: biryukoff0@yandex.ru  
**Nikita A. Gilev** - Student, Novosibirsk State Technical University (20 Karla Marksa prosp., Novosibirsk 630073, Russia), tel.: (913)062-12-05, e-mail: nikitagilyov@gmail.com  
**Yulia O. Filimonova** – Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Novosibirsk State Technical University (20 Karla Marksa prosp., Novosibirsk 630073, Russia), tel.: (383)346-06-33, e-mail: jul7788@mail.ru  
**Konstantin A. Laiko** - Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Novosibirsk State Technical University (20 Karla Marksa prosp., Novosibirsk 630073, Russia), tel.: (383)346-06-33, e-mail: play-byte@mail.ru

## ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ФИКСИРУЮЩИХ СТОЕК НА ХАРАКТЕРИСТИКИ АНТЕННЫ НА ОСНОВЕ ВОЗДУШНОЙ ПОДЛОЖКИ

А.В. Ашихмин<sup>1</sup>, Е.А. Ищенко<sup>2</sup>, С.М. Фёдоров<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup>ЗАО «ИРКОС», г. Воронеж, Россия

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

<sup>3</sup>Международный институт компьютерных технологий, г. Воронеж, Россия

**Аннотация:** рассматривается антенна на основе воздушной подложки для реализации помехозащищенного канала передачи данных. Рассматриваемая антенна позволяет обеспечить всерную диаграмму направленности, а также высокий уровень коэффициента направленного действия. Особый акцент в данной работе сделан на возможность фиксации излучающего слоя над заземлением на необходимой высоте, так как этот параметр определяет основные характеристики антенны. Для реализации стоек рассматривались два основных подхода, которые базируются на основе материалов изготовления, таких как диэлектрические материалы или токопроводящие. Проведенное исследование показывает, что применение диэлектрических стоек оказывает минимальное влияние на антенну, что позволяет сохранить основные показатели. Использование же токопроводящих стоек позволяет значительно повысить надежность фиксации антенных элементов, однако стоит учитывать их влияние. Проведенные исследования показали, что ширина таких стоек оказывает наибольшее влияние на характеристики антенны. В статье приводятся характеристики антенны как в идеальном случае, так и при использовании фиксирующих стоек. Дополнительное исследование было проведено для токопроводящих стоек с целью определить влияние их размеров на характеристики направленной патч-антенны на воздушной подложке. Таким образом, были отмечены основные зависимости характеристик антенны от материалов фиксирующих стоек, что является наиболее актуальной и важной задачей при разработке антенн на основе воздушной подложки

**Ключевые слова:** антенна на воздушной подложке, патч-антенна, направленная антенна, всерная диаграмма направленности, крепление антенны

**Благодарности:** работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания "Молодежная лаборатория" № FZGM-2024-0003

### Введение

Применение современных антенных систем для обеспечения помехозащищенной дальней связи требует минимизации потерь, которые возникают в конструкции антенн. Одним из наиболее перспективных методов минимизации потерь в конструкции антенн является использование воздуха в роли диэлектрика, которые применяется для распространения радиоволн [1-7]. На основании конструкции антенн с воздушной подложкой могут быть сформированы антенны с высоким уровнем усиления, высоким согласованием, а также разными типами конструкций, которые могут быть использованы для излучения электромагнитных волн. Типовыми конструкциями таких антенн является патч-антенна на воздушной подложке [1]. Преимуществами таких антенн является их малый вес, простота реализации, малые потери в диэлектриках, однако конструкция, которая представлена в работе [1] применяется с использованием стандартных

диэлектриков, а воздух применяется лишь для отдаления слоя экранирования. Также важно отметить, что авторы не приводят примера того, как антенна может быть закреплена, а данная часть конструкции имеет очень важную роль, так как необходимо обеспечивать верную высоту над подложкой, а также обеспечить достаточную жесткость. Аналогичная конструкция рассматривается в работах [2-4], авторы показывают, что применение антенны с воздушным диэлектриком позволяет улучшить характеристики, однако не приводится примера фиксации слоев на требуемом расстоянии.

Пример конструкций антенн на основе воздушных подложек с учетом влияния, которые будут вносить стойки приводится в работах [5-7]. Все рассматриваемые случаи приводят пример фиксации слоев антенны с использованием проводящих металлических слоев, однако авторы не приводят сравнения с другими случаями, когда в роли стоек могут быть использованы диэлектрические цилиндры или кубики, которые могут быть изготовлены на основе аддитивных технологий. В данной работе рассматривается антенна на основе воздушной подложки для обеспечения высокоста-

бильной помехозащищенной направленной связи, однако особый акцент делается на анализе материалов изготовления фиксирующих стоек, а также их размеров, с учетом влияния на характеристики антенны.

### Конструкция антенны на основе воздушной подложки

В процессе исследования была разработана антенна с диапазоном рабочих частот от 5 до 6 ГГц. Разработанная антенна предназначена для реализации помехозащищенного канала передачи данных, так как обладает высоким уровнем усиления, а также позволяет сформировать веерную диаграмму направленности. На рис. 1 приводится вид антенны, а также ее характеристики в идеальном случае, когда верхний слой антенны расположен в воздухе.

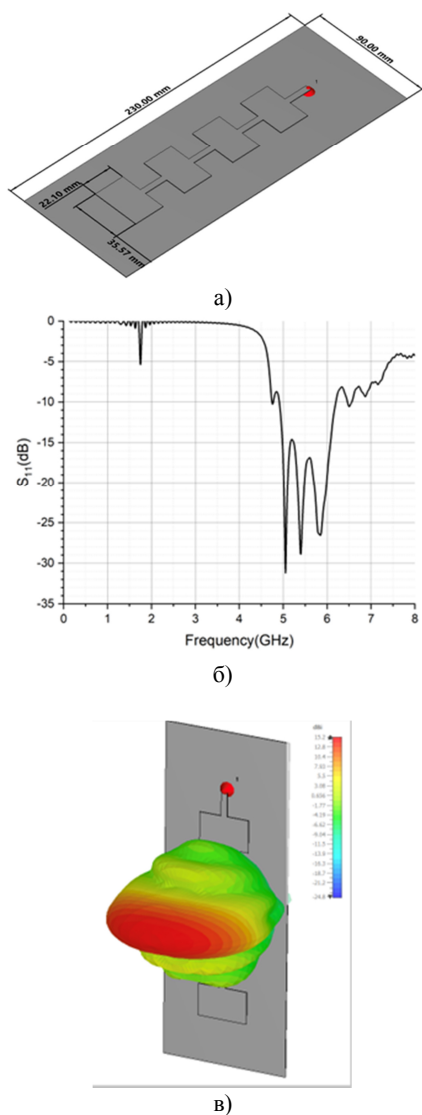


Рис. 1. Конструкция и характеристики антенны в идеальном случае: а) вид антенны; б) график возвратных потерь; в) диаграмма направленности

Как видно, полученная антенна обеспечивает диапазон рабочих частот от 4.91 до 6.2 ГГц, коэффициент полезного действия (КПД) антенны во всем диапазоне рабочих частот превышает 85%, а коэффициент направленного действия антенны составляет 15.2 дБ, при этом в одной плоскости ширина главного лепестка составляет 52.6 градусов, а в ортогональной плоскости 16.8 градусов, что соответствует веерной диаграмме направленности, что особенно важно в обеспечении помехозащищенной дальней связи. Однако важно отметить, что в данном случае рассматривается эталонный случай, когда между слоем заземления (экрана) и излучателями чистая воздушная прослойка, однако на практике реализовать такую конструкцию невозможно ввиду необходимости фиксации антенны на требуемой высоте, так в данном случае патчи расположены на высоте 3 мм. Рассмотрим два основных случая реализации фиксирующих стоек для такой конструкции антенны:

1) в роли стоек используются полимерные (диэлектрические) цилиндры, которые могут быть изготовлены путем аддитивной печати, например, из акрилонитрил-бутадиенстирола (АБС);

2) в роли стоек выступают проводящие цилиндры, которые могут моделировать винты и гайки, однако в таком случае возникает короткое замыкание слоев, что может ухудшить характеристики антенны.

Таким образом, возникает дилемма о том, как обеспечить наиболее оптимальную фиксацию слоев – применить клей и полимерную стойку или металлические стойки, которые обеспечат максимальную жесткость и надежность конструкции. Рассмотрим данные случаи с целью определения наиболее оптимальных характеристик антенны при интеграции в ее конструкцию стоек [8-9].

### Применение фиксирующих стоек на основе диэлектрических материалов

При реализации фиксирующих стоек важно рассматривать точность их изготовления, а также методы крепления к металлу. Если рассматривать полимерные (диэлектрические) стойки, то они могут быть изготовлены путем 3D печати или ЧПУ методами путем резки диэлектрика. Важно отметить, что в случае использования таких стоек возникает вопрос их фиксации с металлом путем применения адгезивов, например, суперклея с активирующим составом. Рассмотрим случай, когда с роли

фиксирующих стоек выступали печатные из акрилонитрил-бутадиен-стирола (АБС) стойки, которые представляют из себя цилиндры с диаметром 4 мм и высотой 3 мм. Стойки размещались по центру патч-излучателей. На рис. 2 приводится вид стоек, а также их расположение для фиксации излучающих элементов на необходимой высоте.

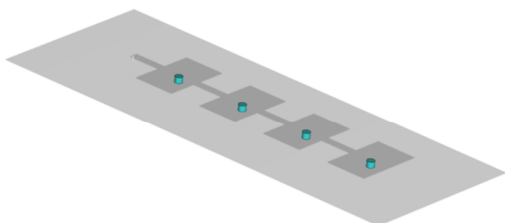


Рис. 2. Вид антенны на основе воздушной подложки с использованием полимерных стоек

Как видно, применение диэлектрических стоек не приводит к усложнению конструкции антенны, при этом сохраняется электрическая изоляция между слоями. На основании этого выполнялось моделирование с учетом характеристик материала стоек. На рис. 3 приводится вид основных характеристик в случае использования диэлектрических стоек [10-11].

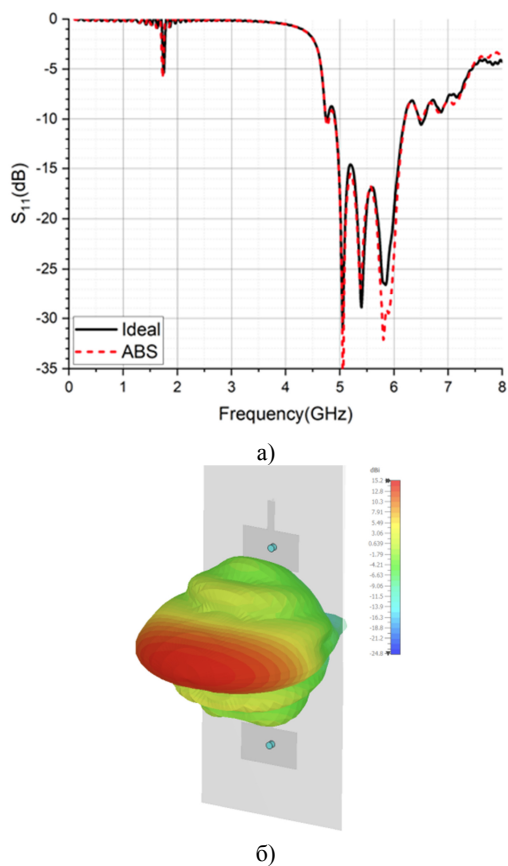


Рис. 3. Характеристики антенны с используемыми диэлектрическими стойками: а) график возвратных потерь; б) диаграмма направленности

Полученные результаты показывают, что применение диэлектрических стоек не приводит к искажениям характеристик антенны, так рабочий диапазон с использованием диэлектрических стоек составил от 4.89 до 6.2 ГГц (небольшое смещение нижней частоты); КНД антенны составил 15.2 дБ (не изменился), а также ширина главного лепестка практически не изменилась и составила 53 градуса в одной плоскости и 16.7 градусов в ортогональной плоскости, что соответствует сохранению веерной диаграммы направленности, при этом КПД антенны сохраняется на уровне более 85%. Таким образом, использование диэлектрических стоек позволяет сохранить характеристики антенны, а также обеспечить фиксацию излучаемых антенных элементов над слоем экранирования. Однако важно отметить, что в конструкции таких антенн очень часто используются проводящие стойки из металла с фиксацией стоек на основе болтов и гаек [5-7]. Рассмотрим возможность использования проводящих стоек для реализации фиксации излучающих антенных элементов над слоем экранирования.

#### Оценка возможности использования проводящих стоек для фиксации антенных элементов

В роли базового случая рассмотрим ситуацию, когда фиксация излучающих слоев осуществляется с использованием винтов М2 (диаметр 2 мм), которые будут использоваться для установки требуемой высоты излучающего слоя над экраном. На рис. 4 приводится вид антенны с токопроводящими стойками, используемыми для установки высоты излучателей над слоем заземления, а также на рис. 4б приводится вид картины токов с их протеканием по стойкам.

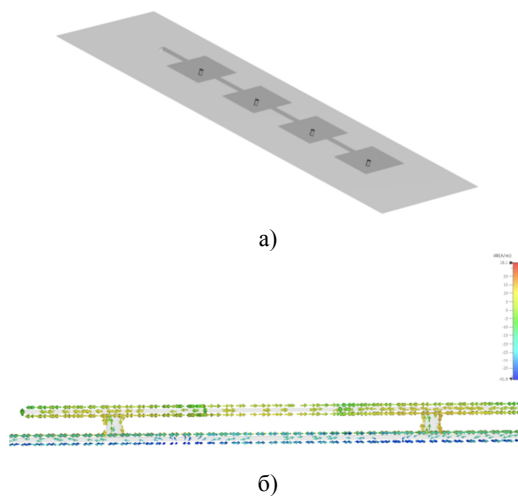


Рис. 4. Вид антенны с токопроводящими стойками: а) расположение стоек (цилиндры с диаметром 2 мм и высотой 3 мм); б) картина протекания токов



Отчетливо видно, что ток замыкается через стойки между заземлением и слоем излучения, что может приводить к ухудшению характеристик, поэтому рассмотрим, как изменились характеристики антенны при использовании таких стоек. На рис. 5 приводятся основные характеристики антенны при использовании токопроводящих стоек.

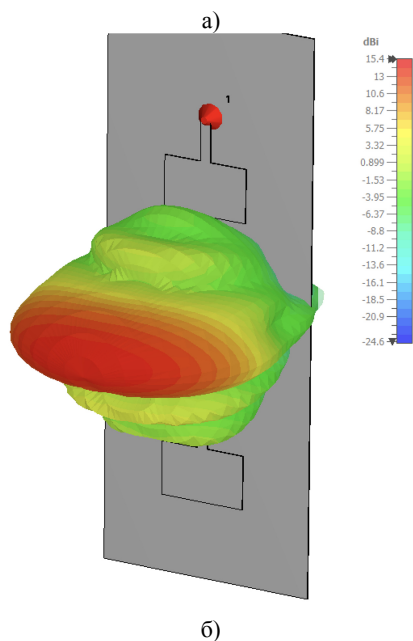
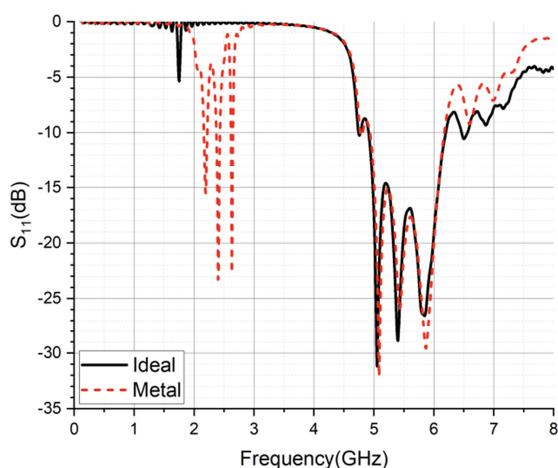


Рис. 5. Характеристики антенны при использовании токопроводящих стоек: а) график возвратных потерь; диаграмма направленности

Как показывают полученные результаты, применение токопроводящих стоек позволяет сохранить излучающие характеристики антенны, при этом диапазон рабочих частот составил от 4.94 до 6.17 ГГц; КНД антенны составил 15.4, при этом ширина главных лепестков сохранилась, что позволяет сделать вывод о возможности использования таких стоек для фиксации антенных элементов над слоем за-

земления, однако особый интерес вызывает предельный размер токопроводящих стоек антенны, так как они оказывают влияние на характеристики ввиду протекания токов. На рис. 6 приводится вид характеристик антенны, при изменении радиуса стоек от 2 до 5 мм с шагом в 1 мм.

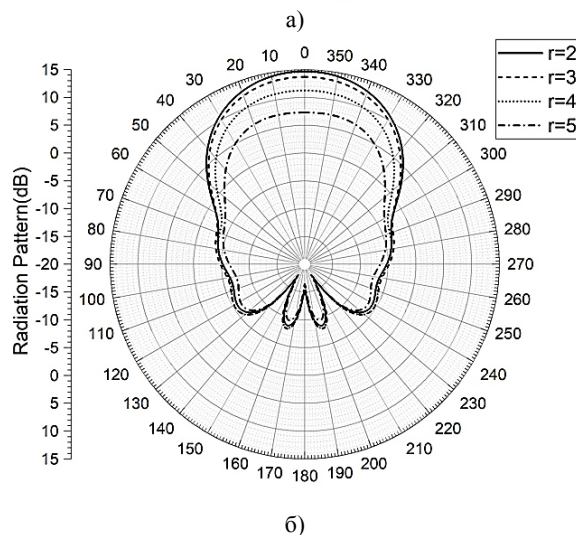
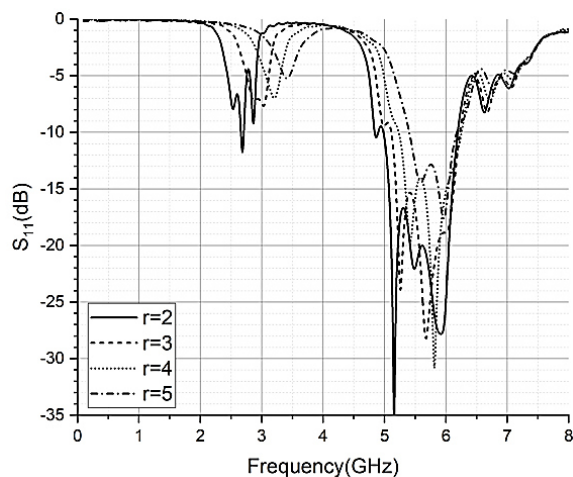


Рис. 6. Характеристики антенны при изменении размеров токопроводящих стоек: а) график возвратных потерь; б) диаграмма направленности антенны

Полученные результаты показывают, что увеличение размеров токопроводящих стоек приводит к ухудшению согласования антенны, сужению диапазона рабочих частот, а также к уменьшению максимальных значений уровня коэффициента направленного действия, таким образом, при выборе токопроводящих стоек для фиксации излучающего слоя необходимо проводить дополнительные исследования для оценки их влияния на характеристики антенн.

### Заключение

Проведенные исследования в данной работе показывают, что выбор стоек для формирования требуемого расстояния между излучателем и слоем заземления является важной задачей. Так, для обеспечения должной жесткости и надежности крепления могут быть использованы разные материалы, однако стоит учитывать то, что они могут оказывать влияние на характеристики антенны. В процессе исследования были рассмотрены диэлектрические стойки, которые оказывают наименьшее влияние, однако их крепление к проводникам является достаточно сложной задачей, поэтому наиболее предпочтительными является реализация антенн на основе крепления винтами и гайками, однако в таком случае стоит учитывать ширину токопроводящих стоек, которая оказывает влияние как на диапазон рабочих частот, так и на характеристики диаграмм направленности.

### Литература

1. Soily S., Mazumder R. K., Ali K. Design and simulation of two conformal arrays with dual patch and quadruple patch antenna elements. 2015 IEEE Conference on Antenna Measurements & Applications (CAMA), Chiang Mai, Thailand, 2015. PP. 1-3.
2. Motevasselian A., Whittow W. G. Miniaturization of a Circular Patch Microstrip Antenna Using an Arc Projection // IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters. 2017. Vol. 16. PP. 517-520.
3. Li Y., Luk K. -M. A transparent water dielectric patch antenna // 2015 IEEE 4th Asia-Pacific Conference on Antennas and Propagation (APCAP), Bali, Indonesia, 2015. PP. 319-320.
4. High Gain and Low-Profile Stacked Magneto-Electric Dipole Antenna for Phased Array Beamforming / H. -J. Dong, Y. -B. Kim, J. Joung, H. L. Lee // IEEE Access. 2020. Vol. 8. PP. 180295-180304.
5. Ozenc K., Aydemir M. E., Öncü A. Design of a 1.26 GHz high gain microstrip patch antenna using double layer with airgap for satellite reconnaissance. 2013 6th International Conference on Recent Advances in Space Technologies (RAST), Istanbul, Turkey, 2013. PP. 499-504.
6. Matsumoto H., Tanikawara M. Circularly polarized microstrip antenna with an airgap for multi-GNSS applications. 2017 IEEE-APS Topical Conference on Antennas and Propagation in Wireless Communications (APWC), Verona, Italy, 2017. PP. 150-151.
7. A Capacitive Fed Microstrip Patch Antenna with Air Gap for Wideband Applications (RESEARCH NOTE) / A. Azadi, P. Rezaei, M. M. Fakharian, M. R. Dadras. International Journal of Engineering. 2014. 27(5). 715-722.
8. Gain Enhancement of Rectangular Microstrip Patch Antenna using Air Gap at 2.4 GHz / K. Kharusi & Ramli, Nurulazlina & Noor, Shehab & Ali, M. Tanseer & Hazwan, Muhamad // International Journal of Nano and Biomaterials. 2020. Volume 13 (special Issue) May 2020. PP. 211-224.
9. Bhatoa R., Sidhu Roopan and E. Novel high gain air gap directive antenna for X-band satellite to earth downlink applications. 2016 International Conference on Control, Computing, Communication and Materials (ICCCCM), Allahbad, India, 2016. PP. 1-4.
10. Singh S., Tyagi N., Sinha N. Design and analysis of single patch, 2×1 and 4×1 microstrip antenna arrays. International Conference for Convergence for Technology-2014, Pune, India, 2014. PP. 1-5.
11. Wong Kin-Lu, Hsu Wen-Hsis A broad-band rectangular patch antenna with a pair of wide slits // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2001. Vol. 49. No 9. PP. 1345-1347.

Поступила 27.06.2024; принята к публикации 26.08.2024

### Информация об авторах

**Ашихмин Александр Владимирович** – д-р техн. наук, главный инженер ЗАО «ИРКОС» (394066, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, д. 179 корпус 4), e-mail: info@ircos.ru

**Ищенко Евгений Алексеевич** – ассистент кафедры радиоэлектронных устройств и систем, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, д. 84), e-mail: kursk1998@yandex.ru

**Фёдоров Сергей Михайлович** – канд. техн. наук, доцент кафедры радиоэлектронных устройств и систем, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84); доцент кафедры информационной безопасности и систем связи, Международный институт компьютерных технологий (394026, Россия, г. Воронеж, ул. Солнечная, д. 29 б), e-mail: fedorov\_sm@mail.ru, ORCID: 0000-0001-9027-6163

## ASSESSMENT OF THE EFFECT OF FIXING RACKS ON THE CHARACTERISTICS OF AN AERIAL-BASED ANTENNA

A.V. Ashikhmin<sup>1</sup>, E.A. Ishchenko<sup>2</sup>, S.M. Fedorov<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup>CJSC IRCOS, Voronezh, Russia

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

<sup>3</sup>International Institute of Computer Technologies, Voronezh, Russia

**Abstract:** the article considers an aerial-based antenna for the implementation of an interference-proof data transmission channel. The antenna in question allows you to provide a fan-shaped radiation pattern, as well as a high level of directional coefficient. Special emphasis is placed on the possibility of fixing the radiating layer above the ground at the required height, since this parameter determines the main characteristics of the antenna. For the implementation of racks, two main approaches were considered, which are based on manufacturing materials – dielectric materials or conductive ones. The conducted research shows that the use of dielectric racks has a minimal effect on the antenna, which allows you to maintain the main indicators. The use of conductive racks can significantly increase the reliability of fixing antenna elements, however, it is worth considering their influence. Studies have shown that the width of such racks has the greatest impact on the characteristics of the antenna. The article describes the characteristics of the antenna both in the ideal case and when using racks. An additional study was conducted for conductive racks in order to determine the effect of their size on the characteristics of the antenna. Thus, the main characteristics of an antenna made of materials that fix the posts were noted, which is relevant and most important when developing antennas based on an airborne substrate

**Key words:** aerial antenna, patch antenna, directional antenna, fan pattern, antenna mount

**Acknowledgements:** the work was carried out with the financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the framework of the state assignment "Youth laboratory" no. FZGM-2024-0003

### References

1. Soily S., Mazumder R.K., Ali K. "Design and simulation of two conformal arrays with dual patch and quadruple patch antenna elements," *2015 IEEE Conference on Antenna Measurements & Applications (CAMA)*, Chiang Mai, Thailand, 2015, pp. 1-3, doi: 10.1109/CAMA.2015.7428157.
2. Motevasselian A., Whittow W.G. "Miniaturization of a Circular Patch Microstrip Antenna Using an Arc Projection," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 16, pp. 517-520, 2017, doi: 10.1109/LAWP.2016.2586749.
3. Li Y., Luk K.-M. "A transparent water dielectric patch antenna," *2015 IEEE 4th Asia-Pacific Conference on Antennas and Propagation (APCAP)*, Bali, Indonesia, 2015, pp. 319-320, doi: 10.1109/APCAP.2015.7374388.
4. Dong H.-J., Kim Y.-B., Joung J., Lee H.L. "High Gain and Low-Profile Stacked Magneto-Electric Dipole Antenna for Phased Array Beamforming," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 180295-180304, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3027813.
5. Ozenc K., Aydemir M.E., Öncü A. "Design of a 1.26 GHz high gain microstrip patch antenna using double layer with airgap for satellite reconnaissance," *2013 6th International Conference on Recent Advances in Space Technologies (RAST)*, Istanbul, Turkey, 2013, pp. 499-504, doi: 10.1109/RAST.2013.6581259.
6. Matsumoto H., Tanikawara M. "Circularly polarized microstrip antenna with an airgap for multi-GNSS applications," *2017 IEEE-APS Topical Conference on Antennas and Propagation in Wireless Communications (APWC)*, Verona, Italy, 2017, pp. 150-151, doi: 10.1109/APWC.2017.8062265.
7. Azadi A., Rezaei P., Fakharian M.M., Dadras M.R. "A Capacitive Fed Microstrip Patch Antenna with Air Gap for Wideband Applications (RESEARCH NOTE)," *International Journal of Engineering*, no. 27 (5), pp. 715-722.
8. Kharusi K., Ramli N., Shehab K.N., Ali M.T., Hazwan M. "Gain Enhancement of Rectangular Microstrip Patch Antenna using Air Gap at 2.4 GHz," *International Journal of Nano and Biomaterials*, May 2020, vol. 13 (sp. issue), pp. 211-224.
9. Bhatoa R., Roopan, Sidhu E. "Novel high gain air gap directive antenna for X-band satellite to earth downlink applications," *2016 International Conference on Control, Computing, Communication and Materials (ICCCCM)*, Allahbad, India, 2016, pp. 1-4, doi: 10.1109/ICCCCM.2016.7918223.
10. Singh S., Tyagi N., Sinha N. "Design and analysis of single patch, 2×1 and 4×1 microstrip antenna arrays," *International Conference for Convergence for Technology-2014*, Pune, India, 2014, pp. 1-5, doi: 10.1109/I2CT.2014.7092286.
11. Kin-Lu Wong, Wen-Hsis Hsu "A broad-band rectangular patch antenna with a pair of wide slits," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 49, no. 9, pp. 1345-1347, Sept. 2001, doi: 10.1109/8.951507.

Submitted 27.06.2024; revised 26.08.2024

### Information about the authors

**Alexander V. Ashikhmin** – Dr. Sc. (Technical), Chief Engineer of CJSC IRKOS (179 korp. 4 Moskovskiy prosp., Voronezh 394066, Russia), e-mail: info@ircos.ru

**Evgeniy A. Ishchenko** – Assistnt, Department of Radioelectronic Devices and Systems, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: kursk1998@yandex.ru

**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

## МЕТОДИКА НАСТРОЙКИ ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПИД-РЕГУЛЯТОРА ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ТРАЕКТОРИЕЙ БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

А.В. Башкиров, М.В. Хорошайлова, И.В. Свиридова

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

**Аннотация:** представлена методика на искусственной основе нейронной сети для настройки оптимальных параметров пропорционально-интегрально-производного (ПИД) управления, позволяющая повысить эффективность управления траекторией движения беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). Эта система управляется тремя различными структурами ПИД-регулирования для движений по крену (Roll), тангажу (Pitch) и рысканью (Yaw). Таким образом, адаптация БПЛА к линейным параметрам ПИД облегчается за счет использования нелинейных поведенческих параметров при обучении нейронной сети. Для этой цели моделирование полета системы летающего БПЛА выполнялось с 200 различными случайно определенными комбинациями параметров ПИД в среде моделирования Mission Planner, и набором данных о местоположении, входных данных и ПИД-параметров при создании выходного сигнала. Моделирование, выполненное на траектории, используемой в качестве контрольной при создании набора данных, показывает, что изменение ПИД-параметров управления рысканьем не вызывает существенного изменения ошибки траектории. Набор данных, полученный для настройки крена и тангажа, используется для моделей, разработанных с использованием нейронной сети прямого и обратного распространения, которая часто используется для определения оптимальных параметров усиления ПИД

**Ключевые слова:** ПИД-управление, архитектура нейронной сети, крен, тангаж, рысканье, параметры обучения, траектория движения

**Благодарности:** работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № FZGM-2024-0006)

### Введение

В последние годы интерес к беспилотным летательным аппаратам (БПЛА) резко возрос. Применение беспилотных летательных аппаратов очень важно там, где присутствие человека опасно. Среди всех основных параметров беспилотных летательных аппаратов выделяется способность поддерживать режим зависания в нужном положении, а также осуществлять взлет и посадку в перегруженных местах.

Система управления тремя различными направлениями ПИД-регулирования для движений по крену, тангажу и рысканию позволяет адаптироваться БПЛА к линейным параметрам ПИД и облегчается за счет использования нелинейных поведенческих параметров при обучении искусственной нейронной сети (ИНС).

### Уравнение движением

Для разработки программы для полетного контроллера необходимо понимание поведе-

ния летательного аппарата. Под поведением системы подразумевается динамика летательного аппарата, которая может быть получена с использованием формулы Ньютона-Эйлера. Для описания движения летательного аппарата необходимо шесть степеней свободы (DOF) в трехмерном пространстве [1]. Поэтому необходимо использовать шесть динамических уравнений, описывающих поведение летательного аппарата, а также кинематические уравнения, определяющие положение БПЛА относительно системы отсчета (т.е. опорной станции и опорного положения).

Управление БПЛА квадрокоптерного типа осуществляется путем регулировки угловой скорости, создаваемой вращающимися роторами. Чтобы уменьшить движение из-за инерционного воздействия на квадрокоптер, смежные двигатели должны иметь разные направления вращения, в то время как противоположные двигатели должны иметь одинаковое направление вращения [2]. Два двигателя вращаются по часовой стрелке, а два других двигателя вращаются против часовой стрелки, оснащенные пропеллерами для создания подъемной силы.



Маневры в полете становятся возможными благодаря изменению частоты вращения несущих винтов в минуту (об/мин). При вертикальных движениях, таких как взлет и зависание, подъемная сила, создаваемая несущими винтами, направлена вертикально и против направления силы тяжести. Чтобы предотвратить вращение БПЛА несущие винты должны прикладывать одинаковую подъемную силу. Затем происходит вертикальное перемещение квадрокоптера за счет равного изменения угловых скоростей ротора [3]. Обычно такое движение сопровождается поддержанием постоянной суммарной силы тяги роторов. На рис. 1 схематично показаны направления движений по крену ( $\varphi$ ), тангажу ( $\theta$ ) и рысканию ( $\psi$ ).

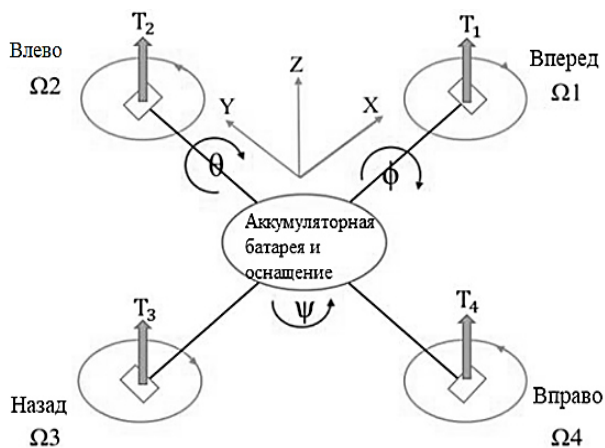


Рис. 1. Схема направлений движения беспилотного летательного аппарата

Во время выполнения маневра БПЛА наклонно перемещается в направлении несущего винта, имеющего наименьшую скорость.

### Стандартная система ПИД-регулирования

Управление дроном в основном осуществляется с учетом четырех степеней свободы, а параметры управления бортовому контроллеру могут быть заданы в виде плавающих значений в диапазоне от  $[-1,1]$ . Четыре входных сигнала ( $u_x, u_y, u_z, u_\psi$ ), представляют собой линейные скорости по соответствующим осям и угловую скорость рыскания соответственно.

Контроллер формирует управляющий сигнал, который представляет собой сумму трех составляющих: пропорциональной (P), интегральной (I) и производной (D). Модель

ПИД-управления БПЛА схематически показана на рис. 2 для движений БПЛА.

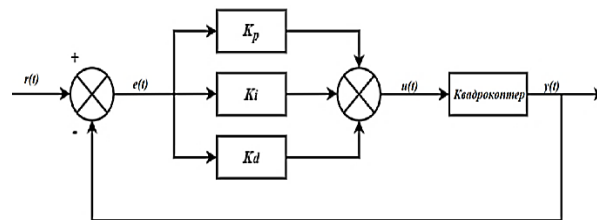


Рис. 2. Стандартная модель ПИД-управления БПЛА

Чтобы привести выход объекта  $y(t)$  к опорному сигналу  $r(t)$ , управляющий вход  $u(t)$  рассчитывается ПИД-регулятором с замкнутым контуром, который использует ошибку на выходе, то есть  $e(t) = r(t) - y(t)$ . непрерывного времени определяется уравнением (1).

$$u(t) = P + I + D = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{d}{dt}(t), \quad (1)$$

где  $K_p$  представляет собой пропорциональный коэффициент усиления,  $K_i$  - интегральный коэффициент усиления и  $K_d$  - производный коэффициент усиления,  $e$  - это ошибка, вызванная разницей между исходным сигналом и ответом системы.

Для правильной работы параметра ПИД-регулятора необходимо настроить соответствующие значения коэффициентов.

Параметры  $K_p, K_i$  и  $K_d$  должны быть настроены для каждой модели управления перед полетом. Однако использовать режим автонастройки невозможно для БПЛА, выполняющего маневры в узком и закрытом пространстве. По этой причине была использована модель искусственной нейронной сети (ИНС) для определения параметров  $K_p, K_i$  и  $K_d$ .

### Нейронная сеть для настройки параметров ПИД-регулятора

Основные функции ИНС могут быть определены либо как вычислительные модели для линейной и нелинейной аппроксимации, кластеризации и классификации данных, либо как модель для анализа [4]. Сеть прямого распространения (FF) обычно используется вместе с обратным распространением для обучения нейронных сетей. Основное назначение сети прямого обратного распространения (FFBPN) — изучение и отображение взаимо-



связей между входными и выходными данными. Кроме того, правило обучения FFBNP используется для корректировки значений весов и пороговых значений системы для достижения минимальной ошибки.

Схематическое изображение модели ИНС, обученной оценивать параметры  $K_p$ ,  $K_i$  и  $K_d$ , представлено на рис. 3.

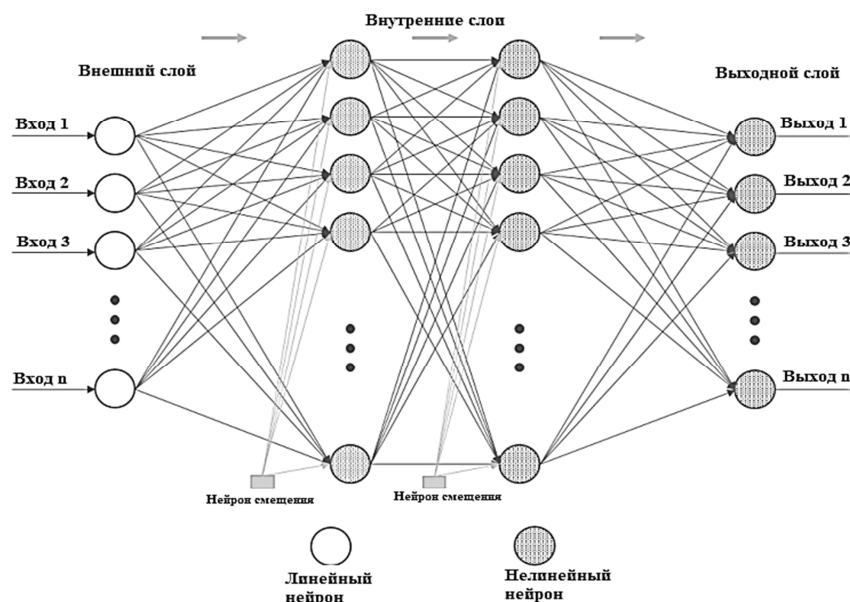


Рис. 3. Схематическое изображение модели нейронной сети прямого и обратного распространения сигнала с указанием направления распространения потока сигнала

Веса между входным и внутренними слоями в нейронной сети прямого и обратного распространения обновляются в соответствии с уравнением (2)

$$\Delta W_{ij}(t) = -\eta \frac{dE_2(t)}{dW_{ij}} + \alpha \Delta W_{ij}(t - 1), \quad (2)$$

где  $\eta$  - скорость обучения, а  $\alpha$  - импульсная составляющая,  $E_2(t)$  - ошибка распространения между скрытым и входным слоями,  $E_1(t)$  - ошибка между экспериментальным сигналом и выходным сигналом нейронной сети.

Значения весов между скрытым и выходным слоями определяется в соответствии с уравнением (3).

$$\Delta W_{in}(t) = -\eta \frac{dE_1(t)}{dW_{in}} + \alpha \Delta W_{in}(t - 1). \quad (3)$$

### Оценка параметров ПИД-регулятора на основе нейронной сети прямого и обратного распространения

Для анализа эффективности параметров усиления ПИД-управления, полученных с помощью моделей искусственной нейронной сети траектория полета разрабатывается в про-

грамме Mission Planner при управлении по крену и тангажу. Полеты выполняются с каждым значением ПИД, а эффективность отслеживания эталонных значений широты, долготы и высоты анализируется с помощью четырех показателей ошибок. Математические выражения показателей среднеквадратичной ошибки (RMSE), среднеквадратического отклонения (MSE), средней абсолютной погрешности (MAE) и средней абсолютной процентной погрешности (MAPE) приведены в уравнениях (4) – (7) соответственно.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - r_i)^2}, \quad (4)$$

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - r_i)^2, \quad (5)$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i - r_i|, \quad (6)$$

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{y_i - r_i}{y_i} \right| \times 100, \quad (7)$$

где  $n$  — количество выборок,  $y_i$  - фактическое выходное значение,  $r_i$  — опорное значение.

Модель искусственной нейронной сети прямого и обратного распространения спроек-

тирована с использованием двенадцати входов, трех выходов и двух скрытых слоев по восемь нейронов в каждом. В процессе обучения модели используется алгоритмы обучения Левенберга-Маркварта и масштабированного сопряженного градиента, а также функции активации (logsig, radbas и tansig) [5, 6]. Значения среднеквадратического отклонения (MSE) модели нейронной сети прямого и обратного

распространения и расчетные ПИД-параметры для регулирования движений по крену (Roll) и тангажу (Pitch) приведены в табл. 1, а на рис. 4 показаны графики производительности модели нейронной сети прямого и обратного распространения с лучшими обучающими значениями MSE для управления движением по крену и тангажу.

Таблица 1

Контрольные параметры

Тип управления	Алгоритм обучения	Функция активации	MSE	Kp	Ki	Kd
Управление креном	Масштабированного сопряженного градиента	logsig	0,9466	1,9622	2,2506	0,4117
		radbas	0,8591	2,4244	2,3351	0,6117
		tansig	0,9067	2,6215	1,5810	0,6680
Управление тангажом	Левенберга-Маркварта	logsig	0,6549	1,4632	1,370	1,1121
		radbas	0,4553	2,0911	2,5904	1,1806
		tansig	0,6539	2,5264	1,9099	1,538

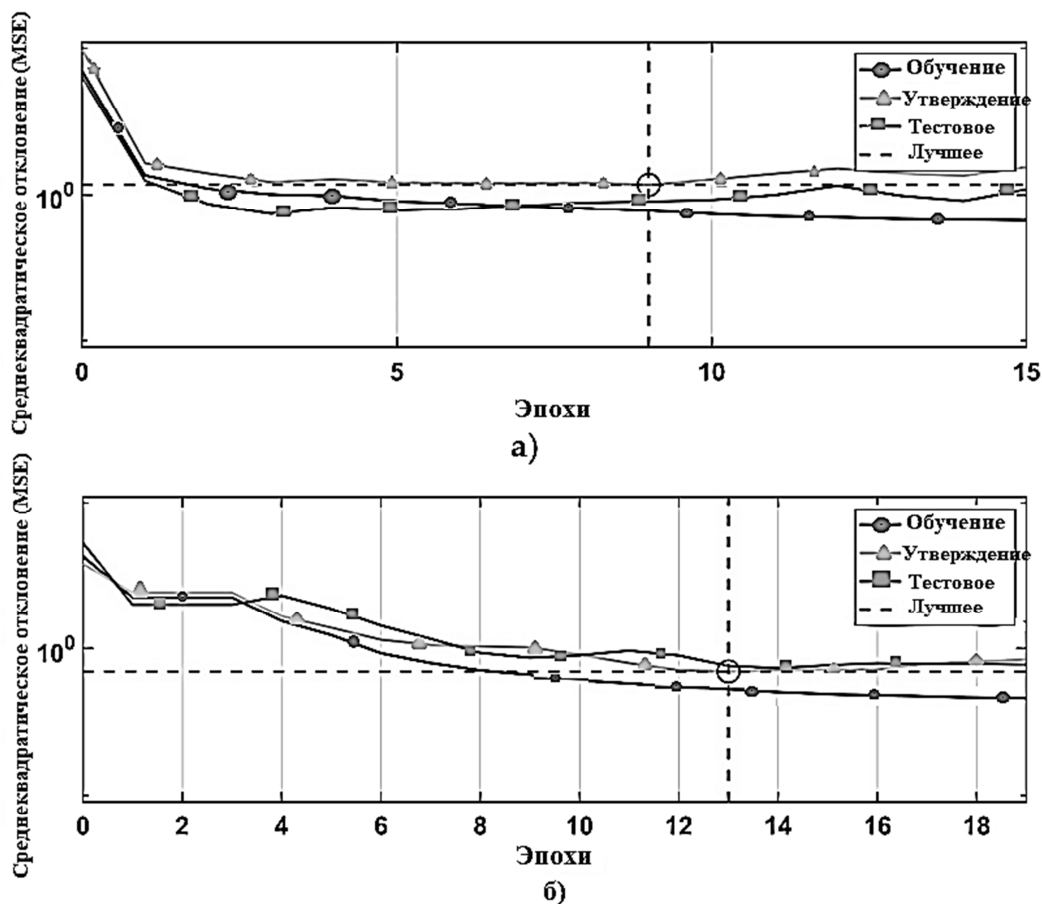


Рис. 4. Графики эффективности обучения моделей искусственной нейронной сети прямого и обратного распространения, дающие наилучшие результаты обучения, используемые для оценки ПИД-параметров контроллеров при (а) управлении креном и (б) управлении тангажом

Контрольные точки широты, долготы и перепада высот траектории, определенные для проверки работоспособности, приведены в табл. 2, а контрольная траектория приведена

на рис. 5, где P<sub>1</sub> – начальная точка, P<sub>2</sub>–P<sub>5</sub> – промежуточные точки траектории, P<sub>6</sub> - конечная точка.

Таблица 2

Значения широты, долготы и перепада высот опорных точек траектории для моделирования

	P <sub>1</sub>	P <sub>2</sub>	P <sub>3</sub>	P <sub>4</sub>	P <sub>5</sub>	P <sub>6</sub>
Широта (°)	-35.363157	-35.362557	-35.362557	-35.363157	-35.363157	-35.362557
Долгота(°)	149.163687	149.163687	149.162939	149.162938	149.162191	149.162190
Перепад высот (м)	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5

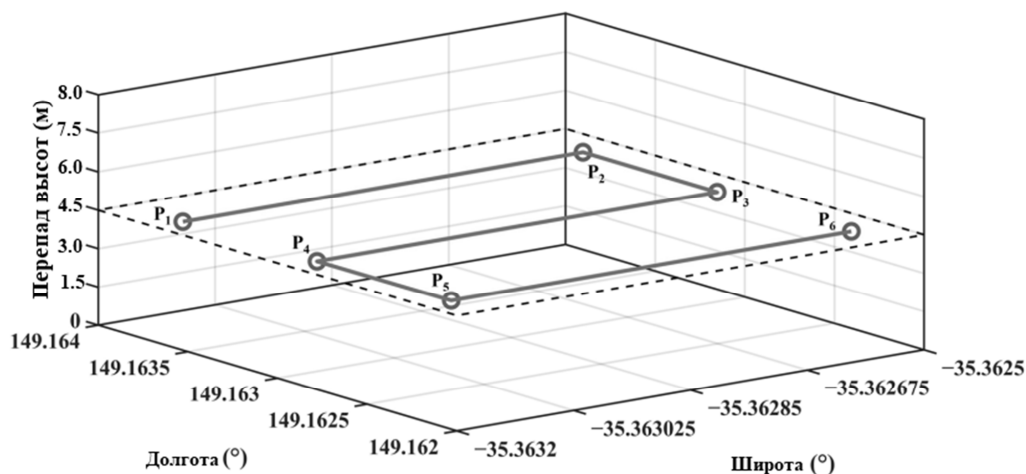


Рис. 5. Контрольные точки траектории при тестировании производительности

Реальная и контрольная траектории полета, реализуемые с ПИД параметрами, настроенными с помощью нейронной сети прямого и обратного распространения, показаны на рис.

