

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

# **ВЕСТНИК**

**Воронежского государственного  
технического университета**

**Том 21 № 1 2025 г.**

**Основан в апреле 2000 г.**

## 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. Милокова** – 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», 2025

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. Bashkirev – 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, 2025

12+

## СОДЕРЖАНИЕ

### Информатика, вычислительная техника и управление

Разработка аппаратного и программного обеспечения цифрового тахометра с функциями бортового компьютера	
<b>Г.В. Петрухнова, Д.А. Ерков, К.В. Давлетшин, А.А. Чёлник, И.А. Храповицкий.....</b>	<b>7</b>
Анализ сходимости и устойчивости алгоритма глубокого обучения с подкреплением исполнитель-критик A2C	
<b>В.В. Кашко, С.А. Олейникова.....</b>	<b>12</b>
Разработка веб-приложения для формирования спортивного расписания онлайн	
<b>К.Н. Безуглый, А.В. Барабанов, В.В. Сафронов .....</b>	<b>20</b>
Разработка подсистемы расчета аналитических показателей	
<b>Е.В. Колыхалова, С.Л. Подвальный, Д.К. Проскурин, Т.А. Голикова.....</b>	<b>26</b>
Динамический алгоритм распределения нагрузки между вычислительными ресурсами центра обработки данных	
<b>В.П. Мочалов, Г.В. Слюсарев, Н.Ю. Братченко, Д.В. Гостева.....</b>	<b>34</b>
Метод моделирования электромагнитного поля для правильного расчета асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором	
<b>К.Е. Кононенко, А.В. Кононенко.....</b>	<b>43</b>
Проектирование сетевых хранилищ на встраиваемых компьютерах малого потребления архитектуры ARM	
<b>Я.В. Любченко, Р.А. Панков, А.В. Бредихин, В.В. Сокольников .....</b>	<b>48</b>
Разработка модуля управления мониторингом и статистикой запасов в кроссплатформенных приложениях на основе Flutter	
<b>Ш.М. Иномжонов, В.Ф. Барабанов, Н.И. Гребенникова, А. Ю. Деревягин.....</b>	<b>53</b>
Сегментация мешей для выполнения булевых операций над мешами	
<b>Г.В. Петрухнова, С.Л. Подвальный, А.С. Точилин.....</b>	<b>60</b>
Разработка способа балансировки нагрузки в распределенных системах обработки данных	
<b>Аунг Чжо Мью, Е.М. Портнов, А.С. Волков, М.В. Слюсарь, А.В. Потапов.....</b>	<b>65</b>

### Радиотехника и связь

Исследование влияния параметров LoRa-модуляции на помехоустойчивость канала связи	
<b>М.А. Ромашенко, Д.В. Васильченко, Р.С. Сухомлинов, К.М. Черкашин.....</b>	<b>73</b>
Оптимизации оценки качества полупроводниковых пластин с помощью нейротехнологий CNN	
<b>О.Н. Чирков, А.Б. Антиликаторов, К.М. Шкаровский, М.Н. Тамбовцев.....</b>	<b>81</b>
Методика управления параметрами диаграммы направленности линейной фазированной антенной решётки	
<b>Е.Н. Буйлов, А.С. Солонар, Ю.Н. Егоров.....</b>	<b>88</b>
Влияние компоновки и материалов на эффективность проектирования и оптимизацию параметров силовых трансформаторов	
<b>И.С. Бобылкин, О.Н. Чирков, А.А. Кузёмкин.....</b>	<b>98</b>
Антенная решетка на основе последовательного массива патч-антенн	
<b>С.М. Фёдоров, О.М. Пещерин.....</b>	<b>103</b>
СФ-блоки приемника и передатчика LVDS для технологического процесса 180 нм	
<b>А.В. Белявцев, А.В. Русанов, Д.О. Лялин.....</b>	<b>107</b>

Разработка ММО-антенной системы с тороидальной диаграммой направленности для помехоустойчивых каналов <b>Е.Д. Егорова, Е.А. Ищенко, Ю.Г. Пастернак, Д.К. Проскурин, С.М. Фёдоров.....</b>	<b>114</b>
LDPC-декодер на базе ПЛИС со сверхдлинными кодами <b>И.В. Свиридова, И.В. Остроумов, О.Н. Чирков.....</b>	<b>121</b>
Сравнительный анализ эффективности выявления онкологических новообразований молочной железы с использованием различных типов антенн <b>Е.А. Ищенко, А.И. Сукачев, Р.В. Кузьменко, Е.Д. Егорова.....</b>	<b>127</b>

### **Машиностроение и машиноведение**

Состояние современного уровня развития технологических процессов и оборудования кузнечно-штамповочного производства <b>С.Л. Новокшенов, В.В. Куц, Е.В. Смоленцев.....</b>	<b>134</b>
Оценка прогрева листовой металлозаготовки при «холодном» формовании в производстве труб большого диаметра <b>А.В. Рязских, В.Ф. Селиванов, А.А. Хвостов, Р.Е. Орлов, А.Д. Слободин.....</b>	<b>148</b>
Анализ особенностей формирования защитных покрытий в машиностроительном производстве <b>А.В. Норман, А.П. Суворов, Ю.С. Золототрубова, Э.И. Воробьев.....</b>	<b>154</b>
Анализ влияния параметров технологических процессов на производительность оборудования кузнечно-штамповочного производства <b>С.Л. Новокшенов, В.В. Куц, С. С. Юхневич.....</b>	<b>161</b>



## CONTENTS

## Informatics, computer engineering and control

Development of hardware and software for a digital tachometer with on-board computer functions <b>G.V. Petrukhnova, D.A. Erkov, K.V. Davletshin, A.A. Chelnik, I.A. Khrapovitsky.....</b>	<b>7</b>
Investigation of factors affecting the convergence and stability of a deep reinforcement learning algorithm A2C performer-critic <b>V.V. Kashko, S.A. Oleinikova.....</b>	<b>12</b>
Development of a web application for creating a sports schedule online <b>K.N. Bezuglyi, A.V. Barabanov, V.V. Safronov.....</b>	<b>20</b>
Development of a subsystem for calculation of analytical indicators <b>E.V. Kolykhalova, S.L. Podvalny, D.K. Proskurin, T.A. Golikova.....</b>	<b>26</b>
Dynamic algorithm for load distribution between computing resources of a data processing center <b>V.P. Mochalov, G.V. Slyusarev, N.Yu. Bratchenko, D.V. Gosteva.....</b>	<b>34</b>
Electromagnetic field simulation method for correct calculation of squirrel cage induction motor <b>K.E. Kononenko, A.V. Kononenko.....</b>	<b>43</b>
Designing network storage on small-consumption embedded of arm computers <b>Ya.V. Lyubchenko, R.A. Pankov, A.V. Bredikhin, V.V. Sokolnikov.....</b>	<b>48</b>
Analysis of methods and development of a module for inventory management with monitoring and statistics in cross-platform applications based on Flutter <b>Sh.M. Inomzhonov, V.F. Barabanov, N.I. Grebennikova, A.Yu. Derevyagin.....</b>	<b>53</b>
Mesh segmentation for boolean operations <b>G.V. Petrukhnova, S.L. Podvalny, A.S. Tochilin.....</b>	<b>60</b>
Development of a method of load balancing in distributed data processing systems <b>Aung Kyaw Myo, E.M. Portnov, A.S. Volkov, M.V. Slyusar, A.V. Potapov.....</b>	<b>65</b>

## Radio engineering and communication

Investigation of the influence of LoRa modulation parameters on the noise immunity of the communication channel <b>M.A. Romashchenko, D.V. Vasilchenko, R.S. Sukhomlinov, K.M. Cherkashin.....</b>	<b>73</b>
Optimization of semiconductor wafer quality assessment using CNN neurotechnologies <b>O.N. Chirkov, A.B. Antilikatorov, K.M. Shkarovsky, M.N. Tambovtsev.....</b>	<b>81</b>
Methodology for controlling the parameters of the directional diagram of a linear phased antenna array <b>E.N. Builov, A.S. Solonar, Yu.N. Egorov.....</b>	<b>88</b>
Investigation of the effect of compounds on the characteristics of a planar transformer in a power supply module <b>I.S. Bobylkin, O.N. Chirkov, A.A. Kuzemkin.....</b>	<b>98</b>
Antenna array based on a serial array of patch antennas <b>S.M. Fedorov, O.M. Peshcherin.....</b>	<b>103</b>
LVDS receiver and transmitter blocks for 180 nm process <b>A.V. Belyavtcev, A.V. Rusanov, D.O. Lyalin.....</b>	<b>107</b>
Development of a MIMO antenna system with a toroidal radiator pattern for interference-reliable channels <b>E.D. Egorova, E.A. Ishchenko, Yu.G. Pasternak, D.K. Proskurin, S.M. Fedorov.....</b>	<b>114</b>

LDPC-FPGA-based decoder with ultra-long codes <b>I.V. Sviridova, I.V. Ostroumov, O.N. Chirkov.....</b>	<b>121</b>
Comparative analysis of the efficiency of detection of breast cancer neoplasms using different types of antennas <b>E.A. Ishchenko, A.I. Sukachev, R.V. Kuzmenko, E.D. Egorova.....</b>	<b>127</b>
<b>Mechanical engineering and science of machines</b>	
Current state of development of technological processes and equipment for forging and stamping production <b>S.L. Novokshchenov, V.V. Kutz, E.V. Smolentsev.....</b>	<b>134</b>
Evaluation of heating of sheet metal workpipe during «cold» molding in the production of large-diameter pipes <b>A.V. Ryazhskikh, V.F. Selivanov, A.A. Khvostov, R.E. Orlov, A.D. Slobodin.....</b>	<b>148</b>
Analysis of the features of the formation of protective coatings in machine-building production <b>A.V. Norman, A.P. Suvorov, Yu.S. Zolototrubova, E.I. Vorobyov .....</b>	<b>154</b>
Analysis of the influence parameters of volumetric stamping technological processes on the productivity of forging and stamping production equipment <b>S.L. Novokshchenov, V.V. Kutz, S.S. Yukhnevich.....</b>	<b>161</b>

## **Информатика, вычислительная техника и управление**

DOI 10.36622/1729-6501.2025.21.1.001

УДК 004.05: 004.7: 004.9

### **РАЗРАБОТКА АППАРАТНОГО И ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЦИФРОВОГО ТАХОМЕТРА С ФУНКЦИЯМИ БОРТОВОГО КОМПЬЮТЕРА**

**Г.В. Петрухнова, Д.А. Ерков, К.В. Давлетшин, А.А. Чёлник, И.А. Храповицкий**

**Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия**

**Аннотация:** представлены структурная схема и возможности тахометра с функциями бортового компьютера. Показана актуальность разработки данного устройства. Представляемый тахометр обладает следующими возможностями: измерение частоты генератора и приведение ее к частоте вращения коленчатого вала; индикация частоты с помощью семисегментного индикатора; индикация частоты с помощью светодиодной линейки; измерение и индикация температуры трех зон (улица, салон, двигатель); энергонезависимые часы; измерение напряжения сети; регулировка яркости индикаторов; ряд потребительских функций (сигнализация о высоких температурах двигателя и др.). Для реализации тахометра использован микроконтроллер ATmega88 в корпусе типа TQFP. Разрабатываемый программный модуль обеспечивает следующие режимы работы устройств и порядок их переключения: Тахометр → Температура внутри → Температура снаружи → Температура двигателя → Напряжение → Часы. Управляющая программа микроконтроллера выполняет и поддерживает следующие функции устройства: тахометр; часы; измерение температуры двигателя; измерение температуры улицы; измерение температуры салона; измерение напряжения аккумуляторной батареи. Программное обеспечение реализовано на языке C в среде AVR Studio. Обмен данными между микроконтроллером и микросхемой реального времени организован с использованием протокола I2C. Шина SPI использована для программирования микроконтроллера. Шина 1-Wire позволяет связать интегральные датчики температуры DS1820 с микроконтроллером через последовательный порт. Представлены ограничения и преимущества разработанного устройства

**Ключевые слова:** цифровой тахометр, двигатель, аккумуляторная батарея, бортовой компьютер, микроконтроллер, управляющая программа микроконтроллера, цифровой сигнал, АЦП, датчик

#### **Введение**

В настоящее время для создания новых систем целесообразно разрабатывать индивидуальные исполнительные и измерительные элементы, с учетом конкретных условий использования [1]. Современный автомобиль оборудован различными электронными системами, от которых водитель получает информацию о состоянии узлов и агрегатов автомобиля, а также о различных факторах окружающей среды. При проектировании панели приборов автомобиля нужно тщательно продумывать, какими способами высвечивать информацию для водителя и какие средства для этого использовать [2].

Одной из основных функций цифровых тахометров является предоставление информации о скорости вращения коленчатого вала двигателя в минуту. Для точного определения момента переключения передач водителю необходимо знать, с какой скоростью вращается

двигатель. Поскольку двигатели внутреннего сгорания имеют невысокий КПД, то для получения оптимальной производительности мотора требуется контролировать вращение коленчатого вала в только определенном диапазоне.

Мониторинг оборотов двигателя с помощью тахометра позволяет избегать перегрузок и излишних оборотов, что может привести к поломкам и износу двигателя. Тахометр помогает водителю контролировать скорость и выбирать правильную передачу для обеспечения безопасного и эффективного движения. Таким образом, тахометры играют важную роль в обеспечении безопасности, эффективности и долговечности автомобиля, предоставляя водителям необходимую информацию о работе двигателя.

Цифровые тахометры представляют собой электронные устройства, которые отображают информацию на цифровом табло. Они могут быть интегрированы в приборную панель автомобиля или установлены отдельно. Современные цифровые тахометры состоят из цифро-аналогового преобразователя и нескольких датчиков, которые обеспечивают высокую точность измерений [3].

Цифровые тахометры с дополнительными функциями имеют несколько преимуществ: измерение температур, защита от высокого тока и напряжения, работа от батареи при нестабильном питании.

Дополнительные функции цифровых тахометров по измерению температур (среды, двигателя, салона) позволяют водителям отслеживать и контролировать температурные параметры, что особенно важно для мониторинга работы двигателя и обеспечения комфортных условий в салоне.

Функции защиты от высокого тока и напряжения помогают предотвратить повреждение тахометра и других систем в случае возникновения электрических сбоев или перегрузок.