6. В табл. 3 приведены показатели ошибок для значений широты, долготы и высоты, которые представляют собой информацию о местоположении для каждого полета.

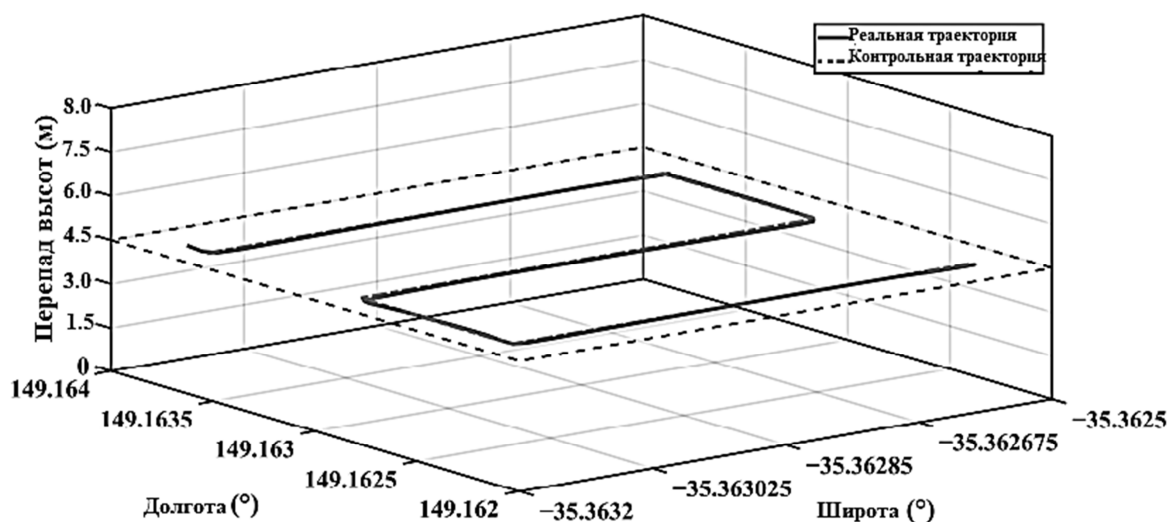


Рис. 6. Реальная и контрольная траектории полета, реализуемые с ПИД параметрами, настроенными с помощью нейронной сети прямого и обратного распространения

Таблица 3

Показатели ошибок для определения широты, долготы и перепада высот точек траектории, полученных с помощью нейронной сети прямого и обратного распространения

Координаты	RMSE	MSE	MAE	MAPE
Широта	$7.52745 \times 10^{-5}$	$5.66626 \times 10^{-9}$	$4.90424 \times 10^{-5}$	$8.16141 \times 10^{-5}$
Долгота	0.00011	$1.16874 \times 10^{-8}$	$6.04816 \times 10^{-5}$	$2.87345 \times 10^{-5}$
Перепад высот	0.01878	0.00035	0.01422 0.25593	0.01878

При рассмотрении показателей и графиков ошибок результаты довольно близки в полетах, где используются ПИД-параметры, полученные с помощью нейронной сети прямого и обратного распространения.

### Заключение

Было произведено моделирование с помощью ИНС прямого и обратного распространения, оценивающее оптимальные параметры ПИД усиления БПЛА, планирующего летать в узких коридорах. Для этой цели создается набор входных параметров из данных о широте, долготе и высоте полетов, выполняемых с ПИД параметрами, определяемыми между нижними и верхними значениями. Поскольку реализация полетов со случайными ПИД параметрами в реальной среде сопряжена с высокими рисками, полеты выполняются в среде моделирования Mission Planner и модели искусственной нейронной сети прямого и обратного распространения, которая часто используется для определения оптимальных параметров. В ходе моделирования полета модель ИНС прямого и обратного распространения продемонстрировала успешные характеристики отслеживания высоты. В результате было продемонстрировано, что ПИД параметры беспилотного летательного аппарата можно

настраивать с помощью искусственных нейронных сетей вместо их рандомизации.

### Литература

1. AlphaPilot: Autonomous drone racing / P. Foehn, D. Brescianini, E. Kaufmann, T. Cieslewski, M. Gehrig, M. Muglikar, D. Scaramuzza // *Auton. Robot.* 2022. No. 46. PP. 307–320.
2. Estimation of Crop Growth Parameters Using UAV-Based Hyperspectral Remote Sensing Data / H. Tao, H. Feng, L. Xu, M. Miao, H. Long, J. Yue, Z. Li, G. Yang, X. Yang, L. Fan // *Sensors.* 2020. No. 20. P. 1296.
3. Unsupervised Deep Learning for Single-Channel Earthquake Data Denoising and Its Applications in Event Detection and Fully Automatic Location / O.M. Saad, Y.F. Chen, A. Savvaiddis, W. Chen, F.X. Zhang, Y.K. Chen // *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 2022. No. 60. PP. 1–10.
4. Башкиров А.В., Хорошайлова М.В., Демихова А.С. Оптимизация системы передачи информации от беспилотного летательного аппарата и повышение пропускной способности канала связи // *Вестник Воронежского института МВД России.* 2023. № 4. С. 140-148.
5. Башкиров А.В., Хорошайлова М.В., Демихова А.С. Методика предварительного кодирования для системы беспилотных летательных аппаратов // *Вестник Воронежского государственного технического университета.* 2023. Т. 19. № 5. С. 106-114.
6. 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 28.06.2024; принята к публикации 26.08.2024

### Информация об авторах

**Башкиров Алексей Викторович** – д-р техн. наук, заведующий кафедрой конструирования и производства радиоаппаратуры, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: fabi7@mail.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-0939-722X>

**Хорошайлова Марина Владимировна** – канд. техн. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: pmv2205@mail.ru, ORCID: [orcid.org/0000-0001-9167-9538](http://orcid.org/0000-0001-9167-9538)

**Свиридова Ирина Владимировна** – старший преподаватель, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: riss-ka@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5279-0807>

## THE TECHNIQUE OF SETTING THE OPTIMAL PARAMETERS OF THE PID CONTROLLER FOR CONTROLLING THE TRAJECTORY OF AN UNMANNED AERIAL VEHICLE USING NEURAL NETWORKS

**A.V. Bashkirov, M.V. Khoroshailova, I.V. Sviridova**

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

**Abstract:** this article presents a technique based on an artificial neural network for configuring optimal parameters of proportional integral derivative (PID) control, which allows to increase the efficiency of controlling the trajectory of unmanned aerial vehicles (UAVs). This system is controlled by three different PID control structures for Roll, Pitch and Yaw movements. Thus, the adaptation of UAVs to linear PID parameters is facilitated by the use of nonlinear behavioral parameters in neural network training. For this purpose, flight simulation of the flying UAV system was performed with 200 different randomly determined combinations of PID parameters in the Mission Planner simulation environment, and a set of location data, both input data and PID parameters when creating the output signal. The simulation performed on the trajectory used as a control when

creating the dataset shows that changing the PID parameters of the yaw control does not cause a significant change in the trajectory error. The data set used to adjust the roll and pitch is used for models developed using a forward and backward propagation neural network, which is often used to determine the optimal parameters of PID amplification

**Key words:** PID control, neural network architecture, roll, pitch, yaw, learning parameters, motion trajectory

**Acknowledgements:** the work was carried out with the support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (project no. FZGM-2024-0006)

#### References

1. Foehn P., Brescianini D., Kaufmann E., Cieslewski T., Gehrig M., Muglikar M., Scaramuzza D. “AlphaPilot: Autonomous drone racing”, *Auton. Robot.* 2022, no. 46, pp. 307–320.
2. Tao H., Feng H., Xu L., Miao M., Long H., Yue J., Li Z., Yang G., Yang X., Fan L. “Estimation of Crop Growth Parameters Using UAV-Based Hyperspectral Remote Sensing Data”, *Sensors*, 2020, no 20, p. 1296.
3. Saad O.M., Chen Y.F., Savvaidis A., Chen W., Zhang F.X., Chen Y.K. “Unsupervised Deep Learning for Single-Channel Earthquake Data Denoising and Its Applications in Event Detection and Fully Automatic Location”, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 2022, no. 60, pp. 1–10.
4. Bashkirov A.V., Khoroshailova M.V., Demikhova A.S. “Optimization of the information transmission system from an unmanned aerial vehicle and increasing the bandwidth of the communication channel”, *The Bulletin of Voronezh Institute of the Ministry of Internal Affairs of Russia (Vestnik Voronezhskogo instituta MVD Rossii)*, 2023, no. 4, pp. 140-148.
5. Bashkirov A.V., Khoroshailova M.V., Demikhova A.S. “The method of pre-coding for a system of unmanned aerial vehicles”, *The Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2023, vol. 19, no. 5., pp. 106-114.
6. Khoroshailova M.V. “Channel coding architecture based on FPGA for 5G wireless network using high-level synthesis”, *The Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2018, vol. 14. no. 2., pp. 99-105.

Submitted 28.06.2024; revised 26.08.2024

#### Information about the authors

**Alexey V. Bashkirov** – Dr. Sc. (Technical), Head of the Department of Radio Equipment Design and Production, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394026, Russia), e-mail: fabi7@mail.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-0939-722X>

**Marina V. Horoshailova** – Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394026, Russia), e-mail: pmv2205@mail.ru, [orcid.org/0000-0001-9167-9538](http://orcid.org/0000-0001-9167-9538)

**Irina V. Sviridova** - Senior Lecturer, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394026, Russia), e-mail: riss-ka@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5279-0807>



## МЕТОДИКА ПОЛУЧЕНИЯ И ОБРАБОТКИ ДАННЫХ ОПТИЧЕСКОЙ ИНСПЕКЦИИ 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 инспекции топологии электронных компонентов. Основной задачей данного этапа являлась разработка методики получения и обработки данных оптической инспекции, необходимой для автоматизированного контроля качества микроскопических изделий. Обоснована необходимость создания методики, которая позволит обеспечить высокую точность и надежность обнаружения дефектов полупроводниковых кристаллов на различных этапах контроля качества. Сформулированы основные требования к подобной методике, включающие первичную инициализацию и управление аппаратным обеспечением, конфигурирование программного обеспечения, сбор данных с камеры машинного зрения и их последующую обработку. Представлена разработанная структурная схема методики управления, сканирования, передачи и обработки данных оптической инспекции. Описаны этапы получения и обработки оптических изображений полупроводниковых кристаллов, а также предложены подходы к интеграции программного обеспечения с аппаратной частью программно-аппаратного комплекса. Приведено описание экспериментального процесса сбора и обработки изображений при помощи промышленного инспекционного микроскопа Nexcore NX1000 и цифровой камеры Dahemg imaging MER2-2000-19U3C. Отдельно рассмотрен алгоритм сбора и предварительной обработки изображений для формирования обучающего датасета. Перечислены рекомендуемые приемы предварительной обработки данных инспекции для их преобразования и нормализации

**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

Актуальность задачи оптической дефектовки топологии электронных компонентов в современном производстве микроэлектроники обусловлена высокой потребностью в повышении качества и надежности изделий. Дефекты в кристаллах электронных компонентов, таких как микросхемы, транзисторы и диоды, могут приводить к существенному снижению их производительности, увеличению уровня брака и снижению надежности конечных изделий. Это подчеркивает важность тщательного контроля качества и разработки эффективных технологий дефектовки для минимизации вероятности прохождения бракованных изделий на последующие этапы производства.

Для решения подобных задач в [1] была рассмотрена разработка аппаратной части комплекса оптической дефектовки топологии электронных компонентов. Авторами описан выбор комплектующих, интеграция в конструкцию инспекционного микроскопа, а также разработ-

ка системы автоматизированного перемещения предметного столика.

Однако для эффективного функционирования аппаратной части требуется соответствующая методика получения и обработки результатов оптической дефектовки топологии электронных компонентов. Разработка подобной методики является необходимым для обеспечения точности и надежности процессов контроля качества, что в свою очередь способствует повышению общей эффективности производства и снижению уровня брака. В настоящей статье будут рассмотрены основные аспекты методики получения и обработки результатов оптической дефектовки, а также интеграция программного обеспечения с аппаратной частью для автоматизированного анализа топологии электронных компонентов.

### Постановка задачи

Целью данной работы является разработка методики, которая позволит автоматизировать процесс получения и обработки данных оптической дефектовки топологии электронных компонентов. Решение данной задачи обеспе-

чит высокую точность и надежность выявления дефектов, а также повысит эффективность производства за счет использования современных методов машинного зрения и алгоритмов обработки изображений.

Разрабатываемая методика должна обеспечивать:

- системный подход к настройке аппаратного обеспечения, включающего промышленные микроскопы и системы автоматизированного перемещения;
- конфигурирование программного обеспечения для сбора, передачи и анализа изображений, полученных с камеры машинного зрения;
- интеграцию алгоритмов машинного обучения и компьютерного зрения для автоматизированного выявления и классификации дефектов на поверхности кристаллов.

На текущем этапе выполнения проекта требовалась разработка и тестирование методики получения и обработки оптических изображений топологии электронных компонентов. Таким образом, постановка задачи формулируется как создание процедур для настройки аппаратного обеспечения, интеграция системы управления движением с микроскопом и камерой, а также разработка алгоритмов для автоматизированной обработки и анализа изображений. Решение данной задачи будет представлено в последующих разделах статьи

### **Структурная схема методики получения и обработки данных**

Структурная схема разработанной методики управления, сканирования, передачи и обработки данных оптической инспекции топологии электронных компонентов представлена на рис. 1.

Разработанная методика состоит из следующих основных этапов.

**Этап 1. Подготовка микроскопа.** Производится инициализация системы путём включения микроскопа и подключенную к нему систему управления (включающая ПК и блок управления с необходимым программным обеспечением). Осуществляется перемещение предметного столика в нулевое положение путём подачи команды из интерфейса пользователя. Активируется система управления движением, для перемещения подставки микроскопа в заданное нулевое положение с помощью концевых выключателей. Этот этап задает инициализирует «нулевую» точку (начало отсчета координат) для всех последующих операций.

**Этап 2. Размещение исследуемого образца.**

Дефектуемая полупроводниковая пластина размещается на подставке микроскопа. После чего подаётся команда на открытие вакуумной магистрали для фиксации образца на подставке, чтобы предотвратить перемещение полупроводниковой пластины в процессе контроля. Далее производится позиционирование под окуляр микроскопа первого верхнего кристалла. Эта операция производится оператором в ручном режиме штатными органами управления инспекционного микроскопа. Затем через программный интерфейс подаётся команда на синхронизацию текущих координат.

**Этап 3. Конфигурирование программного обеспечения.** В интерфейсе программного обеспечения производится выбор необходимого типа изделия для проведения дефектовки. На основе predetermined настроек для различной номенклатуры продукции автоматически адаптируются такие параметры как освещение, фокусировка и траектория сканирования, что обеспечивает оптимальное качество изображения и скорость проверки.

**Этап 4. Запуск процесса тестирования.** Данная команда выполняется в программном интерфейсе и запускает систему управления движением. Автоматизированная система позиционирования осуществляет последовательное перемещение предметного столика под окуляром микроскопа в соответствии с предварительно заданной схемой сканирования, адаптированной к выбранному типу образца. При остановке над очередным кристаллом камера высокого разрешения осуществляет формирование его цифрового изображения.

**Этап 5. Проведение процесса тестирования.** Программно-аппаратный комплекс (ПАК) выполняет итеративный процесс тестирования, фиксируя изображения поверхности каждого кристалла в соответствии с выбранной схемой сканирования. Программное обеспечение управляет перемещением и захватом изображения, обеспечивая полный захват кристалла текущего инспектируемого микроэлектронного изделия. Каждый последующий отснятый кристалл автоматически сохраняется в созданную ячейку базы данных для последующей обработки, анализа или архивирования.

**Этап 6. Завершение теста.** По завершении проверки система управления движением автоматически возвращает предметный столик микроскопа в нулевое положение. Этот шаг подготавливает систему к работе со следующей полупроводниковой пластиной и обеспечивает безопасность, сводя к минимуму риск случай

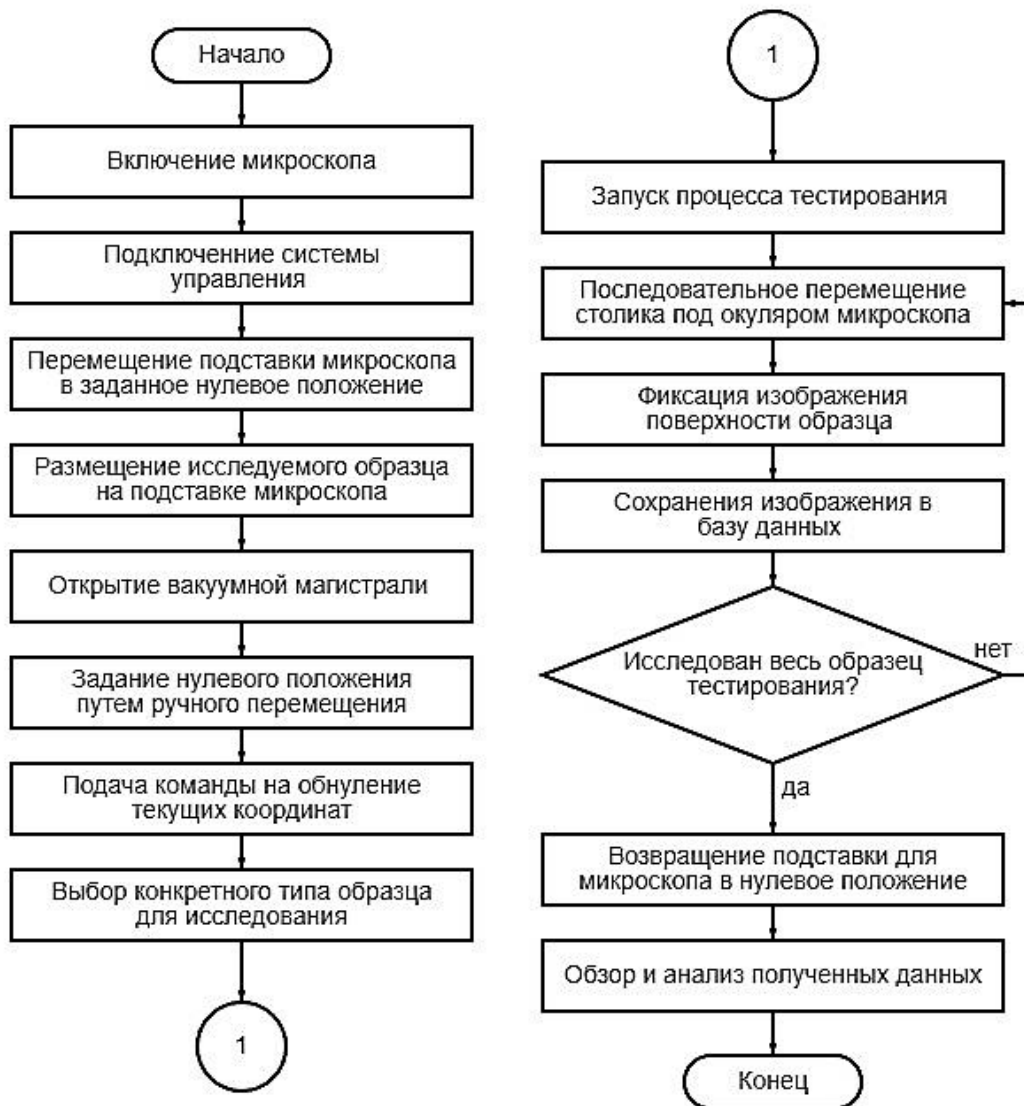


Рис. 1. Структурная схема методики управления, сканирования, передачи и обработки данных оптической инспекции

ного повреждения микроскопа или образца. Программное обеспечение выдает визуальное и звуковое уведомление информирующее оператора о завершении процесса тестирования. После этого оператор может проанализировать полученные результаты и приступить к дефектовке следующего образца.

Этап 7. Анализ полученных результатов. Оператор может приступить к просмотру сохраненных изображений непосредственно после сканирования текущей полупроводниковой пластины или сделать это позже. При этом анализ может быть выполнен как встроенными функциями разработанного прикладного программного обеспечения так и при помощи внешних программных средств. Первый вариант удобен для текущего оперативного контроля выпускаемой продукции. Второй вариант более предпочтителен для глубокого анализа

влияния параметров технологического процесса на выход годных изделий.

Практическая реализация методики в виде разработанного программного обеспечения «Defect collector from InnoVision» позволила получить изображения с высоким разрешением и точностью. Аннотирование типа дефекта производилось оператором при помощи встроенного интерактивного инструмента «Defect selector window».

### Процесс сбора и обработки изображений

Формирование обучающего датасета для задачи оптической инспекции полупроводниковых кристаллов при производстве изделий микроэлектроники напрямую влияет на эффективность и точность последующего обучения нейронной сети [2]. Процесс сбора изображе-

ний для обучающего датасета происходил следующим образом:

- определялись типы дефектов, которые необходимо обнаружить. К таковым относились трещины, сколы, дефекты металлизации, загрязнения и наличие цветов побежалости [3];

- устанавливались критерии качества для изображений, включая разрешение не менее 2000x1800 пикселей, контрастность и освещенность, обеспечивающие достаточную детализацию для обнаружения дефектов;

- использовалось оборудование для формирования цифрового изображения, способное захватывать мелкие детали полупроводниковых кристаллов (промышленный инспекционный микроскоп Nexcore NX1000 с камерой машинного зрения Daheng Imaging MER2-2000-19U3C) [4, 5];

- в процессе текущей работы оператора по дефектовке кристаллов анализировались изделия как с дефектами, так и без них;

- производилось фотографирование каждого образца с применением различных фокусных расстояний, для увеличения разнообразия в датасете. При этом использовались стандартизированные настройки камеры и освещения для всех изображений, чтобы минимизировать возможные артефакты, не связанные с дефектами;

- для каждого изображения проводилась базовая предобработка, включающая: кадрирование для выделения интересующей области; изменение масштаба для унификации размеров изображений; коррекцию яркости/контрастности;

- каждый образец кристалла документировался (размер кристалла, тип изделия, номер партии), а на полученных цифровых изображениях аннотировались дефекты с указанием их типа и расположения, что необходимо для последующего обучения и верификации модели;

- проводилась проверка качества и разнообразия датасета, для подтверждения достаточности примеров каждого типа дефекта и адекватности представления разнообразия условий и кристаллов в исходных данных;

- полученный датасет организовывался в виде удобной для дальнейшего использования структуры файлов/каталогов с применением единообразного именования и форматирования.

На основании описанного процесса был разработан алгоритм сбора изображений для обучающего датасета, общий вид которой представлен на рис. 2.

## Предварительная обработка данных

При формировании датасета были применены следующие приемы предварительной обработки данных:

Для преобразования данных.

- изменение масштаба и размера в соответствии с требованиями нейронной сети к размеру входных данных. При этом масштабированное изображение используется только для поиска дефектов. Дальнейшая сегментация проводится на исходном изображении, поскольку данная операция требует высокого разрешения для более четкого разделения пикселей границ элемента от фона.

- преобразование цветового пространства. из RGB в градации серого или в HSV. Такое преобразование позволило снизить вычислительную нагрузку и сосредоточиться на структурных и текстурных особенностях, важных для обнаружения дефектов, где информация о цвете не имеет первостепенного значения.

- обрезка изображений для увеличения относительной площади интересующих областей и удаления лишних деталей. Этот шаг позволил сфокусировать внимание модели на областях, где наиболее вероятно обнаружение дефектов, что способствовало эффективной идентификации соответствующих признаков.

Для нормализации данных.

- масштабирование значений пикселей по шкале [0, 1] путем деления на 255. Такая нормализация обеспечивает равный вклад всех входных признаков в процесс обучения модели, что способствует более стабильной и быстрой сходимости в процессе обучения.

- значения пикселей были стандартизированы путем вычитания среднего значения набора данных и деления на стандартное отклонение. Эта процедура центрирует данные вокруг нуля и нормализует их масштаб, что необходимо для эффективного обучения моделей глубокого обучения.

- применение пакетной нормализации к каждой мини-партии. Эта техника позволила использовать более высокую скорость обучения и сделала модель менее чувствительной к инициализации, что значительно ускоряет процесс обучения и повышает производительность модели.

Проведение предварительной обработки массива данных значительно повышает качество обучающего датасета и позволяет создать точную и надежную модель для обнаружения дефектов полупроводниковых кристаллов.

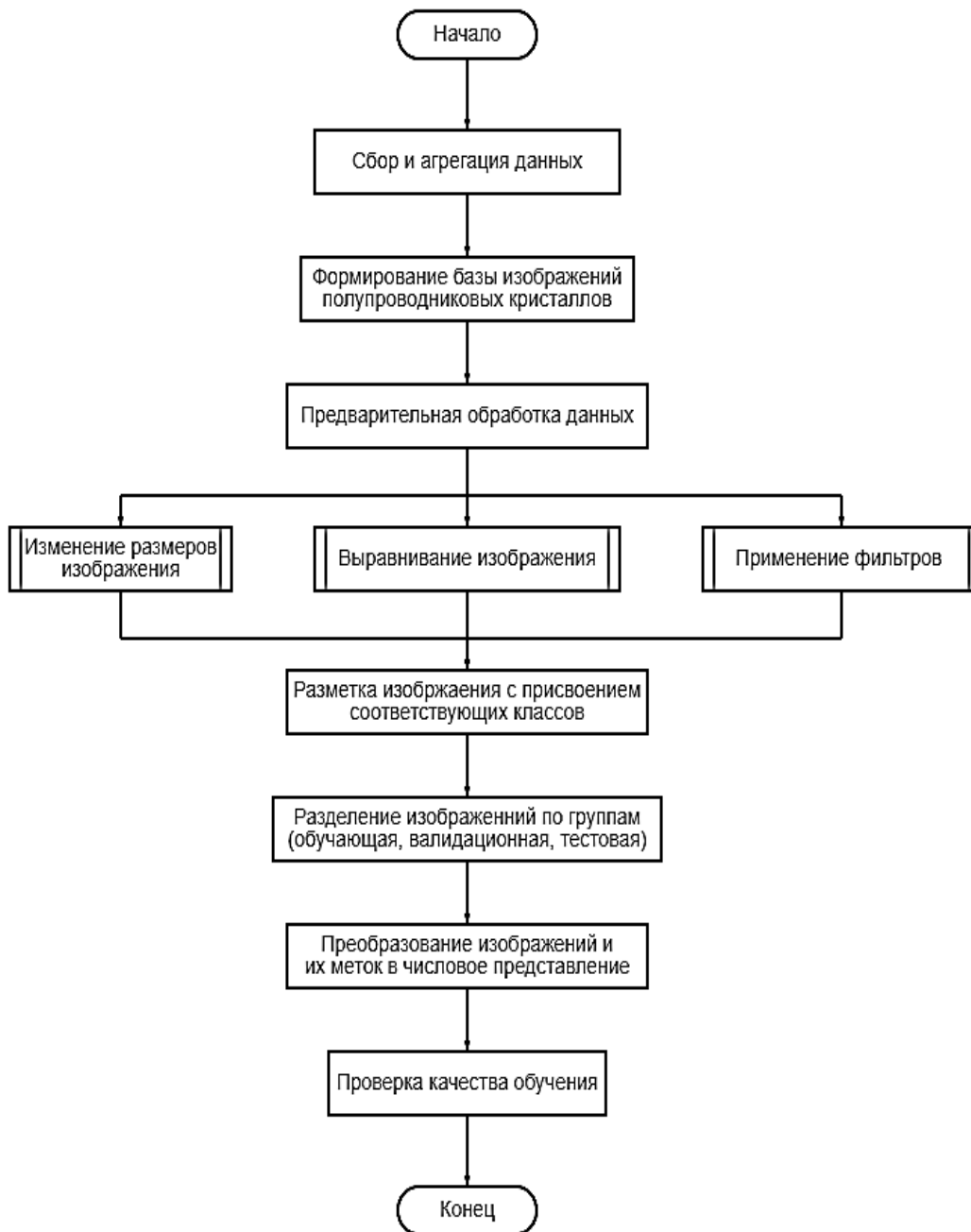


Рис. 2. Структурная схема алгоритма сбора и предварительной обработки изображений

### 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 методики получения и обработки данных оптической дефектовки топологии электронных компонентов.

В результате проведенной работы в части поставленной задачи были получены следующие результаты. Сформулированы требования

к разрабатываемой методике получения и обработки данных. Представлена структурная схема разработанной методики, включающая этапы управления, сканирования, формирования, передачи и обработки данных оптической инспекции топологии электронных компонентов. Практическая реализация методики в виде разработанного программного обеспечения «Defect collector from InnoVision» позволила получить изображения с высоким разрешением и точностью. Описан процесс сбора изображений для обучающего датасета и разработан соответствующий алгоритм. Приведены использован-



ные приемы предварительной обработки данных для их преобразования и нормализации.

#### Литература

1. Ромашенко М. А., Васильченко Д. В. Разработка аппаратной части комплекса оптической дефектовки топологии электронных компонентов // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2024. Т. 20. № 2. С. 110-115.
2. Гудфеллоу Я., Бенджио И., Курвилль А. Глубокое обучение. Пер. с англ. А. А. Слинкина. 2-е изд., испр.

М.: ДМК Пресс, 2018. 652 с. ISBN 978-5-97060-618-6.

3. Пасынков В.В., Чиркин Л.К. Полупроводниковые приборы: учебное пособие. 9-е изд., стер. СПб.: Издательство «Лань», 2021. 480 с. ISBN 978-5-8114-0368-4.

4. Техническое описание микроскопа Nexcope NX1000. URL: <https://www.mding.com.tw/pic/NX1000-1.pdf> (дата обращения: 15.02.2024).

5. Техническое описание цифровой фотокамеры MER2-2000-19U3C. URL: <https://en.daheng-imaging.com/show-106-1999-1.html> (дата обращения: 21.02.2024).

Поступила 30.05.2024; принята к публикации 26.08.2024

#### 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: [kipr@vorstu.ru](mailto:kipr@vorstu.ru), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5629-6056>

**Васильченко Дмитрий Владимирович** – аспирант, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: [kipr@vorstu.ru](mailto:kipr@vorstu.ru), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1045-0841>

### METHODOLOGY FOR OBTAINING AND PROCESSING DATA FROM OPTICAL INSPECTION OF ELECTRONIC COMPONENT TOPOLOGY

**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 the optical inspection of electronic component topology. The main task of this stage was to develop a methodology for obtaining and processing optical inspection data necessary for automated quality control of microelectronic products. The necessity of creating such a methodology, which ensures high accuracy and reliability in detecting defects in semiconductor crystals at various stages of quality control, is substantiated. The main requirements for the methodology are formulated, including initial initialization and management of hardware, software configuration, data collection from the machine vision camera, and subsequent processing. The developed structural scheme of the methodology for management, scanning, transmission, and processing of optical inspection data is presented. The stages of obtaining and processing optical images of semiconductor crystals are described, and approaches for integrating software with the hardware part of the software-hardware complex are proposed. The experimental process of collecting and processing images using the industrial inspection microscope Nexcope NX1000 and the digital camera Daheng imaging MER2-2000-19U3C is described. The algorithm for collecting and preprocessing images to form a training dataset is considered separately. Recommended techniques for preprocessing optical inspection data for their transformation and normalization are listed

**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 Small Innovative Enterprises in the Scientific and Technical Sphere" within the framework of the Start-23-1 competition (stage II) (agreement no. 5049GS1/89569 dated 10.24.2023)

#### References

1. Romashchenko M.A. Vasilchenko D.V. "Development of the hardware part of the optical defect inspection system for electronic component topology", *The Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2024, vol. 20, no. 2, pp. 110-115.
2. Goodfellow I., Bengio Y., Courville A. "Deep Learning" ("Glubokoye obucheniye"), transl. from Eng. by A.A. Slinkin, 2nd ed., Moscow: DMK Press, 2018, 652 p.: ill. ISBN 978-5-97060-618-6.
3. Pasyonkov V.V., Chirkin L.K. "Semiconductor Devices: Study Guide" ("Poluprovodnikovyye pribory: uchebnoye posobiye"), 9th ed., St. Petersburg, Izdatel'stvo "Lan", 2021, 480 p.: ill. ISBN 978-5-8114-0368-4.
4. "Technical description of the Nexcope NX1000 microscope", available at: <https://www.mding.com.tw/pic/NX1000-1.pdf> (accessed 15.02.2024).
5. "Technical description of digital camera MER2-2000-19U3C", available at: <https://en.daheng-imaging.com/show-106-1999-1.html> (accessed 21.02.2024)

Submitted 30.05.2024; revised 26.08.2024

#### 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: [kipr@vorstu.ru](mailto:kipr@vorstu.ru), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5629-6056>

**Dmitriy V. Vasilchenko** – Postgraduate Student, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: [kipr@vorstu.ru](mailto:kipr@vorstu.ru), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1045-0841>

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ НАПРЯЖЕННОСТИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ОТ ФОРМЫ СПИРАЛИ ПЛАНАРНОГО ИЗЛУЧАТЕЛЯ

Н.М. Калинин, А.И. Сукачев, Е.А. Сукачева, Д.А. Рыбников

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

**Аннотация:** дан обзор основных форм спиралей излучающих контуров, выполненных по планарной технологии, применяемых в беспроводных зарядных устройствах. Применение подобных излучателей позволяет упростить производство беспроводной зарядки, уменьшить ее габариты, а также скомпоновать излучатель на одной печатной плате непосредственно вместе с генерирующей цепью. Также подобные излучатели значительно более просты в обращении и обладают высокой стойкостью к внешним воздействиям. Для исследования были созданы модели излучателей в среде Altium Designer, после чего они были проанализированы при помощи метода конечных элементов в одном из пакетов CST Studio Suite. Полученные результаты позволили провести сравнительный анализ магнитных полей, излучаемых планарными антеннами всех приведенных в статье форм, между собой. Показано, что форма спирали играет ключевую роль при проектировании подобных излучающих систем. В заключении были выделены два основных тезиса, на которые следует опираться инженеру при проектировании беспроводного зарядного устройства с применением планарной технологии, что представляется важным для оптимизации процесса разработки и производства и повышения эффективности конечного продукта

**Ключевые слова:** планарный излучатель, излучающий контур, магнитное поле

### Введение

Ранее в статье «Зависимость напряженности магнитного поля от формы излучающего контура» за авторством Н.М. Калинина, А.И. Сукачева, А.И. Сукачевой и Р.В. Кузьменко были рассмотрены магнитные поля, излучаемые обмотками медных проводов различных форм, однако помимо обычных моток меди существует и другое исполнение излучающего контура в системах беспроводных зарядок – планарный излучатель. Такой излучатель представляет собой кусок текстолита, где при помощи проводящей дорожки создана спираль, через которую проходит ток определенной частоты и силы.

В данной статье рассмотрены магнитные поля, образуемые четырьмя различными формами спиралей планарных излучателей: круглой, прямоугольной, треугольной, шестиугольной. Исследование планарных излучателей проводилось с использованием лабораторного стенда [1] и специального программного обеспечения [2].

### Условия и метод анализа

Для корректного анализа каждый планарный излучатель находится в одинаковых усло-

виях: площадь излучателя –  $30 \text{ см}^2$ , сила тока –  $2.5 \text{ А}$ , число витков спирали –  $10$ , частота тока –  $20 \text{ кГц}$ , толщина дорожки –  $70 \text{ мкм}$ , ширина дорожки –  $1 \text{ мм}$ , в качестве материала подложки использован стеклотекстолит FR-4 толщиной  $1.36 \text{ мм}$ .

Планарные излучатели были спроектированы в комплексной системе автоматизированного проектирования радиоэлектронных средств Altium Designer (рис. 1), откуда экспортированы в пакет программного обеспечения для ЭМ-анализа в 3D CST Studio Suite (рис. 2-3).

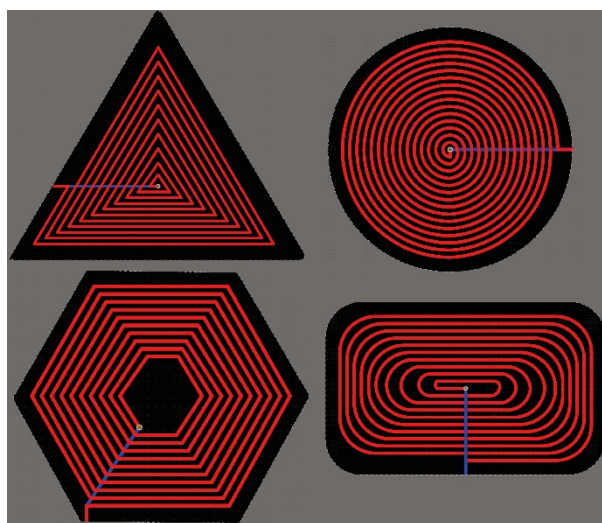


Рис. 1. Внешний вид планарных излучателей в среде Altium Designer

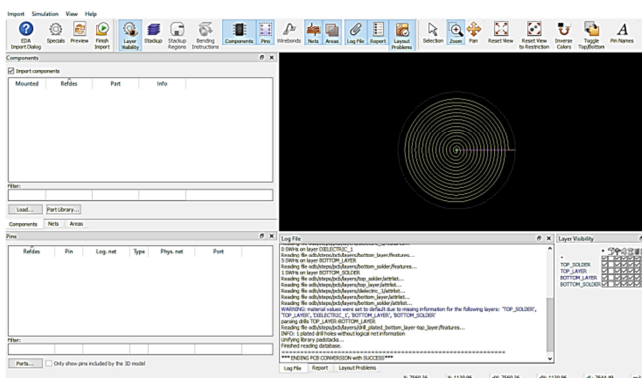


Рис. 2. Окно импорта геометрии в CST Studio Suite

Анализ проводится при помощи пакета HF для 3D симуляции, в качестве решателя используются Frequency Domain Solver.

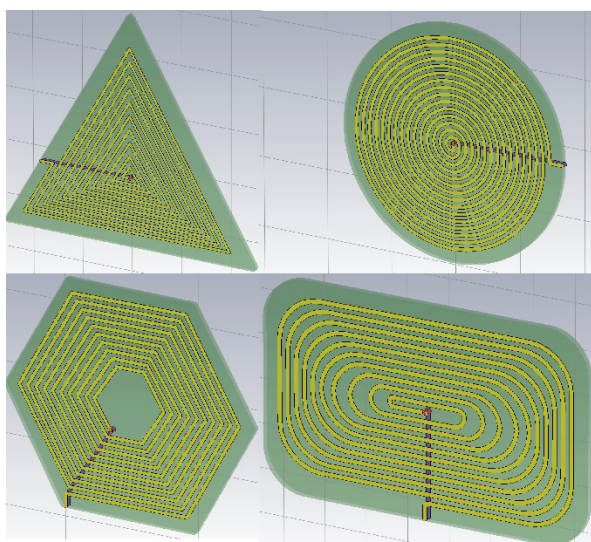


Рис. 3. Внешний вид импортированных излучателей в среде CST Studio Suite

### Результаты

Результаты моделирования могут быть отображены в двух видах: график зависимости значения напряженности магнитного поля от высоты над центром планарного излучателя и поле в разрезе. Результаты анализа представлены на рис. 4-11.

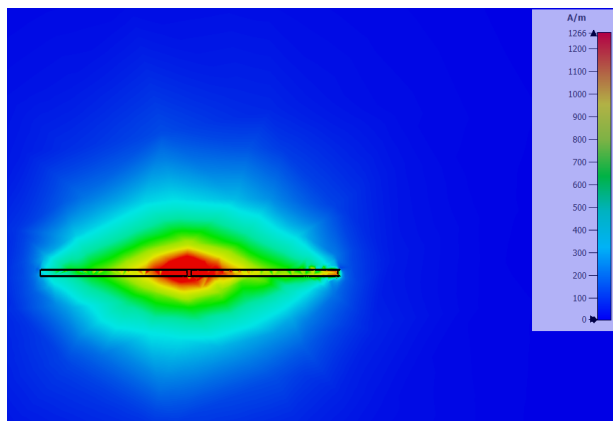


Рис. 4. Магнитное поле круглого спирального планарного излучателя в разрезе

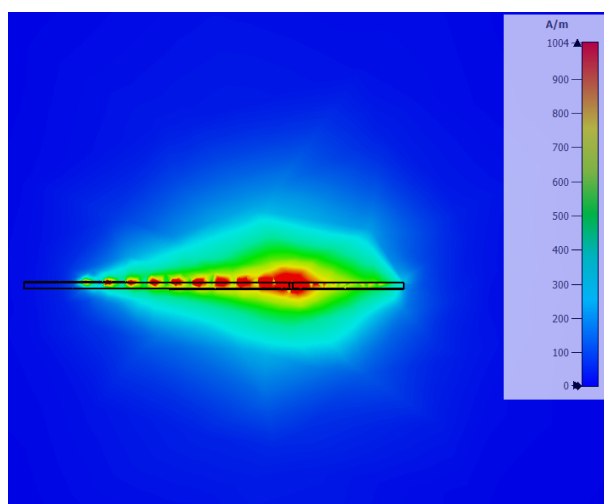


Рис. 5. Магнитное поле треугольного спирального планарного излучателя в разрезе

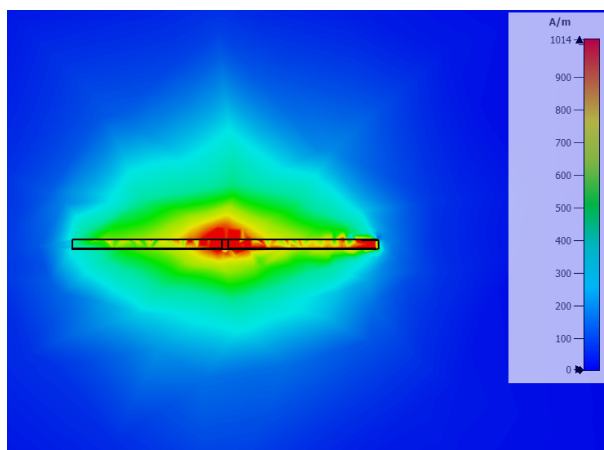


Рис. 6. Магнитное поле прямоугольного спирального планарного излучателя в разрезе

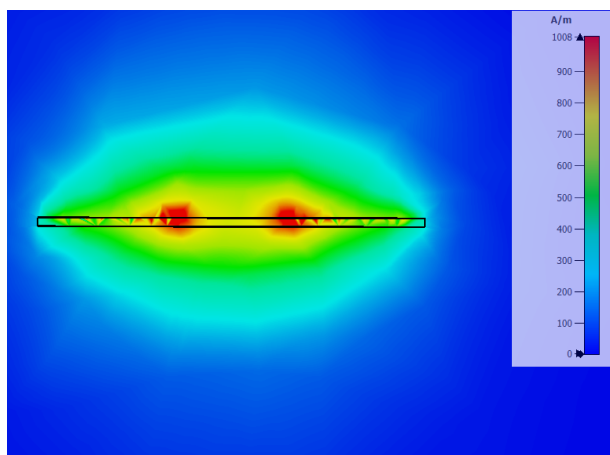


Рис. 7. Магнитное поле шестиугольного спирального планарного излучателя в разрезе

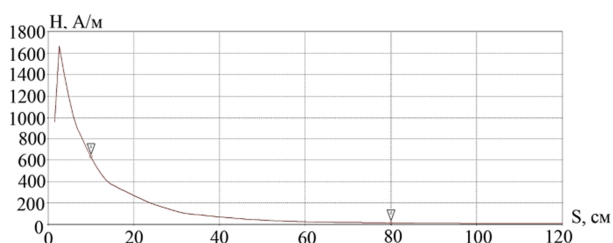


Рис. 8. Магнитное поле круглого спирального планарного излучателя

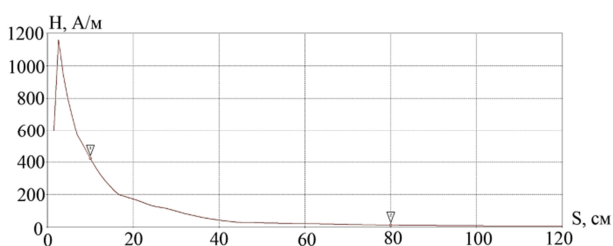


Рис. 9. Магнитное поле треугольного спирального планарного излучателя

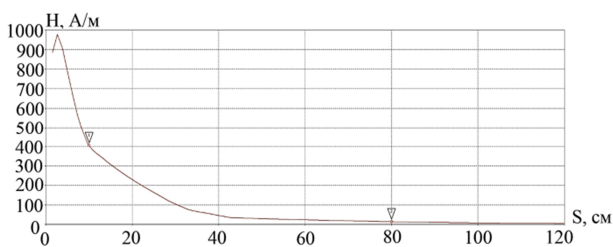


Рис. 10. Магнитное поле прямоугольного спирального планарного излучателя

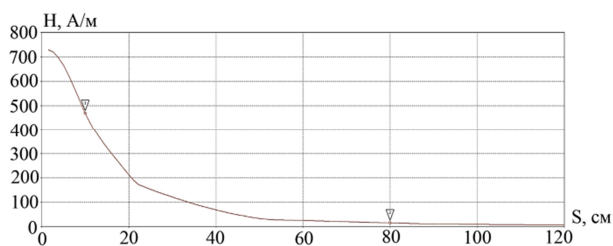


Рис. 11. Магнитное поле шестиугольного спирального планарного излучателя

На рис. 8-10 присутствует резкий выброс. Это обосновано тем, что для всех форм, кроме шестиугольной геометрический центр совпадает с переходным отверстием в плате, тогда как на шестиугольном планарном излучателе переходное отверстие не совпадает с геометрическим центром излучателя (в этом можно убедиться с помощью рис. 3), по которому идет расчет значений для графика, и поле там изначально более гладкое, без выброса. Также все графики начинаются не с нулевой координаты по той причине, что «0» соответствует низу печатной платы, а расчет поля необходим над излучателем, потому началом координат в нашем случае является верхняя плоскость печатной платы.