Возможность работы цифровых тахометров от батареи при нестабильном питании от источника напряжения обеспечивает непрерывную работу при возможных сбоях в электросети или при работе на стоянке без запущенного двигателя.

Эти дополнительные функции делают цифровые тахометры наиболее универсальными и полезными в автомобилях, обеспечивая не только информацию о скорости вращения двигателя, но и контроль за температурой, защиту от электрических сбоев и непрерывную работу в различных условиях.

Цель данной работы – представить структуру и возможности цифрового тахометра с функциями бортового компьютера.

### Обзор аналогов

В настоящее время самыми популярными электронными тахометрами являются VDO (Value Determination Operation): VDO 333 156 Tachometer Gauge, а также Autometer: Autometer 233904 Autogage Pedestal-Mount Tachometer. Основными преимуществами электронных тахометров над их механическими аналогами являются более высокая точность, возможность добавить больший функционал, такой как смена подсветки в различное время суток или в зависимости от желаний пользователя, а также предупреждение о превышении оборотов, подсказки для более эффективного управления транспортным средством в конкретный момент времени. Также эти тахометры используют электронику для измерения оборотов двигателя и отображения их на приборной панели, что позволяет добавить такой функционал, как измерение температуры двигателя,

или любого другого узла транспортного средства, отображение скорости автомобиля. Однако такие устройства подвержены электромагнитным помехам, что может негативно отразиться на работе этих устройств.

Механические тахометры являются более надежным и долговечным устройством, не требуют электрического питания и не подвергаются электромагнитным помехам. Однако на этапе установки являются более сложными и требуют большей квалификации от механика, а также большего числа временных затрат и усилий.

VDO 333 156 Tachometer Gauge предназначен для измерения оборотов двигателя. Одной из главных особенностей является функция предупреждения водителя, что позволяет контролировать обороты двигателя и не допустить каких-либо проблем, связанных с его эксплуатацией. Главным минусом данного решения является сложность установки, а также зависимость от данных, которые приходят с электронных компонентов, и которые, в свою очередь, могут быть подвержены сбоям или неисправностям. Кроме того, VDO 333 156 Tachometer Gauge обладает компактным и прочным корпусом, что обеспечивает надежную защиту от вибраций и внешних воздействий. Это устройство позволяет водителям и механикам быстро и точно оценивать работу двигателя, что способствует поддержанию его оптимальной производительности и позволяет водителю контролировать работу двигателя в реальном времени. Кроме того, этот тахометр имеет компактный и прочный корпус, что обеспечивает надежную защиту от вибраций и внешних воздействий, однако также как и предыдущий вариант имеет проблемы со сложностью установки, а также зависимостью от электронных компонентов. Также некоторым пользователям может не понравиться внешний вид устройства. Внешний вид и стиль могут быть важными факторами при выборе автомобильных аксессуаров, и если важна эстетика, то этот тахометр может не соответствовать предпочтениям пользователя. Стоит отметить, что функции этого тахометра ограничены и уступают устройству рассмотренному выше.

Autometer 233904 Autogage Pedestal-Mount Tachometer предназначен преимущественно для измерения оборотов двигателя. Если требуются дополнительные функции, такие как измерение скорости или температуры, то может потребоваться другое устройство или модель тахометра.

### Структурная схема и возможности цифрового тахометра с функциями бортового компьютера

Назначение разрабатываемой системы – обеспечить измерение количества оборотов коленчатого вала дизельного двигателя с достаточной точностью. Структурная схема тахометра представлена на рис. 1.

Данное устройство обладает следующими возможностями:

- измерение частоты генератора и приведение ее к частоте вращения коленчатого вала;
- индикация частоты с помощью семи-сегментного индикатора;
- индикация частоты с помощью светодиодной линейки;
- измерение и индикация температуры трех зон (улица, салон, двигатель);
- энергонезависимые часы;
- измерение напряжения сети;
- регулировка яркости индикаторов;
- ряд потребительских функций (сигнализация о высоких температурах двигателя и т.п.).

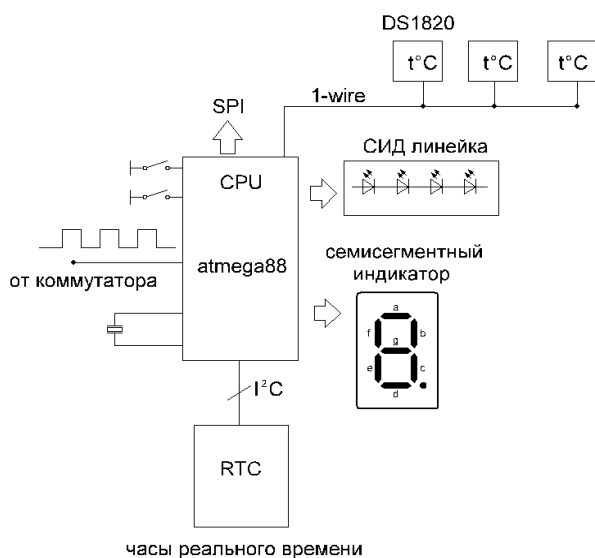


Рис. 1. Структурная схема разрабатываемого тахометра

В составе данной схемы имеется микроконтроллер с разработанной управляющей программой, семи-сегментный индикатор, светодиодная линейка на 14 диодах, три микросхемы – термометр типа DS1820 [4], микросхема реального времени DS1307 [5] и две кнопки управления.

Для управления этой схемой использованы 8-битный микроконтроллер с внутренним АЦП и поддержкой шин I2C, 1-Wire, SPI, обладающий достаточным объемом FLASH памяти для

размещения управляющей программы. Под него должны быть доступное программное обеспечение и низкая цена. Для реализации тахометра использован микроконтроллер ATMega88 [6] в корпусе типа TQFP.

Принцип определения частоты вращения коленчатого вала основан на измерении периода (частоты) импульсов прерывания, поступающих в микроконтроллер от фазы штатного автомобильного генератора. При этом частота сигнала на фазной обмотке связана с частотой вращения коленвала следующим выражением:

$$f = (n * N / 60) * (R_k / R_a) \quad (1)$$

или

$$n = f * 60 / (N * R_k / R_a) \quad (2)$$

где  $f$  – частота сигнала на фазной обмотке, Гц;

$N$  – количество полюсов ротора генератора;

$n$  – частота вращения коленвала, об/мин;

$R_k$  – радиус шкива коленвала, мм;

$R_a$  – радиус шкива генератора, мм.

Электрическая схема тахометра состоит из следующих узлов:

- центрального микроконтроллера ATMega88;
- светодиодной шкалы, подключаемой через регистры;
- дисплея на базе семи-сегментных индикаторов;
- трех интегральных датчиков температуры DS1820 [4], поскольку подобная микросхема содержит интегрированный цифровой термометр, откалиброванный в заводских условиях;
- микросхемы реального времени DS1307 [5], поскольку данная микросхема доступна на нашем отечественном рынке микропроцессорных средств и имеет достаточно низкую стоимость;
- стабилизатора напряжения.

Программное обеспечение реализовано на языке C в среде AVR Studio 5 [7]. Обмен данными между микроконтроллером и микросхемой реального времени организован с использованием протокола I2C.

Шина SPI использована для программирования микроконтроллера [8]. Шина 1-Wire позволяет связать интегральные датчики температуры DS1820 [4] с микроконтроллером через последовательный порт.

Управляющая программа микроконтроллера выполняет и поддерживает следующие функции устройства:

- тахометр;
- часы;
- измерение температуры двигателя;



- измерение температуры улицы;
- измерение температуры салона;
- измерение напряжения аккумуляторной батареи.

Управление устройством производится с помощью двух кнопок – кнопкой «Режим» и кнопкой «Установка». Каждое нажатие любой из кнопок подтверждается звуковым сигналом зуммера.

Разрабатываемый программный модуль обеспечивает следующие режимы работы устройств и порядок их переключения:

Тахометр → Температура внутри →  
Температура снаружи →  
Температура двигателя → Напряжение →  
Часы.

Данное устройство может обладать рядом ограничений по сравнению с существующими моделями, а именно:

- более высокая цена, поскольку расширенный функционал устройства может повлиять на его стоимость, что может быть недоступно для некоторых потенциальных пользователей;

- большая сложность в использовании, потому что дополнительные функции могут сделать устройство сложнее в использовании для некоторых пользователей, требующих дополнительных инструкций;

- повышенное потребление энергии, из-за добавления новых функций может увеличиться энергопотребление устройства.

Однако стоит отметить ряд преимуществ, которыми обладает данное устройство:

- универсальность применения;
- высокая точность измерений;
- расширенный функционал.

Представленный тахометр можно применять в системах других областей, таких как авиация, промышленность, автоспорт. Такой тахометр с дополнительными функциями может быть использован в авиации для мониторинга параметров двигателя и окружающей среды. В промышленности устройство поможет контролировать работу различных механизмов и оборудования. В автоспорте или других видах спорта, где важно контролировать обороты

двигателя или температуру, такое устройство также будет полезным инструментом.

## Заключение

Разработанный тахометр представляет собой универсальное устройство, способное эффективно выполнять не только основные функции измерения оборотов двигателя, но и дополнительные функции, значительно расширяющие его возможности.

Основные преимущества разработанного тахометра включают в себя точность измерений, широкий диапазон измеряемых параметров, простоту использования и надежность работы. Интеграция функций измерения температуры и отображения времени делает устройство более удобным и функциональным для пользователей.

Дальнейшее развитие данного проекта может включать в себя улучшение точности измерений, расширение диапазона измеряемых параметров, а также добавление новых функций и возможностей. Результаты данного исследования могут быть полезны для разработки более совершенных и универсальных автомобильных приборов, способных обеспечить более комфортное и безопасное использование автомобилей.

## Литература

1. Баранов М.В., Илюхин Ю.В., Корчагин О.А. Модуль измерения угла и скорости движения мехатронных систем на основе конструктивного и алгоритмического объединения индукционного датчика и тахомашины // Вестник МГТУ «Станкин». 2021. № 3 (58). С. 62-69.
2. Обзор существующих конструкций комбинаций приборов и их влияние на информативность управления автомобилем / Р.Ю. Илимбетов, Е.А. Сенченко, Д.В. Астафьев, Г.Н. Салимоненко // АПК России. 2015. Т. 74. С. 66-70.
3. Иванов И.И. Автомобильные приборы и их эксплуатация. М.: Транспорт, 2018. 256 с.
4. DS18B20: Программируемый цифровой термометр. Maxim Integrated, 2003. 20 с.
5. DS1307: Часы реального времени с интерфейсом I<sup>2</sup>C. Maxim Integrated, 2002. 15 с.
6. ATmega48A/PA/88A/PA/168A/PA/328/P: Полное техническое описание. Atmel Corporation, 2014. 450 с.
7. Смирнов С.С. Программирование микроконтроллеров AVR в среде AVR Studio. СПб.: Додэка XXI, 2012. 320 с.
8. Петров П.П. Интерфейсы связи в микроконтроллерах. М.: Солон-Пресс, 2017. 176 с.

Поступила 25.01.2025; принята к публикации 28.02.2025

## 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

**Ерков Дмитрий Алексеевич** – студент магистратуры, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: erkov\_dmitriy@mail.ru

**Давлетшин Кирилл Витальевич** – студент магистратуры, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: kirichka27@gmail.com

**Чёлник Александр Александрович** – студент магистратуры, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: chelnik.chaa@yandex.ru

**Храповицкий Илья Александрович** – студент бакалавриата, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: defaultdfhack@gmail.com

## DEVELOPMENT OF HARDWARE AND SOFTWARE FOR A DIGITAL TACHOMETER WITH ON-BOARD COMPUTER FUNCTIONS

G.V. Petrukhnova, D.A. Erkov, K.V. Davletshin, A.A. Chelnik, I.A. Khrapovitsky

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

**Abstract:** the paper presents the structural scheme and capabilities of a tachometer with the functions of an on-board computer. The relevance of the development of this device is shown. The presented tachometer has the following features: measuring the frequency of the generator and bringing it to the speed of rotation of the crankshaft; frequency indication using a seven-segment indicator; frequency indication using an LED ruler; temperature measurement and indication of three zones (street, interior, engine); non-volatile clock; measurement of mains voltage; brightness adjustment of indicators; a number of consumer functions (alarm about high engine temperatures, etc.). An ATmega88 microcontroller in a TQFP type enclosure was used to implement the tachometer. The software module under development provides the following operating modes of the devices and the order of their switching: Tachometer → Temperature inside → Temperature outside → Engine temperature → Voltage → Clock. The microcontroller's control program performs and supports the following device functions: tachometer; clock; engine temperature measurement; outdoor temperature measurement; interior temperature measurement; battery voltage measurement. The software is implemented in the C language in the AVR Studio environment. The data exchange between the microcontroller and the real-time chip is organized using the I2C protocol. The SPI bus is used for programming the microcontroller. The 1-Wire bus allows the DS1820 integrated temperature sensors to be connected to the microcontroller via a serial port. The limitations and advantages of the developed device are presented

**Key words:** digital tachometer, engine, battery, on-board computer, microcontroller, microcontroller control program, digital signal, ADC, sensor

### References

1. Baranov M.V., Ilyukhin Yu.V., Korchagin O.A. "Module for measuring the angle and speed of movement of mechatronic systems based on the constructive and algorithmic combination of an induction sensor and a tachomachine", *The Bulletin of MSTU "Stankin"*, 2021, no. 3 (58), pp. 62-69.
2. Ilimbetov R.Yu., Senchenko E.A., Astafyev D.V., Salimonenko G.N. "Review of existing instrument cluster designs and their impact on the information content of vehicle control", *AIC of Russia*, 2015, vol. 74, pp. 66-70.
3. Ivanov I.I. "Automobile devices and their operation", Moscow, Transport, 2018, 256 p.
4. "DS18B20: Programmable Digital Thermometer", Maxim Integrated, 2003, 20 p.
5. "DS1307: Real-time clock with I<sup>2</sup>C interface", Maxim Integrated, 2002, 15 p.
6. "ATmega48A/PA/88A/PA/168A/PA/328/P: Complete Data Sheet", Atmel Corporation, 2014, 450 p.
7. Smirnov S.S. "Programming AVR microcontrollers in the AVR Studio environment", St. Petersburg, Dodeka XXI, 2012, 320 p.
8. Petrov P.P. "Communication interfaces in microcontrollers", Moscow, Solon-Press, 2017, 176 p.