На каждом графике были взяты 2 точки: на расстоянии 10 мм и 80 мм от основания печатной платы. Значения напряженности магнитного поля в этих точках приведены в табл. 1.

Таблица 1

Форма спирального излучателя	Удаление 10 мм, А/м	Удаление 80 мм, А/м
Прямоугольная	404.702	13.199
Треугольная	424.261	9.478
Шестиугольная	469.242	14.524
Круглая	628.460	13.007

### Заключение

В результате моделирования и проведенных расчетов могут быть сделаны следующие выводы:

1. Чем форма излучателя ближе к кругу, тем выше напряженность магнитного поля на удалении 10 мм, т.е. для передачи энергии на малые расстояния лучше использовать круглые обмотки.

2. На расстоянии сравнимом с размером планарного излучателя и больше напряженность магнитного поля крайне мала, а потому планарные излучатели совершенно непригодны для передачи энергии на дальние расстояния, как минимум в виде одиночного излучателя.

### Литература

1. Учебный лабораторный стенд исследования антенн беспроводной зарядки / А. И. Сукачев, Д. А. Рыбников, Е. А. Сукачева, А. В. Володько // Радиолокация, навигация, связь : сборник трудов XXVII Международной научно-технической конференции, посвященной 60-летию полетов в космос Ю.А. Гагарина и Г.С. Титова, в 4 т. ом 2. Воронеж: Издательский дом ВГУ, 2021. Т. 2. С. 369-375.



2. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022613710 Российская Федерация. Программный модуль управления лабораторным стендом исследования антенн беспроводного зарядного устройства: № 2022612742: заявл. 28.02.2022: опубли.

15.03.2022 / А. И. Сукачев, Д. А. Рыбников, Д. В. Журавлев, Е. А. Сукачева; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Воронежский государственный технический университет».

Поступила 21.06.2024; принята к публикации 26.08.2024

#### Информация об авторах

**Калинин Никита Максимович** – студент, инженер, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), тел.: +7(919)230-36-13, e-mail: nmkalinin37@gmail.com

**Сукачев Александр Игоревич** – старший преподаватель, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), тел.: +7(920)219-63-53, e-mail: mag.dip@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0238-5579>

**Сукачева Елена Александровна** – ассистент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), тел.: +7(920)219-63-53, e-mail: mag.dip@yandex.ru

**Рыбников Дмитрий Александрович** – студент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), тел.: +7(920)219-63-53, e-mail: mag.dip@yandex.ru

### INVESTIGATION OF THE DEPENDENCE OF THE MAGNETIC FIELD STRENGTH ON THE SHAPE OF THE SPIRAL OF A PLANAR RADIATOR

N.M. Kalinin, A.I. Sukachev, E.A. Sukacheva, D.A. Rybnikov

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

**Abstract:** the article provides an overview of the main shapes of spirals of radiating circuits made using planar technology used in wireless chargers. The use of such emitters makes it possible to simplify the production of wireless charging, reduce its dimensions, and also assemble the emitter on one printed circuit board directly together with the generating circuit. Also, such radiators are much easier to handle and have high resistance to external influences. For the study, emitter models were created in the Altium Designer environment, after which they were analyzed using the finite element method in one of the CST Studio Suite packages. The results obtained made it possible to conduct a comparative analysis of the magnetic fields emitted by planar antennas of all the forms given in the article, among themselves. It is shown that the shape of the spiral plays a key role in the design of such radiating systems. In conclusion, two main points were identified that an engineer should rely on when designing a wireless charger using planar technology, which is important for optimizing the development and production process and improving the efficiency of the final product

**Key words:** planar antenna, radiating contour, magnetic field

#### References

1. Sukachev A.I., Rybnikov D.A., Sukacheva E.A., Volodko A.V. "Educational laboratory stand for the study of wireless charging antennas", *Radar, navigation, communications*, proc. of the XXVII International Scientific and Technical Conference dedicated to the 60th anniversary of space flights by Yu.A. Gagarin and G.S. Titov, in 4 vol. Voronezh, September 28-30, 2021, vol. 2, Voronezh, Izdatel'skiy dom VGU, 2021, pp. 369-375, EDN KQJBLT

2. Sukachev A.I., Rybnikov D.A., Zhuravlev D.V., Sukacheva E.A. "Software module for controlling the laboratory stand for the study of wireless charger antennas" ("Programmnyy modul' upravleniya laboratornym stendom issledovaniya antenn besprovodnogo zaryadnogo ustroystva"), RF Certificate of state registration of the computer program no. 2022613710, no. 2022612742, appl. 02.28.2022, publ. 03.15.2022, applicant Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Voronezh State Technical University", EDN AMJHPK

Submitted 21.06.2024; revised 26.08.2024

#### Information about the authors

**Nikita M. Kalinin** – Student, Engineer, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), tel.: +7(919)230-36-13, e-mail: nmkalinin37@gmail.com

**Alexander I. Sukachev** – Senior Lecturer, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), tel.: +7(919)230-36-13, e-mail: mag.dip@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0238-5579>

**Elena A. Sukacheva** – Assistant, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), tel.: +7(919)230-36-13, e-mail: mag.dip@yandex.ru

**Dmitry A. Rybnikov** - Student, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), tel.: +7(919)230-36-13, e-mail: mag.dip@yandex.ru



**АТМОСФЕРНАЯ ОПТИЧЕСКАЯ ЛИНИЯ СВЯЗИ С ПРИМЕНЕНИЕМ  
ПОМЕХОУСТОЙЧИВОГО КОДИРОВАНИЯ****Р.П. Краснов****Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия**

**Аннотация:** в связи с постоянным ростом объема передаваемых данных и высоким спросом на пропускную способность абонентских каналов в качестве широкополосной технологии «последней мили» может выступать атмосферная оптическая линия связи (АОЛС). Высокая спектральная и информационная эффективность по сравнению с радиочастотными линиями ухудшается за счет воздействия атмосферных эффектов в канале связи, в том числе и за счет атмосферной турбулентности. Для повышения качества связи предложено совместное использование методов помехоустойчивого кодирования и ортогонального частотного разделения каналов (OFDM). В статье рассмотрена система атмосферной оптической связи OFDM-типа, в которой для сигналов на поднесущих использовалась бинарная фазовая манипуляция (BPSK). Турбулентный атмосферный оптический канал описывался статистической моделью экспоненциального распределения Вейбулла. В качестве методов помехоустойчивого кодирования рассмотрены сверточные коды, коды Рида-Соломона и турбо-коды. Результаты показывают, что помехоустойчивые коды повышают качество связи системы передачи. Показано также, что турбо-коды значительно улучшают возможности коррекции ошибок по сравнению с другими методами в тех же условиях турбулентности и протяженности линии связи

**Ключевые слова:** АОЛС, битовая ошибка, OFDM, помехоустойчивое кодирование

**Введение**

Повсеместное внедрение цифровых технологий неизменно увеличивает спрос на полосу пропускания и информационную емкость каналов пользователей, что служит для увеличения скорости передачи данных, и улучшения качества обслуживания. Все эти требования сталкиваются с перегруженностью радиочастотного спектра. В то же время системы атмосферной оптической связи обладают многочисленными преимуществами: широкая полоса пропускания, нелицензируемый спектр, большая скорость передачи данных на «последней миле», быстрое развертывание, высокий уровень информационной безопасности, и т. д. [1].

К сожалению, повсеместному развертыванию таких систем связи существенным образом препятствует сильная зависимость качества связи от атмосферных условий в оптическом канале связи. Дождь, туман, дымка вызывают значительное ослабление оптических сигналов в канале. Кроме того, в оптическом пучке возникает эффект флуктуации мощности в поперечном сечении пучка – сцинтилляция. Особенно сильно эти эффекты проявляются при дальности связи 1 км и более [2], что и объясняет применимость АОЛС именно на «последней миле». Поскольку световой сигнал распро-

страняется исключительно по прямолинейной трассе, при развертывании АОЛС требуется обеспечивать связь в условиях прямой видимости.

Для преодоления указанных выше ограничений для повышения качества связи АОЛС применяют различные техники: гибридные системы с резервным радиоканалом, ретрансляторы, адаптивный прием, технологии OFDM и канального кодирования [3].

Применение миллиметровых приемопередатчиков позволяет снизить эффекты атмосферного канала, поскольку главные причины ослабления оптического сигнала слабо сказываются на радиосигнале.

Использование ретрансляторов и технологий корпоративного разнесения позволяет также снизить ограничение на связь в пределах прямой видимости, однако, за счет усложнения и удорожания всей системы в целом.

Адаптивные методы приема требуют сложного приемного оборудования и схем модуляции, в то время как в значительном количестве систем АОЛС до недавнего времени применялся простейший метод модуляции добротности из-за простоты практической реализации [5]. Такая система дополняется адаптивным порогом, что требует организации дополнительного канала обратной связи, по которому приемник получает информацию о состоянии канала для коррекции порога. Переход к систе-

мам с позиционной или угловой манипуляцией позволяет отказаться от такого способа построения систем оптической связи. Из-за сравнительно простых схем модемов, как и для множества практических реализаций АОЛС далее использована система, использующая двоичную фазовую манипуляцию – BPSK. Эти сигналы формируют каналы схемы мультиплексирования с ортогональным частотным разделением каналов – OFDM, являющейся широко применяемой и, следовательно, проработанной.

При использовании OFDM можно снизить межсимвольные искажения канальных сигналов и повысить помехоустойчивость к замираниям [6].

Основной принцип действия OFDM состоит в том, что входной высокоскоростной поток двоичных данных разделяется на несколько низкоскоростных потоков, передаваемых одновременно в виде набора ортогональных поднесущих.

В такой реализации получается система, устойчивая к атмосферным замираниям и, одновременно, снижающая эффект сцинтилляции на качество приема.

Как и при организации передачи в радиосистемах, для повышения качества связи можно применить одну из техник помехоустойчивого кодирования. В этом случае, за счет недоиспользования пропускной способности канала, приобретает возможность обнаружения и исправления битовых ошибок. Поскольку в АОЛС кодек выполняет преобразование над электрическими сигналами, можно применять стандартные помехоустойчивые коды, традиционно реализуемые в различных связных протоколах.

Системы оптической связи, использующие помехоустойчивые коды, хорошо исследованы. Так, АОЛС с OFDM и LDPC - кодом изучалось в [8]. В [9] проведено исследование системы OFDM АОЛС с гибридными канальными кодами. В [10] проведен анализ применения в подобной системе кодов Рида-Соломона для райсовской статистики канала, ожидаемо показавший эффективность таких кодов в борьбе с замираниями.

### Постановка задачи

В статье предложена система АОЛС с OFDM, работающая в атмосферном канале, описываемым статистикой Вейбулла, в которой применены методы помехоустойчивого кодирования. Для определения выигрыша кодирования также анализировалась средняя вероятность битовых ошибок АОЛС с передачей данных в виде сигнала BPSK без помехоустойчивых кодов в условиях слабой, средней и сильной турбулентности. Аналогичный анализ при различных степенях турбулентности приведен для сверточных кодов, кодов Рида-Соломона, а также турбо-кодов.

Блок-схема АОЛС с OFDM и помехоустойчивым кодированием представлена на рис. 1. Всю систему предлагается разбить на три функциональных узла: передатчик, канал и приемник. RS – код вводится в систему на стороне передатчика, как показано на рис. 1. Входной поток двоичных данных поступает на канальный кодер, где к нему применяется один из рассматриваемых ниже методов помехоустойчивого кодирования.

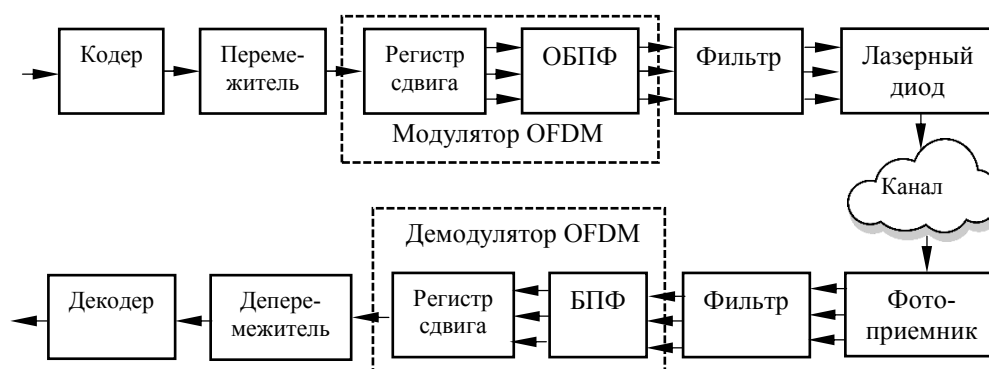


Рис. 1

Переключатель переупорядочивает данные для снижения влияния замираний в канале. Далее данные поступают в блок формирования OFDM сигнала, состоящий из регистра сдвига, преобразующего входной поток в набор параллельных низкоскоростных сигналов, и блок обратного быстрого преобразования Фурье ОБПФ, который переводит кодированные модулированные данные из частотной области во временной формат.

Затем данные очищаются от возможных внеполосных составляющих выходным фильтром и поступают на модулятор лазерного излучателя и далее в канал связи.

Рассмотрим процесс формирования OFDM сигнала на  $N$  поднесущих. Его вид можно представить следующим образом:

$$S_{OFDM}(t) = \sum_{k=0}^{N-1} S_k(t) = \sum_{k=0}^{N-1} \dot{S}_k \exp[j(\omega_k + \omega_{нес})t], 0 \leq t \leq T_c \quad (1)$$

где  $\dot{S}_k$  – комплексный сигнал на  $k$ -ой поднесущей,  $\omega_k = 2\pi k/T_c$  – частота  $k$ -ой ортогональной поднесущей,  $T_c$  – длительность символа OFDM,  $N$  – количество поднесущих,  $\omega_{нес}$  – несущая частота.

Процесс получения такого набора комплексных сигналов, как упоминалось выше, осуществляется за счет использования ОБПФ, обеспечивающего условие ортогональности [6]. Обычно сигналы OFDM для предотвращения межсимвольных искажений дополняют защитными интервалами, располагаемыми обычно в начале блока данных. Если пренебречь защитным интервалом, то длительность символа OFDM станет равна окну анализа Фурье. При этом сам сигнал  $S_{OFDM}(t)$  оказывается чисто действительным благодаря свойству симметрии ОБПФ. Это означает, что будет выполняться равенство  $S_{N-k} = S_k^*$ ,  $k = 1, \dots, N/2$ . К сожалению, такое свойство потребует удвоения размера блока ОБПФ, так как потребуются дополнительный набор нулей, чтобы получить общую длину, равную  $2N$ . Такой подход является стандартным для аппаратуры цифровой абонентской линии (DSL) [11].

Получаемый действительный сигнал  $S_{OFDM}(t)$  модулирует выходную оптическую мощность лазерного диода излучателя. Переда-

ваемая им оптическая мощность  $P_{вых}(t)$  пропорциональна модулирующим сигналам:

$$P_{вых}(t) = P_{cp} \left[ 1 + \sum_{k=0}^{N-1} m_k \dot{S}_k(t) + a_3 \left( \sum_{k=0}^{N-1} m_k \dot{S}_k(t) \right)^3 \right], \quad (2)$$

здесь  $P_{cp}$  – средняя оптическая мощность передающего модуля,  $a_3$  – коэффициент нелинейности третьего порядка,  $m_k$  – индекс оптической модуляции  $k$ -ой поднесущей, что дает итоговое значение [12]:

$$m_0 = \frac{1}{N} \sqrt{\sum_{k=0}^{N-1} m_k^2}. \quad (3)$$

Полученный OFDM- сигнал передается по атмосферному каналу, статистика которого описывается экспоненциальным распределением Вейбулла и детально анализируется в следующем разделе.

После распространения по атмосферному каналу связи оптический сигнал поступает в приемник. Фотоприемник, включающий входную оптику, фотодиод и трансимпедансный усилитель, преобразует оптический сигнал в электрический. После сопутствующей фильтрации восстановление исходного цифрового потока в демодуляторе OFDM. В его составе имеется блок быстрого преобразования Фурье – БПФ, где происходит восстановление низкоскоростных параллельных цифровых потоков. Затем при помощи регистра сдвига формируется высокоскоростной цифровой поток. Далее структура данных восстанавливается демультиплексором и данные поступают на декодер канала, где, при необходимости, производится обнаружение и исправление ошибок, возникающих при передаче в канале связи.

Выражение для тока фотоприемника можно представить следующим образом:

$$i_{вых}(t) = I_{ф\phi} \left[ 1 + \sum_{k=0}^{N-1} m_k S_k(t) + a_3 \left( \sum_{k=0}^{N-1} m_k S_k(t) \right)^3 \right], \quad (4)$$

где  $I_{ф\phi} = \rho \alpha P_{вых} H_{амм}$  – постоянная составляющая фототока, включающая влияние чувствительности фотодиода  $\rho$ , ослабления применяемой оптики  $\alpha$  и канала связи  $H_{амм}$ .

Серьезное ухудшение качества связи возникает из-за влияния интермодуляционных искажений, для  $k$ -ой поднесущей дисперсия соответствующего шума может быть записана как

$$\sigma_k^2 = \frac{18a_3^2 m_0^6 I_{\phi\phi}^2}{2} [2k(N-k+1) + N(N-5) + 2 - \frac{(-1)^k - (-1)^{2N+k}}{2}]^2, \quad (5)$$

Отношение сигнал/шум для  $k$ -ой несущей в приемнике определяется как:

$$\gamma_k = \frac{(m_k \rho P_{cp} I_{\phi\phi})^2}{\sigma_k^2} = \bar{\gamma}_k I_{\phi\phi}^2, \quad (6)$$

где  $\bar{\gamma}_k$  – среднее отношение сигнал/шум, приведенное на энергию бита в отсутствие затухания.

### Модель канала

Воздействия атмосферного канала на передаваемый оптический сигнал могут быть описаны статистическими законами. При этом критически важно использовать наиболее точное приближение для заданных условий передачи. Для этого применяется некоторое количество законов распределения: лог-нормальное (дает хорошую точность при слабой турбулентности), гамма-гамма [7] и К-распределение [2] (хорошо согласуются с экспериментом при средней и сильной турбулентности). Однако далее в статье для моделирования влияния атмосферного канала применено экспоненциальное распределение Вейбулла как модель, наиболее близко согласующаяся с экспериментальными данными для всех видов турбулентности атмосферы: от слабой до сильной [4].

Для указанного экспоненциального распределения Вейбулла плотность вероятности  $p_I(I)$  и интегральная функция вероятности  $P_I(I)$  представляются соответственно [4]:

$$p_I(I) = \frac{\alpha\beta}{\eta} \left[ \frac{I}{\eta} \right]^{\beta-1} \cdot \exp \left[ - \left( \frac{I}{\eta} \right)^\beta \right] \times \left( 1 - \exp \left[ - \left( \frac{I}{\eta} \right)^\beta \right] \right)^{\alpha-1}, \quad (7)$$

$$P_I(I) = \left( 1 - \exp \left[ - \left( \frac{I}{\eta} \right)^\beta \right] \right)^\alpha. \quad (8)$$

Структурный параметр  $\alpha$  задается как:

$$\alpha = 3,931 \left( \frac{D}{\rho} \right)^{-0,519}, \quad (9)$$

где  $D$  – диаметр приемной апертуры,  $\rho = (1,46 C_n^2 k_0^2 L)^{-3/5}$  – атмосферный радиус когерентности,  $C_n^2$  – структурная константа турбулентности,  $k_0$  – волновое число,  $L$  – протяженность канала.

Параметр  $\beta$  определяется как:

$$\beta = (\alpha \sigma_I^2)^{-6/11}, \quad (10)$$

где  $\sigma_I^2$  – индекс сцинтилляции.

Параметр  $\eta$  определяется, согласно [4]:

$$\eta = \frac{1}{\alpha \Gamma(1+1/\beta) g(\alpha, \beta)}, \quad (11)$$

где  $\Gamma(\cdot)$  – гамма-функция, а

$$g(\alpha, \beta) = \sum_{i=0}^{\infty} \frac{(-1)^i (i+1)^{\frac{1-\beta}{\beta}} \Gamma(\alpha)}{i! \Gamma(\alpha-i)}. \quad (12)$$

Подставляя (6) в (7) и (8), получим плотность вероятности для отношения сигнал/шум  $\gamma$  (13) и интегральную функцию вероятности (14) соответственно:

$$p_\gamma(\gamma) = \frac{\alpha\beta\gamma^{\beta/2}}{2(\bar{\gamma}\eta^2)^{\beta/2}} \exp \left[ - \left( \frac{\gamma}{\bar{\gamma}\eta^2} \right)^{\beta/2} \right] \times \left( 1 - \exp \left[ - \left( \frac{\gamma}{\bar{\gamma}\eta^2} \right)^{\beta/2} \right] \right)^{\alpha-1}, \quad (13)$$

$$P_\gamma(\gamma) = \left( 1 - \exp \left[ - \left( \frac{\gamma}{\bar{\gamma}\eta^2} \right)^{\beta/2} \right] \right)^\alpha. \quad (14)$$

При выборе модуляции BPSK средняя частота битовых ошибок в турбулентном канале будет равна [13]:

$$P_{BPSK} = N^{-1} \sum_{i=0}^{N-1} \operatorname{erfc} \left[ \sqrt{\gamma_i} \sin(\pi / 2) \right]. \quad (15)$$

Средняя частота битовых ошибок для системы АОЛС с OFDM в канале с распределени-

ем, описываемым (7), определяется усреднением частоты битовых ошибок над статистикой турбулентного канала [13]:

$$\bar{P} = -\int_0^{\infty} \frac{dP_{BPSK}(I)}{dI} p_I(I) dI \quad (16)$$

Из-за сложности определения интеграла в (16) применим к нему разложение в конечный ряд с помощью квадратурной функции Гаусса-Лагерра:

$$\bar{P} = \frac{1}{N\sqrt{\pi}} \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=1}^m H_j \left[ 1 - \exp \left\{ - \left( \frac{\sqrt{\gamma_j}}{\bar{\gamma}_i \eta \sin \frac{\pi}{2}} \right)^\beta \right\} \right]^\alpha, \quad (17)$$

где  $\gamma_i$  –  $i$ -ый корень обобщенного многочлена Лагерра  $L_m^{(-1/2)}(\gamma)$ , а вес  $H_i$  можно вычислить как [14]:

$$H_i = \frac{\Gamma\left(m + \frac{1}{2}\right) \gamma_i}{m!(m+1)^2 [L_{m+1}^{(-1/2)}(\gamma_i)]^2} \quad (18)$$

### Помехоустойчивое кодирование

Оценим влияние на вероятность ошибки в АОЛС с BPSK модуляцией применение методов помехоустойчивого кодирования.

В этом случае канал связи будет описываться либо как двоичный симметричный для сверточного и турбо-кода, либо как  $q$ -ичный симметричный для  $q$ -ичного кода Рида-Соломона.

Для сверточного кода предполагается декодирование по алгоритму Витерби, верхняя граница вероятности битовой ошибки для которого [15]:

$$\bar{P}_{ou} \leq \frac{1}{k} \sum_{i=d_{min}}^{\infty} w_i P_i, \quad (19)$$

где  $k$  – число информационных символов,  $d_{min}$  – минимальное кодовое расстояние,  $w_i$  – полный информационный вес путей  $i$ -го веса,  $P_i$  – вероятность выбора неправильного пути, который будет отличаться от правильного на  $i$  позициях. Значения  $w_i$  приводятся в [16].

$P_i$  в двоичной симметричном канале с переходными вероятностями  $p$  задается как [15]:

$$P_i = \begin{cases} \sum_{y=(i+1)/2}^i C_i^y p^y (1-p)^{i-y}, & i \text{ нечетно} \\ \frac{C_i^{\frac{i}{2}} p^{\frac{i}{2}} (1-p)^{\frac{i}{2}}}{2} + \\ + \sum_{y=\frac{i}{2}+1}^i C_i^y p^y (1-p)^{i-y}, & i \text{ четно} \end{cases} \quad (20)$$

Коды Рида-Соломона с минимальным кодовым расстоянием  $d_{min} = 2t+1$  исправляют  $t = (n - k/2)$  ошибок. Поскольку коды Рида-Соломона являются подвидом кодов БЧХ, использовалась скорректированная верхняя граница ошибок БЧХ-кодов. Вероятность битовой ошибки при использовании декодирования с жесткими решениями составит величину [15]:

$$\bar{P}_{ou} \approx \left( \frac{q/2}{q-1} \right) \frac{1}{n} \sum_{i=t+1}^n (i+t) C_n^i p^i (1-p)^{n-i}, \quad (21)$$

где  $p$  – вероятность ошибки в  $q$ -ичном симметричном канале,  $q$  – разрядность кодового символа.

Турбо-коды относятся к классу каскадных кодов и строятся последовательным кодированием потока данных сначала внешним  $(n_1, k_1)$  кодом, а затем внутренним  $(n_2, k_2)$  кодом. Получаемый  $(N, K)$  код представляет собой двумерную структуру данных с метриками  $N = n_1 n_2$  и  $K = k_1 k_2$  и кодовой скоростью  $R_k = K/N$ . При использовании турбо-кодов вероятность битовой ошибки оценивается по верхней границе [17]:

$$\bar{P}_{ou} \leq \sum_{d=d_{min}}^{\infty} A_d P_d, \quad (22)$$

где  $A_d$  – объем алфавита источника,  $P_d$  – вероятность ошибки для кодового слова, который ограничивается группами из  $N_k$  бит, соответствующих наборам информационных бит.

Для турбо-кодов с кодовой скоростью 1/2 можно ограничиться  $N$  членами суммы, тогда получаем следующее выражение [17]:

$$\bar{P}_{ou} \leq \sum_{i=d_{min}}^N \frac{\bar{w}_i n_i}{K} P_i, \quad (23)$$

где  $n_i$  – число кодовых слов веса  $i$ , а  $P_i$  определяется из (20).



### Численное моделирование

Передающий модуль АОЛС формировал оптические сигналы с длиной волны 1550 нм на передающую и приемную апертуру, диаметрами 20 см, протяженность канала связи выбиралась равной 800 м.

Структурная постоянная показателя преломления менялась от  $C_n^2 = 3 \cdot 10^{-17}$  и дисперсией Рытова  $\sigma_R^2 = 0,2$ , определяемой как

$$\sigma_R^2 = 1,23 C_n^2 k^{7/6} L^{11/6}, \quad (24)$$

для слабой турбулентности до средней с  $C_n^2 = 5 \cdot 10^{-15}$  и  $\sigma_R^2 = 1,5$  и сильной с  $C_n^2 = 2 \cdot 10^{-14}$  и  $\sigma_R^2 = 16$  [3].

В системе OFDM применялась передача на 16 поднесущих, используя сигналы двоичной фазовой манипуляции BPSK. Коэффициент оптической модуляции полагался равным  $m_0 = 0,7$ , средняя излучаемая мощность лазерного диода 800 мВт.

В качестве методов помехоустойчивого кодирования применялись следующие. Сверточный код с параметрами:  $R_k = 1/2$ ,  $d_{min} = 5$ ,  $K = 3$ , значения  $w_i$  были заимствованы из [15], (31,27) – код Рида-Соломона с  $q = 3$ , а также (37,21) – турбо-код с параметрами  $d_{min} = 6$ ,  $n_i = 3$ ,  $\bar{w}_i = 2$ , размер перемежителя 65536 бит. Результаты моделирования представлены на рис. 2-4 для случаев слабой, умеренной и сильной турбулентностей соответственно.

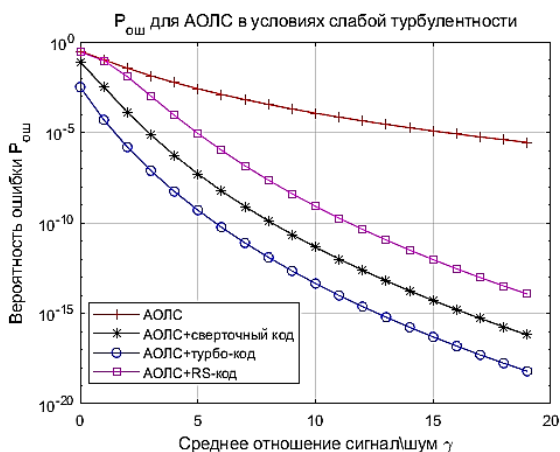


Рис. 2

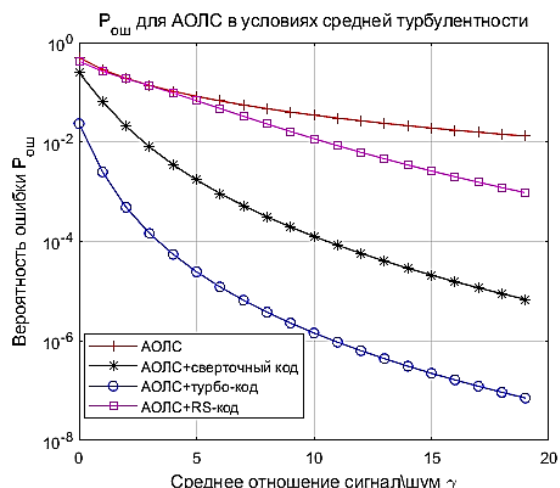


Рис. 3

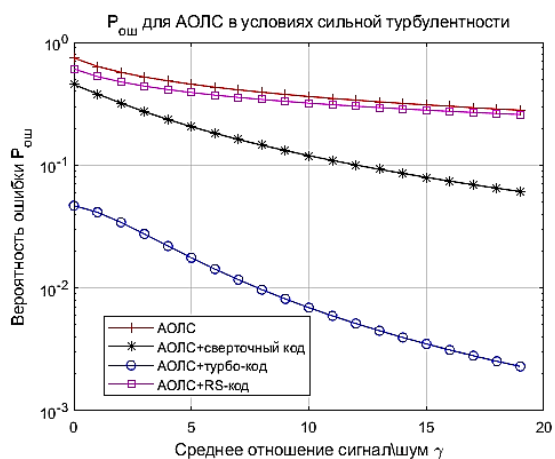


Рис. 4

Из представленных данных, очевидно, следует, что все используемые виды помехоустойчивого кодирования повышают качество связи в системе, однако энергетический выигрыш кодирования находится в сильной зависимости от типа кода и условий передачи в атмосферном канале. Интересно, что для слабой и средней турбулентности разброс в вероятностях битовой ошибки для всех трех видов кодирования при отношении сигнал/шум 10дБ составляет 4 порядка, в то время как при возрастании турбулентности до высоких значений этот разброс сокращается до полутора порядков.

Ожидаемо наиболее эффективным методом кодирования оказался турбо-код, а код Рида-Соломона обеспечивает сколько-нибудь приемлемый выигрыш кодирования лишь в случае слабой атмосферной турбулентности в канале.

Заявленная в [18] вероятность ошибки порядка  $10^{-2}$  для турбо-кода при отношении сиг-

нал/шум около 0 поддерживается для всех случаев турбулентности.

Полученные скромные результаты для кода Рида-Соломона во многом определяются сравнительно небольшим числом исправляемых ошибок, равным 2. Для оценки потенциальных возможностей кодов с более высокими корректирующими способностями рассмотрим код (31,21), исправляющий 5 ошибок и код (31,17), исправляющий 7 ошибок. На рис. 5 представлены вероятности битовых ошибок для таких кодов при передаче данных в условиях средней турбулентности в канале.

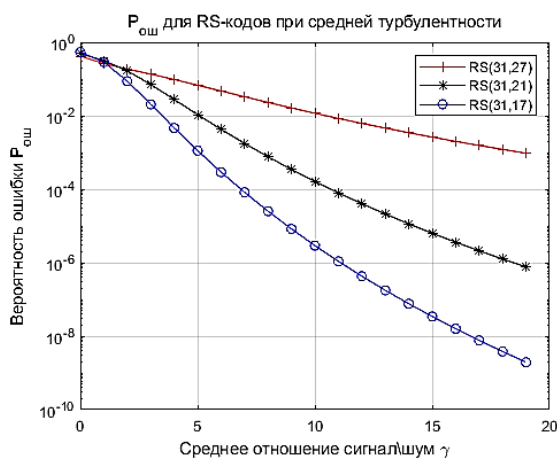


Рис. 5

Сравнивая полученные результаты с данными рис. 3, можно заметить, что код (31,17) становится соизмерим по эффективности с турбо-кодом для отношений сигнал/шум более 10 дБ, а код (31,21) показывает эффективность, близкую к сверточному коду.

Эффективность сверточных кодов в значительной степени определяется скоростью кодирования  $R_k$ . Оценим ее влияние на качество связи АОЛС для случая передачи в условиях средней турбулентности в атмосферном канале. Было рассмотрено два сверточных кода с  $R_k$ , равной 1/3 и 2/3 с  $d_{min}$ , равным 8 и 3, соответственно. Результаты моделирования показаны на рис. 6.

Как видно из показанных зависимостей, снижение скорости кодирования до уровня  $R_k = 1/3$  дает существенный прирост корректирующей способности обеспечивая энергетический выигрыш кодирования для  $P_{ош} = 10^{-5}$  равный 6 дБ.

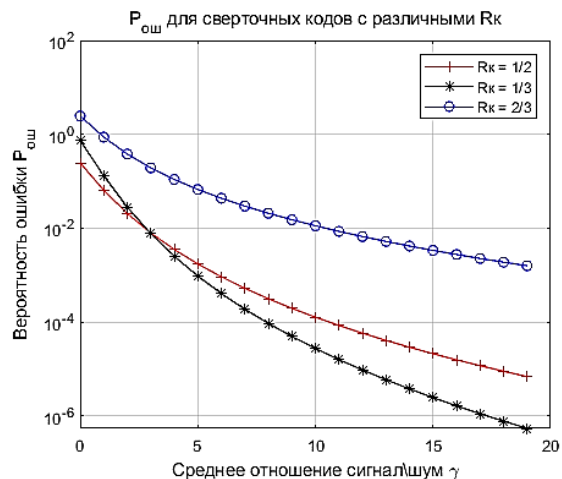


Рис. 6

Эффективность же турбо-кодов в большей степени определяется способом перемежения, а также метриками и длиной перемежителя. При введении в рассмотрение (31,17) – кода в условиях слабой турбулентности энергетический выигрыш кодирования при  $P_{ош} = 10^{-5}$  составляет менее 1 дБ (рис. 7).

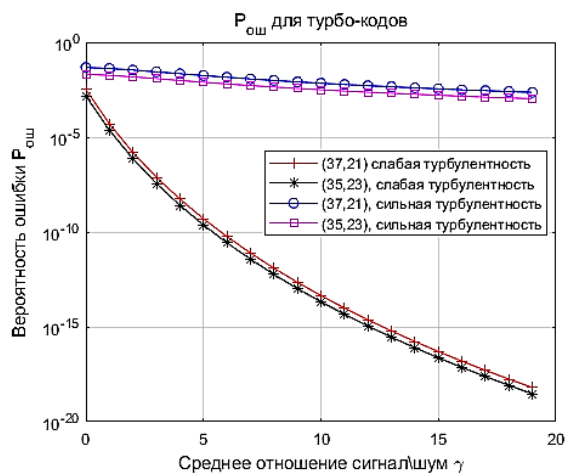


Рис. 7

### Заключение

В статье исследовались характеристики многоканальной атмосферной оптической линии связи с применением технологии OFDM и помехоустойчивым кодированием. Атмосферный канал описывался экспоненциальной моделью Вейбулла, в качестве методов помехоустойчивого кодирования выбирались сверточный код, циклический код на примере кода Рида-Соломона и турбо-код в качестве иллюстрации применения каскадных методов кодирова-

ния. Получены выражения для определения вероятности битовой ошибки АОЛС.

Анализ результатов моделирования показывает, что качество связи может быть улучшено за счет применения методов помехоустойчивого кодирования, при этом наибольшей эффективностью отличается турбо-код.

#### Литература

1. Willebrand H., Ghuman B. Free Space Optics: Enabling Optical Connectivity in Today's Networks. Indianapolis, IN: Sams Publishing, 2002. 259 p.
2. Andrews L., Phillips R., Hopen C. Laser Beam Scintillation With Applications. New York: SPIE Press, 2001. 416 p.
3. Kedar D., Arnon S. Urban optical wireless communications networks: the main challenges and possible solutions // IEEE Commun. Mag. 2003. Vol. 42. No. 5. PP. 2-7.
4. Yura H., Rose Exponentiated T. Weibull distribution family under aperture averaging Gaussian beam waves: comment // Opt. Express. 2012. Vol. 20. No. 18. PP. 20680–20683.
5. Son I. K., Mao S. A survey of free space optical networks // Digital communications and networks. 2017. Vol. 3. No. 2. PP. 67-77.
6. Transmission analysis of OFDM-based wireless services over turbulent radio-on-FSO links modeled by gamma-gamma distribution / A. Bekkali, C. Ben Naila, K. Kazaura, K. Wakamori, M. Matsumoto // IEEE Photonics J. 2010. Vol. 2. No. 3. PP. 510-520.
7. Uysal M., Li J.T., Y M. Error rate performance analysis of coded free-space optics link over gamma-gamma atmospheric turbulence channels // IEEE transactions on wireless communications. 2006. Vol. 5. No. 6. PP. 1229-1233.
8. Djordjevic I. B., Vasic B., Neifeld M.A. LDPC coded OFDM over the atmospheric turbulence channel // Optics Express. 2007. Vol. 15. No. 10. PP. 6336-6350.
9. Gupta, Ritu et al. Performance of OFDM: FSO Communication System with Hybrid Channel Codes during Weak Turbulence. // J. Comput. Networks Commun. 2019. PP. 1306491:1-1306491:6.
10. Ogundile O. O., Ijiga E. O., Versfeld D. J. J. On the Analysis of Reed-Solomon Codes for OFDM Systems over Rician Fading Channels // SAIEE Africa Research Journal. 2017. Vol. 108. No. 3. PP. 108-116.
11. Akansu A. N., Xueming Lin A comparative performance evaluation of DMT (OFDM) and DWMT (DSBMT) based DSL communications systems for single and multitone interference // Proceedings of the 1998 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing, ICASSP '98. 1998. Vol. 6. PP. 3269-3272.
12. Wang, Yi et al. On the Performance of Coherent OFDM Systems in Free-Space Optical Communications // IEEE Photonics Journal. 2015. Vol. 7. PP. 1-10.
13. Скляр Б. Цифровая связь: теоретические основы и практическое применение. М.: Вильямс, 2003. 1104 с.
14. Tables for the evaluation of  $\int_0^{\infty} x^{\beta} e^{-x} f(x) dx$  Gauss-Laguerre quadrature / P. Concus, D. Cassatt, G. Jaehning, E. Melby // Math. Comput. 1963. Vol. 17. No. 83. PP. 245–256.
15. Золотарёв В. В., Овечкин Г. В. Помехоустойчивое кодирование. Методы и алгоритмы: справочник. Под ред. чл.-кор. РАН Ю. Б. Зубарева. М.: Горячая линия–Телеком, 2004. 126 с.
16. Lin S., Costello DJ. Error Control Coding. Prentice-Hall Inc., Englewood Cliffs, N.J., 1983. 603 p.
17. Vafi, Sina, Wysocki Tadeusz A. Computation of the free distance and low weight distribution of turbo codes with convolutional interleavers // 2004 IEEE 15th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications. 2004. Vol. 2. PP. 1356-1359.
18. Xiang-Gen Xia Understanding turbo codes: A signal processing study // Journal of Information and Intelligence. 2024. Vol. 2. Issue 1. PP. 1-13.

Поступила 07.05.2024; принята к публикации 26.08.2024

#### Информация об авторе

**Краснов Роман Петрович** – канд. техн. наук, доцент кафедры радиотехники, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: rkrasnov@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4065-4557>

## FREE-SPACE OPTICAL COMMUNICATION LINE USING FORWARD ERROR CORRECTION CODING

**R.P. Krasnov**

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

**Abstract:** due to the constant growth in the volume of transmitted data and the high demand for the capacity of subscriber channels, a free space optical communication line (FSO) can act as a “last mile” broadband technology. High spectral and information efficiency compared to radio frequency lines is at the same time deteriorated by atmospheric effects in the communication channel, including atmospheric turbulence. To improve the quality of communication, the joint use of noise-resistant coding and orthogonal frequency division (OFDM) methods has been proposed. The article discusses an OFDM-type atmospheric optical communication system in which binary phase shift keying (BPSK) was used for subcarrier signals. Turbulent atmospheric optical channel was described by a statistical model of exponential Weibull distribution. Convolutional codes, Reed-Solomon codes and turbo codes considered as noise-resistant coding methods. The results show that noise-resistant codes

improve the communication quality of the transmission system. It is also shown that turbo codes significantly improve error correction capabilities compared to other methods under the same turbulence and link length conditions

**Key words:** FSO, bit error rate, OFDM, forward error correction coding

### References

1. Willebrand H., Ghuman B. “Free Space Optics: Enabling Optical Connectivity in Today’s Networks”, Indianapolis, Sams Publishing, 2002, 259 p.
2. Andrews L., Phillips R., Hopen C. “Laser Beam Scintillation With Applications”, New York, SPIE Press, 2001, 416 p.
3. Kedar D., Arnon S. “Urban optical wireless communications networks: the main challenges and possible solutions”, *IEEE Commun. Mag.*, vol. 42, no. 5, 2003, pp. 2-7,
4. Yura H., Rose T. “Exponentiated Weibull distribution family under aperture averaging Gaussian beam waves: comment”, *Opt. Express*, vol. 20, no. 18, 2012, pp. 20680–20683.
5. Son I.K., Mao S. “A survey of free space optical networks”, “Digital communications and networks”, vol. 3, no. 2, 2017, pp. 67-77.
6. Bekkali A., Ben Naila C., Kazaura K., Wakamori K., Matsumoto M. “Transmission analysis of OFDM-based wireless services over turbulent radio-on-FSO links modeled by gamma–gamma distribution”, *IEEE Photonics J.*, 2010, vol. 2, no. 3, pp. 510-520.
7. Uysal M., Li J., Meng Y. “Error rate performance analysis of coded free-space optics link over gamma-gamma atmospheric turbulence channels”, *IEEE transactions on wireless communications*, 2006, vol. 5, no. 6, pp. 1229-1233.
8. Djordjevic I.B., Vasic B., Neifeld M.A. “LDPC coded OFDM over the atmospheric turbulence channel”, *Optics Express*, 2007, vol. 15, no. 10, pp. 6336-6350.
9. Gupta Ritu et al. “Performance of OFDM: FSO Communication System with Hybrid Channel Codes during Weak Turbulence”, *J. Comput. Networks Commun.*, 2019, pp. 1306491:1-1306491:6.
10. Ogundile O.O., Ijiga E.O., D. Versfeld J.J. “On the Analysis of Reed-Solomon Codes for OFDM Systems over Rician Fading Channels”, *SAIEE Africa Research Journal*, 2017, vol. 108, no. 3, pp. 108-116.
11. Akansu A.N., Xueming Lin “A comparative performance evaluation of DMT (OFDM) and DWMT (DSBMT) based DSL communications systems for single and multitone interference”, proc. of the *1998 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing, ICASSP '98*, 1998, vol.6, pp. 3269-3272.
12. Wang Yi et al. “On the Performance of Coherent OFDM Systems in Free-Space Optical Communications”, *IEEE Photonics Journal*, 2015, no. 7, pp. 1-10.
13. Sklyar B. “Digital communications: Theoretical foundations and practical application” (“Tsifrovaya svyaz': teoreticheskiye osnovy i prakticheskoye primeneniye”), Moscow, Williams, 2003, 1104 p.
14. Concus P., Cassatt D., Jaehnig G., Melby E. “Tables for the evaluation of  $x^\beta e^{-x} f(x) dx$  by Gauss-Laguerre quadrature,” *Math. Comput.*, Oct. 1963, vol. 17, no. 83, pp. 245–256.
15. Zolotarev V.V., Ovechkin G.V. “Noise-resistant coding. Methods and algorithms: Handbook” (“Pomekhoustoychivoye kodirovaniye. Metody i algoritmy: spravochnik”), ed. by Yu.B. Zubarev, Moscow, Goryachaya liniya–Telekom, 2004, 126 p.
16. Lin S., Costello D.J. “Error Control Coding”, Prentice-Hall Inc., Englewood Cliffs, N.J., 1983, 603 p.
17. Vafi S., Wysocki T.A. “Computation of the free distance and low weight distribution of turbo codes with convolutional interleavers”, *2004 IEEE 15th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications*, vol. 2, 2004, pp. 1356-1359.
18. Xiang-Gen Xia “Understanding turbo codes: A signal processing study”, *Journal of Information and Intelligence*, 2024, vol. 2, iss. 1, pp. 1-13.