Submitted 25.01.2025; revised 28.02.2025

### 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: gvpetrukhnova@mail.ru

**Dmitry A. Erkov** – Undergraduate Student, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: erkov\_dmitriy@mail.ru

**Kirill V. Davletshin** – Undergraduate Student, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: kirichka27@gmail.com

**Alexander A. Chelnik** – Undergraduate Student, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: chelnik.chaa@yandex.ru

**Ilya A. Khrapovitsky** – Undergraduate Student, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: defaultdfhack@gmail.com

## АНАЛИЗ СХОДИМОСТИ И УСТОЙЧИВОСТИ АЛГОРИТМА ГЛУБОКОГО ОБУЧЕНИЯ С ПОДКРЕПЛЕНИЕМ ИСПОЛНИТЕЛЬ-КРИТИК A2C

В.В. Кашко, С.А. Олейникова

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

**Аннотация:** способность алгоритма глубокого обучения с подкреплением к сходимости и устойчивому функционированию является залогом качественного выполнения возложенных на него задач. Непредсказуемость и многофакторность окружающего мира налагают серьезные ограничения, связанные с существованием корреляции между результатом выполнения и множеством параметров метода, каждый из которых оказывает определенное, но в большинстве случаев непредсказуемое воздействие. В контексте прикладных задач данный факт проявляется в сложности выявления и настройки значимых показателей алгоритма, способных гарантировать стабильное и устойчивое функционирование. Использование глубокого обучения с подкреплением в реальных приложениях подразумевает online взаимодействие с окружающей средой. Применение аппарата нейронных сетей для обобщения входных данных сопряжено с увеличением числа факторов и возрастанием сложности анализа системы. Объектом исследования являлся агент, реализующий метод глубокого обучения с подкреплением Advantage Actor Critic или A2C (исполнитель-критик). В качестве предмета исследования рассматривались факторы, влияющие на сходимость и устойчивость функционирования соответствующего алгоритма. Агент, помещенный в среду OpenAi gym CartPole-v0, в процессе решения задачи стабилизации перевёрнутого маятника, в определённый момент времени подвергался выборочному изменению конкретного параметра при постоянстве значений остальных. В результате были получены графики распределения суммарного вознаграждения за указанное количество эпизодов, используемые в качестве метрики качества, демонстрирующей влияние предпринятого изменения. Они позволили исследовать сходимость и устойчивость алгоритма A2C и выявить факторы, влияющие на эти характеристики

**Ключевые слова:** глубокое обучение с подкреплением, исполнитель-критик, нейронные сети, устойчивость алгоритма, гиперпараметры

### Введение

Использование самообучающихся алгоритмов для решения прикладных задач открывает огромные возможности для различных областей науки и техники. Одной из наиболее гибких и перспективных методологий является применение обучения с подкреплением (ОП) [1 – 5]. Взаимодействуя с окружающей средой эпизодически или непрерывно, агент корректирует собственное поведение, используя сгенерированные сигналы вознаграждения. На основании полученного опыта формируется стратегия принятия решений, способствующая достижению поставленных перед агентом целей. Самые первые табличные варианты алгоритмов характеризуются отличными показателями сходимости к оптимальной политике, но обладают весомым недостатком, именуемым «проклятие размерности», что значительно ограничивает их применение в контексте реальных приложений, где количество возможных состояний окружающей среды либо очень большое, либо вовсе неопределённое [1]. В качестве решения проблемы были применены методы аппроксимации функции ценности, что позволило обобщить

пространство состояний, но наложило дополнительные трудности, связанные с обеспечением устойчивой сходимости и настройкой агента. Аппарат нейронных сетей позволил расширить возможности алгоритмов ОП, добавив выявление нелинейных зависимостей, что породило множество современных глубоких самообучающихся методов, способных взаимодействовать с неограниченным количеством состояний [6 – 9]. Рассматривая основание, на котором строится принятие решения агентом, выделяются *ценностные алгоритмы*, основанные на функции ценности состояний (состояний-действий), и *стратегические*, использующие обученную параметрическую политику [4]. Ценностные алгоритмы в значительной степени уступают семейству методов градиента стратегии. Сравнительный анализ подробно представлен в [1, 2, 5]. Несмотря на это, методы градиента стратегии и функции ценности способны сосуществовать совместно, порождая целый класс гибридных алгоритмов исполнитель-критик [1 – 5]. Стратегические методы имеют существенный недостаток, проявляющийся в низкой скорости обучения и возрастании дисперсии величины суммарного дохода с увеличением длины эпизода [4]. В качестве решения



данной проблемы к аппроксиматору, отвечающему за выбор действий, который именуется как «исполнитель», был добавлен аппроксиматор, предсказывающий значение функции ценности состояния – «критик». Алгоритм исполнитель-критик обладает очень важными свойствами. Благодаря использованию бутстреппинга [1], данный метод способен обучаться на неполных траекториях, что делает возможным его применение к неэпизодическим задачам. В качестве объекта исследования был использован алгоритм исполнитель-критик Advantage Actor Critic или A2C. Главной целью данной работы является выявление основных факторов, оказывающих влияние на стабильность функционирования и сходимость соответствующего глубокого метода ОП.

### 1. Определение основных факторов

С точки зрения способа генерации опыта алгоритмы обучения с подкреплением подразделяются на *методы с единой и разделённой стратегией* [1 - 5]. Первым свойственно несмещённое значение случайной величины, характеризующей суммарный доход агента за эпизод (за горизонт для непрерывного случая) при высокой дисперсии. Вторые, напротив, обладают смещённым математическим ожиданием при малой амплитуде колебаний тотального вознаграждения. Для области обучения с подкреплением и аппроксимацией характерна так называемая «смертельная триада» – совокупность характеристик метода, оказывающих прямое воздействие на сходимость и устойчивость [1, 2]. К ним относятся: *принадлежность к алгоритмам с разделённой стратегией; наличие аппроксимации; бутстреппинг*. При совпадении всех выше перечисленных критериев возникают большие трудности со стабилизацией работы метода. Для анализа факторов, влияющих на сходимость и устойчивость, был выбран A2C – алгоритм с единой стратегией, аппроксимацией и бутстреппингом (критик). Данное решение позволяет сосредоточиться на гиперпараметрах алгоритма и архитектуре аппроксимирующей нейронной сети, исключая влияние способа получения опыта на конечный результат. С проблематикой «смертельной триады» подробнее можно ознакомиться в [1, 2]. Поскольку нейронные сети используются в качестве аппроксиматоров, то сходимость и устойчивость глубоких методов обучения с подкреплением напрямую зависит от параметров, оказывающих влияние на спо-

собность сети к обучению [10]. В контексте данного исследования рассматривается воздействие следующих факторов на функционирование алгоритма исполнитель-критик:

- коэффициент скорости обучения;
- коэффициент обесценивания;
- функция активации скрытых слоёв;
- архитектура сети исполнитель-критик;
- количество глубоких слоёв;
- применение dropout регуляризации к скрытым слоям сети исполнитель-критик.

### 2. Планирование эксперимента для исследования сходимости и устойчивости алгоритма A2C

В основе функционирования агента в рамках данного исследования лежит решение задачи стабилизации перевёрнутого маятника [1]. Для получения опыта агентом использовалась окружающая среда OpenAI gym CartPole-v0, являющаяся эпизодической с горизонтом, равным 200 шагов. Завершение эпизода происходит в случае отклонения маятника на угол, больший допустимого от вертикальной оси, при падении, либо при достижении указанного горизонта. За каждый шаг агент получает вознаграждение от среды в размере 1. Основная задача заключается в удержании баланса на протяжении 200 шагов за каждый эпизод. Для генерации экспериментальных данных был реализован алгоритм A2C на языке Python 3 с использованием фреймворка глубокого обучения PyTorch.

Опишем эксперимент, предназначенный для анализа факторов, влияющих на сходимость и устойчивость алгоритма A2C. Для начала потребовалось сформировать отправную точку – реализовать алгоритм в минимальной конфигурации. При этом стоило учитывать архитектуру сети исполнитель-критик, которая на начальном этапе содержала один общий скрытый слой. При стартовом наборе характеристик метода проводилось рассмотрение влияния следующих параметров: коэффициент скорости обучения, коэффициент обесценивания, функция активации, количество нейронов скрытого слоя. На втором этапе исследований нейронная сеть исполнитель-критик была расширена до сети с двумя и тремя общими скрытыми слоями. При данной конфигурации вновь рассматривалось оказываемое влияние ранее обозначенных параметров. Поскольку сеть приобрела многослойный вид, стоило опреде-

лить воздействие применения dropout регуляризации на конечный результат. В большинстве источников, для лучшей сходимости алгоритма рекомендуется использовать архитектуру сети исполнитель-критик с общими скрытыми слоями [2 – 5]. Для экспериментального подтверждения соответствующего факта, в контексте данной работы были рассмотрены эффекты, оказываемые различными способами конфигурации аппроксиматора исполнитель-критик на качество функционирования агента.

### 3. Практические результаты

#### 3.1. Однослойная сеть исполнитель-критик

В качестве отправной точки рассматривался алгоритм с одним скрытым слоем аппроксимирующей сети, размер которого со-

ставлял 128 нейронов с функцией активации  $\text{relu}$ . Коэффициенты обесценивания и количество эпизодов равны соответственно 0.9 и 200. В первой серии экспериментов определялось влияние значения коэффициента скорости обучения на функционирование алгоритма A2C. Рассматривались следующие значения: 0.005, 0.03 и 0.1. Графики полученного распределения суммарного вознаграждения для скоростей обучения 0.005, 0.03 и 0.1 соответственно представлены на рис. 1а, 1б и 1с.

Согласно рис. 1а, при малом значении коэффициента скорости обучения, алгоритм не успевает скорректировать весовые коэффициенты нейронной сети исполнитель-критик, что приводит к ошибкам предсказания, поскольку аппроксиматор на момент принятия решения является недостаточно обученным.

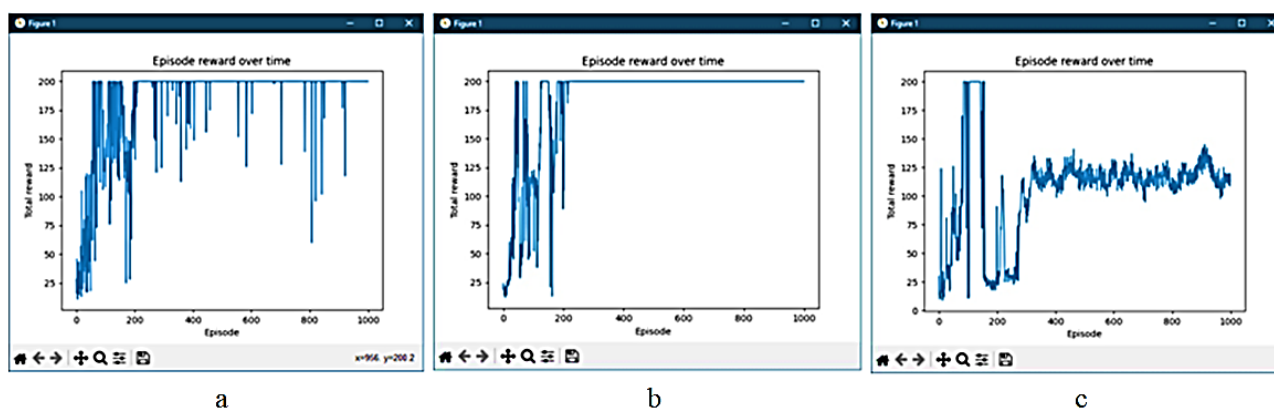


Рис. 1. Оказываемое влияние коэффициента скорости обучения на функционирование алгоритма A2C:  
а – скорость обучения 0.005; б – скорость обучения 0.03; с – скорость обучения 0.1

Рис. 1с демонстрирует эффект переобучения, вследствие которого алгоритм расходится и более не способен стабильно достичь максимального значения суммарного вознаграждения за эпизод. Согласно рис. 1б, величина скорости обучения, равная 0.03 является оптимальной для данной конфигурации алгоритма, поскольку график распределения суммарного дохода демонстрирует стабильную сходимость к максимальному значению суммарной ценности за эпизод. Исходя из этого, для проведения последующих экспериментов, для случая с одним скрытым слоем, было использовано значение соответствующего параметра равное 0.03 в качестве эталонного.

Следующая серия опытов заключалась в определении оказываемого эффекта коэффициента обесценивания на распределение суммарного дохода. В [1] сказано, что с уменьшением значения соответствующего параметра, алгоритм становится более «близоруким», то

есть ориентированным на максимизацию текущего вознаграждения. К сожалению, в источнике не представлена наглядная демонстрация оказываемого эффекта. На рис. 2а, 2б и 2с продемонстрированы полученные графики распределения суммарного дохода при значениях коэффициента обесценивания, равных 0.9, 0.95 и 0.5 соответственно.

На рис. 2с изображён эффект «близорукого» агента, который при стремлении выбрать действие, приводящее к максимальной локальной награде, не способен рассматривать задачу в долгосрочной перспективе, что приводит к плохим показателям сходимости метода. Рис. 2б демонстрирует эффект переоценки значимости будущего вознаграждения, что в некоторых эпизодах приводит к принятию неверного решения. Но при этом, в большинстве случаев, алгоритм достигает максимального дохода за эпизод.