Submitted 07.05.2024; revised 26.08.2024

### Information about the author

**Roman P. Krasnov** - Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: rpkrasnov@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4065-4557>

## АЛГОРИТМ МЕТОДИКИ АНАЛИЗА ДАННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК БЛИЖНЕГО ПОЛЯ ПЕЧАТНЫХ МОДУЛЕЙ

В.В. Глотов, Н.Д. Майков, Д.Ю. Решетников

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

**Аннотация:** при проектировании радиоэлектронных средств с учетом требований электромагнитной совместимости необходимо быстро и качественно оценивать электромагнитную модель этого электронного устройства. Обычно в основу этой модели лежит эквивалентная математическая модель. Как правило, ошибки в решении математической модели появляются из-за ошибок физического моделирования (геометрическая аппроксимация) и математического моделирования. Кроме того, расчет решения уравнений Максвелла для больших сложных задач с минимальной ошибкой требует времени и ресурсов. Чтобы преодолеть ограниченные вычислительные ресурсы компьютеров, применяются численно эффективные методы, которые облегчают вычислительную нагрузку и способны аппроксимировать точное решение с минимальной ошибкой. В данной статье представлен алгоритм методики анализа данных характеристик ближнего поля печатных модулей, в основе которого лежит эквивалентное дипольное моделирование. В математической модели объемные токи поляризации внутри диэлектрического тела заменены эквивалентными дипольными моментами, которые определяются выполнением условия согласованности электрических полей внутри диэлектрического тела. Преимущество разработанной методики состоит в том, что она накладывает аналитические решения рассеянного электромагнитного поля канонических структур для моделирования полного рассеянного поля объекта произвольной формы. Эти элементарные рассеянные поля фактически не являются сингулярными при приближении к распределенному току источника. Они того же порядка, что и падающее поле, то есть первого порядка. В результате метод не отклоняется от эталонных значений, присущих традиционным методам моментных подходов, которые основаны на подходах функций Грина, где выполняется суперпозиция полей, генерируемых бесконечно малыми сосредоточенными источниками тока. Кроме того, метод относительно прост в реализации, особенно потому, что базисные функции для тока электрически малы и, следовательно, могут иметь низкий порядок

**Ключевые слова:** дипольный момент, эквивалентное моделирование, магнитное поле, ближние поля, метод оптимизации

### Введение

Под эквивалентной моделью в радиотехнике понимается модель, которая может представлять физические процессы, происходящие на печатной плате или на печатном модуле. Отличительной чертой эквивалентной модели является скорость оценки физических процессов – электрической или магнитной составляющей. [1]. Так же при разработке радиоэлектронных средств можно на ранних этапах (до создания прототипа оборудования) определить проблемные места, которые создают электромагнитные помехи.

При разработке электронных средств можно условно печатный модуль разбить на несколько электрорадиоэлементов, дорожек, экранов и так далее. Каждый диполь будет отвечать за свою простую структуру и описывать его физическое состояние. Одним недостатком данного метода является неточное определение напряженности ближнего электромагнитного поля, но как показывают экспериментальные

данные, что высокая точность не нужна, достаточно находить проблемные места.

На рис. 1 представлено сравнение компьютерной модели тестового печатного модуля и его эквивалентной модели, в основу которого лежит математического дипольное моделирование. Представленный на рисунке печатный модуль был смоделирован в программном комплексе EtcosPCB Vlab. Диполи были так же расположены на печатной плате в тех местах, где они заменяли электрорадиоэлемент. Их количество в данном случае одинаково, так как тестовый печатный модуль имеет простую электрическую схему [3]. Все диполи, должны располагаться близко к печатной плате, а именно в ближней зоне, чтоб получить так же значения электрической и магнитной составляющей.

Основным параметром диполя является – момент. Суммарная напряженность диполей необходима только в тех случаях, когда используется сложные структуры микросхемы, когда на одну микросхему будет приходиться несколько диполей. Количество этих диполей в данной случае будет зависеть от класса точности производства и изготовления печатной платы.



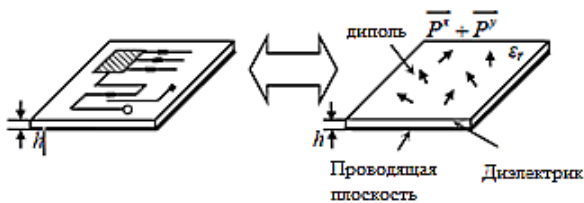


Рис. 1. Модель печатного модуля и ее эквивалентная дипольная модель

Напряженность магнитного и электрического диполя можно, как и скалярные величины – складывать и вычитать. Вычитание происходит в местах заземления и металлизации печатной платы, а суммирование происходит в местах большого скопления электрорадиоэлементов или возле интегральных микросхем.

На рис. 2 представлена структурная схема процессов объединения и удаления [4]. Это модель необходима для быстрого построения эквивалентной модели.

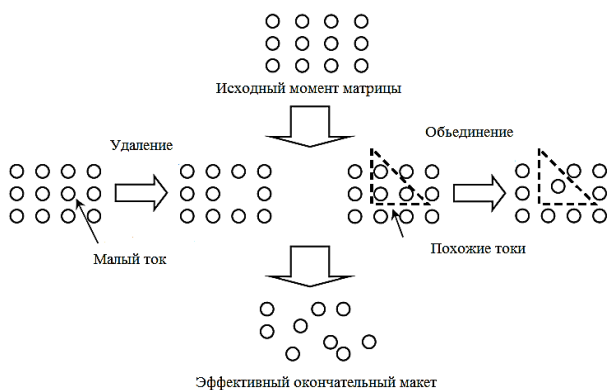


Рис. 2. Схема удаления и объединения диполей при построении общей модели печатного модуля

Когда используется процедура «удаление», необходимо осознавать, что числовое значение, которое стояла за диполем не повлияет на карту напряженности магнитного поля.

При использовании процедуры «объединение» необходимо учитывать напряженность диполей, а именно у них должно быть одинаковое числовое значение [5].

Единственным недостатком данных процедур является ограниченность в действиях процессов «удаления» и «объединения», так как оно не может превышать более 75% из-за возможности искажения полученных данных от эквивалентной модели.

### Математическая модель эквивалентного дипольного преобразования печатного модуля

Для получения эквивалентной дипольной модели печатного модуля необходимо построить аппроксимированную модуль на плоскости однородного диэлектрика (печатной платы). Все элементы находящиеся на печатной плате будут вычисляться и моделироваться как показано на рис. 3. Если же печатная плата имеет большую плоскость заземления, то она тоже будет учитываться.

В 90 процентов случаев работы с печатными модулями в основании которого лежит печатная плата, используется стеклотекстолит диэлектрическая проницаемость ( $\epsilon$ ) которого равна 4,8.

Данные значения будут использоваться при дальнейшем моделировании математической модели.

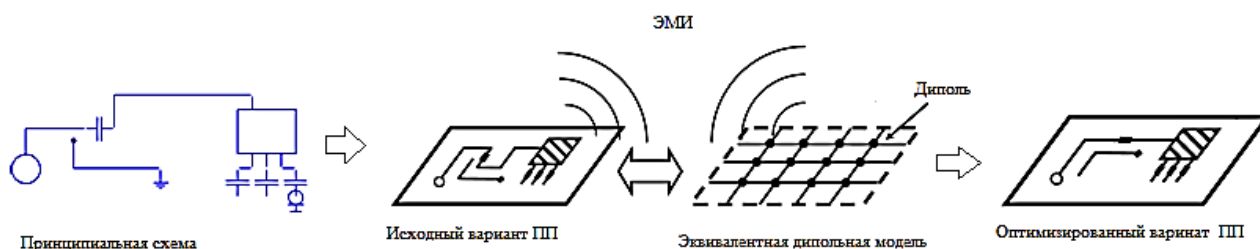


Рис. 3. Структурная схема замена печатного модуля эквивалентной модели

Точность эквивалентной модели определяется шагом накладываемой сетки, в узлах которой располагают диполи. Диполь описывает определенный участок печатного модуля – не зависимо есть там электрорадиоэлементы или нет. Для описания характеристик магнитного

поля через эквивалентную модель используется основной параметр диполей – момент.

На основе принципа эквивалентности – эквивалентные диполи должны излучать то же поле, что и реальный печатный модуль. Современная электроника идет по пути уменьшения рабочих напряжений при одновременном уве-

личении рабочих токов. Это обусловлено уменьшением норм топологического процесса и микроминиатюризации компонентной базы. Таким образом токи оказывают наибольшее влияние на магнитные поля, поэтому необходимо вычислять только напряженность магнитного поля [6].

Для получения более точных данных по величине напряженности магнитного поля, каждый диполь раскладываем на три магнитных компонента -  $H_x$ ,  $H_y$  и  $H_z$ .

Суммарная напряженность одного магнитного диполя вычисляется по формуле:

$$H_D = \sqrt{H_x^2 + H_y^2 + H_z^2} \quad (1)$$

В формулах ниже (2) представлено комплексное вычисление каждого компонента магнитного диполя:

$$\begin{aligned} H_x &= M \cdot \frac{jke^{-jkr}}{4\pi r^4} \cdot (x-x_0) \cdot (z-z_0) \cdot (jkr + 3 + \frac{3}{jkr}) \\ H_y &= M \cdot \frac{jke^{-jkr}}{4\pi r^4} \cdot (y-y_0) \cdot (z-z_0) \cdot (jkr + 3 + \frac{3}{jkr}) \\ H_z &= M \cdot \frac{jke^{-jkr}}{4\pi r} \cdot \left[ \frac{(z-z_0)^2}{r^2} \cdot \left( j + \frac{3}{kr} + \frac{3}{jk^2r^2} \right) - \left( j + \frac{1}{kr} + \frac{1}{jk^2r^2} \right) \right] \end{aligned} \quad (2)$$

где  $k$  - волновое число,  $M$  – момент диполя, а  $r$  - расстояние от диполя до точки измерения, которое в свою очередь вычисляется по следующей форме:

$$r = \sqrt{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2 + (z-z_0)^2} \quad (3)$$

Момент диполя вычисляется по формуле:

$$M = \mu_0 \cdot I \cdot r^2 \cdot l \quad (4)$$

Так как излучаемое магнитное поле диполя может быть выражено через напряжение ( $H_0$ ):

$$H_0 = \frac{V_0}{\eta} f_0(\theta) \frac{e^{-jkr}}{r} \quad (5)$$

Суммарное поле всех диполей может быть охарактеризовано матрицей рассеяния  $N \times N$ , элементы которой вычисляются по следующей формуле:

$$S_{mn} = \frac{V_m^-}{V_n^+} \quad (6)$$

где  $V_n^+$  - падающая волна,  $V_m^-$  - отраженная волна. Связь между отраженным напряже-

нием и падающим, представлено на следующей формуле:

$$V_m^- = \sum_{n=1}^N S_{mn} V_n^+ \quad (7)$$

Суммарное напряжение вычисляется по следующей формуле:

$$V_n = V_n^+ + V_n^- \quad (8)$$

Суммарный ток вычисляется:

$$I_n = I_n^+ + I_n^- = V_n^+ + V_n^- \quad (9)$$

Для сканирования массива на угол  $\theta_0$ , фазируем падающие возбуждение, которое моделирует практический случай постоянной падающей мощности на каждый элемент, как в массиве с корпоративным питанием, и вычисляется по формуле:

$$V_n^+ = V_0 e^{-jknsin\theta} \quad (10)$$

Активный коэффициент отражения на  $m$ -м элементе из (3) и (5) равен:

$$K_m(\theta_0) = \frac{V_m^-}{V_m^+} = e^{-jknsin\theta} \sum_{n=1}^N S_{mn} e^{-jknsin\theta} \quad (11)$$

Согласно формуле (5), полная напряженность магнитного поля вычисляется:

$$H(\theta) = \frac{V_0}{\eta_0} f_0(\theta_0) \sum_{n=1}^N [1 - k_m(\theta_0)] \frac{e^{-jkr}}{r} \quad (12)$$

В основу разработанной методики анализа данных характеристики ближнего электрического и магнитного поля лежит математическая модель, которая в свою очередь дает быструю оценку напряженности поля для прохождения сертификации по требованиям электромагнитной совместимости.

### Методика анализа данных характеристики ближнего электрического и магнитного поля

Алгоритм разработанной методики анализа данных характеристики ближнего электрического и магнитного поля состоит из следующих позиций:

1. Построение модели печатного модуля в САПР.
2. Исследование состояния напряженности электрического и магнитного поля.
3. Проведение анализа по требованиям электромагнитной совместимости - соответствует или нет?

4. Преобразование полученных данных.
5. Выявление по картам напряженности «шумных» участков печатного модуля.
6. Построение дипольной модели печатного модуля.
7. Вычисление напряженности электрического поля на основании эквивалентной модели.
8. Вычисление напряженности магнитного поля на основании эквивалентной модели.
9. Построение карты напряженности электрического поля эквивалентной модели;
10. Построение карты напряженности магнитного поля эквивалентной модели;
11. Анализ данных полученных с помощью эквивалентной модели.
12. Принятие решений по устранению проблем в области электромагнитной совместимости - замена элементов, экранирование, брак продукции или оптимизация компоновки печатного модуля?
13. Устранение «шумных» частей в модели печатного модуля.

14. Построение графика электрической составляющей новой модели.
15. Построение графика магнитной составляющей новой модели.
16. Анализ полученных данных от карт напряженности магнитного и электрического поля.
17. Новая модель печатного модуля соответствует требованиям электромагнитной совместимости? Если да, то переход на 18 пункт, если нет то переход на пункт 6.
18. Сравнение карты напряженности у доработанного печатного модуля с экспериментальным тестовым образцом.
19. Утверждение конструкции печатного модуля.
20. Конец.

На рис. 4 приведены укрупненные этапы разработанной методики анализа данных характеристики ближнего электрического и магнитного поля.

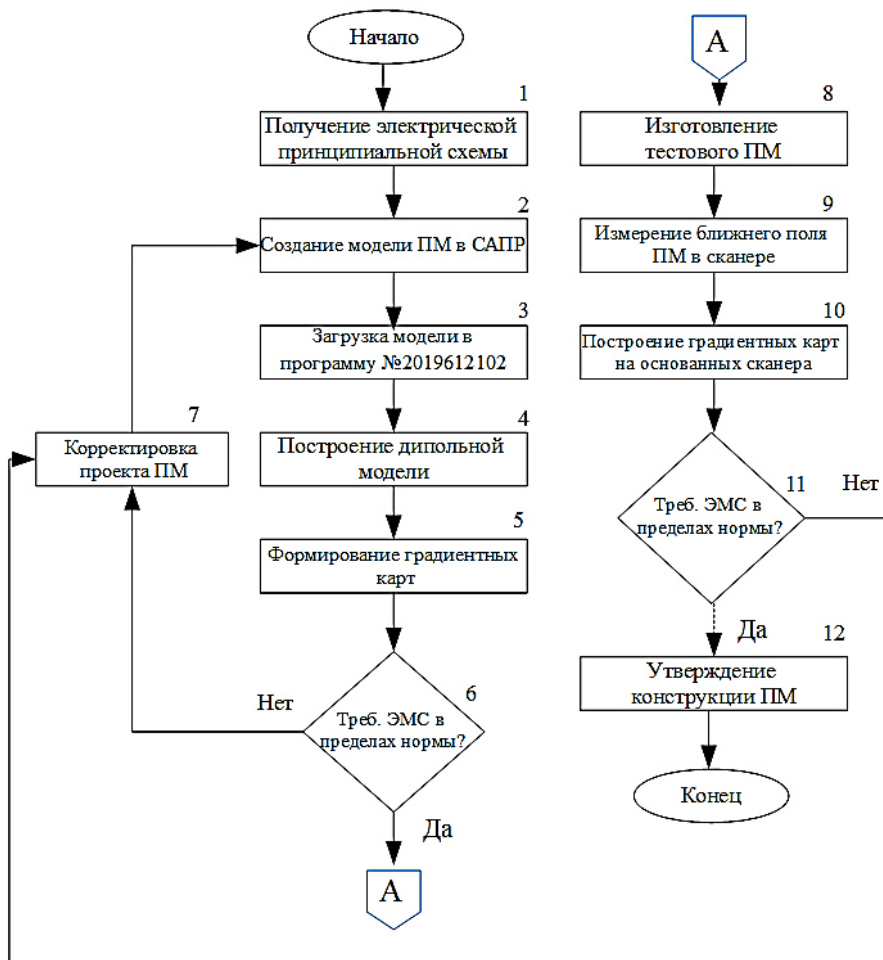


Рис. 4. Основные этапы разработанной методики

### Заключение

Разработка радиоэлектронных средств с учетом требований электромагнитной совместимости становится с каждым днем все актуальнее, так как происходит усложнение разрабатываемых устройств и так же их уменьшение в массе и в габаритных размерах. Поэтому на сегодняшний день существует несколько видов оценки электромагнитной совместимости радиоэлектронных средств. Одним из более быстрых для оценки электромагнитной совместимости является эквивалентное моделирование. Быстрым оно считается потому, что создается виртуальная эквивалентная модель разрабатываемого устройства, а не его физический макет. Так же при разработке физического макета происходит финансовое затраты.

В основу эквивалентной модели лежат – диполи. Каждый элемент на печатно плате описывается эквивалентным диполем или диполями, если элемент носит в себе сложную конструкцию. Далее идет вычислений напряжений магнитного и электрического поля.

Разработанная методика анализа данных характеристики ближнего электрического и магнитного поля в основу которой лежит математическая модель диполя, упрощает задачу оценки электромагнитной совместимости. Результаты экспериментальных исследований показали, что применение данной методики

ускоряет процесс анализа на электромагнитную совместимость печатного модуля примерно на 18-22%. При этом точность полученных данных немного хуже по сравнению с эталонными программными обеспечениями и составляет около – 10-12%.

### Литература

1. Кечиев Л.Н. Проектирование печатных плат для цифровой быстродействующей аппаратуры. М.: ООО «ГруппаИДТ», 2007. 616 с.
2. Патент на изобретение RU 2593910 С2. Вивальди с печатной линзой на единой диэлектрической подложке: № 2014128331/28; заявл. 11.07.2014; опубл. 10.08.2016 / Ашихмин А.В., Федоров С.М., Негроров В.В., Пастернак Ю.Г., Авдюшин А.С. Антенна.
3. 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.
4. 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.
5. 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.
6. Князев А.Д., Кечиев Л.Н., Петров Б.В. Конструирование радиоэлектронной и электронно-вычислительной аппаратуры с учетом электромагнитной совместимости. М.: Радио и связь, 1989. 224 с.

Поступила 08.04.2024; принята к публикации 26.08.2024

### Информация об авторах

**Глов 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: <https://orcid.org/0000-0001-5129-4369>

**Майков Никита Дмитриевич** – студент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: nik-maikof@yandex.ru

**Решетников Дмитрий Юрьевич** – студент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: macs.00.00@mail.ru

## THE ALGORITHM OF THE METHODOLOGY FOR ANALYZING THE DATA OF THE CHARACTERISTICS OF THE NEAR FIELD PRINTED MODULES

V.V. Glotov, N.D. Maikov, D.Yu. Reshetnikov

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

**Abstract:** when designing radio-electronic devices taking into account the requirements of electromagnetic compatibility, it is necessary to quickly and efficiently evaluate the electromagnetic model of this electronic device. Typically, this model is based on an equivalent mathematical model. As a rule, errors in solving a mathematical model appear due to errors in physical modeling (geometric approximation) and mathematical modeling. In addition, calculating solutions to Maxwell's equations for large complex problems with minimal error requires time and resources. To overcome the limited computing resources of computers, numerically efficient methods are used that lighten the computational load and are able to approximate the exact solution with minimal error. This article presents an algorithm for analyzing data on the near-field characteristics of printed

modules, which is based on equivalent dipole modeling. In the mathematical model, volumetric polarization currents inside the dielectric body are replaced by equivalent dipole moments, which are determined by the fulfillment of the condition of consistency of electric fields inside the dielectric body. The advantage of the developed technique is that it superimposes analytical solutions of the scattered electromagnetic field of canonical structures to simulate the total scattered field of an object of arbitrary shape. These elementary scattered fields are in fact not singular when approaching the distributed source current. They are of the same order as the incident field, that is, first order. As a result, the method does not deviate from the reference values inherent in traditional methods of moment approaches, which are based on Green's function approaches, where a superposition of fields generated by infinitesimal concentrated current sources is performed. In addition, the method is relatively simple to implement, especially because the basis functions for the current are electrically small and therefore can be of low order

**Key words:** dipole moment, equivalent modeling, magnetic field, near fields, optimization method

#### References

1. Kechiev L.N. "Design of printed circuit boards for digital high-speed equipment" ("Proyektirovaniye pechatnykh plat dlya tsifrovoy bystrodeystvuyushchey apparatury", Moscow, GruppIDT, 2007, 616 p.
2. 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" ("Vival'di s pechatnoy linzoy na yedinoe dielektricheskoy podlozhke"), Patent for invention RU 2593910 C2, 08.10.2016, appl. no. 2014128331/28 dated 07.11.2014.
3. 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.
4. Ryzhikov A.G., Slinchuk S.A., Fedorov S.M., Chuguevsky V.I. "Study of the characteristics of an antenna array based on a Rothman 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.
5. 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 the Voronezh Institute of the Ministry of Internal Affairs of Russia (Vestnik Voronezhskogo instituta MVD Rossii)*, 2018, no. 3, pp. 70-76.
6. Knyazev A.D., Kechiev L.N., Petrov B.V. "Design of radio-electronic and electronic computing equipment taking into account electromagnetic compatibility" ("Konstruirovaniye radioelektronnoy i elektronno-vychislitel'noy apparatury s uchetom elektromagnitnoy sovmestimosti"), Moscow, Radio i svyaz', 1989, 224 p.

Submitted 08.04.2024.; revised 26.08.2024

#### Information about the authors

**Vadim V. Glotov** – Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, 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: <https://orcid.org/0000-0001-5129-4369>

**Nikita D. Maikov** – Student, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: nik-maikof@yandex.ru

**Dmitry Yu. Reshetnikov** – Student, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: macs.00.00@mail.ru



## НИЗКОПРОФИЛЬНАЯ ДВУХПОЛЯРИЗАЦИОННАЯ АНТЕННАЯ РЕШЕТКА ВИВАЛЬДИ

И.Н. Бобков

Институт радиотехнических систем и управления Южного федерального университета,  
г. Таганрог, Россия

**Аннотация:** рассмотрена плоская антенная решетка Вивальди, предназначенная для работы на двух линейных поляризациях. Излучатели антенной решетки выполнены из тонкого фольгированного диэлектрического материала с малой относительной диэлектрической проницаемостью. Возбуждение экспоненциально расширяющегося щелевого раскрыва в излучателях осуществляется при помощи перехода от полосковой линии передачи к щелевой линии, причем переход располагается ортогонально продольной оси излучателя у самого его основания. Такое взаимное расположение частей позволяет выделить под расширяющийся щелевой раскрыв больше полезной площади диэлектрической подложки, не прибегая к увеличению габаритных размеров. Приведены результаты численного исследования характеристик элементарной ячейки антенной решетки с периодическими граничными условиями на гранях. Показано, что коэффициент стоячей волны по напряжению в режиме излучения по нормали не превышает 3 в полосе частот с перекрытием 2:1. Исследованные характеристики излучения показывают низкий уровень кросс-поляризации и возможность сканирования луча на угол до  $50^\circ$ . При этом высота излучателей над металлическим экраном составляет лишь половину длины волны на верхней частоте рабочего диапазона и не превышает шаг антенной решетки

**Ключевые слова:** антенные решетки, апертурные антенны, кросс-поляризация, широкополосные антенны, антенны Вивальди

**Благодарности:** исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-19-00537, <https://rscf.ru/project/22-19-00537/> в Центре коллективного пользования "Прикладная электродинамика и антенные измерения" Южного федерального университета, г. Таганрог, Россия

### Введение

Одним из актуальных путей совершенствования устройств систем связи и радионавигации связан с разработкой антенн и антенных решеток (АР) с улучшенными характеристиками.

Учитывая тенденцию к расширению спектра и уменьшению габаритных размеров современных средств связи [1], особую важность приобретают вопросы построения широкополосных АР на основе технологичных антенных элементов, не требующих применения внешних согласующих и симметрирующих устройств, при этом обладающих высоким коэффициентом усиления. К таким антенным элементам относится излучатель Вивальди [2].

Известны различные варианты исполнения излучателя Вивальди. Отличие может заключаться в материалах и способе изготовления. Так, в [3] и [4] описана конструкция цельнометаллического излучателя Вивальди. Недостатком такого решения, помимо большой массы, является необходимость применения высокоточной электроэрозионной обработки пазов и щелей при изготовлении АР миллиметрового и

верхней части сантиметрового диапазонов длин волн.

Большую популярность получили антенны Вивальди, выполненные из фольгированных диэлектрических материалов [5, 6]. Для их создания применяется технология изготовления печатных плат, которую отличают невысокая стоимость при массовом производстве, и точность, достаточная для применения в миллиметровом диапазоне длин волн [7]. При этом широко представлены материалы с малой толщиной диэлектрической подложки (сотни микрометров). Выбор такой толщины подложки при изготовлении излучателей АР позволяет значительно сократить массу всего изделия, по сравнению с цельнометаллическими конструкциями.

В настоящей работе рассмотрена конструкция излучателя АР Вивальди на тонкой диэлектрической подложке. Возбуждение расширяющегося щелевого раскрыва осуществляется при помощи перехода от полосковой линии к симметричной щелевой линии. Параметры перехода подобраны таким образом, чтобы осуществлялась трансформация волнового сопротивления с 50 до 100 Ом, а длина была минимальной для обеспечения заданного коэффициента отражения на входе [8].

Необходимо отметить, что идея возбуждения расширяющегося щелевого раскрыва переходом такого типа не является новой. Так в [9] описан излучатель с щелевым раскрывом Ферми-Дирака и переходом микрополосковая линия–щелевая линия, причем расширяющийся щелевой раскрыв и переход к нему расположены друг за другом на одной оси. Но описанное в настоящей работе решение отличается тем, что переход располагается ортогонально оси излучения антенны у самого её основания. Такое взаимное расположение частей позволяет выделить под расширяющийся щелевой раскрыв больше площади диэлектрической подложки и, как будет показано далее, получить низкий уровень кросс-поляризации.

### Конструкция излучателя

На рис. 1 изображена исследуемая в настоящей работе конструкция излучателя Вивальди. Антенна представляет собой диэлектрическую подложку с двусторонней металлизацией. На рис. 1 светло-голубым цветом обозначен металлический экран, на который устанавливается излучатель, серым цветом окрашены слои металлизации.

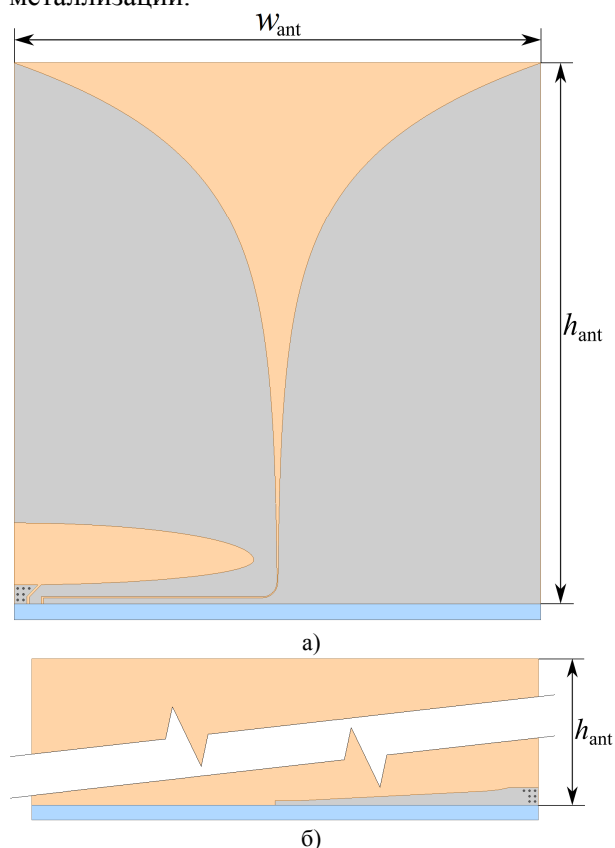


Рис. 1. Геометрические параметры излучателя Вивальди: а) вид спереди; б) вид сзади

Питание излучателя осуществляется при помощи миниатюрного коаксиального соединителя через отверстие в слое земли. Вход представляет собой отрезок 50 Ом копланарного волновода сразу за которым следует оптимальный скошенный поворот [10] и начинается переход к симметричной щелевой линии.

Трансформация сопротивлений в переходе к симметричной щелевой линии осуществляется с чебышевской характеристикой, поскольку такой трансформатор обладает минимальной длиной при заданной величине коэффициента отражения [8]. Принцип работы самого перехода описан в [9] и [11].

Сам переход к симметричной щелевой линии размещается ортогонально оси излучения у самого основания антенны, а оставшаяся площадь диэлектрической подложки отведена под щелевой раскрыв. Высота излучателя  $h_{ant}$  равна его ширине  $w_{ant}$ .

Профиль расширяющегося щелевого раскрыва имеет наиболее часто встречаемую, экспоненциальную форму [2].

### Численное исследование характеристик элементарной ячейки

Для проведения численного исследования характеристик двухполяризационной АР из описанных излучателей в программном обеспечении ANSYS HFSS была разработана модель элементарной ячейки (см. рис. 2). Периодические граничные условия (ГУ) заданы на боковых поверхностях А, А' и Б, Б', на верхней и нижней поверхностях элементарной ячейки заданы ГУ излучения. Грани с периодическими ГУ примыкают к излучателю вплотную, а между металлическими частями соседних излучателей обеспечен контакт чтобы не допустить образования пазов и щелей, которые будут возбуждаться на отдельных частотах, что, в свою очередь, может привести к невозможности работы АР в широкой полосе частот [12].

На рис. 3 показаны частотные зависимости коэффициента стоячей волны по напряжению (КСВН) и коэффициента полезного действия (КПД) элементарной ячейки. Нижняя граница полосы рабочих частот, определяемая по уровню КСВН=3, находится на частоте 2.2 ГГц. В качестве верхней границы примем 4.4 ГГц, т.е. частоту, выше которой шаг АР начинает превышать половину длины волны и становится возможным появление побочных главных максимумов диаграмм направленности. КПД элементарной ячейки в рабочей полосе частот не опускается ниже

75%, а на частотах выше 2.7 ГГц более 95% подводимой к излучателям АР мощности излучается в свободное пространство.

На рис. 4 показана частотная зависимость коэффициента усиления элементарной ячейки в сравнении с теоретически достижимым коэффициентом направленного действия (КНД) апертуры такой же площади  $A = w_{ant} \times w_{ant}$ , что и элементарная ячейка. КНД апертуры определяется по формуле [13]:

$$D = 4\pi A \cos \theta / \lambda^2,$$

где  $D$  – КНД,  $\theta$  – угол сканирования луча (отличен от  $0^\circ$  при сканировании) и  $\lambda$  – длина волны на рассматриваемой частоте. Из рис. 4 видно закономерное снижение коэффициента усиления вблизи нижней границы рабочей полосы частот, обусловленное, прежде всего, ростом потерь на рассогласование (см. рис. 3).

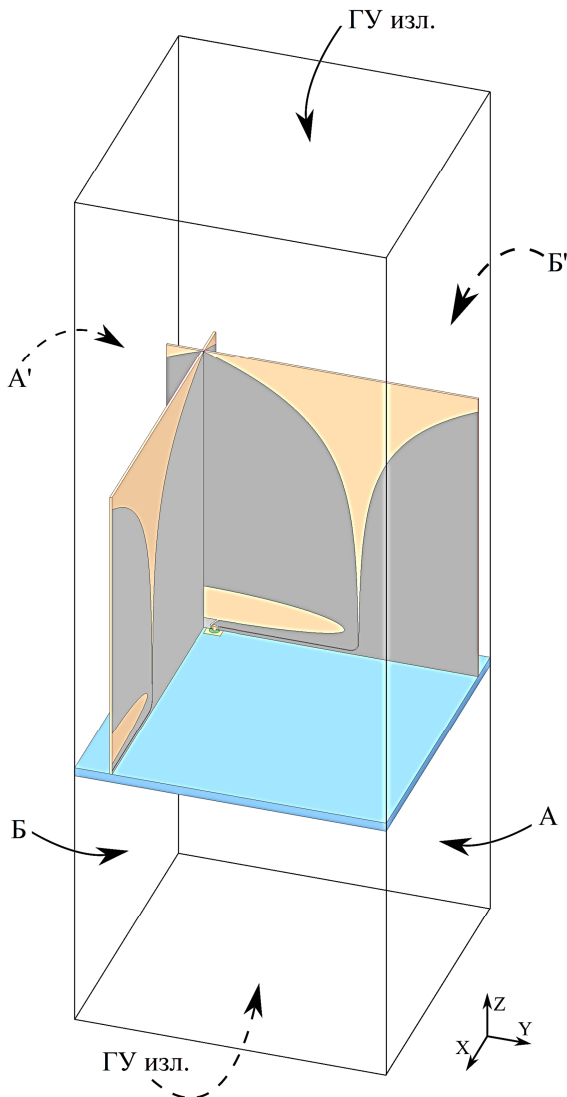


Рис. 2. Общий вид элементарной ячейки плоской двухполяризацонной антенной решетки Вивальди

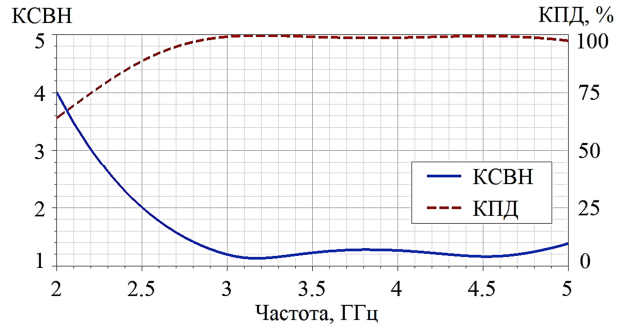


Рис. 3. КСВН на входе излучателя и КПД элементарной ячейки двухполяризацонной АР Вивальди

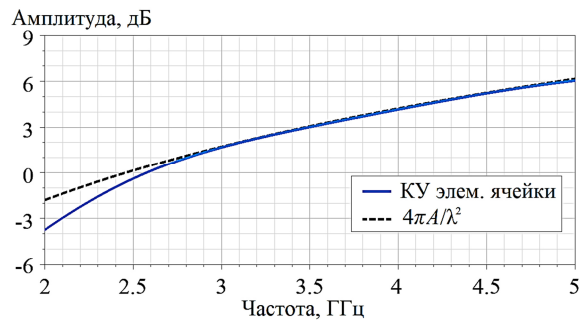


Рис. 4. КУ элементарной ячейки двухполяризацонной АР Вивальди в сравнении с теоретически достижимым КНД апертуры такой же площади

Далее рассмотрим характеристики элемента АР при сканировании луча в  $E$ -,  $H$ - и  $D$ -плоскостях.

На рис. 5 показаны зависимости КСВН от частоты при различных углах сканирования луча в  $E$ -плоскости. Здесь и далее результаты приводятся для режима работы на вертикальной (или горизонтальной) поляризации, т.е. режима возбуждения только одного излучателя элементарной ячейки, в то время как второй излучатель нагружен на согласованную нагрузку [14]. Поляризация АР-конечного изделия может отличаться, например, быть наклонной (при синфазном возбуждении излучателей) или круговой (при квадратурном возбуждении).

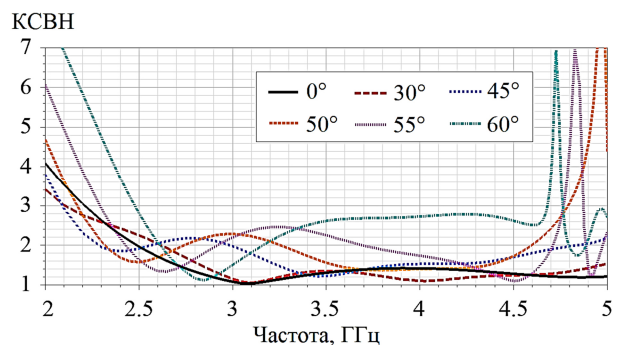


Рис. 5. КСВН на входе излучателя элементарной ячейки при сканировании луча в  $E$ -плоскости

При отклонении луча в  $E$ -плоскости на угол до  $50^\circ$  КСВН на входе излучателя элементарной ячейки практически во всей полосе рабочих частот не превышает 2.4. Начиная с угла сканирования  $55^\circ$  происходит обужение полосы рабочих частот снизу. Тем не менее АР остается работоспособной и при угле сканирования  $60^\circ$  - эффектов ослепления не наблюдается, хотя потери на рассогласование начинают расти и КСВН в рабочей полосе частот достигает значения 2.8.

Важной характеристикой двухполяризационных АР является развязка между ближайшими ортогональными портами. При сканировании луча в  $E$ -плоскости АР Вивальди обеспечивает развязку между ортогональными портами не менее 15 дБ во всей рабочей полосе частот вплоть до угла сканирования  $60^\circ$  (см. рис. 6).

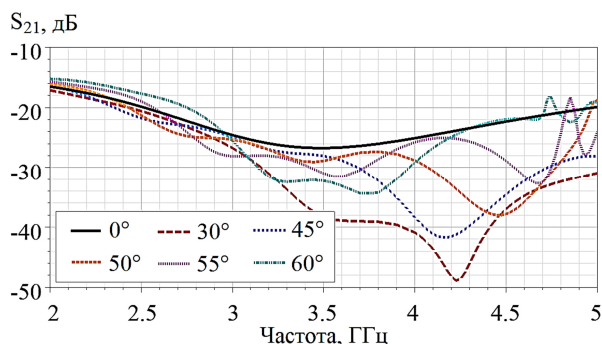


Рис. 6. Развязка между ортогональными портами элементарной ячейки двухполяризационной АР Вивальди при сканировании луча в  $E$ -плоскости

Для большинства фазированных АР характеристики согласования при сканировании луча в  $H$ -плоскости вблизи нижней границы рабочей полосы частот оказываются хуже, чем при сканировании в  $E$ -плоскости [14]. В исследуемой АР Вивальди уже при угле сканирования  $45^\circ$  полоса рабочих частот заметно обужается и растут потери на рассогласование (см. рис. 7). Однако эффекта ослепления не наблюдается и АР остается работоспособной.

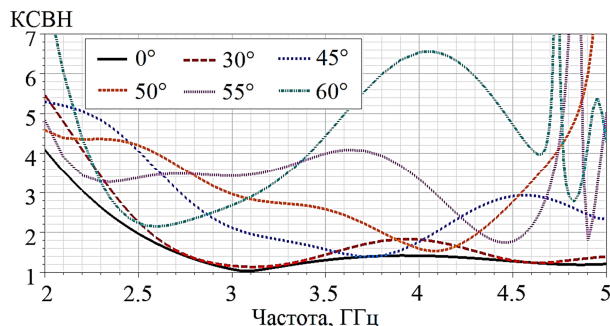


Рис. 7. КСВН на входе излучателя элементарной ячейки при сканировании луча в  $H$ -плоскости

Развязка между ортогональными портами элементарной ячейки при сканировании в  $H$ -плоскости (см. рис. 8) качественно и количественно повторяет результаты для сканирования в  $E$ -плоскости.

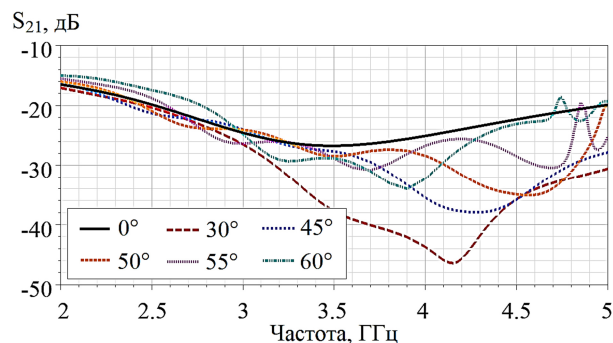


Рис. 8. Развязка между ортогональными портами элементарной ячейки двухполяризационной АР Вивальди при сканировании луча в  $H$ -плоскости

На рис. 9 показаны частотные зависимости КСВН при различных углах сканирования в диагональной плоскости (при угле  $\varphi = 45^\circ$ ). Расчеты показывают, что КСВН излучателя АР на частотах выше 2.65 ГГц не превышает 2 для всех углов сканирования вплоть до  $60^\circ$ . Полученные результаты могут создать ложное впечатление хорошей работоспособности АР при сканировании в  $D$ -плоскости. Однако, хорошее согласование на входе излучателя при углах сканирования больше  $50^\circ$  достигается благодаря малой развязке между портами элементарной ячейки [14]. Так при угле сканирования  $60^\circ$  до четверти подводимой к излучателю мощности поступает на ближайший ортогональный порт элементарной ячейки из-за сильной связи между элементами (см. рис. 10). Однако эффекта ослепления не наблюдается и АР остается работоспособной.

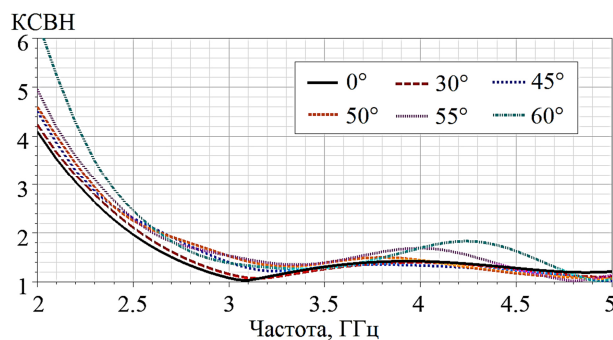


Рис. 9. КСВН на входе излучателя элементарной ячейки при сканировании луча в  $D$ -плоскости



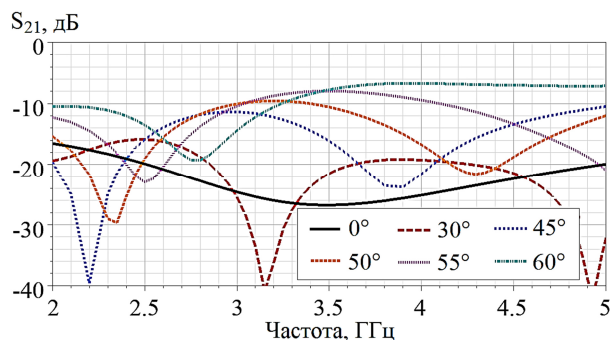


Рис. 10. Развязка между ортогональными портами элементарной ячейки двухполяризационной АР Вивальди при сканировании луча в  $D$ -плоскости

Известно, что АР электрически длинных излучателей Вивальди имеют высокий уровень кросс-поляризационного излучения, особенно при сканировании в  $D$ -плоскости [15, 16]. Однако благодаря тому, что рассматриваемый в настоящей работе излучатель имеет малую высоту (половина длины волны на верхней частоте рабочего диапазона) уровень кросс-поляризации оказывается низким (см. рис. 11). Так, при отклонении луча диаграммы направленности на  $45^\circ$  в  $D$ -плоскости уровень кросс-поляризационного излучения ниже уровня КУ на ко-поляризации на величину от 14 до 23 дБ.

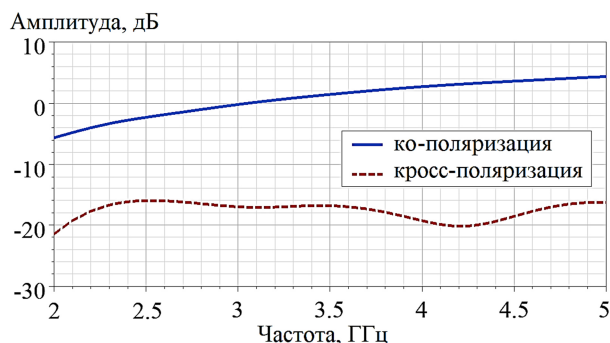


Рис. 11. КУ элементарной ячейки на ко- и кросс-поляризации при наклоне луча на  $45^\circ$  в  $D$ -плоскости

### Заключение

Рассмотрена двухполяризационная АР Вивальди, излучатели которой выполнены на тонкой диэлектрической подложке с двусторонней металлизацией. Для возбуждения расширяющегося щелевого раскрыва применяется переход от копланарного волновода к щелевой линии, который располагается ортогонально оси излучения антенны. Отношение высоты излучателя АР к его ширине составляет 1:1.

Показано, что согласование на входе излучателей АР обеспечивается в полосе с

перекрытием 2:1 (от 2.2 до 4.4 ГГц) при излучении по нормали. КПД элементарной ячейки АР в этом диапазоне составляет не менее 75%.

Расчетным путем установлено, что на частотах выше 2.8 ГГц КУ элементарной ячейки принимает значения, близкие к теоретическому КНД апертуры такой же площади.

Показана возможность сканирования луча на угол до  $50^\circ$  в  $E$ -,  $H$ - и  $D$ -плоскостях без появления эффектов ослепления АР.

Благодаря электрически малой высоте профиля при сканировании луча диаграммы направленности обеспечивается кросс-поляризационная развязка. Так при отклонении луча на  $45^\circ$  в  $D$ -плоскости уровень кросс-поляризационного излучения оказывается ниже уровня КУ на ко-поляризации на величину от 14 до 23 дБ.

Проведенное исследование показывает возможность возбуждения расширяющихся щелевых раскрывов в излучателях двухполяризационных АР Вивальди, изготовленных на тонких диэлектрических подложках, для получения электрически малой высоты профиля и низкого уровня кросс-поляризации.