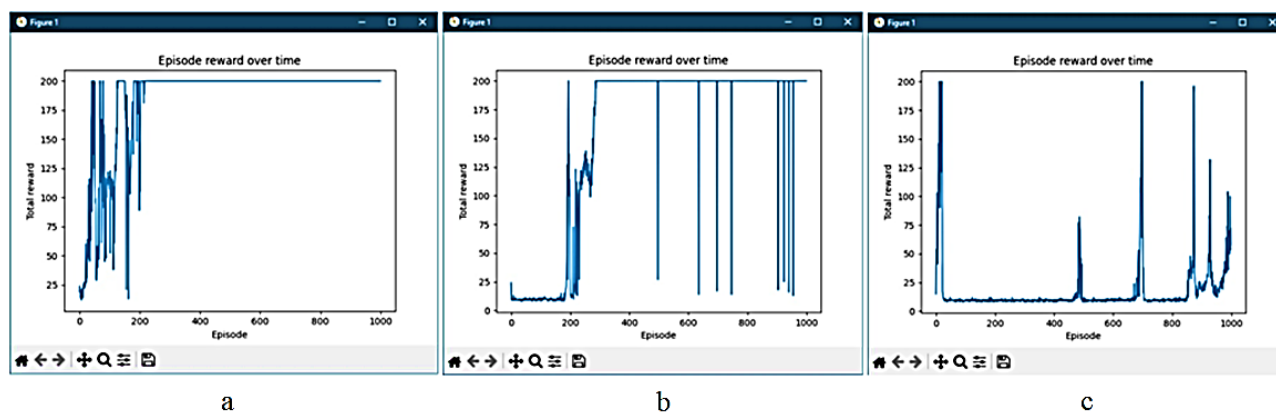


Рис. 2. Влияние коэффициента скорости обучения на работу алгоритма A2C: а – Коэффициент обесценивания равен 0.9; б – Коэффициент обесценивания равен 0.95; с – Коэффициент обесценивания равен 0.5

Далее проводилось исследование влияния функции активации скрытого слоя на суммарное вознаграждение. В работе рассматривались две наиболее распространённые:  $\text{relu}$  и  $\tanh$  для сетей с 128 и 256 нейронами в скрытом слое [6-10]. При детальном рассмотрении было выявлено, что алгоритму с функцией  $\text{relu}$  необходимо меньше времени для достижения максимального дохода, в отличие от  $\tanh$ , который нуждается в интервале для «разгона». Увеличив количество нейронов скрытого слоя вдвое, были получены графики распределения суммарного вознаграждения, на основании которых был сделан вывод о том, что функция  $\tanh$  под действием соответствующих изменений показывает лучшие результаты, чем  $\text{relu}$ .

### 3.2. Многослойная сеть исполнитель-критик

Во второй части исследования ранее описанный агент был модифицирован путём увеличения количества слоёв аппроксиматора исполнитель-критик. Получены экспериментальные конфигурации алгоритма с двумя и тремя скрытыми слоями. В состав первого входили 128 нейронов, второго – 64 и, для трёхслойного случая, 32 в третьем, с функцией активации  $\text{relu}$  для каждого. На начальном этапе все слои сети исполнитель-критик были объединены. Изменение коэффициента обесценивания на серии экспериментов показало аналогичный однослойному случаю результат. В качестве эталонного значения в последующих опытах было использовано 0.9. Вариации скорости обучения продемонстрировали смещение оптимальной величины исследуемого параметра, при которой алгоритм стабильно сходится к максимуму суммарного дохода за эпизод, только в случае трёх скрытых слоёв. Для двух-

слойного варианта приемлемое значение составило 0.03. Трёхслойный агент продемонстрировал стабильную работу при 0.07. Полученные значения для соответствующих конфигураций сети в дальнейшем использовались в качестве эталонов. Применение  $\tanh$  к исследуемым стандам показало аналогичные однослойному варианту результаты.

На следующем этапе рассматривалось воздействие dropout регуляризации и архитектуры сети исполнитель-критик (при ранее указанных значениях скорости и обесценивания) на функционирование агента. Выявление оказываемого эффекта функции dropout производилось с использованием граничных значений оптимальной вероятности отключения нейронов, равной 0.2 и 0.5 соответственно при различных комбинациях применения к слоям [6, 7]. Из полученных экспериментальных данных следует, что применение регуляризации к глубокому методу обучения с подкреплением A2C при решении задачи о балансировке перевернутого маятника демонстрирует худшие результаты устойчивости алгоритма по сравнению со стандартным случаем без использования функции dropout. Предположительно данный эффект связан с тем фактом, что в отличие от обучения с учителем, которое сначала производит настройку, а после принимает решения, обучение с подкреплением, напротив, непрерывно осуществляет корректировку весовых коэффициентов. Поэтому для лучшего предсказания действия, агенту необходимо больше признаков данных, что не может обеспечить регуляризация, поскольку она «урезает» количество доступных классов в конкретный момент времени случайным образом. Поскольку алгоритм непрерывно обучается, то при резком изменении параметров среды (на-

пример, выбор незнакомой траектории) возникает эффект «сброса», который, предположительно, не вызывает переобучения. После приобретения устойчивой конфигурации весов (когда агент обучился стратегии), корректирующая величина имеет практически нулевое значение, что переводит алгоритм в режим использования до тех пор, пока окружающая среда не сгенерирует ранее неизвестное состояние.

Влияние архитектуры сети исполнитель-критик рассматривалось с использованием нескольких метрик качества:

- форма графика распределения суммарного дохода;
- соотношение количества экспериментов, способных хотя бы раз превысить заданный порог на протяжении 1000 эпизодов к общему количеству проведенных экспериментов;
- соотношение величины относительно стабильных экспериментов к общему числу.

Все полученные результаты были сгенерированы при 10 запусках каждого типа конфигурации сети алгоритма. Поскольку максимально допустимым доходом для среды CartPole-v0 является 200, то в качестве горизонта было выбрано значение 100. На рис. 3 изображены варианты архитектуры нейронной сети исполнитель-критик

критик, где в момент времени  $t$  на вход поступает некоторое состояние  $s$ , на основании которого предсказываются значение его функции ценности  $V^\pi(s)$  и стратегия выбора действия  $\pi(s)$ . Рис. 4 демонстрирует структурные схемы возможных вариантов взаимодействия соответствующих аппроксиматоров.

Вначале рассматривался случай двух-слойной сети.

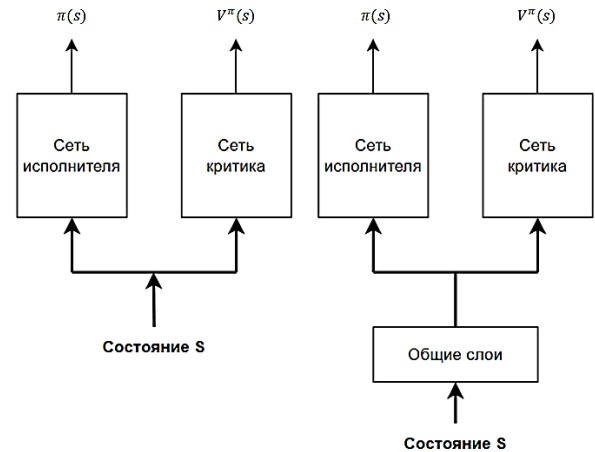


Рис. 3. Возможные варианты архитектуры сети исполнитель-критик

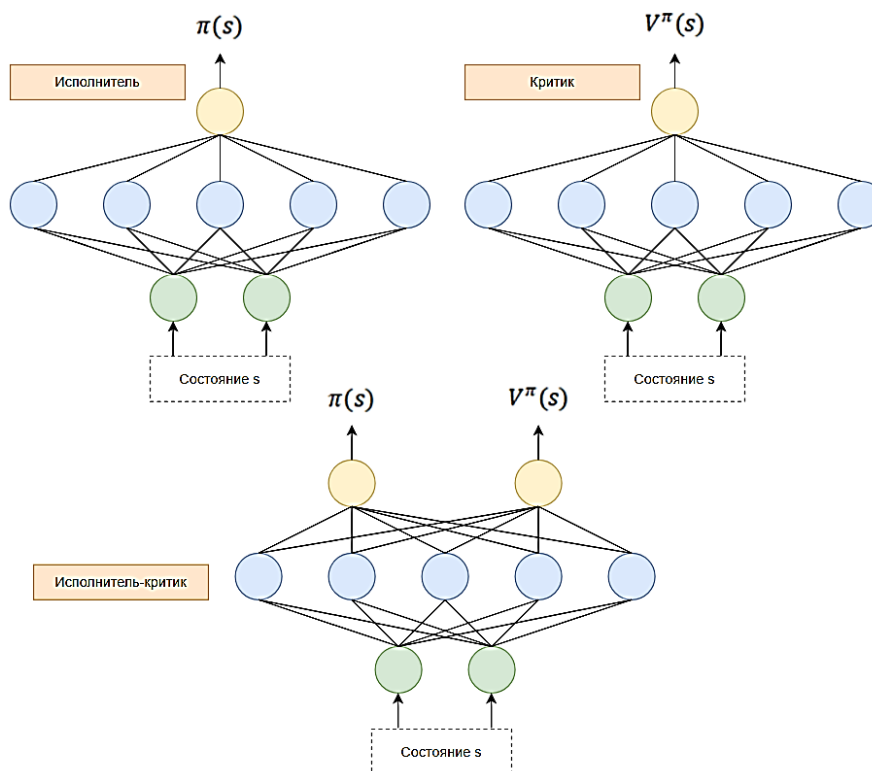


Рис. 4. Структурные схемы вариантов архитектуры нейронной сети исполнитель-критик:  
 $\pi(s)$  – предсказанная стратегия,  $V^\pi(s)$  – прогноз значения функции ценности

В качестве входа, в момент времени  $t$ , выступает текущее состояние  $s$ . Критик генерирует значение его функции ценности  $V^{\pi}(s)$ , в то время как исполнитель предсказывает стратегию выбора действия  $\pi(s)$ . Первая серия экспериментов проводилась при полностью разделённой конфигурации исполнителя и критика. В результате только 30 % опытов из общего числа были способны превысить заданное пороговое значение. Очень редко алгоритму удавалось достичь максимума дохода и стабилизироваться, но это скорее связано с удачной генерацией начальных весов. Лишь 20 % случаев показали относительно приемлемые результаты. Далее первые слои сетей были объединены. В результате показатель пересёкших порог экспериментов вырос до 50 %, при неизменном количестве стабильных случаев.

Стоит отметить, что по сравнению с разделённой архитектурой, объединение первого слоя демонстрирует большую величину всплесков суммарного дохода. При слиянии сетей показатели значительно возросли. Все эксперименты пересекали горизонт и в 70 % достигали равномерной сходимости. Вариант трёхслойной сети при разделённой архитектуре в 80 % случаев хотя бы раз пересекал горизонт и в 40 % равномерно сходил к максимуму дохода. Объединение первого слоя позволило всем экспериментам превысить метрическую границу (как и во всех последующих) при неизменном числе стабильно сходящихся опытов. Случай с двумя общими слоями позволил увеличить количество удачных результатов до

50 %. Полное объединение сетей увеличило данную метрику до 80 %.

Все приведённые данные для вариантов архитектуры двухслойной и трёхслойной сети представлены в табл. 1. Из полученных результатов следует, что наиболее предпочтительным вариантом конфигурации сети исполнитель-критик является полностью обобщённый аппроксиматор. Допустимо использовать варианты с меньшим числом общих слоёв, но при этом стоит учитывать заметное падение эффективности работы метода. Обучение А2С агента базируется на точности предсказания ценности текущего состояния критиком. В случае полностью разделённых сетей исполнитель не способен корректно принимать решения до тех пор, пока аппроксиматор функции ценности не достигнет определённого качества предсказания, что наглядно демонстрируют полученные результаты для данной конфигурации. Также, поскольку сети разделены, между ними отсутствует синхронизация, и нет гарантии того, что они имеют одинаковое пространство признаков совместно обрабатываемых данных. Объединение позволяет использовать одни и те же классы при сокращении числа параметров для настройки. Данная особенность способствует ускорению процесса обучения, что в результате положительно влияет на скорость сходимости и адаптации к изменяющимся условиям среды. Полное объединение при всех положительных сторонах имеет весомый недостаток, который заключается в распространении суммарной ошибки от исполнителя и критика, что негативно сказывается на устойчивости алгоритма.

Таблица 1

Результаты сравнения конфигураций архитектуры сети исполнитель-критик для случая двухслойной и трёхслойной сети

Тип сети	Тип конфигурации	Соотношение количества экспериментов, способных хотя бы раз превысить указанный порог на протяжении 1000 эпизодов к общему количеству проведённых экспериментов	Соотношение величины относительно стабильных экспериментов к общему числу
Двухслойная сеть	Разделённые	~ 0.3	~ 0.2
	Общий первый слой	~ 0.5	~ 0.2
	Общие слои	~ 1	~ 0.7
Трёхслойная сеть	Разделённые	~ 0.8	~ 0.4
	Общий первый слой	~ 1	~ 0.4
	Общие первые два слоя	~ 1	~ 0.5
	Общие слои	~ 1	~ 0.8



## Заключение

В контексте данного исследования были рассмотрены основные факторы, влияющие на сходимость и устойчивость глубокого алгоритма обучения с подкреплением A2C. Был проведён цикл экспериментов, по результатам которого стала очевидной степень и величина влияния исследуемых параметров на характеристики функционирования метода. На сегодняшний день A2C является одним из наиболее используемых, но при этом содержит множество проблем, включающих дисперсию, неполноту опыта и нестабильность на непрерывных задачах, которые больше всех представляют интерес в контексте реальных приложений. Следующим этапом исследования является рассмотрение существующих попыток улучшения алгоритма исполнитель-критик, анализ и генерация новых идей с последующей экспериментальной проверкой.

## Литература

1. Саттон Р.С., Барто Э.Дж. Обучение с подкреплением: введение; 2-е изд. М.: ДМК Пресс, 2020. 552 с.
2. Лонца А. Алгоритмы обучения с подкреплением на Python. Пер. с англ. А.А. Слинкина. М.: ДМК Пресс, 2020. 286 с.
3. Лю Ю. (Х.) Обучение с подкреплением на PyTorch: сборник рецептов. Пер. с англ. А.А. Слинкина. М.: ДМК Пресс, 2020. 282 с.
4. Моралес М. Грожаем глубокое обучение с подкреплением. СПб.: Питер, 2023. 464 с.
5. Грессер Л., Кенг Ван Лун. Глубокое обучение с подкреплением: теория и практика на языке Python. СПб.: Питер, 2022. 416 с.
6. Траск Э. Грожаем глубокое обучение: учебное пособие. СПб.: Питер, 2021. 352 с.
7. Хайкин С. Нейронные сети: полный курс; 2-е издание. М.: Издательский дом «Вильямс», 2006. 1104 с.
8. Гафаров Ф.М., Галимянов А.Ф. Искусственные нейронные сети и приложения: учебное пособие. Казань: Изд-во Казан. ун-та, 2018. 121 с.
9. Сергеев А.П., Тарасов Д.А. Введение в нейросетевое моделирование: учебное пособие. Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2017. 128 с.
10. Настройка гиперпараметров. URL: <https://www.geeksforgeeks.org/hyperparameter-tuning/> (дата обращения: 07.12.2024).