### Литература

1. Akyildiz I. F., Kak A., Nie S. 6G and Beyond: The Future of Wireless Communications Systems // IEEE Access. 2020. Vol. 8. PP. 133995-134030.
2. Gibson P. J. The Vivaldi Aerial // 1979 9th European Microwave Conference, Brighton, UK. 1979. PP. 101-105.
3. Kindt R., Pickles R. 12-to-1 bandwidth all-metal Vivaldi array element // 2009 IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium, North Charleston, SC, USA. 2009. PP. 1-4.
4. Kindt R. W., Pickles W. R. Ultrawideband All-Metal Flared-Notch Array Radiator // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2010. Vol. 58. No. 11. PP. 3568-3575.
5. Endfire tapered slot antennas on dielectric substrates / D. Schaubert, E. Kollberg, T. Korzeniowski, T. Thungren, J. Johansson, K. Yngvesson // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 1985. Vol. 33. No. 12. PP. 1392-1400.
6. Yukhanov Y. V., Bobkov I. N. Linear Vivaldi Antenna Array With Improved Low-Band Performance // 2021 Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves (RSEMW), Divnomorskoe, Russia. 2021. PP. 203-206.
7. Vivaldi antenna design in millimeter-wave-band with ultra wide bandwidth and high gain / Yonghu Zeng, Chong Guo, Xianqi Lin, Xiaofan Yang // 2016 IEEE MTT-S International Microwave Workshop Series on Advanced Materials and Processes for RF and THz Applications (IMWS-AMP), Chengdu. 2016. PP. 1-3.
8. Klopfenstein R. W. A Transmission Line Taper of Improved Design // Proceedings of the IRE. 1956. Vol. 44. No. 1. PP. 31-35.
9. Dong Sik Woo, Kang Wook Kim, Hyun-Chul Choi A Broadband and High Gain Tapered Slot Antenna for W-Band



Imaging Array Applications // International Journal of Antennas and Propagation. 2014. Vol. 2014. Article ID 378527.

10. Douville R. J. P., James D. S. Experimental Study of Symmetric Microstrip Bends and Their Compensation // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 1978. Vol. 26. No. 3. PP. 175-182.

11. Design of an Ultra-Wideband Microstrip-to-Slotline Transition on Low-Permittivity Substrate / J.S. Lee, G.H. Lee, W. Mohyuddin, H.C. Choi, K.W. Kim // Electronics. 2020. Vol. 9. No. 8. 1329.

12. Schaubert D. H. A gap-induced element resonance in single-polarized arrays of notch antennas // Proceedings of IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium and URSI National Radio Science Meeting. 1994. Vol.2. PP. 1264-1267.

13. Pozar D. M. The active element pattern // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 1994. Vol. 42. No. 8. PP. 1176-1178.

14. Kindt R. W., Logan J. T. Benchmarking Ultrawideband Phased Antenna Arrays: Striving for Clearer and More Informative Reporting Practices // IEEE Antennas and Propagation Magazine. 2018. Vol. 60. No. 3. PP. 34-47.

15. Kindt R., Taylor D. Polarization correction in dual-polarized phased arrays of flared notches // Proc. IEEE Int. Symp. Antennas Propagation. 2011. PP. 1-4.

16. Schaubert D. H., Shin J., Wunsch G. Characteristics of single-polarized phased array of tapered slot antennas // Proc. IEEE Int. Symp. Phased Array Systems and Technology. 1996. PP. 102-106.

Поступила 02.04.2024; принята к публикации 22.05.2024

#### Информация об авторах

**Бобков Иван Николаевич** – аспирант кафедры антенн и радиопередающих устройств, Институт радиотехнических систем и управления Южного федерального университета (347900, Россия, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44), тел.: +7 (8634) 37-16-34, e-mail: antennadesign@outlook.com, ORCID: 0000-0002-6923-7917

## LOW-PROFILE DUAL-POLARIZED VIVALDI ANTENNA ARRAY

I.N. Bobkov

The Institute of Radio Engineering Systems and Control, Southern Federal University,  
Taganrog, Russia

**Abstract:** the planar Vivaldi antenna array designed to operate on two linear polarizations is discussed. The antenna array elements are made of thin dielectric substrate with a copper cladding on both sides and a low relative dielectric permittivity. The excitation of the exponentially tapered slot in the elements is carried out using a transition from a coplanar waveguide to a slot line, and this transition is placed orthogonal to the longitudinal axis of the element at its very base. Such relative arrangement of the parts makes it possible to allocate more useful area of the dielectric substrate for the taper without increasing an overall dimension. The results of a numerical study of the antenna array unit-cell with periodic boundary conditions on the sides are presented. It is shown that broadside voltage standing wave ratio does not exceed 3 in the frequency band with a 2:1 overlap. The studied radiation characteristics show a low level of cross-polarization and the ability to scan the beam at an angle of up to 50°. In this case, the height of the antenna array elements above the metal screen is only half the wavelength at the upper frequency of the operating range and does not exceed the pitch of the antenna array

**Key words:** antenna arrays, aperture antennas, cross-polarization, wideband antennas, Vivaldi antennas

**Acknowledgments:** this research was financially supported by Russian Science Foundation, project №22-19-00537, <https://rscf.ru/project/22-19-00537/> and was performed at the Center of Collective Use “Applied Electrodynamics and antenna measurements”, Southern Federal University, Taganrog, Russia

#### References

1. Akyildiz I. F., Kak A., Nie S., "6G and Beyond: The Future of Wireless Communications Systems," *IEEE Access*, 2020, vol. 8, pp. 133995-134030.
2. Gibson P.J. "The Vivaldi Aerial," *1979 9th European Microwave Conference*, Brighton, UK, 1979, pp. 101-105.
3. Kindt R.W., Pickles R. "12-to-1 bandwidth all-metal Vivaldi array element," *2009 IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium*, North Charleston, SC, USA, 2009, pp. 1-4.
4. Kindt R.W., Pickles W.R. "Ultrawideband All-Metal Flared-Notch Array Radiator," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Nov. 2010, vol. 58, no. 11, pp. 3568-3575.
5. Schaubert D., Kollberg E., Korzeniowski T., Thungren T., Johansson J., Yngvesson K. "Endfire tapered slot antennas on dielectric substrates," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, December 1985, vol. 33, no. 12, pp. 1392-1400.
6. Yukhanov Y.V., Bobkov I.N. "Linear Vivaldi Antenna Array with Improved Low-Band Performance," *2021 Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves (RSEMW)*, Divnomorskoe, Russia, 2021, pp. 203-206.
7. Yonghu Zeng, Chong Guo, Xianqi Lin Xiaofan Yang "Vivaldi antenna design in millimeter-wave-band with ultra wide bandwidth and high gain," *2016 IEEE MTT-S International Microwave Workshop Series on Advanced Materials and Processes for RF and THz Applications (IMWS-AMP)*, Chengdu, 2016, pp. 1-3.

8. Klopfenstein R.W. "A Transmission Line Taper of Improved Design," *proc. of the IRE*, Jan. 1956, vol. 44, no. 1, pp. 31-35.
9. Dong Sik Woo, Kang Wook Kim, Hyun-Chul Choi "A Broadband and High Gain Tapered Slot Antenna for W-Band Imaging Array Applications", *International Journal of Antennas and Propagation*, 2014, vol. 2014, Article ID 378527, 6 pages.
10. Douville R.J.P., James D.S. "Experimental Study of Symmetric Microstrip Bends and Their Compensation," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, Mar. 1978, vol. 26, no. 3, pp. 175-182.
11. Lee J.S., Lee G.H., Mohyuddin W., Choi H.C., Kim K.W. "Design of an Ultra-Wideband Microstrip-to-Slotline Transition on Low-Permittivity Substrate", *Electronics*, 2020, vol. 9, no. 8, 1329.
12. Schaubert D.H. "A gap-induced element resonance in single-polarized arrays of notch antennas", *proc. of IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium and URSI National Radio Science Meeting*, 1994, vol. 2, pp. 1264-1267.
13. Pozar D.M. "The active element pattern," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, 1994, vol. 42, no. 8, pp. 1176–1178.
14. Kindt R.W., Logan J.T. "Benchmarking Ultrawideband Phased Antenna Arrays: Striving for Clearer and More Informative Reporting Practices," *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, June 2018, vol. 60, no. 3, pp. 34-47.
15. Kindt R., Taylor D. "Polarization correction in dual-polarized phased arrays of flared notches," *proc. IEEE Int. Symp. Antennas Propagation*, 2011, pp. 1–4.
16. Schaubert D.H., Shin J., Wunsch G. "Characteristics of single-polarized phased array of tapered slot antennas," *proc. IEEE Int. Symp. Phased Array Systems and Technology*, 1996, pp. 102–106.

Submitted 02.04.2024; revised 22.05.2024

#### Information about the author

**Ivan N. Bobkov** – Postgraduate Student, Antenna and radio-transmitter department, Institute of Radio Engineering Systems and Control, Southern Federal University (44 Nekrasovsky per., Taganrog 347900, Russia), tel.: +7 (8634) 37-16-34, e-mail: antennadesign@outlook.com, ORCID: 0000-0002-6923-7917

**ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ВЕЛИЧИНЫ КОЭФФИЦИЕНТА НАПРАВЛЕННОГО ДЕЙСТВИЯ АНТЕННЫ НА ОСНОВЕ ВОЗДУШНОЙ ПОДЛОЖКИ ОТ ЧИСЛА ПАТЧЕЙ****А.В. Ашихмин<sup>1</sup>, Е.Д. Егорова<sup>2</sup>, Е.А. Ищенко<sup>2</sup>, С.М. Фёдоров<sup>2,3</sup>, Д.А. Шершов<sup>2</sup>**<sup>1</sup>**ЗАО «ИРКОС», г. Воронеж, Россия**<sup>2</sup>**Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия**<sup>3</sup>**Международный институт компьютерных технологий, г. Воронеж, Россия**

**Аннотация:** рассматривается антенная система на основе патчей на воздушной подложке для реализации помехозащищенного канала связи с роботизированными автономными комплексами. Для обеспечения наиболее эффективного помехозащищенного канала необходимо обеспечить максимальный уровень коэффициента направленного действия (КНД) и минимальный уровень боковых лепестков (УБЛ). Для определения характеристик антенны проводилось моделирование зависимости уровня КНД антенны от числа излучателей, формирующих антенную решетку. Полученные результаты показывают, что использование антенны на основе воздушной подложки для формирования высоконаправленной системы связи тесно связано с количеством излучателей, используемых в антенной решетке. Было показано, что применение линейной антенной решетки позволяет сформировать высоконаправленную антенную систему с веерной диаграммой направленности и малым уровнем боковых лепестков, при этом ввиду связи размеров антенны и коэффициента усиления возникает дилемма выбора между минимальным размером антенны и наиболее достижимым уровнем коэффициентом направленного действия. Результаты моделирования представлены в виде картин диаграмм направленности, графиков возвратных потерь, а также объединены в единую таблицу для простоты анализа величины уровня КНД, УБЛ и ширины главных лепестков в зависимости от числа патч-излучателей в антенной системе

**Ключевые слова:** антенна на воздушной подложке, коэффициент направленного действия, КНД, высоконаправленная антенна

**Благодарности:** работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания "Молодежная лаборатория" № FZGM-2024-0003

**Введение**

Применение высоконаправленных антенн в задачах помехозащищенной связи является актуальной задачей. Повышение коэффициента направленного действия (КНД) антенны позволяет обеспечить рост дальности связи, а также подавление побочного приема. Для достижения таких параметров применяют высоконаправленные антенны, которые позволяют сконцентрировать излучение в необходимом направлении. Однако важно отметить, что очень часто возникает задача выбора оптимального размера антенны, а также уровня КНД, которого она может достигнуть. Примером таких антенн выступают антенны Уда-Яги, логопериодические антенны, антенные решетки. Так, в работах [1, 2] рассматриваются характеристики антенны Уда-Яги, а также зависимость уровня КНД, который может быть достигнут от числа директоров антенны. Авторами отмечено, что на начальных этапах при добавлении директоров наблюдается рост КНД, однако с добавлением все новых директоров рост КНД замедляется.

Недостатком антенны Уда-Яги является ее узкий диапазон рабочих частот, поэтому ее применение очень ограничено по такой частоте. Для обеспечения работы в широком диапазоне частот используют логопериодические антенны (ЛПА), однако их размер напрямую связан с поддерживаемыми диапазонами частот, а также с уровнем КНД [3, 4]. Таким образом, реализация высоконаправленных антенн является важной и актуальной задачей, однако повышение КНД путем добавления директоров, а также увеличением размеров ЛПА антенны является балансом между размерами и оптимальными характеристиками.

Другими методами реализации высоконаправленных антенн является использование линз, а также диаграммообразующих устройств [5-7]. Благодаря использованию таких конструкций удается сохранить широкий диапазон рабочих частот, повысить уровень КНД, снизить потери и сохранить малые размеры антенны. Однако недостатком всех таких решений является рост цены антенны, усложнения процесса производства. Другим способом повысить направленные свойства антенны является реализация антенных решеток. Благодаря одновременному использованию нескольких

антенных элементов с использованием соложения их излучения повышается пиковый уровень КНД, а также может быть реализована веерная или наклоненная диаграмма направленности. Наиболее простой в реализации является антенна, построенная на основе нескольких патч излучателей, соединенных единой линией питания через делитель [8, 9]. Особый интерес вызывает возможность реализации высоконаправленных антенн с высоким уровнем КНД на основе воздушных подложек, что позволяет уменьшить потери, а также обеспечить простоту реализации и изготовления антенн. В данной работе рассматривается антенна на основе воздушной подложки, которая используется для формирования направленного излучения с целью реализации помехозащищенного канала связи. В процессе исследования будет рассматриваться зависимость уровня КНД от числа антенных элементов, которые образуют антенную решетку.

### Описание конструкции антенны на основе воздушной подложки

В процессе исследования рассматривалась антенна с высоким уровнем КНД, которая была рассчитана для реализации помехозащищенной передачи данных с высоким уровнем КНД на частоте 5.865 ГГц. Благодаря такой частоте работы антенна обладает малыми размерами, а также в процессе исследования путем моделирования могут быть получены наиболее точные характеристики с высокой скоростью расчетов. В роли эталонной (исходной) в процессе исследования выступала патч-антенна на основе воздушной подложки с четырьмя излучателями. На рис. 1 приводится вид антенны с указанием размеров патч-излучателей. На основе приведенной антенны проводилось дальнейшее исследование. Заметим, что так как базовая конструкция антенны обладает четырьмя патч-излучателями, то ее характеристики, которые приводятся на рис. 2 будут выступать в роли эталонных.

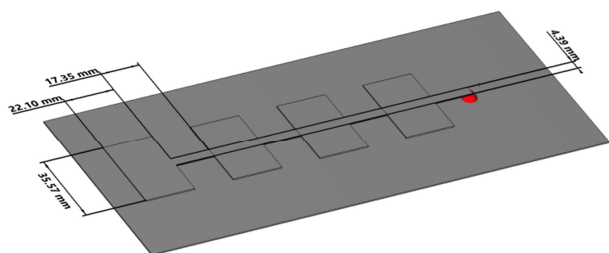
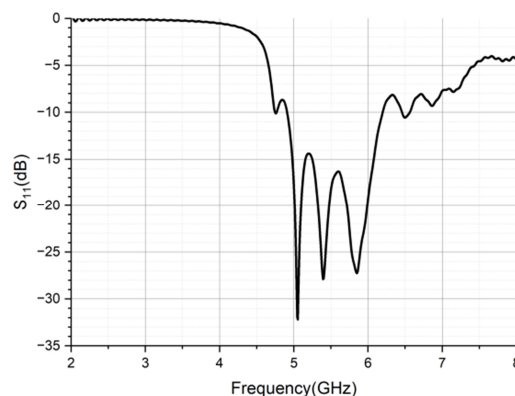
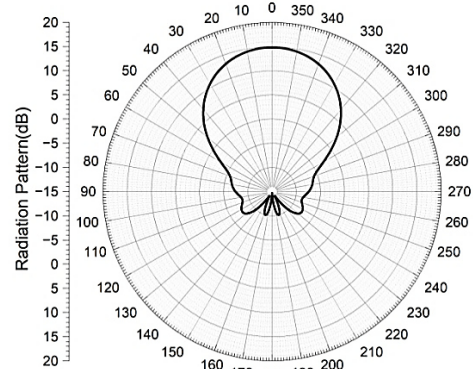


Рис. 1. Конструкция базовой (эталонной антенны).  
Высота патчей над экраном 3 мм



а)



б)

Рис. 2. Характеристики антенны при использовании четырех излучателей: а) график возвратных потерь; б) диаграмма направленности на частоте

Полученные результаты показывают, что диапазон рабочих частот у эталонной антенны составляет от 4.91 до 6.19 ГГц, а максимум КНД составил 15.2 дБ, КПД в диапазоне рабочих частот более 85 %. Благодаря тому, что патч-излучатели установлены в одну линию удается также сформировать веерную диаграмму направленности, что также позволяет повысить помехозащищенность канала передачи данных, так как повышается избирательность в плоскостях приема и передачи данных. Для того, чтобы оценить влияние характеристик антенны от числа патчей рассмотрим случаи, когда антенна сформирована из 1-6 патчей.

### Сравнение зависимости уровня КНД от количества патч-излучателей

В рассматриваемой конструкции антенны число патч-излучателей напрямую влияет на уровень КНД, так с увеличением числа антенных элементов стоит ожидать, что уровень КНД будет возрастать. На рис. 3 приводится вид антенн на основе воздушной подложки, которые рассматривались в процессе моделирования.

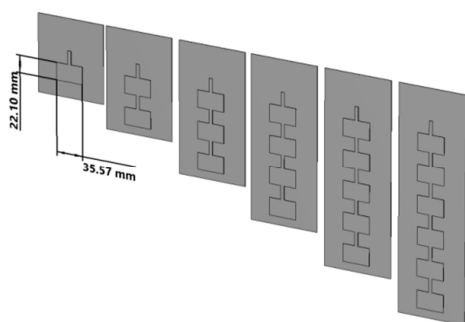
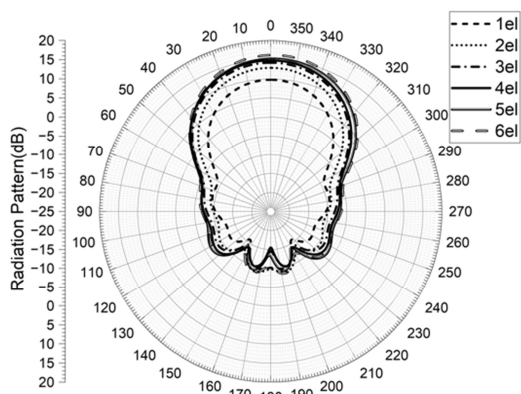
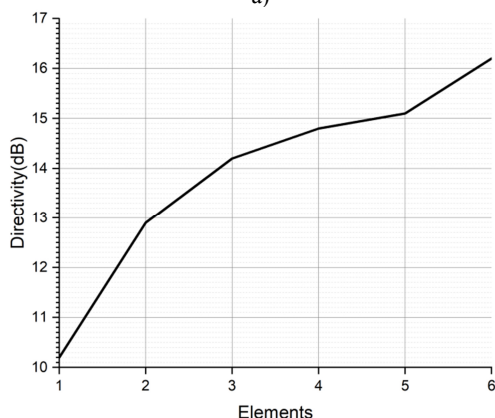


Рис. 3. Антенные элементы, исследуемые в процессе моделирования

Как видно, при увеличении числа элементов наблюдается рост геометрических размеров антенны, соответственно в данном случае будет также возникать компромисс, который будет заключаться в выборе оптимального размера при достижении требуемых характеристик. На рис. 4 и в табл. 1 приводятся основные характеристик антенны при изменении числа патч-излучателей. Важно отметить, что помимо исследования изменения уровня КНД также проводилась оценка характеристик диапазонов рабочих частот.



а)



б)

Рис. 4. Зависимость характеристик антенны от числа излучателей: а) зависимость диаграммы направленности от числа патч-излучателей; б) зависимость пика уровня КНД от числа элементов

Таблица 1

Характеристики антенны при изменении числа патч-излучателей

Число патч-чей	1	2	3	4	5	6
Диапазон рабочих частот, ГГц	5.09 – 5.31	4.81 – 6.20	4.75 – 6.20	4.91 – 6.20	4.84 – 6.18	4.80 – 6.19
Максимум КНД на $f=5.865$	10.2	12.9	14.2	14.8	15.1	16.2
Ширина главного лепестка в двух вертикальных плоскостях, °	48.2 x 69.5	48.9 x 33.9	51.1 x 22.5	51.7 x 16.9	53.7 x 13.7	56.1 x 11.7
УБЛ, дБ	- 18.9	- 21.5	- 22.8	- 22.4	- 21.4	- 20.8
КПД min, %	83	84	84	85	87	86

Полученные результаты показывают, что при увеличении числа антенных элементов наблюдается рост КНД антенны. Важно также отметить, что во всех случаях, кроме применения одного патча, наблюдается явная веерность диаграммы направленности, что также позволяет улучшить помехозащищенность канала связи. Дополнительно можно отметить, что при увеличении числа антенных элементов наблюдается сохранение малого уровня боковых лепестков, которые являются одним из наиболее важных компонентов, обеспечивающих помехозащищенность антенны.

### Заключение

Проведенное в данной работе исследование показывает, что применение высоконаправленных антенн для обеспечения помехозащищенной связи тесно связано с выбором оптимальной конструкции. В процессе исследования было показано, что уровень усиления для патч-антенны на основе воздушной подложки напрямую зависит от числа излучателей, так как они составляют антенную решетку. Таким образом, было показано, что применение такой антенны напрямую связано с выбором между желаемыми характеристиками и геометрическими размерами антенны. Преимуществами же использования рассмотренной конструкции выступает простота изготовления, а также возможность увеличения числа излучателей путем формирования дополнительных секций.



### Литература

1. Hatem M. I. M., Najeb A. E., Monder J. Enhancing Yagi-Uda Antenna Performance: Optimizing Gain and Bandwidth with Directors Modification // International Science and Technology Journal. 2024. Vol. 33. No. 2. PP. 1-14.
2. Vezbicke P. V. NBS Technical note 688 Yagi Antenna Design. U. S. Department of commerce. National Bureau of Standards, 1976. 22 p.
3. Gain Characteristic Maintained, Miniaturized LPDA Antenna Using Partially Applied Folded Planar Helix Dipoles / G. Shin, M. Kong, S. -H. Lee, S. -T. Kim, I. -J. Yoon // IEEE Access. 2018. Vol. 6. PP. 25874-25880.
4. Chopade P., Gaikwad S. V. Design and analysis of log periodic dipole array antenna // ICTACT Journal on Microelectronics. 2019. Vol. 5. Iss. 3. PP. 836-844.
5. Microwave lens using multi-layer substrates for antenna gain enhancement / S. W. Cheung, Q. L. Li, D. Wu, T. I. Yuk // 10th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP), Davos, Switzerland, 2016. PP. 1-4.
6. Kim J. H., Ahn C. -H., Bang J. -K. Antenna Gain Enhancement Using a Holey Superstrate // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2016. Vol. 64. No. 3. PP. 1164-1167.
7. Increasing the gain of a semicircular slot UWB antenna using an FSS reflector / Y. Ranga, K. P. Esselle, L. Matekovits, S. G. Hay // 2012 IEEE-APS Topical Conference on Antennas and Propagation in Wireless Communications (APWC), Cape Town, South Africa, 2012. PP. 478-481.
8. Singh S., Tyagi N., Sinha N. Design and analysis of single patch, 2×1 and 4×1 microstrip antenna arrays // International Conference for Convergence for Technology-2014, Pune, India, 2014. PP. 1-5.
9. Khraisat Yahya Salameh Hassan Design of 4 Elements Rectangular Microstrip Patch Antenna with High Gain for 2.4 GHz applications // Mathematical Models and Methods in Applied Sciences. 2011. No. 6. PP. 68.

Поступила 27.06.2024; принята к публикации 26.08.2024

### Информация об авторах

**Ашихмин Александр Владимирович** – д-р техн. наук, главный инженер ЗАО «ИРКОС» (394066, Россия, г. Воронеж, Московский Проспект, д. 179 корпус 4), e-mail: info@ircos.ru

**Егорова Евгения Дмитриевна** – студент кафедры радиоэлектронных устройств и систем, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, д. 84), e-mail: egorova\_evgenia23@mail.ru

**Ищенко Евгений Алексеевич** – ассистент кафедры радиоэлектронных устройств и систем, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, д. 84), e-mail: kursk1998@yandex.ru

**Фёдоров Сергей Михайлович** – канд. техн. наук, доцент кафедры радиоэлектронных устройств и систем, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84); доцент кафедры информационной безопасности и систем связи, Международный институт компьютерных технологий (394026, Россия, г. Воронеж, ул. Солнечная, д. 29 б), e-mail: fedorov\_sm@mail.ru, ORCID: 0000-0001-9027-6163

**Шершов Даниил Александрович** – студент кафедры радиоэлектронных устройств и систем, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, д. 84), e-mail: shershovdaniil@yandex.ru

## INVESTIGATION OF THE DEPENDENCE OF THE DIRECTIONAL COEFFICIENT OF AN AERIAL-BASED ANTENNA ON THE NUMBER OF PATCHES

A.V. Ashikhmin<sup>1</sup>, E.D. Egorova<sup>2</sup>, E.A. Ishchenko<sup>2,3</sup>, S.M. Fedorov<sup>2,3</sup>, D.A. Shershov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>CJSC IRCOS, Voronezh, Russia

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

<sup>3</sup>International Institute of Computer Technologies, Voronezh, Russia

**Abstract:** the article considers an aerial patch-based antenna system for the implementation of an interference-protected communication channel with robotic autonomous complexes. To ensure the most effective interference-free channel, it is necessary to ensure the maximum level of the directional coefficient (KND) and the minimum level of the side lobes (UBL). To determine the characteristics of the antenna, a simulation was carried out of the dependence of the antenna's CNL level on the number of emitters forming the antenna array. The results obtained show that the use of an aerial-based antenna to form a highly directional communication system is closely related to the number of emitters used in the antenna array. It has been shown that the use of a linear antenna array makes it possible to form a highly directional antenna system with a fan pattern and a low level of side lobes, while due to the connection between the antenna size and the gain factor, a dilemma arises between the minimum antenna size and the most achievable level of directional coefficient. The simulation results are presented in the form of pictures of directional diagrams, return loss graphs, and also combined into a single table, for ease of analysis of the magnitude of the level of CNL, UBL and the width of the main lobes, depending on the number of patch emitters in the antenna system

**Key words:** aerial antenna, directional coefficient, KND, highly directional antenna

**Acknowledgements:** the work was carried out with the financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the framework of the state assignment "Youth laboratory" no. FZGM-2024-0003

References

1. Hatem M.I.M., Najeb A.E., Monder J. "Enhancing Yagi-Uda Antenna Performance: Optimizing Gain and Bandwidth with Directors Modification", *International Science and Technology Journal*, 2024, vol. 33, no. 2, pp. 1-14.
2. Vezbicke P.V. "NBS Technical note 688 Yagi Antenna Design", U.S. Department of commerce. National Bureau of Standards, 1976, 22 p.
3. Shin G., Kong M., Lee S.-H., Kim S.-T., Yoon I.-J. "Gain Characteristic Maintained, Miniaturized LPDA Antenna Using Partially Applied Folded Planar Helix Dipoles," *IEEE Access*, 2018, vol. 6, pp. 25874-25880, doi: 10.1109/ACCESS.2018.2834931
4. Chopade P., Gaikwad S.V. "Design and analysis of log periodic dipole array antenna", *ICTACT Journal on Microelectronics*, 2019, vol. 5, iss. 3, pp. 836-844.
5. Cheung S.W., Li Q.L., Wu D., Yuk T.I. "Microwave lens using multi-layer substrates for antenna gain enhancement," *2016 10th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*, Davos, Switzerland, 2016, pp. 1-4, doi: 10.1109/EuCAP.2016.7481868.
6. Kim J.H., Ahn C.-H., Bang J.-K. "Antenna Gain Enhancement Using a Holey Superstrate," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 64, no. 3, pp. 1164-1167, March 2016, doi: 10.1109/TAP.2016.2518650.
7. Ranga Y., Esselle K.P., Matekovits L., Hay S.G. "Increasing the gain of a semicircular slot UWB antenna using an FSS reflector," *2012 IEEE-APS Topical Conference on Antennas and Propagation in Wireless Communications (APWC)*, Cape Town, South Africa, 2012, pp. 478-481, doi: 10.1109/APWC.2012.6324954.
8. Singh S., Tyagi N., Sinha N. "Design and analysis of single patch, 2×1 and 4×1 microstrip antenna arrays," *International Conference for Convergence for Technology-2014*, Pune, India, 2014, pp. 1-5, doi: 10.1109/I2CT.2014.7092286.
9. Khraisat Y.S.H. "Design of 4 Elements Rectangular Microstrip Patch Antenna with High Gain for 2.4 GHz applications", *Mathematical Models and Methods in Applied Sciences*, 2011, no.6, p. 68.

Submitted 27.06.2024; revised 26.08.2024

Information about the authors

**Alexandr V. Ashikhmin** – Dr. Sc. (Technical), Chief Engineer of CJSC IRKOS (179 korp. 4 Moskovskiy prosp., Voronezh 394066, Russia), e-mail: info@ircos.ru

**Evgeniya D. Egorova** – Student, Department of Radioelectronic Devices and Systems, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: egorova\_evgenia23@mail.ru

**Evgeniy A. Ishchenko** – Assistant, Department of Radioelectronic Devices and Systems, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: kursk1998@yandex.ru

**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

**Daniil A. Shershov** – Student, Department of Radioelectronic Devices and Systems, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia) e-mail: shershovdaniil@yandex.ru

## ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДВУХПРОВОДНОЙ НАПРАВЛЯЮЩЕЙ ЛИНИИ ПЕРЕДАЧИ В ПОДЗЕМНОМ КВАЗИОДНОМЕРНОМ СООРУЖЕНИИ

Д.В. Федосов<sup>1</sup>, А.В. Колесников<sup>1</sup>, А.В. Николаев<sup>2</sup>

<sup>1</sup>НПООО «КВ-СВЯЗЬ», г. Омск, Россия

<sup>2</sup>Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, г. Москва, Россия

**Аннотация:** приведены результаты моделирования методом конечных элементов двухпроводной направляющей линии передачи, проложенной вдоль боковой поверхности горной выработки в сплошном полупроводящем пространстве почв и горных пород. Получены зависимости удельного затухания и коэффициента замедления электромагнитной волны в диапазоне средних частот от 1 до 3 МГц при различных расстояниях между направляющей линией и боковой поверхностью тоннеля. Использовано приближение прямого полуцилиндрического туннеля с радиусом 2 м, имитирующее промышленные объекты в горных породах без металлических крепей и железобетонных стен. При приближении линии передачи к горной породе происходит резкое увеличение удельного затухания. Приведены аналитические выражения для расчета полученной моделированием величины удельного затухания радиосигнала на средних частотах от 1 до 3 МГц при изменении расстояния между боковой поверхностью выработки и направляющей линией. Изменчивость фазы детектируемого сигнала и потери энергии волны вдоль линии передачи являются её важными техническими характеристиками при построении перспективных радио- и телекоммуникационных систем связи, навигации, управления автономной аппаратурой и передачи информации в подземных квазиодномерных сооружениях различного назначения

**Ключевые слова:** подземная связь, подземная навигация, удельное затухание сигнала в шахтах, коэффициент фазы

### Введение

Бесконтактная связь и навигация в квазиодномерных подземных сооружениях между горнорабочими и транспортно-технологическим оборудованием возможна при помощи аппаратуры радиосвязи диапазона средних волн (СВ) и направляющих линий (НЛ) передачи сигналов [1-4]. В статье [5] приведены основные характеристики однопроводных НЛ (ОНЛ).

Двухпроводная НЛ (ДНЛ) относительно однопроводной (ОНЛ) характеризуется следующим [6]:

- более равномерная интенсивность радиосигнала в сечении горной выработки;
- максимальный уровень детектируемого сигнала с антеннами магнитного типа в горной выработке;
- минимальный уровень детектируемого сигнала с антеннами электрического типа в центре между плечами ДНЛ;
- более высокую стойкость к авариям НЛ, так как обрыв двух плеч ДНЛ менее вероятен, чем одного плеча в ОНЛ.

Использование ДНЛ для организации подземной навигационной трассы предложено в [7]. Ввиду этого, возникает потребность оценки основных технических характеристик ДНЛ, влияющих в большей степени на навигацию.

Схема использования ДНЛ приведена на рис. 1: стационарные приёмопередатчики (СП) соединены двухпроводной линией передачи на расстоянии от 1 км и более, в зависимости от технических условий подземного сооружения. СП может иметь несколько согласованных с линиями выходов в различные ветви выработок  $X_n$ ,  $n = 1, 2, 3$ . Каждый СП располагается в узлах, связывающих туннели подземных объектов в рамках привычной вентиляционной парадигмы устройства горных выработок. Подвижные абоненты связаны бесконтактно с СП двигаясь в поле ДНЛ.

Для получения характеристик ДНЛ проведено моделирование методом конечных элементов [8]. Геометрия модели туннеля приведена на рис. 2: 1) – сосредоточенный порт с активным импедансом  $Z_{\Pi} = 600 \text{ Ом}$ , 2) – ДНЛ с импедансным условием  $\sigma_{\text{НЛ}} = 58 \cdot 10^7 \text{ См/м}$ , 3) – сосредоточенный порт с активным импедансом  $Z_{\Pi} = 600 \text{ Ом}$  либо нагрузка  $R = 600 \text{ Ом}$ . Другие параметры модели:

- частота источника 1, 2 и 3 МГц,
- туннель имеет форму прямого полуцилиндра радиусом 2 м,
- высота подвеса плеч ДНЛ от пола – 1 м,
- диэлектрическая проницаемость выбрана постоянной  $\epsilon = 10$ ,
- электропроводность - переменна  $\sigma = \{0,5; 0,1; 0,01; 0,001\} \text{ См/м}$ .

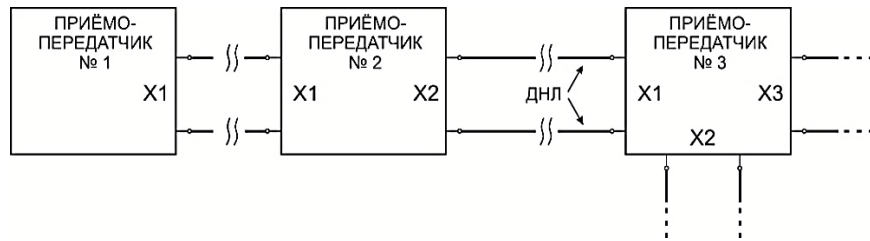


Рис. 1. Схема включения приёмопередатчиков в ДНЛ

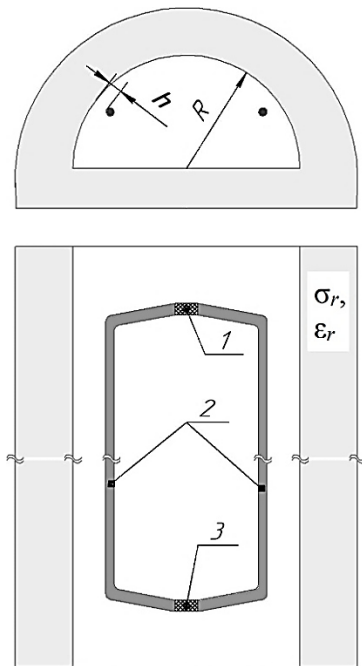
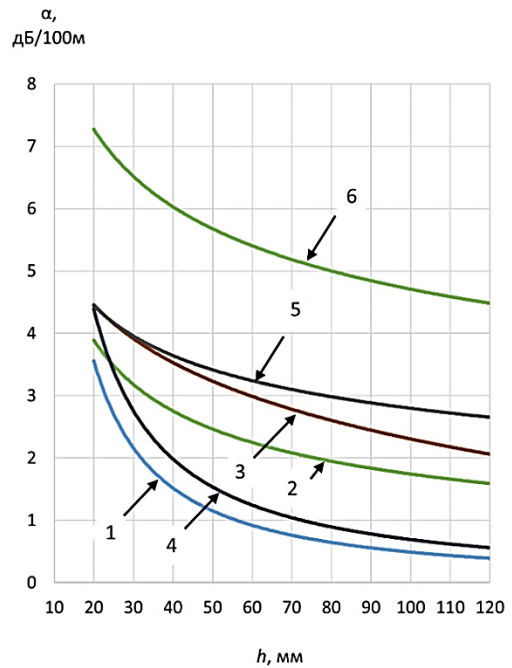


Рис. 2. Геометрическая модель туннеля

### Удельное затухание ДНЛ

Средние значения удельного затухания сигнала при различных расстояниях между плечом ДНЛ и боковой поверхностью туннеля ( $h$ , м), полученные методом компьютерного моделирования выработки с различными значениями электропроводности сплошного полупроводящего пространства почвы и горной породы при постоянной величине диэлектрической проницаемости  $\epsilon = 10$ , приведены на рис. 3. Протяженность выработки составляла 1000 м, частота возбуждающих линию сигналов – 1, 2 и 3 МГц.

Таким образом, значение интенсивности сигнала в туннеле может отличаться более чем на 20 дБ и зависит от частоты возбуждающего ДНЛ радиосигнала.



- 1 -  $f = 1$  МГц,  $\sigma = 0,0001$  См/м,
- 2 -  $f = 2$  МГц,  $\sigma = 0,0001$  См/м,
- 3 -  $f = 3$  МГц,  $\sigma = 0,0001$  См/м,
- 4 -  $f = 1$  МГц,  $\sigma = 0,1$  См/м,
- 5 -  $f = 2$  МГц,  $\sigma = 0,1$  См/м,
- 6 -  $f = 3$  МГц,  $\sigma = 0,1$  См/м.

Рис. 3. Зависимость удельного затухания сигнала от расстояния между плечом ДНЛ и боковой поверхностью выработки, а также частоты

Таблица 1  
Функции приближения для расчёта затухания ДНЛ

Параметры ДНЛ	Выражение для $\alpha$ , дБ/100м
$f = 1$ МГц, $\sigma = 0,001$ См/м	$142h^{(-1,23)}$
$f = 2$ МГц, $\sigma = 0,001$ См/м	$17,4h^{(-0,5)}$
$f = 3$ МГц, $\sigma = 0,001$ См/м	$-1,3\ln(h)+8,64$
$f = 1$ МГц, $\sigma = 0,1$ См/м	$136h^{(-1,15)}$
$f = 2$ МГц, $\sigma = 0,1$ См/м	$10,5h^{(-0,28)}$
$f = 3$ МГц, $\sigma = 0,1$ См/м	$16,3h^{(-0,27)}$

В табл. 1 приведены аппроксимирующие функции для приближенного расчета затухания ДНЛ и последующей оценки бюджета проектируемой подземной радиолнии.

### Фазовое замедление ДНЛ

Сигнал в ДНЛ будет испытывать замедление, которое можно охарактеризовать коэффициентами укорочения  $K_y$ , замедления  $K_3$  и фазы  $\beta$  [9, 10]:

$$c = K_3 v_\phi, \quad \lambda_\phi = K_y \lambda_0, \\ \beta = 2\pi f K_3 / c, \quad K_3 = 1/K_y,$$

где  $v_\phi$  – фазовая скорость,  $c$  и  $\lambda_0$  – скорость распространения и длина волны в свободном пространстве.

Уравнение фазы сигнала в НЛ вдоль направления  $z$  будет выражаться следующим образом:

$$\Psi_{НЛ}(t, z) = 2\pi f t - K_3 2\pi z / \lambda_0.$$

На рис. 4 и 5 приведены, соответственно, зависимости коэффициента замедления  $K_3$  при  $\sigma = 0,001$  и  $0,1$  См/м, а также различном расстоянии от плеч ДНЛ до боковой поверхности горной выработки. Сравнивая их с графиком коэффициента  $K_3$  для ОНЛ (рис. 11, [5]), видно, что в ДНЛ величина фазовой задержки меньше чем в ОНЛ и убывает более равномерно и плавно при малых расстояниях до поверхности выработки. Можно предположить, что такой характер изменения фазы в ДНЛ относительно ОНЛ позволит повысить точность фазовой навигации.

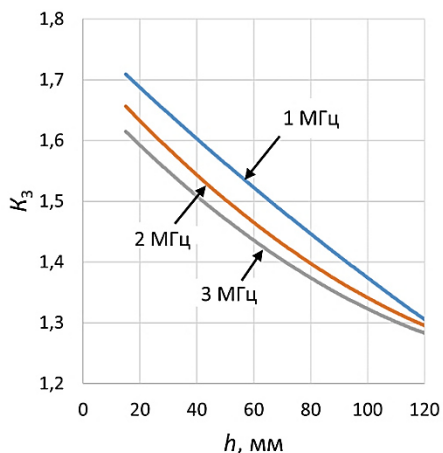


Рис. 4. Зависимости  $K_3$  от  $h$  на частотах 1, 2 и 3 МГц при  $\sigma = 0,001$  См/м и  $\epsilon = 10$

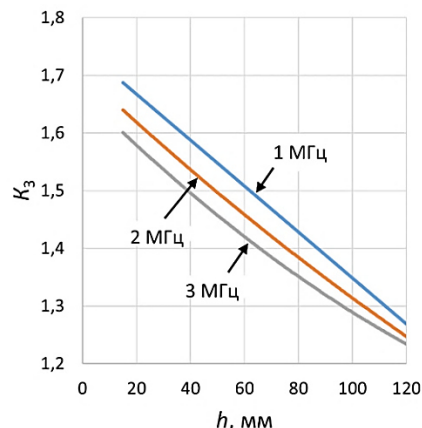


Рис. 5. Зависимости  $K_3$  от  $h$  на частотах 1, 2 и 3 МГц при  $\sigma = 0,1$  См/м и  $\epsilon = 10$

### Заключение

Анализ технических характеристик направляющей линии передачи для подземной связи показал:

- затухание сигнала при расстоянии менее 50 мм от НЛ до боковой поверхности горной выработки начинает резко возрастать;
- приближение плеча ДНЛ к боковой поверхности горной выработки приводит к укорочению длины волны, однако величина фазовой задержки в ДНЛ меньше, чем для ОНЛ.

Выводы и предположения в данной статье требуют экспериментального подтверждения в условиях горных выработок, что и является предметом последующей работы авторов в данном направлении.

### Литература

1. Simulation and measurement of medium frequency signals coupling from a line to a loop antenna / N. Diamando, J. Li, Ch. Zhou, D.E. Brocker, Y. Qin, D.H. Werner, P.L. Werner // IEEE Transactions on industry applications. 2016. Vol. 52 (4). PP. 3527-3534.
2. A hybrid approach for efficient modeling of medium-frequency propagation in coal mines / D.E. Brocker, P.E. Sieber, J.A. Waynert, J. Li, P.L. Werner, D.H. Werner // IEEE Antennas and propagation magazine. 2015. Vol. 57(1). PP. 164-176.
3. Li J., Whisner B., Waynert J.A. Measurements of medium-frequency propagation characteristics of a transmission line in an underground coal mine // IEEE Transactions on industry applications. 2013. Vol. 49 (5). PP. 1984-1991.
4. Обзор способов организации подземной связи и перспективы использования диапазона средних волн в шахтах / Федосов Д.В., Николаев А.В., Колесников А.В., Лапин С.Э., Бабенко А.Г. // Труды НИИР. 2022. №1. С. 19-36.
5. Федосов Д.В., Колесников А.В., Николаев А.В. Технические характеристики направляющей линии передачи в подземном квазиодномерном сооружении // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2024. Т.20. № 1. С. 106-111.
6. Федосов Д.В., Колесников А.В. Обоснование концепции системы связи диапазона средних волн в подземных квазиодномерных сооружениях // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2023. Т. 26. №3. С. 89-97.
7. Патент РФ 2797240. Способ навигации и измерения расстояний в протяженных объектах: заявл.:



05.05.2022; опублик. 01.06.2023 / Федосов Д.В.; заявитель и патентообладатель Федосов Д.В. 18 с.

8. Чебышев В. В. Основы проектирования антенных систем. М.: Горная линия-Телеком, 2018. 150 с.

9. Гроднев И.И., Шварцман, В.О. Теория направляющих систем связи. М.: Связь, 1978. 296 с.

10. Сазонов Д.М. Антенны и устройства СВЧ. М.: Высш. шк., 1988. 432 с.

Поступила 27.05.2024; принята к публикации 26.08.2024

#### Информация об авторах

**Федосов Дмитрий Витальевич** – канд. техн. наук, генеральный директор, НПО «КВ-СВЯЗЬ» (644012, Россия, г. Омск, пр. Академика Королева, 32), e-mail: xferra@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5904-2710>

**Колесников Андрей Викторович** – канд. техн. наук, инженер, НПО «КВ-СВЯЗЬ» (644012, Россия, г. Омск, пр. Академика Королева, 32), e-mail: kolesnikov.radio@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9048-2899>

**Николаев Алексей Владимирович** – д-р техн. наук, главный научный сотрудник, Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН (101990, Россия, г. Москва, Малый Харитоньевский переулок, д. 4), e-mail: alarmoren@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3642-0707>

## TECHNICAL CHARACTERISTICS OF A BIFILAR TRANSMISSION LINE IN AN UNDERGROUND QUASI-ONE-DIMENSIONAL STRUCTURE

D.V. Fedosov<sup>1</sup>, A.V. Kolesnikov<sup>1</sup>, A.V. Nikolaev<sup>2</sup>

<sup>1</sup>RPSLL "HF-COMMUNICATION", Omsk, Russia

<sup>2</sup>Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

**Abstract:** The paper presents the results of finite element modeling of a two-wire transmission guide line laid along the side surface of a mine working in a continuous semiconducting space of soils and rocks. The dependences of the specific attenuation and the slowing down coefficient of an electromagnetic wave in the range of medium frequencies from 1 to 3 MHz are obtained for different distances between the guide line and the side surface of the tunnel. An approximation of a straight semi-cylindrical tunnel with a radius of 2 m is used, simulating industrial facilities in rocks without metal supports and reinforced concrete walls. As the transmission line approaches the rock, a sharp increase in the specific attenuation occurs. The analytical expressions are presented for calculating the value of the specific attenuation of a radio signal obtained by modeling at medium frequencies from 1 to 3 MHz with a change in the distance between the side surface of the working and the guide line. The variability of the phase of the detected signal and the loss of wave energy along the transmission line are its important technical characteristics in the construction of promising radio and telecommunication systems for communication, navigation, control of autonomous equipment and transmission of information in underground quasi-one-dimensional structures for various purposes.