Поступила 22.11.2024; принята к публикации 24.02.2025

## 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

**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; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0333-2313>

## INVESTIGATION OF FACTORS AFFECTING THE CONVERGENCE AND STABILITY OF A DEEP REINFORCEMENT LEARNING ALGORITHM A2C PERFORMER-CRITIC

V.V. Kashko, S.A. Oleinikova

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

**Annotation:** the ability of a deep learning algorithm with reinforcement for convergence and stable functioning is the key to high-quality performance of the tasks assigned to it. The unpredictability and multifactorial nature of the surrounding world impose serious limitations associated with the existence of a correlation between the result of execution and a variety of method parameters, each of which has a certain, but in most cases unpredictable effect. In the context of applied tasks, this fact manifests itself in the difficulty of identifying and configuring significant indicators of the algorithm that can guarantee stable and sustainable functioning. Using deep reinforcement learning in real-world applications implies online interaction with the environment. The use of neural network apparatus for generalizing input data is associated with an increase in the number of factors and an increase in the complexity of system analysis. The object of the study was an agent implementing a deep learning method with reinforcement Advantage Actor Critic or A2C (performer-critic). The factors influencing the convergence and stability of the functioning of the corresponding algorithm were considered as the subject of the study. The agent placed in the OpenAI gym CartPole-v0 environment, in the process of solving the problem of stabilizing an inverted pendulum, was selectively changed at a certain point in time by a specific parameter with constant values of the rest. As a result, graphs of the distribution of the total remuneration for the specified number of episodes were obtained, used as a quality metric demonstrating the impact of the change undertaken. They allowed to study the convergence and stability of the A2C algorithm and to identify the factors influencing these characteristics

**Key words:** deep reinforcement learning, performer-critic, neural networks, algorithm stability, hyperparameters

#### References

1. Sutton R.S., Barto E.J. "Reinforcement Learning: An Introduction; 2nd ed.", Moscow, DMK Press, 2020, 552 p.
2. Lonza A. "Reinforcement Learning Algorithms in Python", trans. from Eng. by A.A. Slinkin, Moscow, DMK Press, 2020, 286 p.
3. Liu Y. (H.) "Reinforcement Learning on PyTorch: A Collection of Recipes", trans. from Eng. by A.A. Slinkin, Moscow, DMK Press, 2020, 282 p.
4. Morales M. "Grokking Deep Reinforcement Learning", St. Petersburg, Piter, 2023, 464 p.
5. Gresser L., Keng Wang Loon "Deep reinforcement learning: theory and practice in Python", St. Petersburg, Piter, 2022, 416 p.
6. Trask "Grokking Deep Learning: a tutorial", St. Petersburg, Piter, 2022, 352 p.
7. Khaikin S. "Neural networks: a complete course; 2nd edition", Moscow, Williams, 2006, 1104 p.
8. Gafarov F.M., Galimyanov A.F. "Artificial neural networks and applications: a tutorial Kazan: Publishing house of Kazan. University, 2018. 121 p.
9. Sergeev A.P., Tarasov D.A. "Introduction to neural network modeling: a tutorial", Ekaterinburg, The Ural. University, 2017, 128 p.
10. "Hyperparameter Tuning", available at: <https://www.geeksforgeeks.org/hyperparameter-tuning/> (Accessed: 07.12.2024). Hyperparameter Tuning. URL: <https://www.geeksforgeeks.org/hyperparameter-tuning/> (accessed 07.12.2024).

Submitted 22.11.2024; revised 24.02.2025

#### Information about the authors

**Vasily V. Kashko** – Postgraduate student, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: [vasya.kashko@mail.ru](mailto:vasya.kashko@mail.ru)

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

## РАЗРАБОТКА ВЕБ-ПРИЛОЖЕНИЯ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ СПОРТИВНОГО РАСПИСАНИЯ ОНЛАЙН

К.Н. Безуглый, А.В. Барабанов, В.В. Сафронов

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

**Аннотация:** исследуется процесс разработки веб-приложения для формирования и дальнейшего мониторинга спортивного расписания. Рассматривается процесс проектирования и создания веб-приложения, предназначенного для спортивных организаций, тренеров и спортсменов. Также анализируются особенности проектирования интерфейса, управления данными о расписании, реализации уведомлений и адаптивного дизайна. Веб-приложение разрабатывается на основе технологии Angular. Данная программа использует обширную коллекцию хорошо интегрированных библиотек, которые охватывают широкий спектр функций, включая управление формами, маршрутизацию, взаимодействие между клиентской и серверной частями и многое другое. Приложение сделано однопользовательским для упрощения работы сотрудников и спортсменов. Им не нужно вводить свои личные данные в профиль. Чтобы внести себя в соревновательную базу, можно заполнить данные диалогового окна. Когда пользователь входит в систему, ему предоставляется возможность просматривать, добавлять, редактировать, удалять данные. Также в интерфейсе реализованы: сайдбар с возможностью открытия и закрытия, навигация со ссылками на разделы (Календарь, Ответственный человек, Спортивная дисциплина, Статистика по людям), таблица с данными о людях и действиями, кнопки для открытия диалоговых окон и компоненты диалоговых окон. Представленный подход поможет улучшить организацию спортивных мероприятий, повысить эффективность тренировок и упростить взаимодействие между участниками спортивного сообщества

**Ключевые слова:** UML-диаграмма, Angular, FrontEnd, BackEnd, сайдбар

### Введение

В современном мире использование веб-приложений становится неотъемлемой частью взаимодействия и организации различных сфер деятельности. Спорт не остаётся в стороне от цифрового прогресса, и разработка веб-приложения для формирования спортивного расписания становится актуальной задачей. Процесс создания такого приложения представляет собой важный шаг в улучшении координации спортивных мероприятий, оптимизации тренировочного процесса и упрощении взаимодействия между участниками спортивного сообщества. В статье подробно исследуются основные аспекты проектирования и разработки веб-приложения, ориентированного на спортивные организации, тренеров и спортсменов. Также описываются этапы создания приложения, начиная со сбора требований и определения функциональности, и заканчивая тестированием и внедрением в реальное окружение. Особое внимание уделяется проектированию интерфейса, управлению данными о расписании, реализации уведомлений и поддержке адаптивного дизайна, что способствует повы-

шению эффективности и комфорта использования приложения.

### Разработка приложения

#### Построение потоков данных с использованием UML-диаграмм

Создание приложения формирования спортивного расписания требует построения диаграммы последовательности [6], которая покажет, как пользователь взаимодействует с системой, а система взаимодействует с другими компонентами программы, такими как база данных и хранилище объектов.

На диаграмме последовательности показан порядок взаимодействия процессов в зависимости от конкретного случая использования, а именно процесс добавления новых данных.

Приложение сделано однопользовательским для упрощения работы сотрудников и спортсменов. Им не нужно вводить свои личные данные в профиль. Для того, чтобы внести себя в соревновательную базу, можно заполнить данные диалогового окна.

Когда пользователь входит в систему, ему предоставляется возможность просматривать, добавлять, редактировать, удалять данные.

Процесс добавления работает следующим образом:



1. Пользователь вводит данные в диалоговое окно (FrontEnd).
2. С FrontEnd система посылает запрос в BackEnd на добавление данных.
3. Basecontroller BackEnd идет с запросом на добавление данных в базу данных PostgreSQL.
4. BackEnd получает результат от PostgreSQL.
5. BackEnd возвращает результат добавления на FrontEnd.
6. FrontEnd отображает полученные данные в таблице на веб-странице приложения.

Процессы удаления, редактирования и загрузки работают аналогичным образом.

Модульная структура программы представляет собой древовидную структуру, в узлах которой размещаются программные модули, а направленные дуги показывают статическую подчиненность модулей. Каждый модуль может обращаться к подчиненным ему модулям. При этом модульная структура программной системы, кроме структурной схемы, должна включать в себя еще и совокупность спецификаций модулей, образующих эту систему.

Модульная структура программного комплекса приложения представлена на рис. 1.

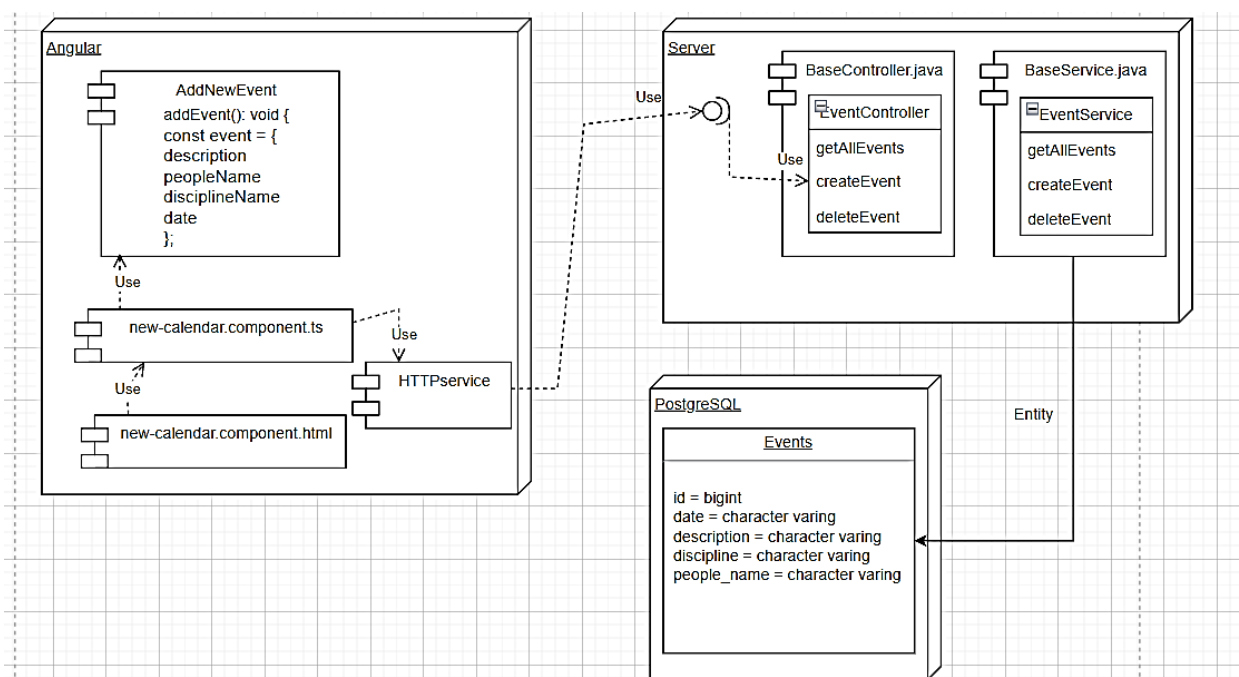


Рис. 1. Модульная структура программного комплекса

На схеме базы данных, представленной на рис. 2, мы видим, что BackEnd приложения состоит из четырех классов [8].

Первый класс — event, отвечает за события, которые создает пользователь, например, записывать и отслеживать разные мероприятия.

Второй класс — reople, в нем располагаются все данные о тренерах, включая и их характеристики, достижения и информацию о связи.

Третий класс — statistic, хранит статистическую информацию о тренерах, включая данные о их прошлых соревнованиях, что помогает анализировать и сравнивать достижения.

Четвертый класс — discipline, отвечает за спортивные дисциплины, по которым прово-

дятся соревнования, и включает в себя информацию о различных видах спорта и правилах.

Структура каждого класса таблицы представляет собой полное описание полей таблицы через их свойства. Ключевыми свойствами поля являются: имя поля, тип данных в поле, размер поля и формат. Эти характеристики задают основу для хранения информации и позволяют обеспечить целостность данных.

Кроме этого, существует много других свойств, которые могут варьироваться в зависимости от типа данных в поле, включая такие параметры, как уникальность, возможность хранения пустых значений, что в итоге способствует более эффективной работе с данными.

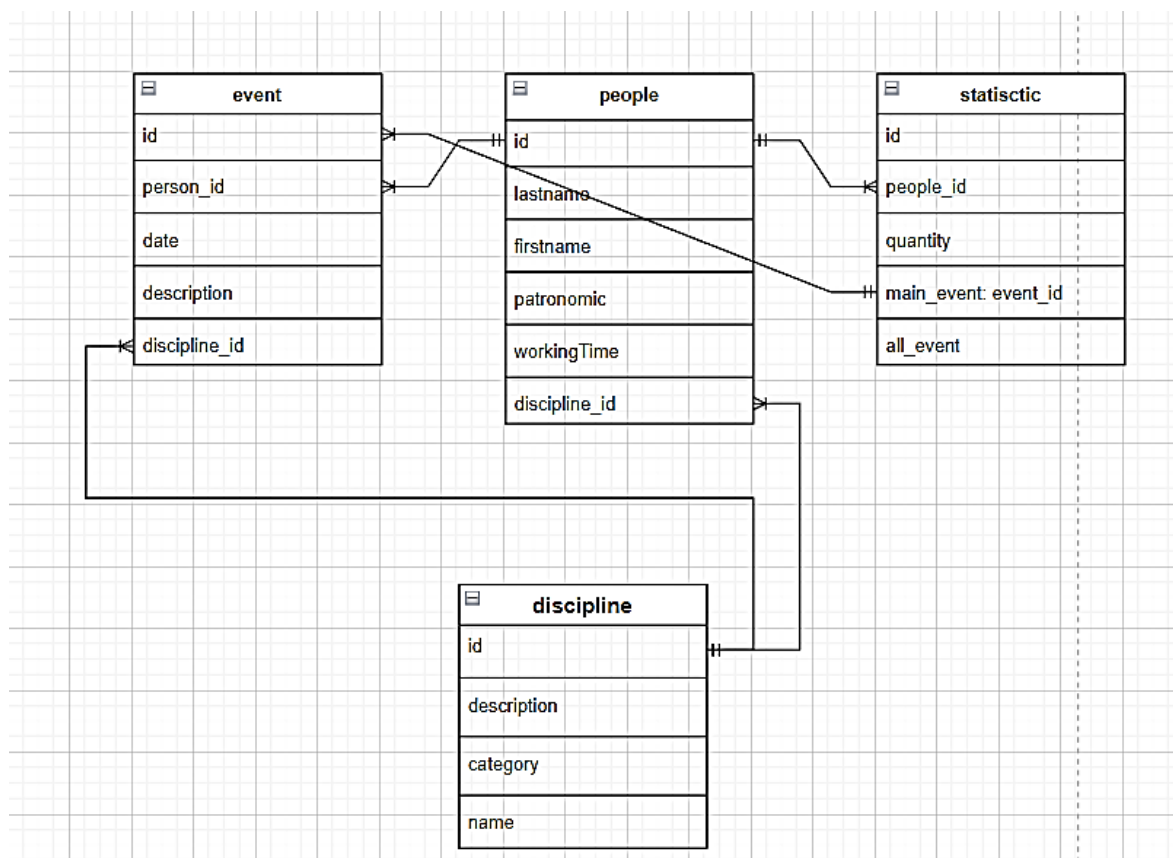


Рис. 2. Схема базы данных

Согласно диаграмме использования, представленной на рис. 3, пользователю предоставляется возможность просматривать, добавлять, редактировать и удалять данные.