**Key words:** transmission line impedance, underground communication, attenuation in mines, velocity factor

#### References

1. Damiano N., Li J., Zhou Ch., Brocker D.E., Qin Y., Werner D.H., Werner P.L. "Simulation and measurement of medium frequency signals coupling from a line to a loop antenna", *IEEE Transactions on industry applications*, 2016, vol. 52 (4), pp. 3527-3534.
2. Brocker D.E., Sieber P.E., Waynert J.A., Li J., Werner P.L., Werner D.H. "A hybrid approach for efficient modeling of medium-frequency propagation in coal mines", *IEEE Antennas and propagation magazine*, 2015, vol. 57 (1), pp. 164-176.
3. Li J., Whisner B., Waynert J.A. "Measurements of medium-frequency propagation characteristics of a transmission line in an underground coal mine", *IEEE Transactions on industry applications*, 2013, vol. 49 (5), pp. 1984-1991.
4. Fedosov D.V. Nikolaev A.V., Kolesnikov A.V., Lapin S.E., Babenko A.G. "Review of methods for organizing of underground communications and prospects for using the medium wave range in mines", *Proceedings of the Research Institute of Radio Engineering (Trudy NIIR)*, 2022, no. 1, pp. 19-36.
5. Fedosov D.V., Kolesnikov A.V., Nikolaev A.V. "Technical characteristics and parameters of a transmission line in an underground quasi-one-dimensional structure", *The Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2024, vol. 20, no. 1, pp. 106-111.
6. Fedosov D.V., Kolesnikov A.V. "Substantiation of the concept of a communication system in the range of medium waves in underground quasi-one-dimensional structures", *Physics of Wave Processes and Radio Systems (Fizika volnovykh protsessov i radiotekhnicheskoye sistemy)*, 2023, vol. 26, no. 3, pp. 89-97.
7. Fedosov D.V. "Method of navigation and distance measurement in extended objects" ("Sposob navigatsii i izmereniya rasstoyaniy v protyazhennykh ob'yektakh"), Patent of RF 2797240, appl. 05.05.2022, published 01.06.2023.
8. Chebyshev V.V. "Antenna System Design Fundamentals" ("Osnovy proektirovaniya antennyh system"), Moscow, Goryachaya liniya-Telekom, 2018, 150 p.
9. Grodnev I.I., Shvartsman, V.O. "Theory of guiding communication systems" ("Teoriya napravlyayushchih sistem svyazi"), Moscow, Svyaz, 1978, 296 p.
10. Sazonov D.M. "Antennas and microwave devices" ("Antenny i ustrojstva SVCh"), Moscow, Vyssh. shk., 1988, 432 p.

Submitted 27.05.2024; revised 26.08.2024

#### Information about the authors

**Dmitry V. Fedosov** – Cand. Sc. (Technical), General Director, RPSLL "HF-Communication" (32 Akademika Koroleva prosp., Omsk 644012, Russia), e-mail: xferra@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5904-2710>

**Andrey V. Kolesnikov** – Cand. Sc. (Technical), Engineer, RPSLL "HF-Communication" (32 Akademika Koroleva prosp., Omsk 644012, Russia), e-mail: kolesnikov.radio@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9048-2899>

**Alexey V. Nikolaev** – Dr. sc. (Technical), Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences (4 Maly Kharitonievsky per., Moscow 101990, Russia), e-mail: alarmoren@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3642-0707>

## ОПТИМИЗАЦИЯ ХРАНЕНИЯ МАТРИЦЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МНОГОУРОВНЕВОГО ДЕКОДЕРА

М.В. Хорошайлова, Э.Э. Каграманов, В.С. Карташов, С.С. Иванова

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

**Аннотация:** предлагается многоуровневый декодер для декодирования квазициклических низкоплотностных кодов с несколькими ребрами (QC-LDPC) с использованием графического процессора (ГП) в системах квантового распределения ключей с непрерывной переменной (НПКРК). Коды с контролем четности низкой плотности обладают отличными характеристиками исправления ошибок и широко применяются в различных системах связи. Ключевое ограничение, которое приводит к низкой скорости декодирования, связано с тем фактом, что успешное декодирование при очень низком отношении сигнал/шум требует большого числа итераций. Поэтому здесь для ускорения сходимости декодирования используется алгоритм многоуровневого распространения доверия (BP). Однако пропускная способность декодирования во время постобработки является одним из основных препятствий, возникающих в системе квантового распределения ключей с непрерывной переменной. Исходя из этой проблемы, предлагается провести оптимизацию методов хранения, которые непосредственно имеют связь с матрицей проверки четности. Оптимизация заключается в объединении подматриц, не имеющих связей между собой, и проведение параллельного декодирования некоторого количества кодовых слов с применением GPU. Для верификации методики было проведено моделирование. В ходе моделирования получены данные, демонстрирующие, что усредненная скорость процедуры декодирования LDPC-кода с тремя типичными кодовыми скоростями, т.е. 0,15, 0,06 и 0,03, достигает 57,12 Мбит/с, 48,25 Мбит/с и 35,51 Мбит/с, соответственно, при одновременном декодировании 128 кодовых слов длиной  $10^6$  без преждевременного завершения

**Ключевые слова:** LDPC-декодирование, метод квантового распределения ключей, алгоритм распространения доверия, матрица проверки четности

### Введение

Современные компьютерные системы уделяют большое внимание обеспечению безопасности при использовании и передаче данных между пользовательскими устройствами по информационно-вычислительным сетям. Актуальные на сегодняшний день методики обеспечения конфиденциальности приема-передачи данных в компьютерных системах с участием пользователей и/или серверных систем включают в свой состав использование методов кодирования информации [1]. Но у таких методов существует одна значительная проблема. Они используют общие ключи, которые создаются посредством определенных алгоритмов. Эти алгоритмы базируются на предположениях о сложности вычислений и в настоящее время не могут гарантировать безопасность данных. Проблема становится значительнее после появления и распространения крупномасштабных универсальных квантовых компьютеров.

Рассмотрим метод квантового распределения ключей (КРК). Описываемый метод использует квантовые явления для создания без-

опасного канала приема-передачи информации в компьютерных сетях [2]. С помощью этого метода можно осуществить двум вычислительным объектам, соединенным по открытому каналу приема-передачи, создание общего случайного ключа. Созданный ключ будет известен только вычислительным устройствам, входящим в этот канал связи. Он будет использоваться для осуществления процедур кодирования и декодирования информационных сообщений.

Сейчас есть две категории распределения квантовых ключей. Первая категория подразумевает под собой дискретное переменное квантовое распределение ключей (ДПКРК). В этой категории основные информационные сообщения кодируются в дискретном гильбертовом пространстве. Вторая категория это непрерывное переменное квантовое распределение ключей, где основные информационные сообщения кодируются в непрерывном гильбертовом пространстве, например, квадратуры когерентных состояний.

Как правило, два участника системы распределения квантовых ключей с непрерывной переменной частотой требуют провести установку конфиденциальных ключей между вычислительными устройствами на большой ди-

станции. При этом всегда существует требование реализовать низкий показатель отношения сигнал/шум. При таких требованиях в абсолютном большинстве случаев, как правило, существует проблема синтеза кодов с высокой способностью к исправлению ошибок. Для реализации высокого показателя эффективности согласования ключей можно использовать только быстродействующие коды с очень большой длиной блоков.

### Реализация алгоритма многоуровневого декодирования

Эффективность системы распределения квантовых ключей зависит от параметров, влияющих на режим ее работы. В общем, для выбора скорости протокола распределения квантовых ключей необходимо указать некоторые переменные, которые включают в себя переменные скорости счета ( $D_0$ ), которая является скоростью обнаружения квантовых значений; эффективность передачи квантовых значений ( $p_d$ ); дальность передачи ( $T_D$ ); частота ошибок ( $me_d$ ) для определения общей ошибки связи и номер импульса ( $p_n$ ). Чтобы настроить моделирование распределения квантовых ключей в реальном времени для получения более точных выходных данных, необходимо установить используемые параметры в диапазонах, определенных следующим образом:  $D_0 = 10^{-10} \dots 10^{-5}$ ,  $me_d = 0.00 \dots 0.06$ ,  $p_d = 0.1 \dots 0.9$ ,  $p_n = 10^6 \dots 10^{16}$ ,  $T_D = 1 \dots 100$  км. Данные значения используются при моделировании системы в Matlab.

Сообщения могут обновляться на переменных и проверочных узлах и могут выполняться параллельно, алгоритм многоуровневого декодирования распространения доверия (belief propagation) реализуется на графическом процессоре [3].

Для обеспечения непрерывной работы системы распределения квантовых ключей с непрерывной переменной частотой в режиме реального времени требуется высокоскоростная коррекция ошибок. Скорость исправления ошибок в кодах с низкой плотностью проверки четности с несколькими ребрами зависит от алгоритма декодирования, длины кода, количества итераций, метода реализации и других факторов. Для системы с квантовым ключом с непрерывной переменной частотой исправление ошибок довольно сложно из-за низкого уровня SNR.

Реализация декодера оптимизирована таким образом, что сообщение сохраняется в глобальной памяти для объединенного доступа. Для доступа к памяти в режиме искажения объединенный доступ означает, что адрес данных потока всегда совпадает с индексом потока, а не с неупорядоченным доступом. Поскольку ядро графического процессора выполняется системой преобразования, состоящей из 32 потоков, задержка декодирования может быть хорошо скрыта для кода, длина которого кратна 32. Многоуровневый ВР-декодер имеет объединенный доступ к глобальной памяти и сохраняет матрицу проверки четности в одном файле для индексации соответствующих сообщений. Такой файл, обозначаемый «N\_compact1», будет применяться при вычислении сообщений, относящихся к контрольным узлам. Каждый элемент в файле «N\_compact1» содержит три параметра информации: величину сдвига, положение элемента после перестановки строк в базовой матрице и положение столбца, в котором находится неотрицательный элемент в базовой матрице. На рис. 1 показана базовая матрица размером 4 на 8 с коэффициентом расширения 100.

Каждый неотрицательный элемент базовой матрицы  $N$  на рис. 1,а указывает величину сдвига, а «-1» представляет матрицу, полностью равную нулю. На рис. 1,б показана структура, которая показывает положение компонента после перестановки строк. Для индексации необходимых сообщений используется подматрица, показанная на рис. 1,в. Соответственно, одномерная матрица справа на рис. 1,в представляет степени базовой матрицы (т.е. каждый элемент одномерной матрицы).

В разрабатываемом декодере для завершения итеративного процесса требуется только одно ядро. В этом единственном ядре один поток отображает определенную информацию в одном кодовом слове, и затем последовательно сохраняется информация того же типа из всех кодовых слов. Информацию можно разделить на три типа, которые включают в себя: логарифмические отношения правдоподобия (LLR) переменных узлов, сообщение от контрольных узлов переменным узлам и сообщение от переменных узлов контрольным узлам. Выполняем хранение информации одного и того же типа из разных кодовых слов последовательно, например,  $L_{v0}^0, L_{v0}^1, \dots, L_{v0}^K$ ;  $L_{v1}^0, L_{v1}^1, \dots, L_{v1}^K$ , где  $L_{vi}^{kk}$  представляет LLR  $L_{q_n}^{(t,l)}$   $k$ -го кодового слова, обозначаемого  $CW_k$ .

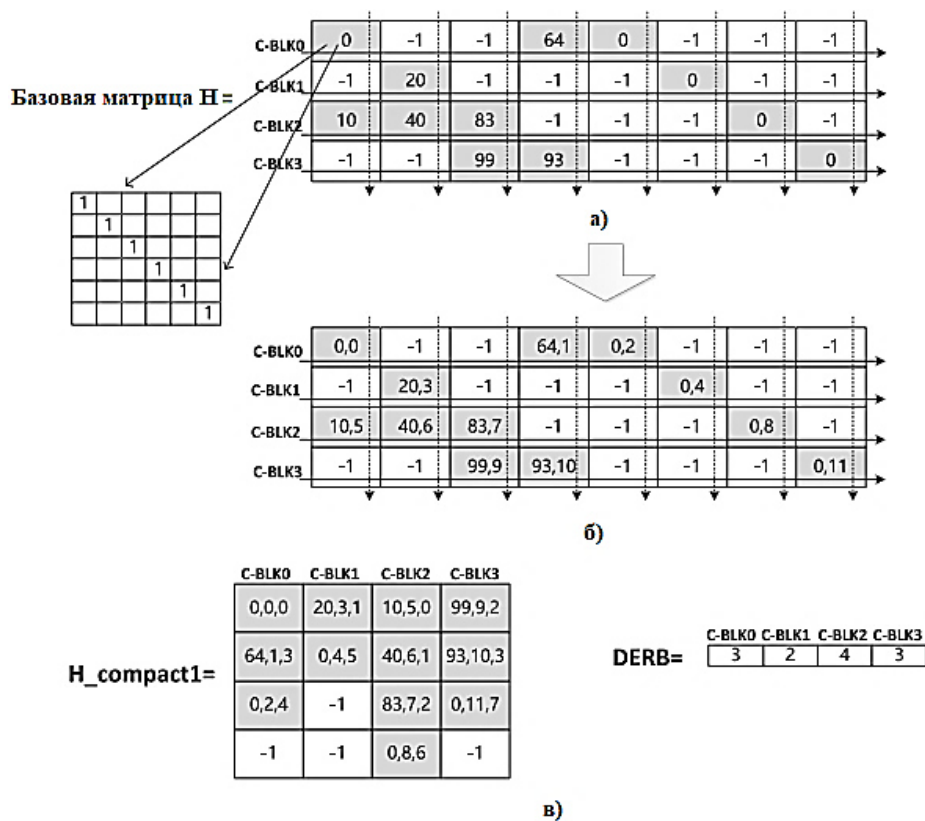


Рис. 1. Базовая матрица размером  $4 \times 8$  и соответствующий ей формат файла

Многоуровневый ВР-декодер на базе ГП обновляет сообщения переменных узлов и контрольных узлов одновременно, позволяя параллельно декодировать несколько кодовых слов [4]. Для каждого отдельного кодового слова требуемое количество потоков ГП совпадает с количеством контрольных узлов в подматрице. Эта процедура показана на рис. 2 на примере LDPC кода с 4 контрольными узлами и 6 переменными узлами.

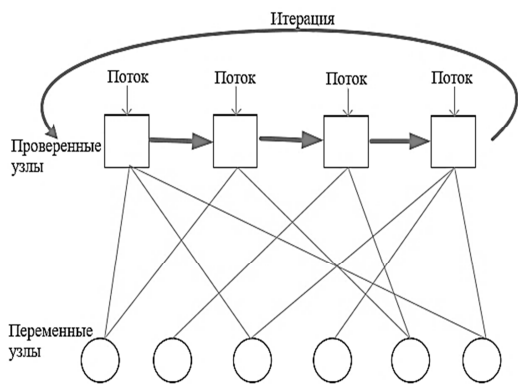


Рис. 2. Схема параллельного декодирования узлов в многоуровневом ВР-декодере

На каждой итерации один поток соответствует контрольному узлу. Если коэффициент

расширения  $Z$  равен 100,  $1 \times 100$  потоков, соответствующих контрольным узлам подматрицы, отправляют сообщения соседним переменным узлам, а также вычисляют сообщения от переменных узлов. Затем потоки размером  $1 \times 100$  повторно используются для обновления сообщений во второй группе контрольных узлов и соседних с ними переменных узлах. Количество повторно используемых потоков равно количеству строк базовой матрицы. Тем не менее, многоуровневый ВР-декодер потребляет меньше потоков, а количество потоков, назначенных каждой подматрице, составляет всего  $1 \times 64 \times Z$ , при одновременном декодировании 64 кодовых слов [5]. Чем больше значения  $Z$  и количество кодовых слов, тем выше коэффициент использования потока.

Исходный многоуровневый декодер разбивает матрицу  $H$  на множество подматриц с использованием слоев, что эквивалентно обработке каждого слоя как подкода. В каждой подматрице используются потоки  $1 \times Z$ , и последовательные вычисления проводятся среди подматриц. Чтобы увеличить использование потоков многоуровневого декодера, объединяем несвязанные подматрицы в новую подматрицу. Например, базовая матрица  $3 \times 3$ , показанная в уравнении (1) с коэффициентом раз-



ложения  $Z$  можно разделить на три подматрицы и степень любого переменного узла в каждой подматрице равна единице или нулю. Здесь неотрицательное целое число  $\alpha$  в уравнении (1), соответствует матрице, полученной путем циклического сдвига единичной матрицы  $Z \times Z$  вправо на биты,  $\alpha^{-1}$  указывает на нулевую матрицу  $Z \times Z$ .

$$H = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ 2 & 1 & 1 \\ 0 & 2 & 0 \end{bmatrix}. \quad (1)$$

Рассмотрим те случаи, когда базовая матрица имеет форму, представленную в формуле (2). Здесь можно произвести объединение ее первых двух строк в один слой. Эти строки создают некоторую подматрицу, в которой степень какого-либо переменного узла будет равна либо единице, либо нулю. Строка под номером три будет образовывать отдельную подматрицу. Две подматрицы обрабатываются последовательно с использованием потоков  $2 \times Z$  и  $1 \times Z$  соответственно.

$$H = \begin{bmatrix} 1 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & 1 \\ 2 & 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (2)$$

Учитывая базовую матрицу формы, показанной в формуле (2), объединим в одну подматрицу первую и третью строки, а вторая строка создаст другую подматрицу, как показано в уравнении (3)

$$H = \begin{bmatrix} 1 & -1 & -1 \\ 2 & 0 & 0 \\ -1 & 2 & 1 \end{bmatrix}. \quad (3)$$

Коэффициент использования потока  $\eta$  вычисляется по формуле

$$\eta = \frac{T_1 \cdot T_2 \cdot Z}{T_3}, \quad (4)$$

где  $T_1$  - определяет число слоев в каждой подматрице,  $T_2$  - определяет число кодовых слов, а  $T_3$  - общее количество потоков.

### Производительность предлагаемого декодера на базе графического процессора

Производительность многоуровневых декодеров ВР на базе графического процессора исследуется для кодов QC-LDPC со скоростями 0,15, 0,06 и 0,03. На рис. 3 показана скорость исправления ошибок при одновременном декодировании различного количества кодовых слов.

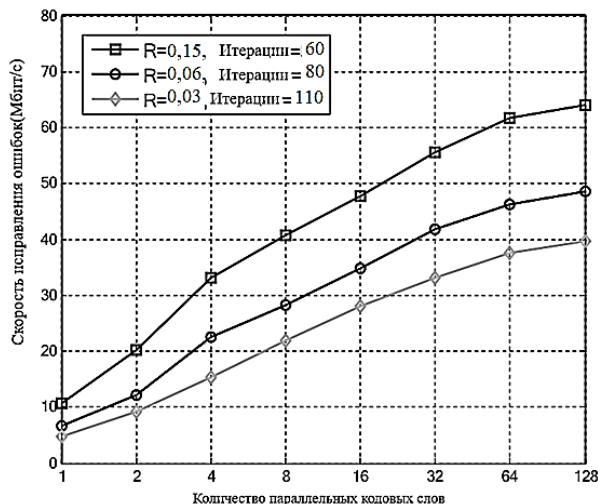


Рис. 3. Сравнение скорости исправления ошибок для различного числа кодовых слов в многоуровневом декодере

Скорость постоянно растет от 1 до 128 кодовых слов и не сходится, даже если количество кодовых слов достигает 128. Представленный многоуровневый ВР- декодер одновременно декодирует 128 кодовых слов, а коэффициент использования его потока вычисляется по формуле  $1 \times 128 \times 2500 \div 67108864 = 0,00477$ . В этой формуле каждая подматрица включает в себя один слой базовой матрицы из максимального количества.

В табл. 1 проводится сравнение параметров многоуровневого декодера ВР с несколькими типами подматриц.

Первый тип подматрицы состоит из одного слоя. Второй тип подматрицы из нескольких слоев. В случае одновременной процедуры декодирования 128 кодовых слов размерностью  $10^6$  многоуровневый декодер ВР с подматрицами, сформированными из нескольких слоев, работает лучше, чем его аналог, с точки зрения пропускной способности декодирования. Улучшение составляет 3,2 Мбит/с, 1,9 Мбит/с и 1,6 Мбит/с соответственно, если рассматривать три скорости кода: 0,15, 0,06 и 0,03. Исходя из этого, представляется, что объединение некоррелированных подматриц можно дополнительно улучшить, что затем ускорит декодирование.

Здесь используются QC-LDPC коды трехуровневого типа. Распределение степеней LDPC кода задается парой многомерных полиномов  $v(r,x)$  и  $\mu(x)$ , где  $v(r,x)$  связано с переменными узлами, а  $\mu(x)$  связано с проверочными узлами.



Таблица 1

Производительности многоуровневого декодера с различными формами подматриц

Скорость кода	0.15	0.15	0.06	0.06	0.03	0.03
Сигнал/шум	0.161	0.161	0.076	0.076	0.03	0.03
Количество итераций	60	60	80	80	110	110
Форма подматрицы	одиночная	множественная	одиночная	множественная	одиночная	множественная
Задержка на итерацию (мс)	42.029	39.931	36.530	35.081	33.720	32.397
Скорость исправления ошибок (Мбит/с)	60.91	64.11	46.72	48.65	37.96	39.51

Пара многомерных полиномов  $(v(r,x), \mu(x))$  определяется по формулам:

$$v(r, x) = \sum v_{b,d} r^b x^d, \quad (5)$$

$$\mu(x) = \sum \mu_d x^d, \quad (6)$$

где  $b$  обозначает разные типы протоколов передачи, если  $b=0$ , то биты передаются, если  $b=1$ , то происходит остановка передачи данных,  $d$  обозначает степени различных типов ребер,  $r$  обозначает переменные, соответствующие различным типам каналов, а  $x$  обозначает переменные, связанные с типами ребер. Кроме того,  $v_{b,d}$  и  $\mu_d$

обозначают вероятности переменных узлов типа  $b$  и проверочных узлов типа  $d$ , а скорость кода вычисляется по формуле:

$$R = \sum v_{b,d} - \sum \mu_d \quad (7)$$

Построение кодов QC-LDPC, используемых в моделировании, выполняется с использованием следующих этапов.

Шаг 1: Генерация распределения степеней LDPC кода для заданной скорости кода. Три функции распределения степеней, соответствующие трем показателям 0,15, 0,06 и 0,03 соответственно, приведены ниже:

$$R = 0.15 : v(r, x) = 0.0775r_1x_1^2x_2^{20} + 0.0475r_1x_1^3x_2^{22} + 0.875r_1x_3,$$

$$\mu(x) = 0.0025x_1^{11} + 0.0025x_1^{12} + 0.03x_2^2x_3 + 0.845x_3^2x_3$$

$$R = 0.06 : v(r, x) = 0.04r_1x_1^2x_2^{34} + 0.03r_1x_1^3x_2^{34} + 0.93r_1x_3,$$

$$\mu(x) = 0.01x_1^8 + 0.01x_1^9 + 0.41x_2^2x_3 + 0.52x_3^2x_3$$

$$R = 0.03 : v(r, x) = 0.0225r_1x_1^2x_2^{57} + 0.0175r_1x_1^3x_2^{57} + 0.96r_1x_3,$$

$$\mu(x) = 0.010625x_1^3 + 0.009375x_1^7 + 0.6x_2^2x_3 + 0.36x_3^2x_3$$

Шаг 2. В соответствии с распределением степеней строятся базовые матрицы, с использованием алгоритма прогрессивного-роста-ребер (ПРР).

Шаг 3. Расширение базовой матрицы с помощью циркулянтных матриц перестановок, где элементы «0» заменяются нулевыми матрицами  $q \times q$ , а элементы «1» заменяются единичными матрицами с циклическим сдвигом  $q \times q$  со случайно сгенерированными циклическими сдвигами.

### Заключение

В данной работе представлена реализации многоуровневого низкоплотностного декодера на базе графического процессора (ГП) с оптимизацией хранения матричного сообщения. Оптимизация достигается с помощью объеди-

нения битов в единое значение и объединения двух процессов в одно ядро для завершения целой итерации. Вследствие проводимых манипуляций масштабы вычислительных операций значительно сокращаются. Скорость многоуровневого декодера достигает 57,12 Мбит/с для кода длиной  $10^6$  со скоростью 0,15 при условии отношения сигнал/шум  $SNR=0,155$  и 60 итераций без досрочного завершения итерации. Результаты моделирования показывают, что средняя скорость декодирования квазициклических кодов низкой плотности проверки на четность с тремя типичными кодовыми скоростями, т.е. 0,15, 0,06 и 0,03, достигает 57,12 Мбит/с, 48,25 Мбит/с и 35,51 Мбит/с при декодировании 128 кодовых слов длиной  $10^6$  одновременно без досрочного прекращения итерации.

**Литература**

1. Bennett C. H., Brassard G. Quantum cryptography: public key distribution and coin tossing. *Theoret. Comput. Sci.*, 2014. PP. 7–14.
2. Wang T. et al. High key rate continuous-variable quantum key distribution with a real local oscillator. *Opt. Express*, 2018. PP. 2794–2806.
3. 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.
4. 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.
  5. Hu X. Y., Eleftheriou E., Arnold D. M. Regular and irregular progressive edge-growth tanner graphs. *IEEE Trans. Inf. Theory*, 2005. PP. 386–398.

Поступила 15.04.2024; принята к публикации 26.08.2024

**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: orcid.org/0000-0001-9167-9538  
**Каграманов Эдуард Эдуардович** – аспирант, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия октября, 84), e-mail: kagramanov98@yandex.ru  
**Карташов Виктор Сергеевич** – студент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия октября, 84), e-mail: kartasovvictor501@gmail.com  
**Иванова Софья Сергеевна** – студент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия октября, 84), e-mail: sofaivanova726@gmail.com

**OPTIMIZATION OF MATRIX STORAGE USING A MULTI-LEVEL DECODER**

**M.V. Khoroshailova, E.E. Kagramanov, V.S. Kartashov, S.S. Ivanova**

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

**Abstract:** A multilevel decoder is proposed for decoding quasi-cyclic low-density multi-edge codes (QC-LDPC) using a graphics processor (GPU) in continuous variable quantum key distribution systems (NPCRCS). Low-density parity codes have excellent error correction characteristics and are widely used in various communication systems. The key limitation that leads to a low decoding rate is due to the fact that successful decoding at a very low signal-to-noise ratio requires a large number of iterations. Therefore, the multilevel Trust Propagation (BP) algorithm is used here to accelerate decoding convergence. However, the decoding bandwidth during postprocessing is one of the main obstacles encountered in a continuous variable quantum key distribution system. Based on this problem, it is proposed to optimize storage methods that are directly related to the parity check matrix. Optimization consists in combining submatrices that have no connections with each other and conducting parallel decoding of a certain number of code words using the GPU. A simulation was carried out to verify the methodology. During the simulation, data were obtained demonstrating that the average speed of the LDPC decoding procedure with three typical code speeds, i.e. 0.15, 0.06 and 0.03, reaches 57.12 Mbit/s, 48.25 Mbit/s and 35.51 Mbit/s, respectively, with simultaneous decoding of 128 code words with a length of 106 without premature completion

**Key words:** LDPC decoding, quantum key distribution method, trust propagation algorithm, parity check matrix

**References**

1. Bennett C.H., Brassard G. “Quantum cryptography: public key distribution and coin tossing”, *Theoret. Comput. Sci.*, 2014, pp 7–14.
2. Wang T. et al. “High key rate continuous-variable quantum key distribution with a real local oscillator”, *Opt. Express*, 2018. pp. 2794–2806.
3. Bashkirov A.V., Khoroshailova M.V., Churakov P.P., Turetskaya E.V. “Development of a QC-LDPC decoder with high bandwidth for 5G wireless radio communication”, *Radio Engineering (Radiotekhnika)*, 2022, vol. 86, no. 7, pp. 14-19.
4. Horoshaylova M.V. “Architecture of FPGA based channel coding for 5G wireless network using high-level synthesis”, *The Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2018, vol. 14, no. 2, pp. 99-105.
5. Hu, X.Y., Eleftheriou E., Arnold D.M. “Regular and irregular progressive edge-growth tanner graphs”, *IEEE Trans. Inf. Theory*, 2005, pp. 386–398

Submitted 15.04.2024; revised 26.08.2024

**Information about authors**

**Marina V. Horoshaylova** – Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: pmv2205@mail.ru, orcid.org/0000-0001-9167-9538  
**Eduard E. Kagramanov** – Postgraduate Student, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: kagramanov98@yandex.ru  
**Viktor S. Kartashov** – Student, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: kartasovvictor501@gmail.com  
**Sofya S. Ivanova** – Student, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: sofaivanova726@gmail.com

## МЕТОДИКА РАЗРАБОТКИ И ИССЛЕДОВАНИЕ МИКРОПОЛОСКОВЫХ ФИЛЬТРОВ ДЛЯ МОДУЛЯ ПРИЕМНОГО УСТРОЙСТВА

И.С. Бобылкин, В.Р. Тимошилова, А.М. Безрукавый, Е.М. Ивашкина

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

**Аннотация:** рассматривается создание микрополоскового фильтра для приёмного устройства. Разработка основана на технологии микрополосковой линии, применяемой в качестве линии передачи для электромагнитных волн в диэлектрической среде. Были созданы две схемы с различным количеством микрополосковых элементов для определения наиболее подходящего материала по электрическим характеристикам. После создания и производства печатной платы на неё установили конденсаторы и фильтры. В результате были изготовлены микрополосковые фильтры для первой и второй ступеней фильтрации. Выбранный диэлектрик — г4003с и г3003с. Для фильтра первой ступени использовалась межпальцевая геометрия, для второй — параллельная геометрия. Каждый фильтр был рассчитан и смоделирован в программе AWR Microwave Office. Практическая реализация включала формирование герберов и чертежей на печатную плату, изготовление платы на стороннем предприятии и заполнение бланка заказа с указанием основных требований на производство платы. В ходе практической реализации были проведены измерения размеров проводников и расстояний между ними с использованием микроскопа, а также измерены частоты настройки фильтров

**Ключевые слова:** микрополосковые фильтры, СВЧ, микрополосковые линии

### Введение

Микрополосковые фильтры являются важным элементом современных радиотехнических систем, включая технику сверхвысокой частоты. Они обладают высокой надёжностью, хорошей воспроизводимостью параметров и низкой стоимостью при массовом производстве. Однако проектирование и производство микрополосковых фильтров до сих пор остаётся сложной задачей, требующей высокой квалификации специалистов.

Фильтры СВЧ — это пассивные компоненты, которые используются в высокочастотных системах связи и радиолокации. Они предназначены для удаления побочных и соседних сигналов, а также для подавления помех. Фильтры СВЧ делятся на типы по параметру «полоса пропускания», а также делятся по амплитудно-частотной характеристике полосы пропускания на фильтры Баттерворта и фильтры Чебышёва. Реализация СВЧ-фильтров основана на использовании различных технологий и компонентов. [4]

### Реализация с помощью ПО

Для модуля приёмника нужно было создать фильтр в виде печатной платы. Его разра-

ботка и проектирование основаны на технологии микрополосковой линии, применяемой в качестве линии передачи для электромагнитных волн в диэлектрической среде.

Разработчиками были созданы две схемы с разным количеством микрополосковых элементов, для определения наиболее подходящего материала по электрическим характеристикам. После создания и производства печатной платы на неё установили конденсаторы и фильтры. Разработанная схема представлена на рис. 1.

В данном случае были изготовлены микрополосковые фильтры как для фильтров первой, так и для фильтров второй ступени. Выбранный диэлектрик г4003с и г3003с. Для фильтра первой ступени была использована межпальцевая геометрия, для второй — параллельная геометрия.

Каждый фильтр был рассчитан и смоделирован в программе AWR Microwave Office.

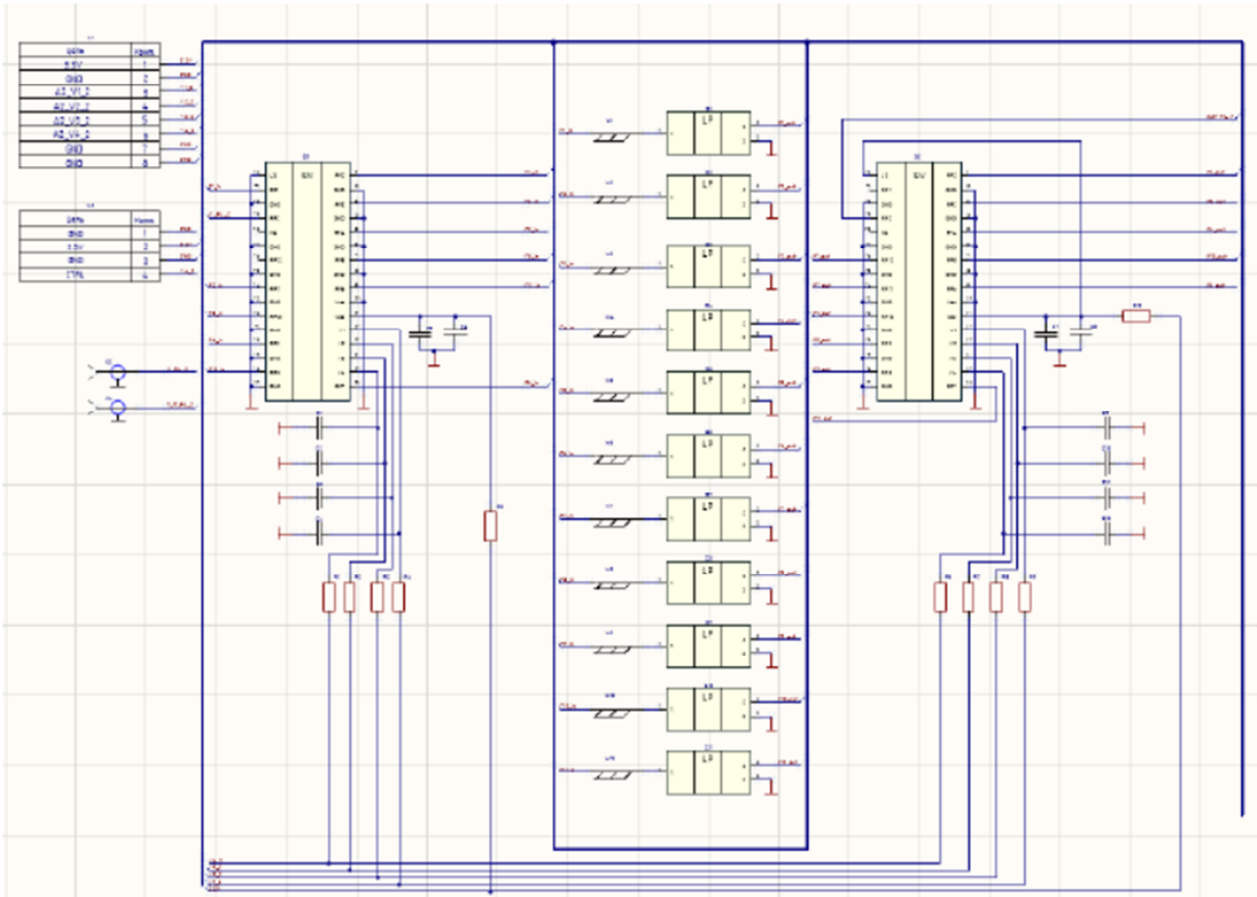


Рис. 1. Схема устройства для фильтрации приемного устройства

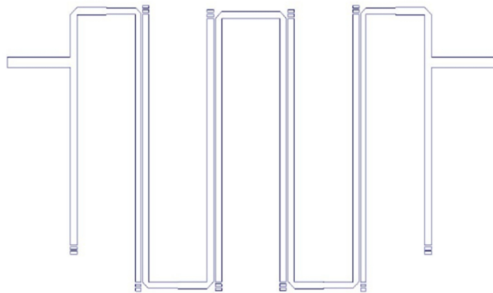
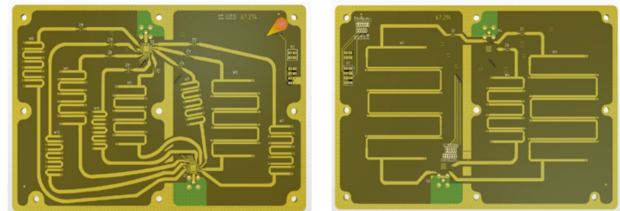


Рис. 2. Контур микрополоскового рисунка в формате dwg

Далее контур фильтра (рис.2) преобразовывается в печатный рисунок на печатной плате с помощью программы Altium Designer, результат на рис. 3.

Следующим шагом идет формирование герберов и чертёжа на печатную плату для её изготовления на стороннем предприятии, а также заполнение бланка заказа с указанием основных требований на производство платы. [5]



а)

б)

Рис. 3. Спроектированная печатная плата в Altium Designer: печатная плата со стороны top (а) и печатная плата со стороны bottom (б)

### Практическая реализация

В нашем случае толщина фольги на внешних слоях составляет 35 мкм, а на внутренних 18 мкм. Итоговая толщина платы 2 мм.

Печатная плата состоит из шести слоёв. Применяются два типа двусторонних диэлектриков разной толщины. Так как разрабатываемое устройство функционирует на высоких частотах, подходящим финишным покрытием считается иммерсионное золото. Оно характеризуется хорошей паяемостью, высокой плоскостностью поверхности, но дорого стоит. Что-

бы уменьшить помехи, нужно металлизировать торцы платы. [1,3]

Каждый из микрополосковых фильтров на печатной плате настроен на определённую частоту. Для проверки качества их изготовления были проведены измерения размеров проводников и расстояний между ними с использованием микроскопа (рис.4).

Результаты измерений всех фильтров на первой печатной плате с девятью микрополосковыми элементами представлены в табл. 1, а с одиннадцатью в табл. 2.

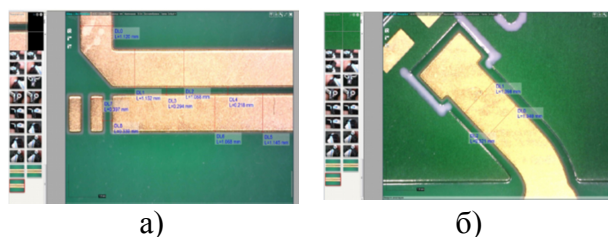


Рис. 4. Измерение ширины проводника и зазора у микрополоскового фильтра: с девятью полосками (а) и с одиннадцатью полосками (б)

Таблица 1

Величины зазора и ширины проводников фильтра №1

Част. фильтра, Гц	Зазор №1	Зазор №2	Ср.вел. зазора	Шир. про-водн. №1	Шир. про-водн. №2	Шир. про-водн. №3	Ср. вел. про-водника
800 - 1000	0,237	0,166	0,202	0,864	0,857	0,921	0,861
1000-1300	0,147	0,218	0,183	0,601	0,595	0,627	0,598
1300-1600	0,23	0,154	0,192	0,806	0,774	-	0,790
1600-2000	0,147	0,198	0,173	0,627	0,582	0,646	0,605
2000-2400	0,173	0,275	0,224	1,03	0,96	0,934	0,995
2400-3000	0,218	0,166	0,192	0,736	0,742	0,691	0,739

Таблица 2

Величины зазора и ширины проводников фильтра №2

Част. фильтра, Гц	Зазор №1	Зазор №2	Ср.вел. зазора	Шир. про-водн. №1	Шир. про-водн. №2	Шир. про-водн. №3	Ср. вел. про-водника
800-1000	0,307	0,301	0,304	0,985	0,966	-	0,976
1000-1300	0,352	0,339	0,346	0,742	0,749	0,832	0,746
1300-1600	0,256	0,256	0,256	0,947	0,953	0,979	0,950
1600-2000	0,326	0,313	0,320	0,819	0,825	-	0,822
2000-2400	0,2	0,3	0,250	0,75	0,696	-	0,723
2400-3000	0,218	0,198	0,208	0,691	0,665	-	0,678

Печатные платы имеют пятый класс точности, потому что расстояние между проводниками составляет менее 0,15 миллиметра. Небольшие расхождения в полученных данных могут быть вызваны человеческим фактором при измерении с помощью микроскопа. [2]

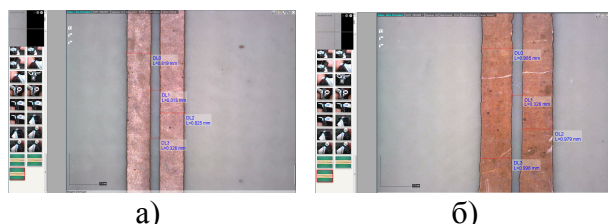


Рис. 5. Измерение ширины проводника и зазора у микрополоскового фильтра: изготовленного субтрактивным методом (а) и ручным методом (б)



Имеются также результаты измерений (рис.5) по печатным платам, изготовленным не на заводе, а собственноручно разработчи-

ками на предприятии, где и конструировались данные фильтры для приемного устройства, представлены в табл. 3 и 4.

Таблица 3

Величины зазора и ширины проводников фильтра №3

Част. филь-тра, Гц	Зазор №1	Зазор №2	Ср. вел. зазора	Шир. про-водн. №1	Шир. про-водн. №2	Шир. про-водн. №3	Ср. вел. про-водника
800-1000	0,237	0,166	0,202	0,864	0,857	0,921	0,861
1000-1300	0,147	0,218	0,183	0,601	0,595	0,627	0,598
1300-1600	0,23	0,154	0,192	0,806	0,774	-	0,790
1600-2000	0,147	0,198	0,173	0,627	0,582	0,646	0,605
2000-2400	0,173	0,275	0,224	1,03	0,96	0,934	0,995
2400-3000	0,218	0,166	0,192	0,736	0,742	0,691	0,739

Таблица 4

Величины зазора и ширины проводников фильтра №1, изготовленного ручным методом

Част. филь-тра, Гц	Зазор №1	Зазор №2	Ср. вел. зазора	Шир. про-водн. №1	Шир. про-водн. №2	Шир. про-водн. №3	Ср. вел. про-водника
800-1000	0,192	0,16	0,176	0,998	0,979	1,056	1,005
1000-1300	0,192	0,109	0,151	0,742	0,793	0,8	0,769
1300-1600	0,186	0,211	0,199	0,953	0,934	0,915	0,945
1600-2000	0,102	0,154	0,128	0,8	0,761	0,755	0,777
2000-2400	0,218	0,294	0,256	1,12	1,152	1,068	1,121
2400-3000	0,121	0,218	0,170	0,851	0,851	0,883	0,877

В результаты всех проведенных экспериментов, был выбран наиболее подходящий ма-

териал R4003С. На рис. 6 представлен итог сравнения макетной и расчетной АЧХ.

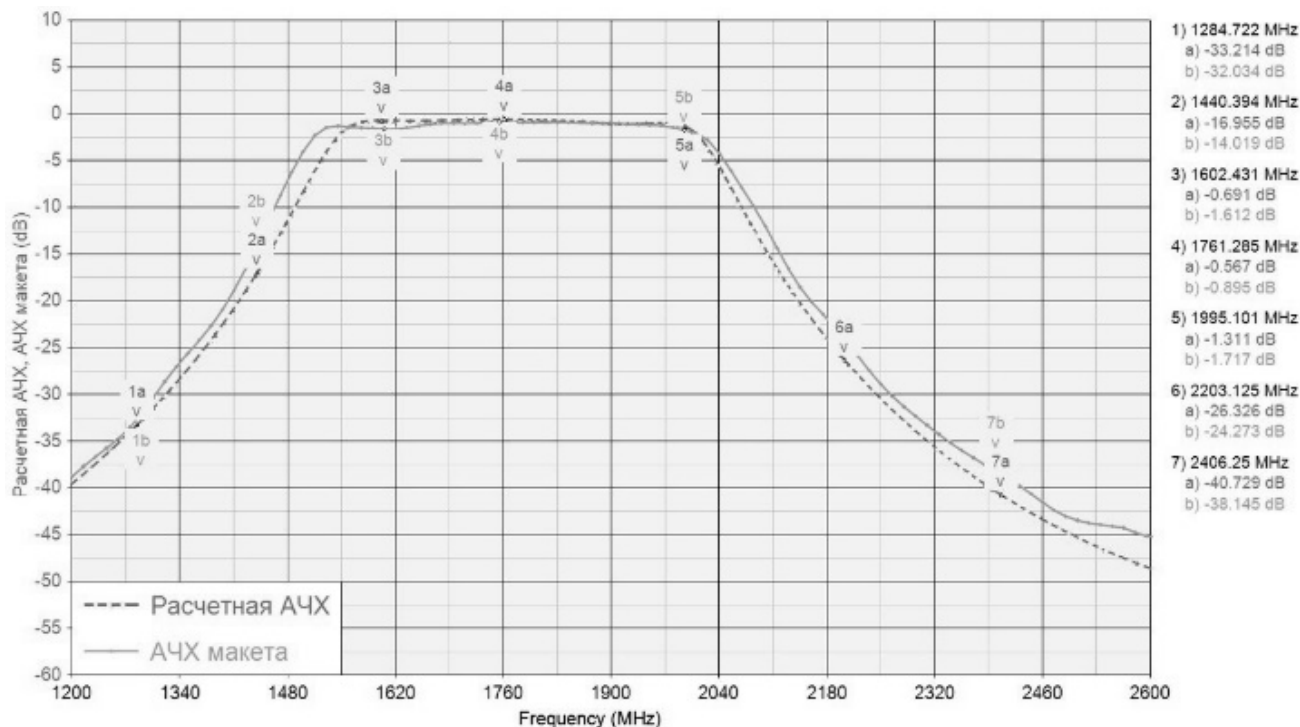


Рис. 6. Сравнение расчетной и опытной величины, полученной в результате эксперимента

### Заключение

Была разработана технология производства микрополосковых фильтров для приёмного устройства, после чего началось производство печатной платы с изображением межпальцевого фильтра. Затем произвели монтаж электронных компонентов в соответствии с принципиальной электрической схемой. Были измерены такие параметры, как расстояние между «пальцами» фильтра и их ширина, чтобы оценить качество изготовления и сравнить его с результатами моделирования.

### Литература

1. Маттей Г.Л., Янг Л., Джонс Е.М.Т. Фильтры СВЧ, согласующие цепи и цепи связи. Под общей редакцией Л.В. Алексеева и Ф.В. Кушнира. М.: Связь, 1971. 438 с.

2. Дирлав Дж., Паккиам П., Федоров А. Двойное повышающее преобразование для сверхпроводящего кубита. Управление реализовано с использованием микрополосковых фильтров. М.: Центр передового опыта в области инженерных квантовых систем, Квинслендский университет, Сент-Люсия Австралия, 2022. 9 с.

3. Конструирование и расчет полосковых устройств. Под ред. И.С. Ковалева. М.: Советское радио, 1974. 295 с.

4. Никитина М. И. Система проектирования микрополосковых полосно-пропускающих фильтров : специальность 05.12.21 : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. Красноярск, 1998. 21 с.

5. Разработка топологии компактных квазиэллиптических полосовых микрополосковых фильтров / Р. Е. Семерня, С. Л. Чернышев, А. Р. Виленский, Э. О. Можаров // Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника. 2018. № 6. С. 41-53.

Поступила 31.05.2024; принята к публикации 27.08.2024

### 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

**Тимошилова Виктория Романовна** – студент магистратуры, Воронежский государственный технический университет (34006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: timoshilova.vika@yandex.ru

**Безрукавый Артем Михайлович** – студент магистратуры, Воронежский государственный технический университет (34006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), тел. +79994035324, e-mail: artivirus07@mail.ru

**Ивашкина Екатерина Михайловна** – студент, Воронежский государственный технический университет (34006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: katya.ivashk-ina@yandex.ru

## METHODOLOGY FOR THE DEVELOPMENT AND RESEARCH OF MICROSTRIP FILTERS FOR THE RECEIVER MODULE

I.S. Bobylkin, V.R. Timoshilova, A.M. Bezrukavy, E.M. Ivashkina

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

**Abstract:** this article discusses the creation of a microstrip filter for a receiving device. The development is based on the technology of a microstrip line used as a transmission line for electromagnetic waves in a dielectric medium. Two circuits with different numbers of microstrip elements were created to determine the most suitable material based on electrical characteristics. After the creation and production of the printed circuit board, capacitors and filters were installed on it. As a result, microstrip filters for the first and second filtration stages were manufactured. The selected dielectric is r4003c and r3003c. The interdigital geometry was used for the first stage filter, and parallel geometry was used for the second stage. Each filter was calculated and modeled in the AWR Microwave Office program. The practical implementation included the formation of gerbers and drawings for the printed circuit board, the manufacture of the board at a third-party enterprise and filling out an order form indicating the basic requirements for the production of the board. In the course of practical implementation, measurements of the dimensions of the conductors and the distances between them were carried out using a microscope, as well as filter tuning frequencies were measured

**Key words:** microstrip filters, microwave, microstrip lines

### References

1. Mattei G.L., Yang L., Jones E.M.T. "Microwave filters, matching circuits and communication circuits" ("Fil'try SVCH, soglasuyushchiye tsepi i tsepi svyazi", trans. from Eng., ed. by L.V. Alekseev, F.V. Kushnir, Moscow Svyaz, 1971, 438 p.
2. Dirlov J., Pakkiam P., Fedorov A. "Double step-up conversion for a superconducting qubit. The control is implemented using microstrip filters" ("Dvoynoye povyshayushcheye preobrazovaniye dlya sverkhprovodyashchego kubita. Upravleniye realizovano s ispol'zovaniyem mikropoloskovykh fil'trov"), Moscow Center of Excellence in the field of engineering quantum systems, University of Queensland, Saint Lucia Australia, 2022, 9 p.
3. "Design and calculation of strip devices" ("Konstruirovaniye i raschet poloskovykh ustroystv"), ed. by I.S. Kovalev, M.: Sovetskoe ra-dio, 1974. – 295 p.
4. "Handbook on the elements of strip technology (directional couplers of class 1-3)" ("Spravochnik po elementam poloskovoy tekhniki (napravlennyye otvetviteli 1-3 klassa)"), ed. by A.L. Feldstein, Moscow, Svyaz, 1979, 336 p.
5. "Strip boards and assemblies. Design and manufacture" ("Poloskovyye platy i uzly. Proyektirovaniye i izgotovleniye"), ed. by E.P. Kotov, V.D. Kaplun, Moscow, Sovetskoe radio, 1979, 243 p.
6. "Microstrip bandpass filter and a device including a microstrip bandpass filter" ("Mikropoloskovyy polosno-propuskayushchiy fil'tr i ustroystvo, vklyuchayushcheye mikropoloskovyy polosno-propuskayushchiy fil'tr"), Patent of RF no. 2743007 C1, IPC H01P 1/203, no. 2020116697, appl. 04.24.2020, publ. 02.12.2021, Safronov A.N., Kornilov I.S., applicant Limited Liability Company "Mig Trading", EDN GPURFI.
7. Nikitina M.I. "The design system of microstrip bandpass filters: speciality 05.12.21" ("Sistema proyektirovaniya mikropoloskovykh polosno-propuskayushchikh fil'trov: spetsial'nost' 05.12.21"), abstr. of the dissertation for the degree of Cand. Sc. (Technical), Krasnoyarsk, 1998, 21 p., EDN ZKGACV.
8. Semernya R.E., Chernyshev S.L., Vilensky A.R., Mozharov E.O. "Development of the topology of compact quasi-elliptical band-pass microstrip filters", *News of Higher Educational Institutions of Russia. Radioelectronics (Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy Rossii. Radioelektronika)*, 2018, no. 6, pp. 41-53, DOI 10.32603/1993-8985-2018-21-6-41-53, EDN YTUHFZ.

Submitted 31.05.2024; revised 27.08.2024

### Information about the authors

**Igor S. Bobylkin** – Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), tel.: +79038511113, e-mail: bobylkin@bk.ru, ORCID: 0000-0001-7489-2249

**Victoria R. Timoshilova** – Master's Student, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: timoshilova.vika@yandex.ru

**Artyom M. Bezrukavy** - Master's Student, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), tel.: +79994035324, e-mail: artivirus07@mail.ru

**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 10.36622/1729-6501.2024.20.3.027

УДК 621.924.9

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ИСКАЖЕНИЙ ФОРМ ГЕОМЕТРИИ МАЛОЖЕСТКИХ КРУПНОГАБАРИТНЫХ ДЕТАЛЕЙ С УЧЕТОМ ВЛИЯНИЯ НА НИХ СИЛЫ СОБСТВЕННОГО ВЕСА И УСЛОВИЙ ЗАКРЕПЛЕНИЯ**С.А. Антипин<sup>1</sup>, А.А. Пыхалов<sup>1,2</sup>, А.А. Пашков<sup>1</sup><sup>1</sup>Иркутский национальный исследовательский технический университет,  
г. Иркутск, Россия<sup>2</sup>Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Россия

**Аннотация:** вопрос разработки методики расчета напряженно-деформированного состояния (НДС) мало жестких крупногабаритных деталей авиационной техники на основе математической модели метода конечных элементов и решении физически и геометрически нелинейных задач механики деформируемого твердого тела является актуальной задачей технологии их формообразования. Исследование заключается в том, чтобы на основе полученных при расчете отклонений форм и размеров мало жестких крупногабаритных деталей произвести их учет в реальном технологическом процессе формообразования данного типа деталей. В качестве объекта исследования, с использованием которого производилась разработка методики, была выбрана мало жесткая панель двойной кривизны с поперечными ребрами. На основании построенной конечно-элементной (КЭ) модели был произведен численный эксперимент. В качестве действующего на панель внешнего нагружения использовались сила веса и условия закрепления. Математическая модель построена с использованием решения статической задачи. Исследование достоверности результатов численного расчета проведено с использованием изогнутой пластины постоянной толщины, для которой имеются данные натурного эксперимента. По результатам проведенного исследования НДС детали были сделаны выводы о том, что искажения форм и размеров необходимо учитывать в технологии изготовления панели, а их максимальная величина имеет место в области свободного конца детали. Полученные результаты расчета КЭ-модели предлагаемой панели, которые выводились в виде коэффициентов изменения формы, позволяют осуществить переход к реальному технологическому процессу дробеударного формообразования, что, в свою очередь, позволяет контролировать размеры получаемых деталей в пределах допуска

**Ключевые слова:** двойная кривизна, вальцевание, радиус кривизны, напряжено-деформированное состояние, метод конечных элементов, деформируемое твердое тело, статический анализ, гравитационная нагрузка, дробеударное формообразование (ДУФ)

**Введение**

Изготовление крупногабаритных мало жестких деталей летательных аппаратов (ЛА) с поверхностью двойной кривизны является сложным и трудоемким технологическим процессом. Наиболее актуальным фактором здесь является достижение заданной точности геометрии детали [1]. В качестве таких деталей выступают обшивки двойной кривизны (рис. 1, а), панели с поперечными (рис. 1, б) и продольными ребрами (рис. 1, в) как одинарной, так и двойной кривизны формообразующей поверхности.

В условиях реального производства наиболее универсальным методом формообразования представленных деталей является свободная гибка на прессах. Данная технология является самостоятельным процессом и используется для деталей одинарной кривизны, для правок заготовок, а также для подгибки мест усиления перед дробеударным формообразованием (ДУФ) панелей и обшивок двойной кривизны [2], [3].

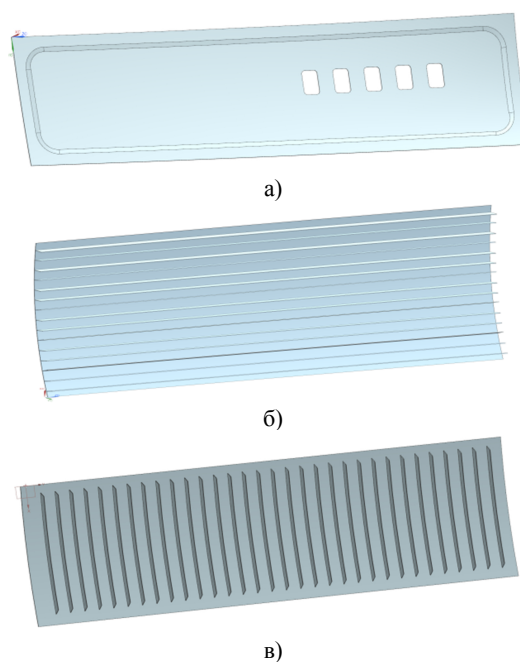


Рис. 1. Типы длинномерных панелей, использующихся в самолетостроении

К недостаткам процесса гибки относятся отсутствие стабильно получаемой геометрии, большая трудоемкость и потребность в высокой квалификации работника. Также после данного процесса возможно выявление таких дефектов формы как огранка [4].

Эффективным методом изготовления, позволяющим дополнить или в некоторых случаях полностью заменить операцию гибки, является дробеударное формообразование (ДУФ) [5].

Комбинация методов прессовой гибки в сочетании с обработкой обводообразующей поверхности дробью на специальных установках хорошо зарекомендовала себя при формообразовании панелей и обшивок авиационной тех-

ники по получению требуемой аэродинамической формы поверхности [6], [7].

Разработанная на основе трудов ИРНТУ технология комбинированного формообразования реализуется посредством поэтапного создания сначала поверхности одинарной кривизны, формируемой путем деформирования ребер раскаткой или посадкой роликами, а затем поверхности двойной кривизны, получаемой при обработке аэродинамической поверхности детали дробью [8]. Процесс раскатки или посадки возможно заменить операцией прессовой гибки [9]. На рис. 2 представлена схема получения детали с использованием комбинированного метода формообразования.

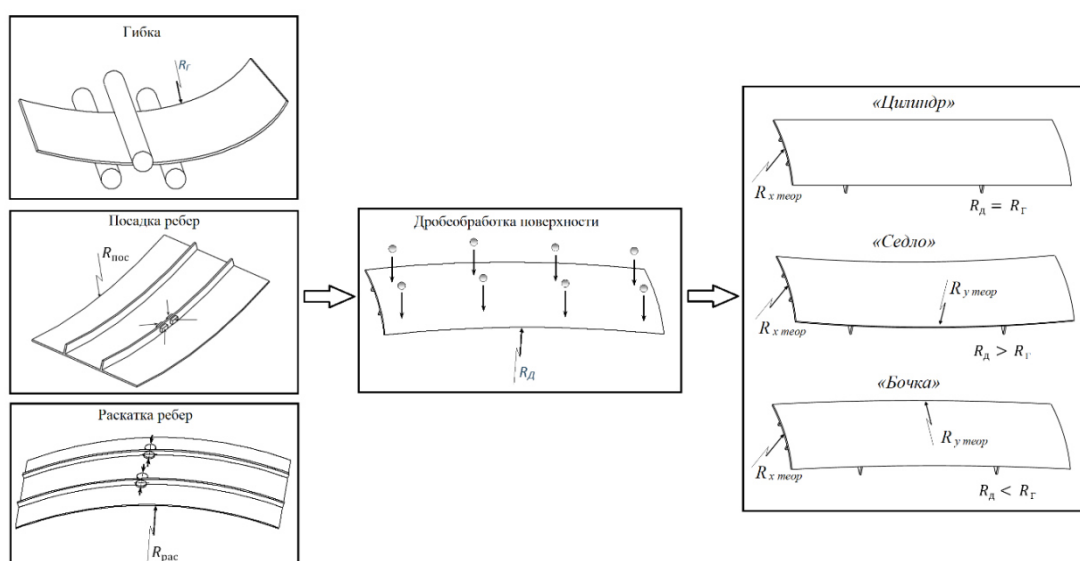


Рис. 2. Схема комбинированного формообразования панелей

Процесс ДУФ может быть реализован на установках контактного (рис. 3, а) или проходного (рис. 3, б) типа [10]. Особенностью установок, влияющей на реализацию процесса ДУФ, является схема закрепления детали. В первом случае деталь закрепляется в неподвижной системе фиксации с возможностью позиционирования сечений детали, во втором – деталь фиксируется в свободном состоянии при помощи зажимов на траверсе для перемещения детали [11].

На рис. 4 представлена схема закрепления детали в установке контактного типа. Для данной конфигурации характерна неподвижная система фиксации, в которой закрепляется деталь 1. Позиционирование панели в ней осуществляется посредством стоек 2 и проверяется по контрольным точкам системой лазерного сканирования. Установка, на которой располагается дробеметный аппарат 3, перемещается по трем линейным направлениям X, Y, Z и прижимается к обрабатываемой поверхности при помощи эластичных уплотнений.



а)



б)

Рис. 3. Оборудование для реализации процесса ДУФ: а) установка УДФ-4 контактного типа; б) установка МР 20000 проходного типа



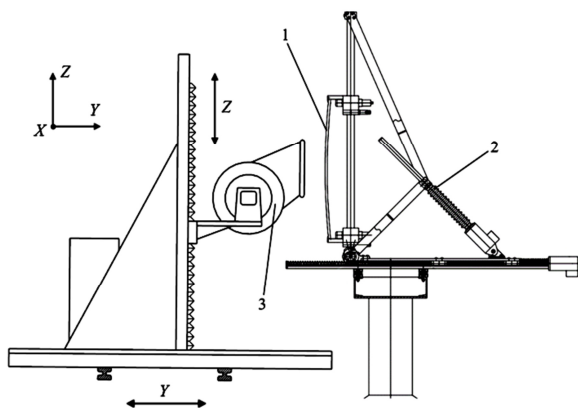


Рис. 4. Схема крепления детали на установке УДФ-4 контактного типа

Схема закрепления детали на установке проходного типа имеет обратный принцип действия (рис. 5). В этом случае имеется неподвижная роботизированная камера, оснащенная дробеметными аппаратами, через которую перемещается сама деталь, закрепляемая на специальной траверсе.

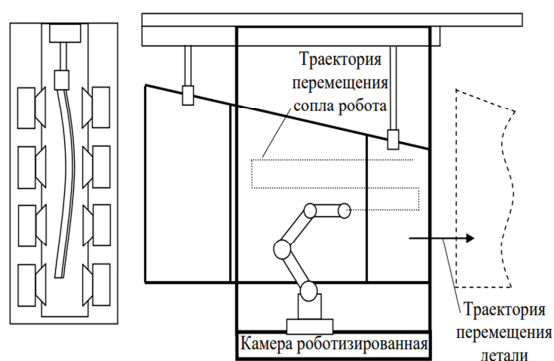


Рис. 5. Схема крепления детали на установке МР 20000 проходного типа

До и после обработки деталь подвергается контрольным операциям для определения отклонений формы. В качестве средств измерения используются шаблоны контура сечения или более современные методы – автоматизированные системы лазерного сканирования.

Ввиду того, что обрабатываемые детали являются маложесткими, в процессе закрепления возможно возникновение искажений пространственной формы, что влияет на точность процесса измерений и, как следствие, на выбор режимов обработки, основанных на показаниях контрольных операций [12].

Учет данных искажений является актуальной задачей, требующей отдельного изучения. Решить данную задачу можно с применением

систем инженерного анализа, путем моделирования изменений формы детали под действием собственного веса в зависимости от выбранной схемы закрепления.

### Коэффициенты искажения форм геометрии панелей

Формообразование детали при дробеударной обработке можно описать выражениями:

$$k_y^{дуф} = \frac{P_{y\ дуф}}{KEI_x} (Z_{0y} - z_{c\ y}^{дуф}), \quad (1)$$

$$k_x^{дуф} = k_x^{упр} - \frac{P_{x\ дуф}}{KEI_y} (Z_{0x} - z_{c\ x}^{дуф}), \quad (2)$$

где  $k_y^{дуф}, k_x^{дуф}$  — кривизна панели в продольном и поперечном направлении соответственно, полученная в результате ДУФ;

$k_y^{упр}$  — продольная кривизна детали, формируемая на этапе прессовой гибки;

$P_{x\ дуф}, P_{y\ дуф}$  — составляющие удельной внутренней силы, определяемой режимом работы ДУФ;

$Z_{0x}, Z_{0y}$  — координаты нейтрального слоя детали в направлении соответствующих осей;

$z_{c\ x}^{дуф}, z_{c\ y}^{дуф}$  — расстояние от обрабатываемой поверхности до точки приложения внутренних сил;

$I_x, I_y$  — моменты инерции сечений детали относительно соответствующих осей;

$E$  — модуль упругости материала;

$K$  — коэффициент вида напряженно-деформированного состояния.

В свою очередь кривизна обратно пропорционально связана с радиусом кривизны  $R$ :

$$k = \frac{1}{R}. \quad (3)$$

К параметрам, определяющим оптимальные режимы работы ДУФ, можно отнести  $P_{дуф}$  и  $z_c$ , которые задаются в зависимости от диаметра дроби, их скорости и времени обработки поверхности детали [13].

Исходя из формул (1) и (2), данные параметры в свою очередь зависят от показателей кривизны, полученных на этапе прессовой гибки  $k_y^{упр}$ , геометрических параметров детали  $I_x, I_y, Z_{0x}, Z_{0y}$ , зависящих от конструктивных особенностей панели и способов закрепления, а также от требуемой получаемой после ДУФ кривизны  $k^{дуф}$ , которую можно выразить через радиус кривизны  $R^{дуф}$ .

Исходный контур крупногабаритной детали, подвергаемой формообразованию, может иметь отклонения формы, обусловленные наличием предшествующих стадий механической обработки [14]. В этом случае перед проведением операции ДУФ предполагается использовать систему лазерного сканирования панелей (рис. 6, а).

Определение радиуса кривизны производится по формуле

$$R_{x\text{исх}}^G = \frac{a^2}{8f_x}, \quad R_{y\text{исх}}^G = \frac{a^2}{8f_y}, \quad (4)$$

где  $a$  — база измерения (определяется размерами рассматриваемого участка измерений);

$f_x$  и  $f_y$  — стрелы прогиба в продольном и поперечном направлении.

В результате после проведения лазерного сканирования панели должна быть сформирована база данных, в которой располагаются значения  $R_{x\text{исх}}^G$  и  $R_{y\text{исх}}^G$  — исходные радиусы кривизны в продольном и поперечном направлении [15].

В свою очередь после проведения операции ДУФ требуемая геометрия малогабаритной панели должна соответствовать определенным показателям, обозначаемым как  $R_x^{\text{теор}}$ ,  $R_y^{\text{теор}}$  (рис. 6, в).

Следовательно, соотношение радиусов кривизны определяется по формулам:

$$R_{x\text{исх}}^{\text{теор}} + R_x^{\Delta y \phi} = R_x^{\text{теор}}, \quad (5)$$

$$R_{y\text{исх}}^{\text{теор}} + R_y^{\Delta y \phi} = R_y^{\text{теор}}. \quad (6)$$

Исходя из формул (5) и (6) с учетом использования исходных данных, взятых по контрольным точкам с помощью системы лазерного сканирования  $R_{\text{исх}}^G$ , и данных с теоретически заданной геометрии панели в тех же точках  $R^{\text{теор}}$  требуется определить значения радиусов кривизны панели, получаемые непосредственно операцией дробеударного формообразования:

$$R_{x\text{ij}}^{\Delta y \phi} = R_{x\text{ij}}^{\text{теор}} - k_{x\text{ij}}^G \cdot R_{x\text{исх}\text{ij}}^G, \quad (7)$$

$$R_{y\text{ij}}^{\Delta y \phi} = R_{y\text{ij}}^{\text{теор}} - k_{y\text{ij}}^G \cdot R_{y\text{исх}\text{ij}}^G, \quad (8)$$

где  $k_x^G$ ,  $k_y^G$  — коэффициенты искажения формы детали при измерении в вертикальном положении.

Краеугольным камнем в этом вопросе является определение данных коэффициентов  $k_x^G$  и  $k_y^G$  на каждом участке измерения.

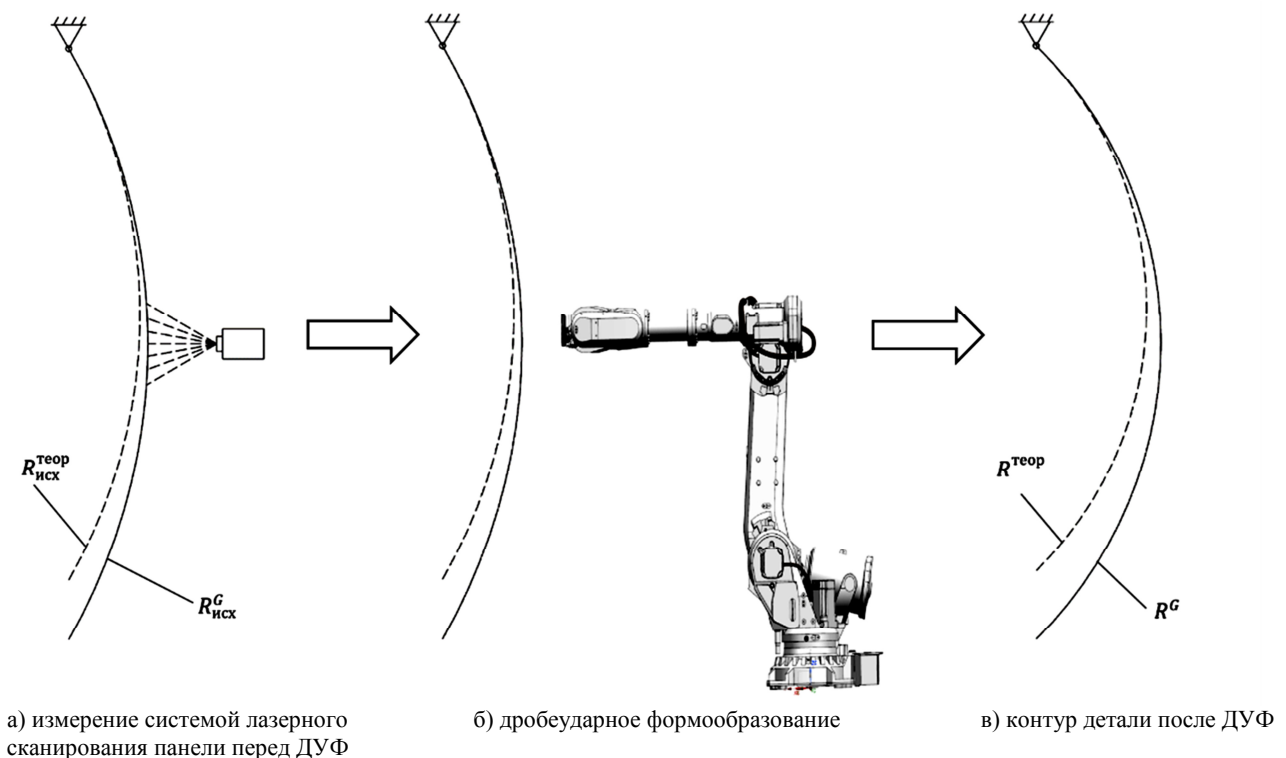


Рис. 6. Схема определения радиусов кривизны

### Построение конечно-элементной модели формоизменения изогнутой пластины под действием собственного веса

Для определения параметров искажений пространственной формы рассматриваемой мало жесткой изогнутой пластины под действием силы собственного веса была использована среда конечно-элементного (КЭ) анализа Ansys LS-Dуна.

В качестве исходных данных для создания КЭ-модели можно использовать изогнутую пластину с размерами 2000x125x5 мм со средним радиусом кривизны в неподвешенном (горизонтальном) состоянии 1- 5 м. В качестве материала использовалась модель 001-ELASTIC, хорошо работающая в зоне упругих деформаций материала [16]. Свойства модели материала соответствуют показателям стали Ст3:

- плотность  $\rho = 7850 \text{ кг/м}^3$ ;
- модуль Юнга  $E = 2,1 \cdot 10^5 \text{ Мпа}$ ;
- коэффициент Пуассона  $\mu = 0,3$ .

При моделировании использовался оболочечный тип элементов. Построенная гексаэдральная конечно-элементная сетка имела минимальный размер 3 мм.

В качестве схемы закрепления детали использовалась фиксация по верхнему торцу, применяемая на установках проходного типа. Условием нагружения для рассматриваемой модели выступала сила собственного веса (рис. 7, а).

После проведения численного эксперимента определялся радиус кривизны КЭ-модели пластины и расстояние между ее концами (рис. 7, б).

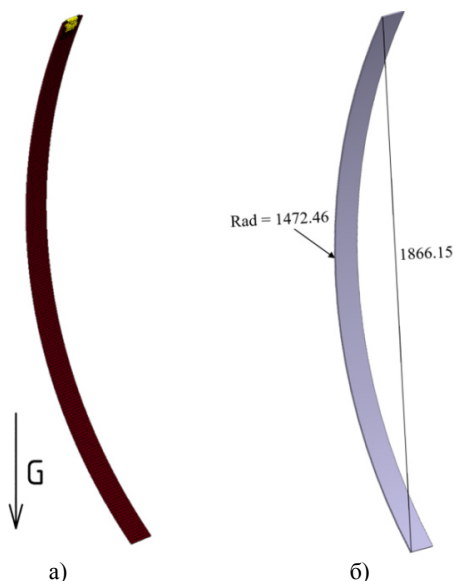


Рис. 7. КЭ-модель стальной изогнутой пластины (а), результаты ее измерения после расчета (б)

На рис. 8 представлен график зависимости радиуса кривизны пластины, подвергнутой силе собственного веса, от радиуса кривизны заданной геометрии.

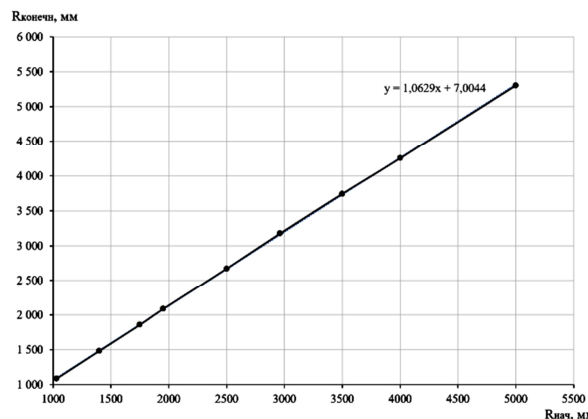


Рис. 8. График зависимости радиуса кривизны пластины под действием силы веса от первоначально заданного радиуса кривизны

Полученный график является линейным, что свидетельствует о постоянстве изменений параметров геометрии деталей. С учетом имеющихся данных отклонения в геометрии деталей составляют в среднем 6,6 %. Таким образом, соответствующий для пластины коэффициент искажения форм  $k^G = 0,944$ .

### Построение конечно-элементной модели формоизменения участков крупногабаритных мало жестких деталей с исходной кривизной под действием собственного веса

На основе КЭ-модели изогнутой пластины было выполнено моделирование формоизменения участков крупногабаритных мало жестких деталей с исходной кривизной под действием собственного веса в соответствии со следующим алгоритмом:

1) На основании имеющейся геометрии твердотельной математической модели мало жесткой панели двойной кривизны с габаритными размерами 2376x1843 мм выполнялось ее упрощение — создавалась оболочечная модель (рис. 9).

2) Выполнялось построение КЭ-сетки (рис. 10). Средний размер сетки составлял 5 мм.

3) Производилось задание толщин и свойств материала модели (рис. 10). Свойства материала КЭ-модели соответствуют параметрам алюминиевого сплава В95пчТ2 (упругая модель материала 001-ELASTIC):

- плотность  $\rho = 2850 \text{ кг/м}^3$ ;
- модуль Юнга  $E = 74500 \text{ Мпа}$ ;
- коэффициент Пуассона  $\mu = 0,34$ .

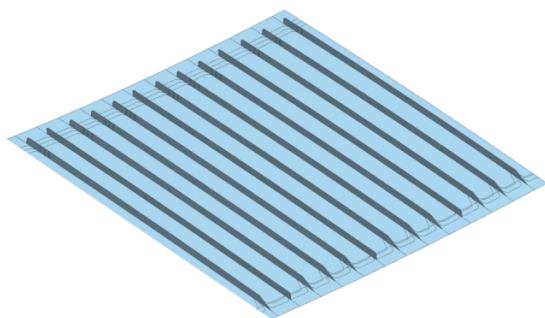


Рис. 9. Оболочечная модель маложесткой криволинейной панели двойной кривизны

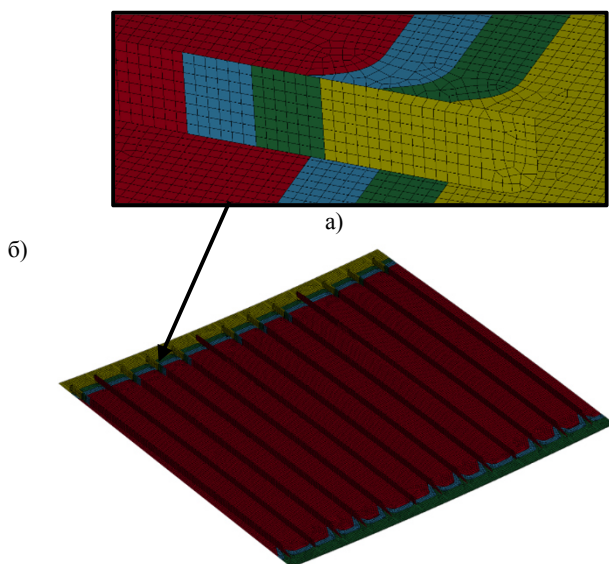


Рис. 10. КЭ-модель маложесткой криволинейной панели двойной кривизны (а) и ее участок с фрагментом ребра (б) (различные толщины показаны соответствующим цветом)

4) Определялись граничные условия: по верхней кромке на равноудаленном расстоянии (рис. 11) задавались ограничения, имитирующие прижимные устройства, используемые на установках проходного типа.

Для данного вида закрепления в модели необходимо ограничить перемещения по осям  $Y$  и  $Z$  с возможностью линейного перемещения по оси  $X$ , кроме центрального шарнира, в котором перемещения по оси  $X$  также требуется ограничить. В модели возможно вращение относительно оси  $X$ , вращения относительно других осей ограничены (рис. 12) [17], [18].

5) Задавались параметры нагружения в виде силы собственного веса, направленной в противоположную от оси  $Z$  сторону.

6) После проведения расчета определялись значения радиусов кривизны в равноудаленных

друг от друга точках продольных и поперечных сечений модели. Геометрия панели разбивается на определенное количество продольных и поперечных сечений, определяемое значением шага между сечениями. Величина шага выбирается из соображений точности получаемых значений. В машиностроении для такого типа деталей, как правило, величина шага, которая еще называется базой измерений, составляет 200 мм [19].

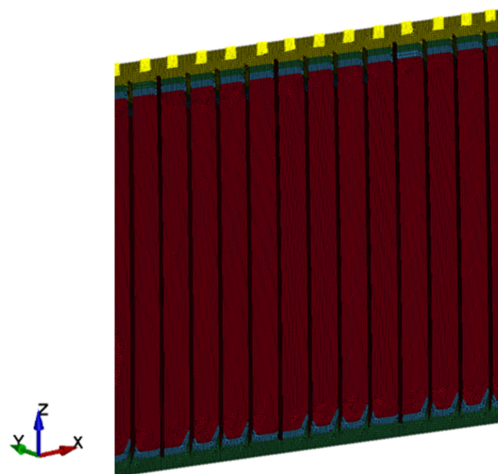


Рис. 11. Граничные условия для КЭ-модели

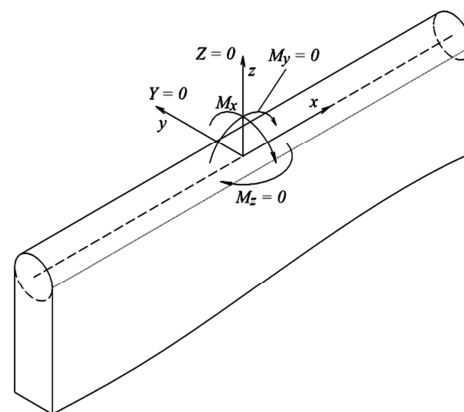


Рис. 12. Схема ограничения степеней свободы при задании граничных условий для панели

7) Определялись коэффициенты искажения форм и размеров от силы веса.

Значения коэффициентов определялись по формуле

$$k^G = \frac{R^{\text{исх}}}{R^G}; \quad (9)$$

где  $R^{\text{исх}}$  — первоначально заданный радиус кривизны;

$R^G$  — получаемый под действием силы веса радиус кривизны.



В качестве примера расчета в табл. 1 указаны значения радиусов кривизны, определенных в точках крайних левого и нижнего сечений модели, а также рассчитанные коэффици-

енты  $k^G$ . Точки выбирались в местах пересечения продольных и поперечных сечений, определенных базой измерений.

Таблица 1

№ точки		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Нижнее сечение	$R_x^{исх}$	20252	20409	20605	21281	21968	23273	24481	25995	27957	30109	31714	33760
	$R_x^G$	20277	20544	20646	21506	22162	23244	24651	26312	28224	30090	31744	33273
	$k_x^G$	0,999	0,993	0,998	0,990	0,991	1,001	0,993	0,988	0,991	1,001	0,999	1,015
Левое сечение	$R_y^{исх}$	49892	57584	62672	61704	64429	64773	65984	61354	61258			
	$R_y^G$	50051	57396	63098	62399	65239	65372	66425	61956	61814			
	$k_y^G$	0,997	1,003	0,993	0,989	0,988	0,991	0,993	0,99	0,991			

Благодаря полученным коэффициентам на каждом конкретном участке сечения возможен пересчет геометрии с учетом силы собственного веса и задание оптимальных режимов работы ДУФ.

### Экспериментальное определение параметров геометрии изогнутой пластины

Для верификации КЭ-модели формоизменения изогнутой пластины под действием собственного веса было проведено экспериментальное исследование.

В качестве детали использовалась пластина с размерами 2000x125x5 мм, изготовленная из стального сплава Ст.3.

Радиус кривизны пластины получали путем гибки-прокатки на вальцовочном станке (рис. 13). В ходе эксперимента было создано 4 различных случая кривизны детали (табл. 2).

Для проведения измерений на деталь нанесли контрольные точки с шагом в 100 мм (рис. 14).



Рис. 13. Листогибочный 3-х вальцовый станок

Измерения полученной вальцеванием изогнутой пластины производились специальной планкой (с базой в 200 мм) с часовым индикатором ИЧ-10 (рис. 15) и проводилось в 2 этапа: сначала установленной ребром на жесткую стальную платформу (рис. 14), затем в подвешенном состоянии.

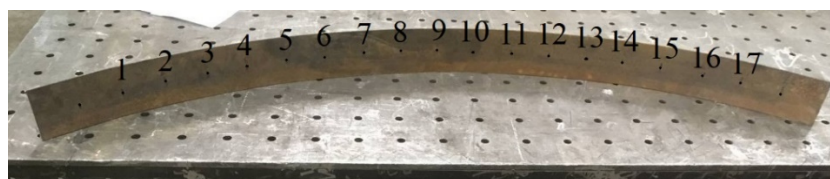


Рис. 14. Изогнутая пластина, установленная на ребро с контрольными для измерения точками

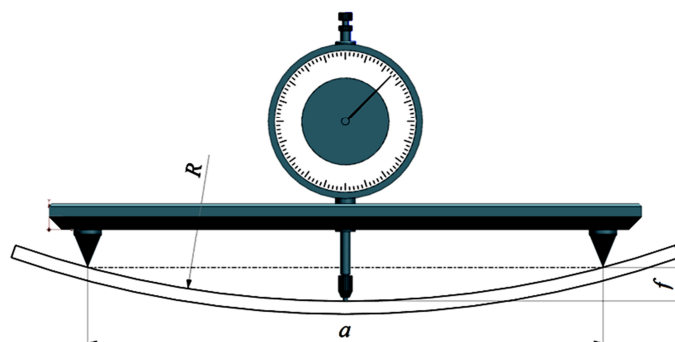


Рис. 15. Схема измерения с помощью измерительной планки



В результате для каждой пластины было получено 17 стрел прогиба. Также для дополнительной проверки получаемой методики определялось расстояние между концами пластины.

После определения прогибов пластины на каждом из измеренных участков возможен расчет радиусов ее кривизны по формуле

$$R = \frac{a^2}{8 \cdot f}, \quad (10)$$

где  $a$  — база измерений, равная 200 мм (определяется расстоянием между ножками измерительной планки);

$f$  — величина прогиба на исследуемом участке.

В табл. 2 представлены полученные значения средних значений радиусов кривизны и расстояние между концами исследуемых пластин и соответствующих им рассчитанных моделей.

Таблица 2

		1 кривизна		2 кривизна		3 кривизна		4 кривизна	
		На ребре	Подвешена	На ребре	Подвешена	На ребре	Подвешена	На ребре	Подвешена
Стальная пластина	Среднее значение	2819	3020	1950	2087	1397	1484	1029	1088
	Расстояние между концами	1960	1966	1920	1927	1850	1865	1683	1715
Модель	Среднее значение	2819	3062	1950	2145	1397	1472,5	1029	1095
	Расстояние между концами	1960	1969	1920	1930,5	1850	1866	1683	1708

Согласно полученным данным, можно сделать вывод, что максимальные расхождения экспериментальных данных и данных расчетной модели не превышают 2,3 % по показателю радиуса кривизны и 0,4 % — по расстоянию между концами пластины, что является допустимым при моделировании подобных процессов.

### Заключение

При комбинированном методе формообразования для получения изделия требуемой точности уделяется большое внимание заданию оптимальных режимов работы дробеударного формообразования.

Представленная в статье методика позволяет производить пересчет геометрии детали, подвергшейся силе собственного веса. В результате, с учетом входных параметров геометрии до проведения ДУФ, снятых измерительной системой установки и определенных по методике коэффициентов искажения формы, возможно более точное задание требуемых режимов работы формообразования дробью.

С целью проверки достоверности используемой методики были проведены численные расчеты изменения геометрии изогнутой пластины. Полученные в ходе моделирования результаты показали, что изменения ее геометрии протекают по линейной зависимости. При ис-

следовании деталей типа обшивка данная закономерность позволит качественней оценить показатели изменения получаемой геометрии.

Сравнительный анализ численного расчета и экспериментальных данных показал, что погрешность выполненного расчета не превышает 2,3 %, что является допустимым при выполнении моделирования рассматриваемых в статье процессов.

### Литература

1. Пашков А.Е. Об особенностях применения отечественной и зарубежной технологии формообразования обшивок и панелей самолетов // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2015. № 5 (100). С. 17-22.
2. Пашков А.Е., Дяк А.Ю., Чапышев А.П. Моделирование процесса дробеударного формообразования // Высокие технологии в машиностроении: сб. докл. Междунар. научн.-техн. конф. Самарск. гос. техн. ун-т. Самара, 2004. С. 23-25.
3. Пашков А.Е. Автоматизированная технология комбинированного формообразования панелей самолетов // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2013. Т. 15. № 6 (2). С. 453-457.
4. Кузнецов В.С., Пономарев В.А. Универсально сборные приспособления «Альбом монтажных чертежей». М.: Машиностроение. 1974. 156 с.
5. Фалеев С.Ю., Пашков А.А., Рыжков М.Ю. Автоматизация процесса анализа формы крупногабаритных деталей сложной формы по трехмерным моделям // VIII Международная конференция Проблемы механики современных машин. 2022. С. 554-562.

6. К разработке постпроцессора установки для дробеударного формообразования / А.Е. Пашков, А.А. Пашков, К.Н. Савенко, Г.С. Цыремпилов // Авиационное строительство и транспорт Сибири: Сб. статей XV Всеросс. науч.-техн. конф., Иркутск, 22 декабря 2020 года. Иркутск: Иркутский национ. исслед. техн. ун-т. 2021. С. 59-66.

7. Пашков А.А. Моделирование процесса формообразования крупногабаритных деталей двойной кривизны на дробеметных установках контактного типа // Современные материалы и передовые производственные технологии (СМПТ-2019): Тез. докл. междунар. науч. конф., Санкт-Петербург 2019 года. С-петерб. политехн. ун-т Петра Великого. 2019. С. 114.

8. Пашков А.Е., Чапышев А.П. Учет влияния структуры зоны обработки при дробеударном формообразовании // Технологическая механика материалов: Межвуз. Сб. научн. тр. Иркутск: Изд-во ИрГТУ. 2004. С. 22-27.

9. Стародубцева Д.А. Автоматизация процесса зачистки крупногабаритных поверхностей панелей и обшивок после дробеударного формообразования на установках контактного типа // Авиационное строительство и транспорт Сибири: Сб. ст. XI Всеросс. науч.-техн. конф. 2018. С. 96-101.

10. Пашков А.Е. Технологический комплекс для формообразования длинномерных панелей и обшивок на базе отечественного оборудования // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2014. № 1(5). С. 1528-1535.

11. Разработка методики анализа геометрических параметров длинномерных панелей / А.Е. Пашков, А.А. Пашков, С.Ю. Фалеев, О.В. Самойленко // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2023. Т. 21. № 2. С. 102-113.

12. Experimental study of shot peening and stress peen forming / H. Y. Miao, D. Demers, S. Larose, C. Perron,

M. Levesque // J. Mater. Process. Technol. 2010. Vol. 210. PP. 2089-2102.

13. Pashkov A.A. Simulation of the Forming of Large Double Curvature Parts on Contact-Type Shot Peening Installations // Russian metallurgy (Metally). 2021. Vol. 13. PP. 1821-1828.

14. On the potential applications of a 3D random finite element model for the simulation of shot peening / H. Y. Miao, S. Larose, C. Perron, M. Levesque // Adv. Eng. Softw. 2009. Vol. 40. PP. 1023-1038.

15. Толстиков В.Г., Пыхалов А.А. Анализ напряженно-деформированного состояния деталей планера самолета из композиционных материалов на основе сканирования и решения глобально-локальной задачи // Труды МАИ. 2021. № 118. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=158214> (дата обращения 19.03.2024)

16. Пашков А.А., Антипин С.А., Миниханов К.Д. Учет данных промежуточного контроля формы крупногабаритных деталей при назначении режимов дробеударного формообразования // XIII Всероссийская конференция «Жизненный цикл конструкционных материалов (от получения до утилизации)». 2023 С. 43-47.

17. Маломыжов Д.О., Пыхалов А.А. Анализ методов определения напряженно-деформированного состояния и усталостной прочности подвижного состава // Молодая наука Сибири. 2022. № 2 (16). С. 12-19.

18. Пыхалов А.А., Пушин Р.В. Напряженно-деформированное состояние рабочих лопаток авиационных турбомашин с учетом особенностей их крепления // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2020. № 1 (65). С. 14-21.

19. Исследование напряженного состояния при обработке деталей повышенной жесткости бойковым инструментом / А.А. Макарук, А.М. Хамаганов, А.А. Пашков, О.В. Самойленко // Вестник ИрГТУ. 2017. № 4 (123). С. 39-46.