Рис. 3. Диаграмма использования приложения обычным пользователем

Согласно диаграмме использования, представленной на рис. 4, тренеру предоставляется возможность просматривать, добавлять, редактировать и удалять данные.

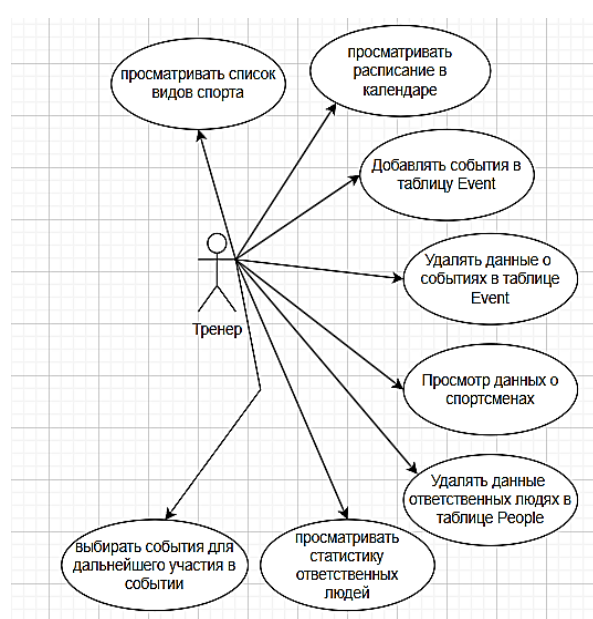


Рис. 4. Диаграмма использования приложения Тренером

### Реализация FrontEnd на основе технологии Angular

Приложение было разработано на основе технологий Angular, поскольку данная программа использует обширную коллекцию хорошо интегрированных библиотек, которые охватывают широкий спектр функций, включая управление формами, маршрутизацию, взаимодействие между клиентской и серверной частями и многое другое [3,4,5].

#### Функционал главной страницы:

- сайдбар с возможностью открытия и закрытия, и изменением ширины. Класс "left side" относится к сайдбару, атрибуты [ngClass] и [ngStyle] используются для динамического изменения классов и стилей с помощью Angular [7].
- навигация с ссылками на разделы: "Календарь", "Ответственный человек", "Спортивная дисциплина", "Статистика по людям".
- календарь с таблицей, в которой отображаются дни недели и числа для выбранного месяца и года. Каждая ячейка с числом имеет обработчик событий (click) для вызова диалогового окна при клике на ячейку события.
- в скрипте ниже таблицы определены методы и переменные для управления активностью ячеек календаря и сохранения состояния в локальном хранилище (localStorage).
- секция с кнопкой "Add new Event", которая вызывает диалоговое окно для добавления нового события, его можно увидеть на рис. 5.

**Добавить событие**

Ответственный:

Person

Спортивная дисциплина:

Sports Discipline

Выберите число:

Date

Здесь вы можете указать подробную информацию о событии:

Описание события

Добавить

Рис. 5. Диалоговое окно для добавления события в таблицу Event

- таблица материалов (mat-table) с данными (dataSource), которая отображает события. Таблица содержит столбцы "date", "peopleName", "disciplineName", "description" и "actions".

В коде также присутствуют импорт и определение компонента NewCalendarComponent, в котором присутствуют методы для загрузки данных с бэкенда, удаления данных, отображения диалогового окна события и другие обработчики событий.

#### Описание работы и функционал страницы работников спортивных соревнований

В интерфейсе (коде) [2] реализован сайдбар с возможностью открытия и закрытия, навигация с ссылками на разделы (Календарь, Ответственный человек, Спортивная дисциплина, Статистика по людям), таблица с данными о людях и действиями, кнопки для открытия диалоговых окон и компоненты диалоговых окон.

Для сайдбара используется класс "left\_side" с возможностью динамического изменения ширины и состояния (открыт/закрыт) с помощью Angular. В навигации используются иконки эмодзи для краткого обозначения разделов.

Таблица материалов (mat-table) отображает данные о людях с различными свойствами, такими как фамилия, имя, отчество и т.д. Добавлена функция удаления данных. Также присутствуют кнопки, которые вызывают диалоговые окна для ввода или редактирования информации о людях.

Диалоговое окно создано с использованием компонента mat-card из библиотеки Angular Material [1]. В заголовке (<mat-card-title>) выводится переменная dialogTitle, которая устанавливается в коде компонента.

В содержимом диалогового окна (<mat-card-content>) размещается нужная информация о человеке, его фотография, имя, описание и прочее.

Возможно добавление дополнительных действий в секции <mat-card-actions>, например, кнопок для сохранения изменений или закрытия диалогового окна.

Для отображения диалогового окна с данными используется компонент DialogEditWrapper1Component. Он использует MatDialogRef для управления состоянием диалогового окна. В конструкторе компонента передаются параметры dialogRef и data, чтобы

обеспечить его функциональность и получить доступ к данным компонента PeopleComponent.

Страница работников показана на рис. 6.

people Name	First Name	Patronymic	DisciplineName	Working Time	Actions
Игнат	Илья	ДМИТРИЧ	Баскетбол	75	
Серебрянский	Дмитрий	Николаевич	Волейбол	9775	
Певторак	Викторина	Юрьевен	Волейбол	1775	
Кораблина	Анастасия	Михайловна	Настольный теннис	775	

Игнат Илья Дмитриевич    Серебрянский Дмитрий Николаевич    Певторак Викторина Юрьевен    Кораблина Анастасия Михайловна

Рис. 6. Страница работников спортивных соревнований

### Заключение

В процессе разработки веб-приложения для формирования спортивного расписания были рассмотрены ключевые аспекты взаимодействия пользователя с системой, обеспечивающие удобство и эффективность использования приложения.

Создание диаграммы последовательности позволило четко определить порядок взаимодействия процессов при работе с данными, включая добавление, редактирование и удаление информации о спортивном расписании. Компоненты приложения, такие как FrontEnd и BackEnd [9], совместно обеспечивают надежное добавление данных в базу данных и хранилище объектов, а также отображение результатов на веб-странице.

Этот проект является отличным примером того, как современные информационные технологии могут быть успешно применены в области спорта для улучшения организации соревнований и повышения эффективности управления спортивным расписанием. Развитие подобных веб-приложений открывает новые возможности для автоматизации процессов планирования и

управления спортивными мероприятиями, способствуя развитию спортивной индустрии и содействуя здоровому образу жизни среди людей.

### Литература

1. AngularMaterial. URL: <https://material.angular.io> (дата обращения: 01.03.2024).
2. Вильданов А.Н. 3D-моделирование на WebGL с помощью библиотеки Three.js: учебное пособие. Уфа: РИЦ БашГУ, 2014. 113 с.
3. Backend – разработка: что это такое?. URL: <https://highload.today/backend/> (дата обращения: 01.03.2024).
4. PostgreSQL: самая передовая в мире база данных с открытым исходным кодом. URL: <https://www.postgresql.org> (дата обращения: 01.03.2024).
5. Фаулер М. UML основы, 3-е издание. СПб: Символ-Плюс, 2004. 192 с.
6. Буч Г., Рамбо Д., Якобсон А. Язык UML. Руководство пользователя; 2-е издание. М.: ДМК Пресс, 2006. 496 с.
7. Angular. URL: <https://angular.io> (дата обращения: 01.03.2024).
8. Мартин Р. Чистый код: создание, анализ и рефакторинг. СПб: Питер, 2018. 464 с.
9. Фронтенд-разработка: ключевые технологии и понятия. URL: <https://habr.com/ru/companies/otus/articles/674748/> (дата обращения: 01.03.2024).

Поступила 26.12.2024; принята к публикации 24.02.2025

### Информация об авторах

**Безуглый Кирилл Николаевич** – студент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: [kirillbezuglyj@gmail.com](mailto:kirillbezuglyj@gmail.com), тел.: +7(900)961-34-89

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

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

## DEVELOPMENT OF A WEB APPLICATION FOR CREATING A SPORTS SCHEDULE ONLINE

K.N. Bezuglyi, A.V. Barabanov, V.V. Safronov

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

**Abstract:** this article is devoted to the development of a web application for the formation and further monitoring of a sports schedule. The article considers the process of designing and creating a web application intended for sports organizations, coaches and athletes. It also considers the features of interface design, schedule data management, notification implementation and adaptive design. The web application is developed based on Angular technology. This program uses an extensive collection of well-integrated libraries that cover a wide range of functions, including form management, routing, interaction between the client and server parts and much more. The application is made single-user, to simplify the work of employees and athletes. They do not need to enter their personal data in the profile. To add yourself to the competition database, you can fill in the data of the dialog box. When the user logs in, he is given the opportunity to view, add, edit, delete data. The interface also includes: a sidebar with the ability to open and close, navigation with links to sections (Calendar, Responsible Person, Sports Discipline, People Statistics), a table with data on people and actions, buttons for opening dialog boxes and dialog box components. The presented approach will help improve the organization of sports events, increase the effectiveness of training and simplify interaction between members of the sports community

**Key words:** UML diagram, Angular, FrontEnd, BackEnd, Sitbar

### References

1. "AngularMaterial", available at: <https://material.angular.io> (date of access 03.01.2024)
2. Vildanov A.N. "3D modeling on WebGL using the Three.js library: a tutorial", Ufa: RIC BashSU, 2014, 113 p.
3. "Backend - development: what is it?", available at: <https://highload.today/backend/> (date of access 03.01.2024)
4. "PostgreSQL: the world's most advanced open-source database", available at: <https://www.postgresql.org> (date of access 03.01.2024)
5. Fowler M. "UML basics. 3rd edition", SPb: Simvol-Plus, 2004, 192 p.
6. Butch G., Rambo D., Jacobson A. "UML Language. User's Guide. 2nd edition", SPb: DMK, 2006, 496 p.
7. "Angular", available at: <https://angular.io> (date of access 03.01.2024).
8. Martin R. "Clean code", SPb., Piter, 2018, 464 p.
9. "Frontend development: key technologies and concepts", available at: <https://habr.com/ru/companies/otus/articles/674748/> (date of access 03.01.2024)

Submitted 26.12.2024; revised 24.02.2025

### Information about the authors

**Kirill N. Bezuglyi** – Student, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), tel.: +7(900)961-34-89, e-mail: [kirillbezuglyj@gmail.com](mailto:kirillbezuglyj@gmail.com)

**Alexander V. Barabanov** – Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: [bav33@mail.ru](mailto:bav33@mail.ru)

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



## РАЗРАБОТКА ПОДСИСТЕМЫ РАСЧЕТА АНАЛИТИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ

Е.В. Колыхалова, С.Л. Подвальный, Д.К. Проскурин, Т.А. Голикова

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

**Аннотация:** обосновывается необходимость разработки подсистемы аналитических показателей и программной реализации решения для автоматизации расчета, описания и повторного использования показателей расчета рейтинга при автоматизации системы оценки работы вуза как в разрезе подразделений, так и в целом. Высшие учебные заведения регулярно сдают большое количество аналитических отчетов в Министерство науки и высшего образования Российской Федерации. Эти отчеты необходимы для контроля качества образовательного процесса, оценки эффективности деятельности вузов и распределения финансирования. Проведение оценки качества оказания образовательных услуг, качества работы подразделений вуза, а также оперативная подготовка отчетности в вышестоящие органы чрезвычайно трудоемки. Для облегчения подготовки отчетности и сокращения трудоемкости оценки качества образовательного процесса требуется разработать автоматизированную систему аналитических показателей. Подсистема аналитических показателей должна предоставлять возможность оперативной подготовки отчетов и повторного использования показателей, применяемых при подготовке формул рейтингов. Аналитические системы позволяют организациям эффективно управлять данными, выявлять закономерности, прогнозировать тенденции и оптимизировать бизнес-процессы. Обосновывается выбор программной среды разработки программного модуля, а также описание основных объектов разработанной подсистемы

**Ключевые слова:** аналитические показатели, информационная система, цифровизация университета

### Введение

Большое количество работ посвящено автоматизации различных видов деятельности в вузах. Так, проектированию и разработке различных систем автоматизации для вузов посвящены публикации [1-7, 10].

Несмотря на большое количество информационных систем, объем обрабатываемой информации увеличивается, требования к вузам растут, а время, предоставляемое для подготовки рейтингов и отчетов, уменьшается.

В современном мире, чтобы оставаться одним из лучших вузов, необходимо постоянно разрабатывать системы показателей оценки качества образовательной и административной деятельности. Некоторые из них описаны в статьях [8, 9].

Вузы являются подведомственными организациями и, помимо внутренней отчетности по контролю качества процессов, обязаны также регулярно отчитываться перед вышестоящими организациями.

### Обоснование необходимости разработки программного модуля

Высшие учебные заведения (далее – вузы) осуществляют образовательную деятельность

по образовательным программам высшего образования и научную деятельность. Они созданы для осуществления образовательных, научных, социальных и иных функций некоммерческого характера.

Учредителем и собственником имущества вузов является Российская Федерация. Функции и полномочия учредителя от имени Российской Федерации осуществляет Министерство науки и высшего образования Российской Федерации (далее также – Министерство) [11].

Функции и полномочия собственника имущества, переданного Вузу, осуществляют Министерство и Федеральное агентство по управлению государственным имуществом и порядке, установленном законодательством Российской Федерации.

Вузы руководствуются в своей деятельности Конституцией Российской Федерации, федеральными конституционными законами, федеральными законами, актами Президента Российской Федерации, Правительства Российской Федерации, Министерства, иными нормативными правовыми актами и уставом вуза.

Вузы выполняют государственное задание, сформированное Министерством в установленном порядке в соответствии с предусмотренными уставом основными видами деятельности.

Вузы обеспечивают необходимые условия, в том числе социальную, культурную, спортивную и рекреационно-оздоровительную инфраструктуру для обучения, профессиональной деятельности, научных исследований, экспериментальных разработок, экспертных, аналитических, опытно-конструкторских и технологических работ, творческого развития и сохранения здоровья обучающихся, научно-педагогических и других категорий работников вуза.

Высшие учебные заведения (вузы) регулярно подают различные отчёты в Министерство науки и высшего образования Российской Федерации (Минобрнауки). Эти отчёты необходимы для контроля качества образовательного процесса, оценки эффективности деятельности вузов и распределения финансирования [11, 12]. Вот некоторые ключевые виды отчётности:

1. Отчёт о самообследовании

Вузы должны проводить ежегодное самообследование своей образовательной и научной деятельности. Этот документ включает анализ выполнения федеральных государственных образовательных стандартов (ФГОС), достижения целей программы развития вуза, кадрового состава, материально-технической базы и других аспектов работы учебного заведения.

2. Годовой отчет о результатах деятельности

Каждый вуз обязан ежегодно должен предоставлять годовой отчет о своей работе. Он содержит информацию об основных показателях деятельности вуза за прошедший год, таких как количество студентов, бюджет, результаты научных исследований, трудоустройство выпускников и т.д.

3. Мониторинговые данные

Минобрнауки проводит мониторинг эффективности деятельности высших учебных заведений. Для этого вузы предоставляют данные по различным показателям, таким как успеваемость студентов, качество преподавания, научные публикации, международное сотрудничество и др.

4. Финансовый отчет

Финансовая отчетность является важной частью отчетности перед Министерством. Она включает сведения о доходах и расходах вуза, использовании бюджетных средств, грантов и иных источников финансирования.

5. Информация о реализации образовательных программ

Отчет о выполнении требований ФГОС и реализации образовательных программ. Включает данные о количестве студентов, проходящих обучение по разным программам, качестве обучения, соответствии содержания программ требованиям стандартов и т.п.

6. Данные о научно-исследовательской деятельности

Информация о научных исследованиях, проводимых в вузе, публикациях, патентах, грантах и других формах участия в научной жизни страны.

7. Статистическая отчетность

Регулярная статистическая отчетность по различным направлениям деятельности вуза, включая численность студентов, преподавателей, показатели трудоустройства выпускников и многое другое.

8. Публичный доклад

Публичный отчет о деятельности вуза представляет собой открытый документ, который публикуется на сайте учебного заведения и доступен широкой общественности. В нем содержатся обобщённые данные о различных аспектах работы вуза, а также планы на будущее.

Эти отчёты помогают Министерству контролировать деятельность вузов, оценивать их вклад в развитие системы высшего образования и принимать решения о распределении ресурсов.

С учетом этого выделяют понятия внешней системы оценки качества и внутренней системы оценки качества образования.

Внешняя система оценки качества – совокупность методов контроля, применяемых в рамках проведения процедур государственной аккредитации, профессионально-общественной аккредитации, общественной аккредитации, международной аккредитации и т.д.

Внутренняя система оценки качества образования (ВСОКО) представляет собой совокупность регламентированных процессов, обеспечивающих систематическое отслеживание результатов деятельности структурных подразделений университета по организации и обеспечению образовательного процесса и позволяющих получить объективную информацию об уровне освоения обучающимися образовательных программ для определения направлений модернизации и совершенствования образовательных программ и образовательного процесса [12].

Целью ВСОКО является поддержание соответствия содержания и условий осуществления образовательного процесса в университете требованиям ФГОС и федерального законодательства в сфере образования.

ВСОКО направлена на решение следующих задач:

- формирование максимально объективной оценки качества подготовки обучающихся в соответствии с требованиями ФГОС, профессиональных стандартов (при наличии) и потребностями рынка труда;
- изучение удовлетворенности участников образовательного процесса качеством реализации образовательной программы и ее востребованности среди обучающихся и работодателей;
- оценка ресурсного обеспечения образовательной деятельности в университете;
- совершенствование структуры и содержания образовательных программ, реализуемых в университете;
- повышение компетентности и уровня квалификации педагогических работников, обеспечивающих реализацию образовательных программ;
- повышение уровня информированности участников образовательного процесса и общественности об используемых технологиях обучения, современных формах и методах учебно-методической и воспитательной работы педагогических работников;
- повышение конкурентоспособности образовательных программ, реализуемых в университете.

Внутренняя система оценки качества образования включает три уровня.

Первый (кафедральный) уровень осуществляется силами научно-преподавательского состава и учебно-вспомогательного персонала кафедр.

Второй (факультетский) уровень осуществляют деканы факультетов.

Третий (университетский) уровень осуществляет администрация университета.

Таким образом, проверка качества работы может проводиться как на уровне того или иного подразделения, так и в целом по университету.

Проведение оценки качества оказания образовательных услуг, а также качества работы подразделений вуза, и оперативная подготовка отчетности в вышестоящие органы чрезвычайно трудоемка. Для облегчения подготовки отчетности и сокращения трудоемкости оценки

качества образовательного процесса требуется разработать автоматизированную систему аналитических показателей.

Подсистема аналитических показателей должна предоставлять возможность оперативной подготовки отчетов и повторного использования показателей, применяемых при подготовке формул рейтингов.

### **Обоснование выбора программной среды для разработки модуля**

Использование программного продукта «1С: Университет» широко распространено в организациях высшего профессионального образования. Программный продукт «1С: Университет», разработанный СГУ-Инфоком, предназначен для автоматизации управления учебным процессом в высших учебных заведениях. Он позволяет решать широкий спектр задач, связанных с организацией образовательного процесса, управлением контингентом студентов, ведением учебной документации и многим другим. «1С: Университет» является мощным инструментом для автоматизации и оптимизации всех процессов, связанных с обучением и управлением в высшем учебном заведении.

Использование платформы 1С для разработки имеет множество преимуществ, которые делают её привлекательной для разработчиков и бизнеса. Вот несколько ключевых причин, почему стоит выбрать 1С:

#### **1. Широкая функциональность**

Платформа 1С обладает обширной функциональностью, которая охватывает практически все аспекты управления бизнесом: бухгалтерию, складской учёт, управление персоналом, CRM-системы и многое другое. Это позволяет создавать комплексные решения без необходимости интеграции с внешними системами.

#### **2. Простота освоения**

Язык программирования 1С является высокоуровневым и интуитивно понятным, что делает его доступным даже для новичков в разработке. Это сокращает время на обучение и ускоряет процесс создания приложений.

#### **3. Гибкость и адаптивность**

Система 1С легко адаптируется под специфику конкретного бизнеса благодаря модульному подходу и возможности настройки конфигурации под конкретные нужды компании. Это особенно полезно для предприятий с уникальными бизнес-процессами.



#### 4. Поддержка локальных особенностей

1С ориентирована на российский рынок и учитывает особенности российского законодательства и бухгалтерского учёта. Это существенно упрощает внедрение и использование системы в российских компаниях.

#### 5. Большой выбор готовых решений

Существует огромное количество готовых конфигураций и модулей, созданных как самой компанией 1С, так и сторонними разработчиками. Это позволяет быстро внедрять готовые решения и минимизировать затраты на разработку.

#### 6. Обширная экосистема

Сообщество разработчиков 1С очень велико, что означает наличие большого количества документации, примеров кода, форумов и других ресурсов, где можно найти помощь и поддержку. Также существует множество специализированных компаний, предлагающих услуги по внедрению и поддержке систем 1С.

#### 7. Совместимость с другими платформами

Приложения, созданные на платформе 1С, могут интегрироваться с другими системами и сервисами, что расширяет возможности использования данных и автоматизирует процессы взаимодействия между различными IT-решениями.

#### 8. Безопасность и надежность

Разработчики 1С уделяют большое внимание вопросам безопасности и надежности своих продуктов. Это гарантирует защиту данных от несанкционированного доступа и минимизацию рисков потери информации.

#### 9. Экономичность

Несмотря на высокую стоимость лицензий и услуг внедрения, система 1С окупается за счет высокой производительности и сокращения затрат на обслуживание и доработку. Кроме того, существуют облачные решения, которые позволяют снизить начальные инвестиции.

Платформа 1С предлагает широкий набор инструментов и возможностей для разработки и внедрения корпоративных информационных систем. Её гибкость, простота освоения, поддержка локальных особенностей и большая экосистема делают её идеальным выбором для многих компаний, стремящихся оптимизировать свои бизнес-процессы и повысить эффективность работы.

Существующая система автоматизации ВУЗа разработана на платформе 1С и несмотря на то, что система 1С позволяет подключать

внешние библиотеки, разработанные на других языках программирования, разработка модуля на языке программирования 1С выглядит более логичным решением и нетрудоемкой задачей.

### **Разработка подсистемы аналитических показателей**

Аналитические системы используются для сбора, обработки, анализа и интерпретации больших объемов данных с целью получения полезной информации, которая помогает принимать обоснованные решения. Они позволяют организациям эффективно управлять данными, выявлять закономерности, прогнозировать тенденции и оптимизировать бизнес-процессы.

С помощью аналитических систем можно строить прогнозы на основе исторических данных. Моделирование позволяет тестировать различные сценарии развития событий и выбирать наиболее оптимальный путь.

Анализируя данные о текущих процессах, можно находить узкие места и неэффективности.

Одной из главных целей использования аналитической системы является поддержка принятия управленческих решений. Полученная информация позволяет руководителям видеть полную картину ситуации и делать обоснованные выводы.

В реальном времени аналитические системы могут отслеживать ключевые показатели эффективности (KPI) и сигнализировать об отклонениях от нормы. Это позволяет оперативно реагировать на изменения и предотвращать возможные проблемы.

Таким образом, аналитические системы играют важную роль в управлении организациями, помогая им оставаться конкурентоспособными и адаптироваться к изменениям внешней среды.

Подсистема аналитических показателей разрабатывалась с учетом необходимости оперативного расширения возможностей подготовки отчетов.

Разработка нового отчета силами программиста каждый раз, когда требуется рассчитать новый рейтинг или подготовить аналитический отчет, может быть чрезвычайно трудоемкой и не укладываться в отведенные для разработки сроки. Сложность отчетов и рейтингов повышается, а время на подготовку

сокращается. Таким образом своевременная подготовка отчетности возможна только при декомпозиции отчетов на составляющие и повторном использовании рассчитанных показателей.

Несмотря на сложность подготовки отчетов подсистема аналитических показателей может иметь достаточно простую структуру основных объектов, не зависит от основной конфигурации, в которую встраивается новая подсистема и может применяться с любыми базовыми конфигурациями. Основной сложностью работы с подсистемой аналитических показателей является необходимость описания показателей рейтинга. Однако, как правило, каждый показатель рассчитывается относительно просто. Сложность возрастает при необходимости расчета формул рейтингов. Однако разработанная подсистема предполагает использование в формулах ранее описанных показателей.

Система 1С представляет собой платформу для автоматизации учета и управления различными процессами в бизнесе. Она включает множество объектов, каждый из которых предназначен для выполнения определенных функций. Основные объекты системы 1С, с которыми работают пользователи и разработчики, включают:

#### 1. Документы

Документы – это записи, фиксирующие хозяйственные операции. Каждый документ имеет свою структуру и набор реквизитов, которые определяют его содержание.

#### 2. Справочники

Справочники содержат информацию, необходимую для ведения учета. Справочники могут быть связаны друг с другом, что позволяет создавать сложные иерархии данных.

#### 3. Регистры

Регистры служат для хранения изменений, происходящих в системе. Они делятся на регистры сведений, накопления и бухгалтерии. Регистр сведений хранит статистическую информацию, регистр накопления учитывает количественные и стоимостные характеристики, а регистр бухгалтерии используется для ведения бухгалтерского учета.

#### 4. Журналы документов

Журналы документов предназначены для отображения списка всех созданных документов за определенный период. Пользователь может фильтровать документы по различным критериям, просматривать их содержимое и редактировать при необходимости.

#### 5. Отчеты

Отчеты генерируются на основании данных, содержащихся в документах, справочниках и регистрах. Они предоставляют пользователям возможность получать сводную информацию в удобном виде. Отчеты могут быть настроены под конкретные задачи и потребности пользователей.

#### 6. Обработки

Обработки – это процедуры, выполняющие определенные действия над данными. Они могут использоваться для автоматического заполнения документов, проведения расчетов, формирования отчетов и других операций.

#### 7. Планы видов характеристик

Планы видов характеристик определяют структуру и правила работы с данными в системе. Например, план счетов в бухгалтерском учете определяет, каким образом будут вестись проводки и рассчитываться финансовые результаты.

#### 8. Роли

Роли определяют права доступа пользователей к различным объектам системы. Различные роли могут иметь разные уровни доступа, что обеспечивает безопасность и конфиденциальность данных.

#### 9. Константы

Константы представляют собой неизменяемые значения, используемые в системе.

#### 10. Бизнес-процессы

Бизнес-процессы описывают последовательность действий, необходимых для выполнения определенной задачи. Они помогают автоматизировать рутинные операции и контролировать выполнение этапов процесса.

Эти объекты являются основными строительными блоками любой конфигурации на платформе 1С. Вместе они обеспечивают гибкость и функциональность системы, позволяя настраивать ее под нужды конкретного предприятия.

На рис. 1 представлены основные объекты подсистемы аналитических показателей. Следует учитывать, что 1С является объектно-реляционной системой. Одному объекту, как правило, соответствует более одной таблицы реляционной базы данных.