Поступила 20.03.2024; принята к публикации 12.08.2024

#### Информация об авторах

**Антипин Сергей Алексеевич** – инженер-исследователь, Иркутский национальный исследовательский технический университет (664074, Россия, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83), e-mail: [sergey.antipin.98@mail.ru](mailto:sergey.antipin.98@mail.ru)

**Пыхалов Анатолий Александрович** – д-р техн. наук, профессор, Иркутский государственный университет путей и сообщения (664074, Россия, г. Иркутск, ул. Чернышевского, 15); профессор кафедры механики и сопротивления материалов, Иркутский национальный исследовательский технический университет (664074, Россия, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83), e-mail: [rykhalov\\_aa@mail.ru](mailto:rykhalov_aa@mail.ru)

**Пашков Александр Андреевич** – канд. техн. наук, доцент, Иркутский национальный исследовательский технический университет (664074, Россия, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83), e-mail: [pashk0ff@mail.ru](mailto:pashk0ff@mail.ru)

### DEFINING GEOMETRY SHAPE DISTORTION PARAMETERS OF LOW-RIGIDITY LARGE-SIZED PARTS, TAKING INTO ACCOUNT THE INFLUENCE ON THEM THE FORCE OF THEIR OWN WEIGHT AND FASTENING CONDITIONS

S.A. Antipin<sup>1</sup>, A.A. Pykhalov<sup>1,2</sup>, A.A. Pashkov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

<sup>2</sup>Irkutsk State Transport University, Irkutsk, Russia

**Abstract:** the issue of developing a methodology for calculating the stress-strain state (SSS) of low-rigid large-sized aircraft parts based on a mathematical model of the finite element method and solving physically and geometrically nonlinear problems in the mechanics of a deformable solid is an urgent problem in the technology of their shaping. The purpose of the research presented in the work is to take into account the deviations of the shapes and sizes of low-rigid large-sized parts obtained during the calculation in the real technological process of shaping this type of parts. A low-rigid double-curvature panel with transverse ribs was chosen as the object of study with which the methodology was developed. Based on the constructed finite element (FE) model, a numerical experiment was carried out. The weight force and fastening conditions were used as the external load acting on the panel. The mathematical model is built using a solution to a static problem. A study of the reliability of the results of numerical calculations was carried out using a curved plate of constant thickness for which there is data from a full-scale experiment. Based on the results of the study of the SSS of the part, it was concluded that distortions of shapes and sizes must be taken into account in the panel manufacturing technology and that their maximum value occurs in the area of the free end of the part. The obtained re-

sults of calculating the FE model of the proposed panel allow us to make a transition to the real technological process of shaping, which in turn allows us to control the dimensions of the resulting parts within the tolerance

**Key words:** double curvature, rolling, radius of curvature, stress-strain state, finite element method, deformable solid, static analysis, gravitational load, shot peen forming (SPF)

#### References

1. Pashkov A.E. "On the features of the use of domestic and foreign technology for the formation of aircraft skins and panels", *The Bulletin of Irkutsk State Technical University (Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2015, no. 5 (100), pp. 17–22.
2. Pashkov A.E., Diyak A.Yu., Chapyshev A.P. "Modeling the process of shot-impact shaping", *High technologies in mechanical engineering (Vysokiye tekhnologii v mashinostroyenii)*, collect. report Intl. scientific-technical conf., Samar. State Tech. Univ., Samara, 2004, pp. 23–25.
3. Pashkov A.E. "Automated technology of combined shaping of aircraft panels", *News of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences (Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk)*, 2013, vol. 15, no. 6 (2), pp. 453–457.
4. Kuznetsov V.S., Ponomarev V.A. "Universally prefabricated devices "Album of installation drawings" ("Universal'no sbornyye prispособleniya "Al'bom montazhnykh chertezhey"), Moscow, Mashinostroyeniye, 1974, 156 p.
5. Faleev S.Yu., Pashkov A.A., Ryzhkov M.Yu. "Automation of the process of analyzing the shape of large-sized parts of complex shape using three-dimensional models", *Problems of Mechanics of Modern Machines (Problemy mekhaniki sovremennykh mashin)*, VIII International Conference, 2022, pp. 554 – 562.
6. Pashkov A.E., Pashkov A.A., Savenkov K.N., Tsyrempilov G.S. "On the development of a post-processor for an installation for shot-impact shaping", *Aircraft engineering and transport of Siberia (Aviamashinostroyeniye i transport Sibiri)*, coll. of articles of the XV All-Russian Scientific and Technical Conference, Irkutsk, December 22, 2020, Irkutsk National Research Technical University, 2021, pp. 59-66.
7. Pashkov A.A. "Modeling the process of shaping large-sized parts of double curvature on contact-type shot blasting machines", *Modern materials and advanced production technologies (Sovremennyye materialy i peredovyye proizvodstvennyye tekhnologii)* (SMPPT-2019), abstracts of the international scientific conference, St. Petersburg 2019, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, 2019, p. 114.
8. Pashkov A.E., Chapyshev A.P. "Taking into account the influence of the structure of the processing zone during shot-impact shaping", *Technological mechanics of materials (Tekhnologicheskaya mekhanika materialov)*, interuniversity collection of scientific papers, Irkutsk, Izd-vo IrGTU, 2004, pp. 22–27.
9. Starodubtseva D.A. "Automation of the process of cleaning large-sized surfaces of panels and skins after shot-impact shaping on contact-type installations", *Aircraft engineering and transport of Siberia (Aviamashinostroyeniye i transport Sibiri)*, coll. of articles of the XI All-Russian Scientific and Technical Conference, 2018, pp. 96-101.
10. Pashkov A.E. "Technological complex for shaping long panels and skins based on domestic equipment", *News of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences (Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk)*, 2014, no. 1 (5), pp. 1528 – 1535.
11. Pashkov A.E., Pashkov A.A., Faleev S.Yu., Samoilenko O.V. "Development of a methodology for analyzing the geometric parameters of long panels", *The Bulletin of Magnitogorsk State Technical University n.a. G.I. Nosova (Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova)*, 2023, vol. 21, no. 2, pp. 102-113.
12. Miao H.Y., Demers D., Larose S., Perron C., Levesque M. "Experimental study of shot peening and stress peen forming", *J. Mater. Process. Technol.*, 2010, vol. 210, pp. 2089 – 2102.
13. Pashkov A.A. "Simulation of the Forming of Large Double Curvature Parts on Contact-Type Shot Peening Installations", *Russian metallurgy (Metally)*, 2021, vol. 13, pp. 1821 – 1828.
14. Miao H.Y., Larose S., Perron C., Evesque M. "On the potential applications of a 3D random finite element model for the simulation of shot peening", *Adv. Eng. Softw.*, 2009, vol. 40, pp. 1023–1038.
15. Tolstikov V.G., Pykhalov A.A. "Analysis of the stress-strain state of aircraft airframe parts made of composite materials based on scanning and solving a global-local problem", *Proceedings of MAI (Trudy MAI)*, 2021, no. 118, available at: <https://trudymai.ru/published.php?ID=158214> (accessed 19.03.2024)
16. Pashkov A.A., Antipin S.A., Minikhanov K.D. "Taking into account data from intermediate control of the shape of large-sized parts when assigning shot-impact shaping modes", *Life cycle of construction materials (from production to disposal) (Zhiznennyi tsikl konstruktivnykh materialov (ot polucheniya do utilizatsii))*, XIII All-Russian Conference, 2023, pp. 43-47.
17. Malomyzhev D.O., A.A. Pykhalov "Analysis of methods for determining the stress-strain state and fatigue strength of roll- ing stock", *Young Science of Siberia (Molodaya nauka Sibiri)*, 2022, no. 2 (16), pp. 12-19.
18. Pykhalov A.A., Pushchin R.V. "Stress-strain state of rotor blades of aircraft turbomachines, taking into account the peculiarities of their fastening", *Modern technologies. System analysis. Modeling (Sovremennyye tekhnologii. Sistemnyy analiz. Modelirovaniye)*, 2020, no. 1 (65), pp. 14-21.
19. Makaruk A.A., Khamaganov A.M., Pashkov A.A., Samoilenko O.V. "Study of stressed standing when processing parts of increased rigidity with a striking tool", *The Bulletin of ISTU (Vestnik IrGTU)*, 2017, no. 4 (123), pp. 39–46.

Submitted 20.03.2024; revised 12.08.2024

#### Information about the authors

**Sergey A. Antipin** – Research Engineer, Irkutsk National Research Technical University (83 Lermontova str., Irkutsk 664074, Russia), e-mail: sergey.antipin.98@mail.ru

**Anatoliy A. Pykhalov** – Dr. Sc. (Technical), Professor, Irkutsk State Transport University (15 Chernyshevskogo str., Irkutsk 664074, Russia), Professor of the Department of Mechanics and Strength of Materials Irkutsk National Research Technical University (83 Lermontova str., Irkutsk 664074, Russia), e-mail: pykhalov\_aa@mail.ru

**Aleksandr A. Pashkov** – Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Irkutsk National Research Technical University (83 Lermontova str., Irkutsk 664074, Russia), e-mail: pashk0ff@mail.ru

## ВЫЯВЛЕНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ПРОТЕКАНИЯ ПРОЦЕССОВ В МЕЖЭЛЕКТРОДНОМ РАБОЧЕМ ОБЪЕМЕ ЭЛЕКТРОЛИТА ДЛЯ МЕТАЛЛОВ, СКЛОННЫХ К ПАССИВАЦИОННЫМ ЯВЛЕНИЯМ НА ИХ ПОВЕРХНОСТИ

И.М. Винокурова, В.С. Бородина

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

**Аннотация:** цель исследования состоит в разработке модельного комплекса управления режимами электрохимической размерной обработки для металлов из титана, алюминия и их сплавов: анодная обработка (снятие металла под размеры с финишной обработкой с образованием оксидной плёнки) и катодная обработка (нанесение покрытий необходимой толщины). Приведены оптимизационные действия обеспечения контроля обработки и подачи необходимых режимов тока, а также граничные параметры по регулированию изменения температурных полей в рабочем объёме электролита приэлектродных слоёв электродов и в межэлектродном зазоре. Установлены температурные показатели, влияющие на изменение кинетических параметров технологического процесса электрохимической обработки, и составляющие зависимостей, влияющие на изменения показателей режимов течения электролита (концентрационные составляющие рабочего водного раствора электролита: катионный и анионный состав). Разработана физическая модель по моделированию рационального использования локализации тепловых процессов с целью рентабельного применения задаваемых режимов подачи тока в рабочие приэлектродные зоны двойного электрического слоя. Установлены критерии реализации технологического процесса распределения плотности тока по поверхности электрода с учётом законов тепло- и газовой выделению в объёме электролита

**Ключевые слова:** обработка металла, электролит, критерии расчёта, механизм анодного окисления, рабочие электроды

### Введение

Изучение и анализ известных экспериментальных результатов анодной обработки алюминиевых и титановых сплавов [1-20], а также обсуждённых в открытой печати достоверных данных, позволили определить, что исследования в области совершенствования приёмов технического оснащения и модернизации совершенных приёмов локализации процессов растворения и дальнейшей обработки металлов, склонных к пассивации, осуществляется в рамках изучения анодного поведения различных систем «металл/электролит».

Изученные методы определения показателей технологических параметров процессов для электрохимического способа обработки металлов из титана, алюминия и их сплавов строятся на решении трёх взаимосвязанных между собой категорий задач, которые зачастую могут не полностью охватить весь объём возникающих в данной технологии, поставленных перед разработчиками решаемых вопросов технических показателей обработки. Вначале использовался метод расчёта показателей режима обработки на основе уравнений Лапласа для вычисления изменения показателей электрического поля в

объёме межэлектродного рабочего пространства, т.е. использовалась идеализированная форма постановки без учета влияния показателей электродных процессов (поляризации анода и катода, электропроводность  $\alpha$  рабочего объёма электролита берется const).

### Формирование задач анодной обработки металлов в зависимости от уровня сложности

Большинство методов решения задач с введением показателей электрического поля на границы одной подвижной (анод) и другой неподвижной (катод), позволяют решать ряд задач при разработке технологии в нестационарном режиме формообразования поверхности, однако они ограничиваются в применении простейших технологических вариантов численных математических расчетов. Разберем условия применения задаваемых граничных показателей в условиях использования нелинейных поляризационных характеристик, зависящих от гальвано- или потенциостатических условий (рис. 1). Простейшим вариантом является использование 1-го уровня задач с применением дополнительных корректирующих приёмов по показателям ( $\alpha$ ,  $E_a$  и  $E_k$ ) во время эксперимента.



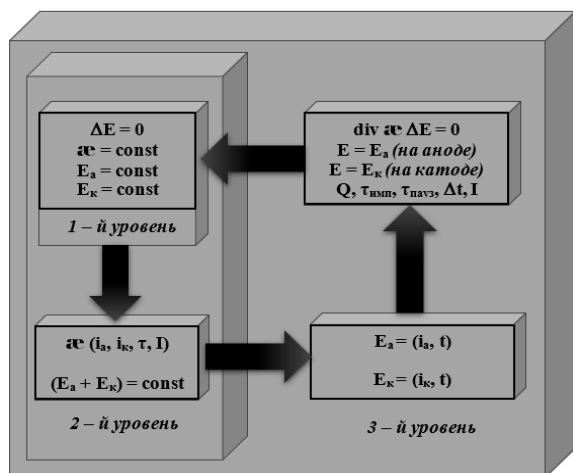


Рис. 1. Уровни решения задач анодной обработки металлов

Для второго уровня разрабатываемых показателей учитывается изменение электропроводности в рабочем объёме и влияние на изменение плотности тока с дальнейшим внесением корректив на поверхностный съём изделия (рис. 1, 2-й уровень задач). На этом уровне расчётов вводим ограничения по параметрам ( $E_a$ ,  $E_k$ ,  $\tau$  и  $\Delta t$ ), зависящим от условий изменения физических свойств, образования и развития газожидкостного слоя.

Решение задач с введением в оптимизационную схему показателей ( $\alpha(i_a, i_k, E_a, E_k, \tau, I)$ ) упрощает и облегчает до одномерной модели расчет процесса, но упускаются моменты оптимизации условий технологии обработки.

Использование задач разряда 3-го уровня (рис. 1) с введением параметров ( $Q, \tau_{имп}, \tau_{пауз}, \Delta t, I, E_a$  и  $E_k$ ) в оптимизационные показатели распределения потенциала по обрабатываемой поверхности, с учётом диффузионных показателей, позволяет учитывать изменения в межэлектродном зазоре, связанные с изменением течения электролита с ламинарного на турбулентный поток.

Модель растворения металлов, склонных к пассивации должна учитывать специфические особенности обработки данных изделий.

**Особенности данных на электродах**

- 1 - при аномально высоких плотностях тока, при которых обрабатываются металлы, создаются предпосылки для интенсивного газовыделения на электродах
- 2 - процессы газовыделения сопровождаются значительным выделением тепла при реакциях молизации этих газов
- 3 - газовыделение на электродах оказывает существенное влияние на процессы массопереноса продуктов взаимодействия в электрохимических системах

Рассмотренные и систематизированные нами виды эффектов тепловыделения [16] рис. 2, могут реализоваться в тот или иной период в электрохимической системе технологического процесса при соответствующем виде электрохимической обработки, а количественный вклад в общий тепловой баланс определяется механизмом протекающих реакций. Локализация всех электрохимических процессов осуществляется в двойном электрическом слое (на границах электрод-электролит), а времена релаксации электролита определяются

$$\theta = \frac{0,553}{C} \cdot 10^{-10} \text{с,}$$

где  $C$  — концентрация в г/ион·л рабочего компонента в растворе электролита (составляют  $10^{-5} \div 10^{-7}$  с).

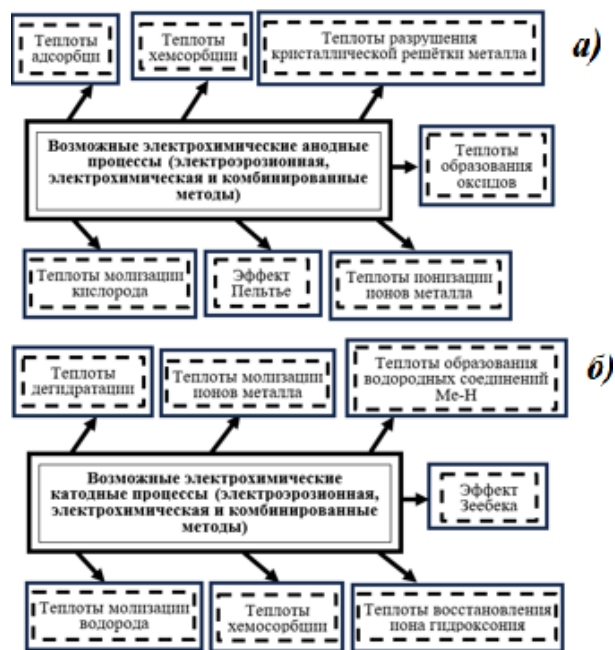


Рис. 2. Тепловые составляющие в технологических подсистемах при анодной обработке с учётом суммарных теплот: а) в прианодной зоне; б) в прикатодной зоне

Исследования использования введения различных режимов подачи рабочего тока (постоянный или импульсный) позволяют решить в дальнейшем процессы оптимизации по регулированию массопереноса в электролитической ячейке и рассчитать критериальные показатели режимов, обеспечивающие требуемую равномерность и качество обработки деталей [5, 19].

Решение в рамках формообразования без учета влияния закономерностей анодных реакций, позволяет учитывать явления тепло- и массопереноса с учётом формирования различ-



ных по величине анодных потенциалов по обрабатываемой поверхности [5, 6, 16] и установившемуся значению потенциала, но возникает проблема неэквипотенциальности отдельных участков поверхности обрабатываемого металла и недостижения потенциала активного растворения на поверхности обработки. Для того чтобы повысить локализацию процесса растворения, необходимо перейти к задачам формообразования, учитывающим параметры 3-го уровня, представленного на рис. 1.

Первостепенной задачей [8, 10, 12, 14, 18] становится установление зависимостей в смоделированном виде между показателями задаваемых параметров рабочего объема электролита межэлектродного пространства и изменением кинетических показателей процесса съема металла с первоначально задаваемыми технологическими показателями, связанными с процессами газовыделения на поверхности электрода анода.

Улучшение регенерирующего массообмена в рабочей зоне обработки, с учётом дополнительных промежуточных процессов роста и дальнейшего выхода (отрыва рис. 3) пузырьков газа в зоне двойного электрического слоя, достигается непосредственно микроконвективным процессом перемешивания. Структура газового слоя приэлектродной зоны всегда являлась затруднительной задачей из-за особых условий контроля. Движение пузырей создаёт условие для хаотических пульсаций, что облегчает условия передачи тепла и импульса в объеме жидкости (рис. 3). На поверхности обрабатываемого изделия в водных электролитах зарождаются пузырьки  $O_2$  (кислорода), а на поверхности электрода катода зарождаются пузырьки  $H_2$  (водорода), которые при достаточно малых размерах (диаметр  $n \cdot O_2$  составляет  $\approx 3-5$  мкм) являются центрами зарождения вихревых потоков в рабочем растворе. Число центров зарождения и роста пузырьков газов рис. 3 зависит от  $i$  (плотности тока) и максимально возрастает с возрастанием показателя  $i_a$ . Применение  $i_{имп}$  (импульсного тока) расширяет границы регулирования рабочих показателей процессов обработки,  $i_{имп}$  при электролизе превышает его среднеинтегральное в  $Q$  раз ( $Q$  — скважность импульсного тока  $Q \gg 1$ ), а в условиях «жестких» режимов может возрастать в десятки число центров завихрения на единицу рабочей поверхности и происходит резкое изменение масштабности движения жидкости в рабочем объеме электролита.

С другой стороны, расчёт изменения течения электролита в межэлектродном простран-

стве с ламинарного на турбулентное (с учётом показателей динамических сил  $V_L$ , представленных на рис. 3) позволяет спрогнозировать регенерирующие процессы электролита в рабочих зонах обработки.

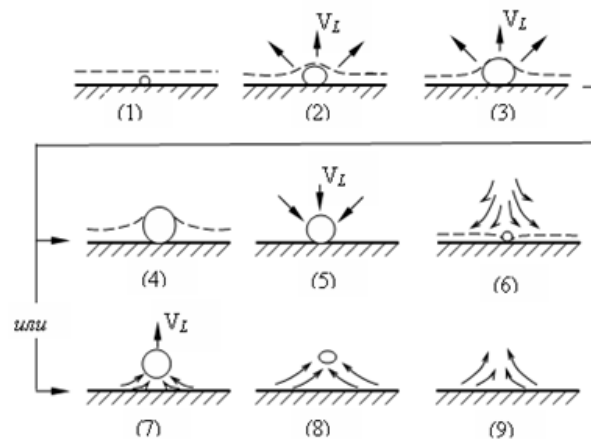
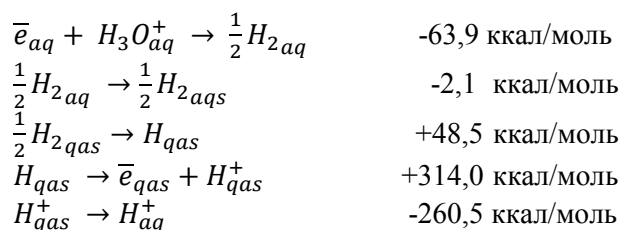


Рис. 3. Схема процесса роста пузырьков

Расчёты значения энергии гидратации электрона производим:

$$\bar{e}_q \rightarrow \bar{e}_{aq} + \Delta G_1 \quad (A)$$

Используя следующий термодинамический цикл:



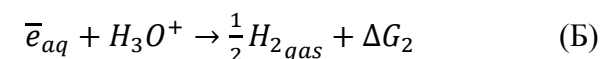
Для реакции гидратации (A) расчёты суммарной величины свободной энергии дают:

$$\Delta G_1 = -36,0 \text{ ккал/моль } (-1,56 \text{ эВ}),$$

что не оказывает влияния на изменение процесса гидратации электрона, и этот процесс протекает несмотря на то, что  $\Delta G_1$  отличается от измеряемой в эксперименте  $\Delta G_{реал}$  на показание, даваемое математической операцией  $E \cdot \alpha$  для определения показания разности потенциала на границе определяемого двойного электрического слоя реакции.

В водных растворах электролитов практически всегда наблюдается взаимодействие (в большей или меньшей степени) на границе раздела фаз поверхность металла – электролит с молекулами воды, с последующими процессами, завершающимися выделением газовых

продуктов  $H_2$  на катоде вследствие протекания ряда промежуточных реакций с ионом  $H_3O^+$ :



$H_{qas} \rightarrow H_{aq}$	-4,6 ккал/моль
$H_{qas} \rightarrow \frac{1}{2}H_{2,aqs}$	-48,6 ккал/моль
$H_3O^+ + OH^- \rightarrow H_2O$	-19,1 ккал/моль
$\bar{e}_{aq} + H_2O \rightarrow H_{qas} + OH^-$	+8,4 ккал/моль

Реакция гидратации иона, представленного в выражении (Б) процесса, позволяет получить:

$$\Delta G_2 = -63,9 \text{ ккал/моль (уточнение: } -2,87 \text{ эВ)}.$$

Использование режимов с большой скажностью  $Q$  импульсного тока позволяет уменьшить границы диффузионного рабочего слоя, соответственно повышается суммарное составляющее вектора перемещения частиц и увеличивается скорость переноса ионов в границах электродной зоны, поэтому необходимо детально обрабатывать режимы колебания температурных изменений раствора и их суммарных векторных показателей в рабочих приэлектродных зонах и в объёме потока электролита. Резкое изменение температуры в рассматриваемых зонах зачастую приводит к изменению режимов тепломассопереноса с дальнейшим переходом к неконтролируемости и непредсказуемости самого процесса электрохимической обработки. Для того чтобы не возникало критического состояния, необходимо проводить оптимизацию температурных изменений рабочих зон обработки систем электрод-электролит (прианодные и прикатодные) и зоны объёма межэлектродного зазора рис. 4 [4, 5, 10, 14].

Локализация тепла на рабочих площадках активного растворения (в двойном электрическом слое) и осаждения нанесение покрытий (на катоде), приводит к возникновению скачка повышения температуры, а часть энергии теплового импульса при обработке уходит в рабочий объём электролита. Не регулируемый рост температуры в межэлектродных рабочих пространствах приводит к возникновению «теплового барьера» и дальнейшему затруднению и прекращению транспортировки разряжающихся ионов в зонах обрабатываемой поверхности электрода (анода или катода).

#### Определение математических показателей оптимизации режимов обработки

Суммарный тепловой баланс в процессе позволит проводить оптимизационные меро-

приятия и задавать режимы подачи тока, а возможность регулирования и корректирования паузой ( $\tau_{\text{пауз}}$ ) импульсного тока в рабочем режиме обработки позволит выравнять температуру в объёме электролита. Для определения и решения импульсного уравнения теплопроводности (в граничных условиях) берем  $t_{ct}$  температуру стенки (электрода) в начальный момент ( $\tau_{\text{имп}}$ ) за 0. В первоначальный момент подачи импульса тепловой эффект в приэлектродной зоне будет менять своё значение за счёт любых из химических или электрохимических процессов в рабочей зоне обработки.

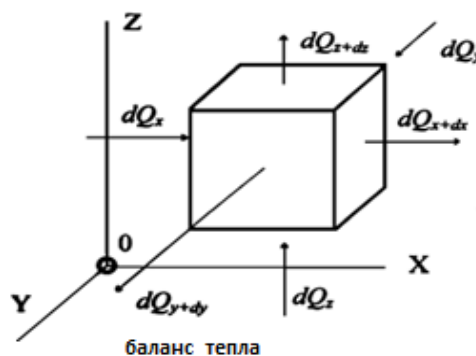


Рис. 4. Модель изображения процесса тепломассопереноса для единичного рабочего объёма электролита

При расчетах определения общего уравнения теплопроводности при воздействии на рабочую зону тепловым импульсом прямоугольной формы теплота определяется:

$$d\theta = \mathfrak{Z} \cdot P \cdot du \cdot dl, \quad (1)$$

где  $\mathfrak{Z}$  — коэффициент импульсный;

$P$  — мощность, выделяемая в ходе процесса;

$du$  — изменения по времени;

$dl$  — показатели длины.

Величина определяемой расчетной мощности  $P \cdot dl = \text{const}$ , т.к. процесс нагрева происходит от источника постоянной мощности ( $P_0$ ) на одной поверхности элемента ( $dl$ ).

Дополнительные условия возникают с появлением турбулентности в зоне электродной реакции, представленной на рис. 3, из-за большого газонаполнения рабочего межэлектродного зазора. Таким образом, критерием протекания процесса является разность температур электролита в рабочем объёме на выходе и входе ячейки. Количество теплоты, выделяемое с обрабатываемой металлической поверхности при соприкосновении с жидкой или газообразной средой:

$$Q = \alpha S(\theta_s - \theta_0) \cdot \tau, \quad (2)$$

где  $\alpha$  — коэффициент теплоотдачи в приэлектродном слое, Вт/(м<sup>2</sup>×°С);

$S$  — площадь поверхности теплообмена;

$\theta_s$  и  $\theta_0$  — соответственно температуры поверхности и среды;

$\tau$  — рабочее время обработки.

Для теплофизического анализа технологических систем  $\alpha$  характеризует процесс и условия теплообмена между твёрдым телом и жидкой или газообразной средой, и определяется:

$$\alpha(\theta_s - \theta_0) = \lambda_0 \left( \frac{\partial \theta}{\partial x} \right)_{x=0}, \quad (3)$$

где  $\lambda_0$  — коэффициент теплопроводности среды;

$x$  — ось системы координат с началом на поверхности теплообмена, направленная вглубь жидкости.

Определение параметра теплоотдачи  $\alpha$  предполагает нахождение градиента температуры в слое жидкости и температурного поля в ней. Распределение изменения температур ( $\Delta t$ ) внутри движущейся несжимаемой жидкости для нестационарного (импульсного) режима (рис. 4) описывается:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \theta}{\partial \tau} + \omega_x \frac{\partial \theta}{\partial x} + \omega_y \frac{\partial \theta}{\partial y} + \omega_z \frac{\partial \theta}{\partial z} = \\ = \omega \left( \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} \right), \end{aligned} \quad (4)$$

где  $\frac{\partial \theta}{\partial \tau}$  — изменение температуры какой-либо точки жидкости во времени;

$\omega_x \frac{\partial \theta}{\partial x}$ ,  $\omega_y \frac{\partial \theta}{\partial y}$ ,  $\omega_z \frac{\partial \theta}{\partial z}$  — изменение температуры при переходе от одной точки к другой;

$\omega_x$ ,  $\omega_y$ ,  $\omega_z$  — проекции вектора скорости движения потока жидкости на оси координат.

Распределение температур в движущейся жидкости определяется данными изменения скорости во времени и пространстве  $\omega_x$ ,  $\omega_y$ ,  $\omega_z$ :

$$\rho \frac{D\omega_x}{d\tau} = \rho g_x - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left( \frac{\partial^2 \omega_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \omega_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \omega_x}{\partial z^2} \right); \quad (5)$$

$$\rho \frac{D\omega_y}{d\tau} = \rho g_y - \frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left( \frac{\partial^2 \omega_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \omega_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \omega_y}{\partial z^2} \right); \quad (6)$$

$$\rho \frac{D\omega_z}{d\tau} = \rho g_z - \frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left( \frac{\partial^2 \omega_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \omega_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \omega_z}{\partial z^2} \right), \quad (7)$$

где  $\rho$  — плотность;

$\frac{D\omega_x}{d\tau}$ ,  $\frac{D\omega_y}{d\tau}$ ,  $\frac{D\omega_z}{d\tau}$  — соответственно полные производные от скорости по времени для осей X, Y, Z;

$\mu$  — динамический коэффициент вязкости жидкости;

$g_x$ ,  $g_y$ ,  $g_z$  — соответственно проекции на оси X, Y, Z ускорения силы тяжести;

$p$  — давление в данной точке потока.

Явление применения данного режима тождественно использованию серии импульсов (П – типа) и созданием условий с дальнейшим повышением потенциала во времени, а для данных охлаждения вводим изменения на значение потенциала противоположного знака. При режимах П - импульсов значения тепловой мощности в пространстве  $P_0 = const$  и выделяемая теплота за период короткого времени от  $l_1$  до  $l_2$  (для любых значений  $t$ ) определяется:

$$\theta = P_0 \cdot du \int_{l_1}^{l_2} \zeta dl. \quad (8)$$

Расчёты по построению температурного поля в координатах ток ( $i$ ) и время ( $\tau_{имп}$ ) продолжительности электролиза позволяют получить функциональные зависимости, представленные на рис. 5. По полученным зависимостям видим, что изменение температуры электрода в реакционной зоне обработки определяет увеличение температуры, а показатели возрастания плотности тока от времени электролиза работают в одном направлении и автоматически создают условия возрастания градиента температур в приэлектродном рабочем слое (аноде или катоде).

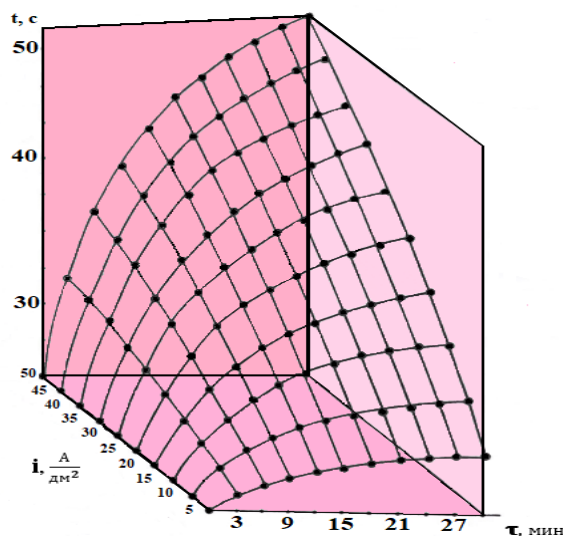


Рис. 5. Экспериментальные данные изменения температуры электрода от подаваемой плотности тока и времени проведения электролиза

Введение в расчёты дифференциальных уравнений 2-го порядка позволят определять изменения температур  $\Delta t$  электродов с достоверной точностью в математической оптимизации процесса для любого этапа по времени при любых значениях  $i$  – плотности тока.

Введение импульсных режимов при обработке металлов, склонных к пассивации требует предварительной проработки условий по режимной регулировке и корректировке показателей оптимальных параметров подачи импульсов с учётом показателей точности, заданной производительности и регулирование процессом управления рабочей системой в целом.

Применение пакета серий коротких импульсов ( $J_m \rightarrow \min$ ) позволило в первоначальный момент формировать на поверхности обрабатываемого металла ВТЛ-1 зоны травления (сканирующие импульсы). Формирование и подача следующих формирующих серий импульсов (значение  $J_m$  выше в 2÷3 раза) позволяет обозначить каналы растворения.



Рис. 6. Оптимизационная схема технологического процесса анодной обработки титановых и алюминиевых сплавов

Задача оптимизации процесса (рис. 6) по расчётам изменения показателей температурных и концентрационных полей в объёме электролита на рабочих участках обрабатываемого изделия становится более управляемая, так как

в дальнейшем регулировка режима течения жидкости позволяет своевременно обновлять электролит в реакционной зоне, повысить массоперенос электролита (ионов-окислителей) и продуктов реакции, что ускоряет процесс регенерации. Введение новых режимов позволило нам расширить зоны теплового фронта в глубину электролита, и повысить амплитуды теплового импульса обработки:

$$T(x, \tau) \rightarrow 0 \text{ при } x \rightarrow \pm\infty.$$

Определение основных критериев по показателям при обработке всегда определяется по задаваемым технологическим показателям конкретной технологии обрабатываемого изделия из изучаемого материала.

### Выводы

Таким образом, затруднения, связанные с возникновением нестационарных моментов при эксперименте, могут быть полностью устранены благодаря использованию предварительных оптимизационных мер (расчётов) для конкретных электрохимических систем технологического процесса. Для титана, титановых сплавов и алюминия, в рабочих зонах тепловые процессы локализованы в границах приэлектродного двойного электрического слоя (толщина  $\delta=1\div3$  молекулярных слоя) и трудности измерения количества тепловой энергии преодолевается с помощью простых математических оптимизационных действий.

Разработанная схема оптимизации процесса обработки обеспечивает достоверную сходимость результатов теоретических и экспериментальных данных и позволяет производить корректировки технологического процесса в рабочий период времени. Применение импульсных режимов позволяет обеспечивать процессы регулирования показателей формообразования и достигать высоких показателей точности обработки.

Применение импульсного тока и изменение параметров подачи тока при обработке металлов электрохимическим способом [10-20], позволяет изменять гидродинамические условия и более эффективно использовать компоненты электролита.

### Литература

1. Винокурова И.М., Смоленцев В.П., Плужников И.А. Основные аспекты определения зависимостей кинетических параметров анодной обработки при планировании эксперимента // Авиакосмические технологии. «АКТ - 2008»: тр. IX Всероссийской научно-практической конференции. Воронеж, 2008. С. 59-63.



2. Vinokurova I. Mathematical modeling of anodic oxidation and cathodic reduction of metals prone to passivation, taking into account the peculiarities of heat and mass transfer in the ieg under pulsed modes / I. Vinokurova, E. Khlopovskikh, A. Tychinina, L.Safonova // Key Engineering Materials. 2022. Т. 910 К Е М. С. 529-537.
3. Винокурова И.М. Методы расчета процессов формообразования при электрохимической размерной обработке металлов на основе титана // Совершенствование производства поршневых двигателей для малой авиации: тр. отраслевой науч.-техн. конф. М.: Машиностроение. 2008. С. 115-123.
4. Винокурова И.М., Спиридонов Б.А. Коррозионно-электрохимическое поведение титана, сплава ВТ3-1 и родированного титана // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2008. Т. 4. № 5. С. 53-55.
5. Винокурова И.М., Смоленцев В.П. Определение оптимальных режимов при электрохимической размерной обработке титана и его сплавов с учетом особенностей тепломассопереноса // Изв. вузов Орел ГТУ. Сер. Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2009. № 1/273(559). С. 67-73.
6. Ландау Л.Д., Лившиц Е.М. Электродинамика сплошных сред. Теоретическая физика. М.: Наука. 1982. Т. VIII. 624 с.
7. Смоленцев В.П. Технология электрохимической обработки внутренних поверхностей. Машиностроение. М., 1978. 176 с.
8. Давыдов А. Д., Козак Е. Высокоскоростное электрохимическое формообразование. М.: Наука. 1990. 272 с.
9. Кашеев В. Д. Импульсный метод исследования процессов анодного растворения металлов при высоких плотностях тока / В. Д. Кашеев, Н.С. Меркулова, А.Д. Давыдов // Электродная обработка материалов. № 5. 1966. С. 35-41.
10. Резников А.Н., Резников Л.А. Тепловые процессы в технологических системах: учебник для вузов. М.: Машиностроение. 1990. 288 с.
11. Фрумкин А. И. Электродные процессы (избранные труды). М.: Наука, 1987. 336 с.
12. Westerheide D. E. Изотермический рост пузырей водорода при электролизе / D. E. Westerheide, J. W. Westwater // I. Ch. E. Journal 7(3), 357 (1961).
13. Винокурова И.М., Агафонцев И.В. Моделирование процессов электрохимической обработки с учетом температурных полей // Системы жизнеобеспечения и управления в чрезвычайных ситуациях: межвуз. сб. науч. тр. Воронеж, 2005. Ч. II. С. 222-227.
14. Винокурова И.М., Шалимов Ю.Н. Термокинетические эффекты при анодной обработке титана // Физические проблемы водородной энергетики: тез. докл. седьмой российской конф. С-Пб., 2011. С. 185-186.
15. Патент РФ №2216437 Способ электрохимической обработки / Смоленцев В.П., Газизулин К.М.; опубл. 10.07.2003, Бюл. №32. 8 с.
16. Мандрыкина И.М. Исследование взаимосвязи термокинетических и электрохимических параметров при импульсных режимах обработки титановых сплавов. Дис... Воронеж. 1998. 210 с.
17. Барабошкин А.Н. Происхождение кристаллов в гальваническом режиме. Математическое моделирование / А.Н. Барабошкин, В.А. Исаев, В.Н. Чеботин // Электрохимия. 1981. Том. 17. № 14. с. 483-487.
18. Винокурова И.М., Смоленцев В.П. Математическое описание процессов переноса в турбулентных потоках при электрохимической обработке металлов // Современная электротехнология в промышленности центра России: сб. тр. VIII регион. науч.-техн. конф. Тула: ТулГУ, 2006. С. 22-26.
19. Study of changes in hydrodynamic conditions in electrochemical systems / I.M. Vinokurova, E.E. Khlopovskikh, A.A. Boldyrev, I.V. Vinokurov, L.B. Safonova // AIP Conference Proceedings. International conference on modern trends in manufacturing technologies and equipment. 2022. С. 050082.
20. Study of the features of heat and mass transfer in the interelectrode space during electrochemical processing of metals for the aerospace industry / I.M. Vinokurova, E.E. Khlopovskikh, L.B. Safonova, L.N. Zvyagina // AIP Conference Proceedings. International conference on modern trends in manufacturing technologies and equipment. 2022. С. 050053.

Поступила 14.11.2024; принята к публикации 26.08.2024

#### Информация об авторах

**Винокурова Ирина Михайловна** – канд. техн. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: vinokurovai@bk.ru  
**Бородинна Влада Сергеевна** – студент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: vladusha34@gmail.com

### IDENTIFICATION OF THE FEATURES OF THE PROCESSES IN THE INTERELECTRODE WORKING VOLUME OF THE ELECTROLYTE FOR METALS PRONE TO PASSIVATION PHENOMENA ON THEIR SURFACE

I.M. Vinokurova, V.S. Borodina

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

**Abstract:** the purpose of the study is to develop a model complex for controlling the modes of electrochemical dimensional processing for metals made of titanium, aluminum and their alloys: anodic treatment (removal of metal to size with finishing treatment to form an oxide film) and cathodic treatment (coating of the required thickness). Optimization actions to ensure control of processing and supply of the necessary current modes are presented, as well as boundary parameters for regulating changes in temperature fields in the working volume of the electrolyte of the electrode layers of the electrodes and in the interelectrode gap. The temperature parameters influencing the change in the kinetic parameters of the technological process of electrochemical treatment and the components of the dependencies influencing the changes in the parameters of the electrolyte flow modes (concentration components of the working aqueous electrolyte solution: cationic and anionic composition) are es-



established. A physical model has been developed for modeling the rational use of localization of thermal processes in order to cost-effectively apply the specified current supply modes to the working near-electrode zones of the double electric layer. The criteria for the implementation of the technological process of current density distribution over the electrode surface, taking into account the laws of heat and gas release in the volume of the electrolyte, are established

**Key words:** metal processing, electrolyte, calculation criteria, mechanism of anodic oxidation, working electrodes.

### References

1. Vinokurova I.M., Pluzhnikov I.A., Smolentsev V.P. "The main aspects of determining the dependences of kinetic parameters of anodic treatment when planning an experiment", *Aerospace technologies (Aviakosmicheskiye tekhnologii "AKT -2008")*, proc. of IX All-Russian Scientific and Practical Conference, Voronezh, 2008, pp. 59-63.
2. Vinokurova I., Khlopovskikh E., Tychinina A., Safonova L. "Mathematical modeling of anodic oxidation and cathodic reduction of metals prone to passivation, taking into account the peculiarities of heat and mass transfer in the ieg under pulsed modes", *Key Engineering Materials*, 2022, vol. 910, pp. 529-537.
3. Vinokurova I.M. "Methods for calculating the processes of shaping in electrochemical dimensional processing of metals based on titanium", *Improving the production of piston engines for small aircraft (Sovershenstvovaniye proizvodstva porshnevnykh dvigateley dlya maloy aviatsii)*, proc. of the branch scientific and technical conference, Moscow, Mashinostroyeniye, 2008, pp. 115-123.
4. Vinokurova I.M., Spiridonov B.A. "Corrosion-electrochemical behavior of titanium, VT3-1 alloy and rhodated titanium", *The Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2008, vol. 4, no. 5. pp. 53-55.
5. Vinokurova I.M., Smolentsev V.P. "Determination of optimal modes for electrochemical dimensional processing of titanium and its alloys taking into account the peculiarities of heat and mass transfer", *News of Oryol State Technical University. Series: Fundamental and applied problems of engineering and technology (Izvestiya Orlovskogo GTU. Ser. Fundamental'nyye i priklad'nyye problemy tekhniki i tekhnologii)*, 2009, no. 1/273(559), pp. 67-73.
6. Landau L.D., Livshits E.M. "Electrodynamics of continuous media. Theoretical physics" ("Elektrodinamika sploshnykh sred. Teoreticheskaya fizika"), vol. VIII, Moscow, Nauka, 1982, 624 p.
7. Smolentsev V.P. "Technology of electrochemical treatment of internal surfaces" ("Tekhnologiya elektrokhimicheskoy obrabotki vnutrennikh poverkhnostey"), Moscow, Mashinostroyeniye, 1978, p. 176.
8. Davydov A.D., Kozak E. "High-speed electrochemical shaping" ("Vysokoskorostnoye elektrokhimicheskoye formoobrazovaniye"), Moscow, Nauka, 1990, 272 p.
9. Kashcheev V.D., Merkulova N.S., Davydov A.D. "Pulse method for studying the processes of anodic dissolution of metals at high current densities", *Electrode processing of materials (Elektrodnaya obrabotka materialov)*, no. 5, 1966, pp. 35-41.
10. Reznikov A.N., Reznikov L.A. "Thermal processes in technological systems: a textbook for universities" ("Teplovyye protsessy v tekhnologicheskikh sistemakh: uchebnik dlya vuzov"), Moscow, Mashinostroyeniye, 1990, 288 p.
11. Frumkin A.I. "Electrode processes (selected works)" ("Elektroodnyye protsessy (izbrannyye trudy)", Moscow, Nauka, 1987, 336 p.
12. Westerheide D.E., Westwater J.W. "Isothermal growth of hydrogen bubbles during electrolysis", *I. Ch. E. Journal*, 1961, no. 7(3), p. 357.
13. Vinokurova I.M., Agafontsev I.V. "Modeling of electrochemical treatment processes taking into account temperature fields", *Life support and emergency management systems (Sistemy zhizneobespecheniya i upravleniya v chrezvychaynykh situatsiyakh)*, coll. of scient. works, part II, Voronezh, 2005, pp. 222-227.
14. Vinokurova I. M., Shalimov Yu.N. "Thermokinetic effects during anodic treatment of titanium", *Physical problems of hydrogen energy (Fizicheskiye problemy vodorodnoy energetiki)*, abstracts of reports, Seventh Russian. confer., St. Petersburg, November 21-23, 2011, pp. 185-186.
15. Smolentsev V.P., Gazizulin K.M. "Method of electrochemical treatment" ("Sposob elektrokhimicheskoy obrabotki"), Patent of PF no. 2216437, publ. 10.07.2003, Bul. no. 32, 8 p.
16. Mandrykina I.M. "Investigation of the relationship between thermokinetic and electrochemical parameters in pulsed modes of processing titanium alloys", Dis... Voronezh, 1998, 210 p.
17. Baraboshkin A.N., Isaev V.A., Chebotin V.N. "The origin of crystals in the galvanic mode. Mathematical modeling", *Electrochemistry (Elektrokhiimiya)*, 1981, vol. 17, no. 14, pp. 483-487.
18. Vinokurova I.M., Smolentsev V. P. "Mathematical description of transfer processes in turbulent flows during electrochemical processing of metals", *Modern electrical technology in the industry of the center of Russia (Sovremennaya elektrotekhnologiya v promyshlennosti tsentra Rossii)*, coll. of works, VIII regional scientific and technical conf., Tula, June 1, 2006, Tula:TulGU, pp. 22-26.
19. Vinokurova I.M., Khlopovskikh E.E., Boldyrev A.A., Vinokurov I.V., Safonova L.B. "Study of changes in hydrodynamic conditions in electrochemical systems", *AIP Conference Proceedings. International conference on modern trends in manufacturing technologies and equipment*, 2022, p. 050082.
20. Vinokurova I.M., Khlopovskikh E.E., Safonova L.B., Zvyagina L.N. "Study of the features of heat and mass transfer in the interelectrode space during electrochemical processing of metals for the aerospace industry", *AIP Conference Proceedings. International conference on modern trends in manufacturing technologies and equipment*, 2022, p. 050053.

Submitted 14.11.2024; revised 26.08.2024

### Information about the authors

**Irina M. Vinokurova** – Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: vinokurovai@bk.ru  
**Vlada S. Borodina** – Student, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: vladusha34@gmail.com