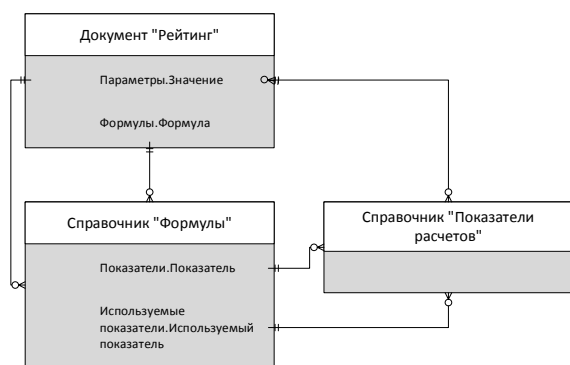


Рис. 1. Основные классы разрабатываемой системы

Показатели расчетов – справочник предназначен для регистрации и хранения показателей, используемых в формулах различных рейтингов. Основными реквизитами справочника являются:

- наименование – используется для обозначения показателя в формулах;
- описание – произвольное описание показателя;
- текст запроса – поле содержит запрос на языке программирования 1С, позволяющий получить значения показателя с заполнением необходимых параметров. Такое решение позволяет без доработки конфигурации получать значения необходимых показателей и впоследствии использовать их при составлении и расчете рейтингов.

Форма элемента справочника Показатели расчета представлена на рис. 2.

Рис. 2. Форма справочника Показатели расчета

Формулы – справочник предназначен для формирования различных формул рейтингов. Формулы составляются из предварительно подготовленных показателей расчетов. Формулы, как и показатели, могут быть описаны один раз и использованы многократно при со-

ставлении различных рейтингов и аналитических отчетов.

Справочник содержит следующие поля:

- описание – наименование пункта рейтинга или формулы расчета, предназначено для общего понимания содержания формулы;
- формула – собственно формула, по которой должен производиться расчет. При составлении формулы могут использоваться предварительно описанные показатели, операции сложения, вычитания, умножения и деления, скобки и числа. Такой набор позволяет составить большое количество формул.

Форма элемента справочника Формулы представлена на рис. 3.

Рис. 3. Форма справочника Формулы

Рейтинг – документ предназначен для составления наборов формул. В документе могут быть многократно использованы одни и те же формулы с различными значениями параметров. Документ содержит следующие реквизиты:

- формулы – табличная часть предназначена для выбора формул рейтинга, расчет которых будет осуществлен в текущем документе;
- фильтр – табличная часть отражает показатели формул и позволяет указать значения показателей для выбранных формул. Соответствие устанавливается по номеру формулы в табличной части Формулы и табличной части Фильтр;

- табличный документ – поле табличного документа, отражающего результаты расчета формул, выбранных в табличной части Формулы.

Форма документа Рейтинг представлена на рис. 4.

На текущий момент подсистема позволяет рассчитывать существующие внутренние рейтинги и, используя уже описанные показатели, оперативно подготавливать новые формулы и автоматизировать расчет новых аналитических отчетов. Однако есть перспективы развития

подсистемы и расширения ее функционала для возможности более оперативно рассчитывать значения показателей и хранить ранее полученные значения показателей для составления временных рядов и учета изменения значений показателей с течением времени.

Рис. 4. Форма документа Рейтинг

## Заключение

В результате выполнения работы разработана подсистема расчета аналитических показателей. Подсистема может быть интегрирована в любую конфигурацию на платформе 1С. Показатели настраиваются один раз и могут быть повторно использованы в различных формулах и отчетах. Формулы, также настроенные один раз, могут быть использованы в различных рейтингах или в одном рейтинге с разными параметрами.

Использование подсистемы облегчит и ускорит подготовку различных отчетных форм.

## Литература

1. О подходе к автоматизации процессов организации научной деятельности вуза (на примере Академии гражданской защиты МЧС России) / Н.А. Дрожжин,

Р.А. Ихсанов, П.А. Янышев, С.Л. Очетов // Научные и образовательные проблемы гражданской обороны. 2020. № 3 (46). С. 9-18.

2. Батчаева А.А. Разработка информационной системы для автоматизации управления образовательным процессом в вузе // Время науки. 2017. № 4 (40). С. 34-39.

3. Змушко М.Д., Вахрушева М.Ю. Автоматизация управления логистикой структурного подразделения вуза // Актуальные проблемы региональной экономики: анализ, диагностика и прогнозирование: материалы V Междунар. студ. науч.-практ. конф.. Нижегородский филиал МИИТ. Нижний Новгород: Стимул-СТ, 2015. С. 174-177.

4. Агапов В.Ю. Автоматизация образовательных процессов в вузе // Инженерные кадры – будущее инновационной экономики России. 2019. № 6. С. 4-8.

5. Курбонов Н.М., Юлдашев Р.Р., Рустамова М.Я. Кутубхона Тизими – Система автоматизации библиотек для вузов // Проблемы вычислительной и прикладной математики. 2022. № С2(40). С. 148-152.

6. Шафиев Н.Н., Еникеев Р.Р. Эффективность автоматизации процесса обработки заявлений на заселение в общежитие вуза // Молодежный вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. – 2022. № 1 (26). С. 141-146.

7. Родыгина И.В., Халеева Э.Л., Копцев М.А. К вопросу проектирования системы автоматизации проверки сформированности компетенций выпускников вуза // Вестник Государственного морского университета имени адмирала Ф. Ф. Ушакова. 2023. № 1 (42). С. 50-51.

8. Exploring the role of ranking systems towards university performance improvement: A focus group-based study / Tayyaba Rafique, Muhammad Usman Awan, Muhammad Shafiq, Khalid Mahmood // Heliyon. 2023. Vol. 9. No. 10. P. e20904.

9. Andrea Bonaccorsi, Tindaro Cicero Nondeterministic ranking of university departments // Informetrics. 2016. Vol. 10. No. 1. PP. 224-237.

10. Deming Li. An interactive teaching evaluation system for preschool education in universities based on machine learning algorithm // Computers in Human Behavior. 2024. Vol. 157, P. 108211.

11. Федеральный закон от 29.12.2012 № 273-ФЗ «Об образовании в Российской Федерации» (с изменениями и дополнениями). 2012. Ст. 4-11. С. 29.

12. Положение о внутренней оценке качества образования Воронежского государственного технического университета. 2023. 19 с.

Поступила 20.01.2025; принята к публикации 27.02.2025

## Информация об авторах

**Колыхалова Евгения Владимировна** – начальник отдела автоматизированных информационных систем управления информационных технологий, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), тел.: +7(473)207-22-20 доб.4800, e-mail: evkolihalova@yandex.ru, ORCID: 0009-0008-2443-1717

**Подвальный Семен 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

**Проскурин Дмитрий Константинович** – канд. физ.-мат. наук, доцент, ректор, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: rector@cchgeu.ru

**Голикова Татьяна Алексеевна** – магистрант кафедры искусственного интеллекта и цифровых технологий, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: sapris.kaf@cchgeu.ru, ORCID: 0009-0005-7947-2872



## DEVELOPMENT OF A SUBSYSTEM FOR CALCULATION OF ANALYTICAL INDICATORS

E.V. Kolykhalova, S.L. Podvalny, D.K. Proskurin, T.A. Golikova

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

**Abstract:** the article is devoted to the substantiation of the need to develop a subsystem of analytical indicators and software implementation of a solution for automating the calculation, description and reuse of rating calculation indicators when automating the system of assessing the work of a university both in terms of departments and as a whole. Higher education institutions regularly submit a large number of analytical reports to the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation. These reports are necessary for quality control of the educational process, assessing the effectiveness of universities and distributing funding. Assessing the quality of educational services, as well as the quality of work of university departments, and promptly preparing reports to higher authorities is extremely labor-intensive. To facilitate the preparation of reports and reduce the labor intensity of assessing the quality of the educational process, it is necessary to develop an automated system of analytical indicators. The subsystem of analytical indicators should provide the ability to promptly prepare reports and reuse the indicators used in preparing rating formulas. Analytical systems allow organizations to effectively manage data, identify patterns, predict trends and optimize business processes. The article provides a rationale for choosing a software development environment for a software module, as well as a description of the main objects of the developed subsystem

**Key words:** analytical indicators, information system, digitalization of the university

### References

1. Drozhzhin N.A., Ikhsanov R.A., Yanyshv P.A., Ochegov S.L. "On the approach to the automation of the processes of organizing scientific activities of the university (on the example of the Civil Defense Academy of the Ministry of Emergency Situations of Russia)", *Scientific and educational problems of civil defense*, 2020, no. 3 (46), pp. 9-18. EDN KENVDA.
2. Batchaeva A.A. "Development of an information system for the automation of the management of the educational process in the university", *Time of Science*, 2017, no. 4 (40), pp. 34-39. EDN YANKTSN.
3. Zmushko M.D., Vakhrusheva M.Yu. "Automation of logistics management of a structural division of a university", *Actual problems of regional economy: analysis, diagnostics and forecasting: Proceedings of the V International student scientific and practical conference*, Nizhny Novgorod, April 17, 2015, Nizhny Novgorod branch of MIIT, editor N.V. Pshenishnov, Nizhny Novgorod, Stimul-ST, 2015, pp. 174-177. EDN UEBGDZ.
4. Agapov V.Yu. "Automation of educational processes in the university", *Engineering personnel - the future of the innovative economy of Russia*, 2019, no. 6, pp. 4-8. EDN RABBGQ.
5. Kurbonov N.M., Yuldashev R.R., Rustamova M.Ya. "Kutubkhona Tizimi - Library automation system for universities", *Problems of computational and applied mathematics*, 2022, no. C2 (40), pp. 148-152. EDN GBRCNW.
6. Shafiev N.N., Yenikeev R.R. "Efficiency of automation of the process of processing applications for check-in to a university dormitory", *Youth Bulletin of the Ufa State Aviation Technical University*, 2022, no. 1 (26), pp. 141-146. EDN YGLVGY.
7. Rodygina I.V., Khaleeva E.L., Koptsev M.A. "On the issue of designing a system for automating the verification of the formation of competencies of uni-versity graduates", *Bulletin of the Admiral F. F. Ushakov State Maritime University*, 2023, no. 1 (42), pp. 50-51. EDN TDTTSD.
8. Tayyaba Rafique, Muhammad Usman Awan, Muhammad Shafiq, Khalid Mahmood "Exploring the role of ranking systems towards univer-sity performance improvement: A focus group-based study", *Heliyon*, 2023, vol. 9, no. 10, p. e20904.
9. Andrea Bonaccorsi, Tindaro Cicero "Nondeterministic ranking of university departments", *Informetrics*, 2016, vol. 10, no. 1, pp. 224-237.
10. Deming Li "An interactive teaching evaluation system for preschool education in universities based on machine learning algorithm", *Computers in Human Behavior*, 2024, vol. 157, pp. 108211.
11. Federal Law dated 29.12.2012 no. 273-FZ "On Education in the Russian Federation" (with amendments and additions), available at: <http://pravo.gov.ru/proxy/ips/?docbody=&nd=102162745>. 2012. Art. 4-11, 29.
12. "Regulations on the internal assessment of the quality of education of the Voronezh State Technical University", available at: <https://cchgeu.ru/upload/iblock/21d/s81t4ywph7heb9s2bh4m6mw9muirp1m/Polozhenie-o-vnutrenney-sisteme-otsenki-kachestva-obrazovaniya.pdf>. 2023.

Submitted 20.01.2025; revised 27.02.2025

### Information about the authors

**Evgeniya V. Kolykhalova** – Head of the Department of Automated Information Systems for Information Technology Management, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), tel.: +7 (473) 207-22-20 ext. 4800, [evkolihalova@yandex.ru](mailto:evkolihalova@yandex.ru) ORCID: 0009-0008-2443-1717

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

**Dmitry K. Proskurin** – Cand. Sc. (Phys. and Mathematics), Associate Professor, Rector, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: [rector@cchgeu.ru](mailto:rector@cchgeu.ru)

**Tatyana A. Golikova** – Master's Student, Department of Artificial Intelligence and Digital Technologies, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), ORCID: 0009-0005-7947-2872

**ДИНАМИЧЕСКИЙ АЛГОРИТМ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ НАГРУЗКИ МЕЖДУ  
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫМИ РЕСУРСАМИ ЦЕНТРА ОБРАБОТКИ ДАННЫХ****В.П. Мочалов, Г.В. Слюсарев, Н.Ю. Братченко, Д.В. Гостева****Северо-Кавказский федеральный университет, г. Ставрополь, Россия**

**Аннотация:** рассматривается разработка динамического алгоритма распределения и балансировки нагрузки, характеризующейся нелинейными параметрами и фрактальной структурой, между вычислительными ресурсами центров обработки данных облачных сред (ЦОД). Дано обоснование применения методов нелинейной динамики и теории хаоса к решению данной задачи, в основу которой положено топологическое сходство поведения детерминированных хаотических систем и входной сетевой нагрузки ЦОД. Проверка на хаотичность нагрузки выполнена путем расчета показателей Ляпунова. Для устранения шумовых компонент сетевого трафика применен метод главных компонент его временного ряда. Задача реконструкции фазового пространства решена методом задержек, в основе которого лежат теорема о вложении и метод средней взаимной информации. На базе данной реконструкции разработан метод прогнозирования динамики нагрузки, представленный в виде системы дискретных отображений, связанных алгебраическим полиномом, обеспечивающим успешное прогнозирование нерегулярных временных рядов и положенных в основу построения матрицы распределения ресурсов ЦОД. Целью статьи является повышение эффективности использования ресурсов серверов кластеров ЦОД в условиях фрактальной структуры сетевой нагрузки путем разработки динамического алгоритма ее распределения и балансировки на основе методов нелинейной динамики

**Ключевые слова:** распределение нагрузки, нелинейная динамика, прогноз, локальная аппроксимация

**Введение**

Существующие модели и алгоритмы системы управления сетевой нагрузкой ЦОД, сформированные на предположениях случайности процессов ее поступления и обработки и нормальном законе распределения, основаны на широко известных методах, не учитывающих ее долговременную корреляцию и фрактальную структуру, что вызывает существенное снижение эффективности использования ресурсов процессоров, качество распределения нагрузки между вычислительными ресурсами ЦОД, а так же качество обслуживания пользователей. Многочисленными исследованиями установлено [1, 2, 3], что сетевая нагрузка ЦОД не стационарна, обладает свойствами последствия, фрактальными свойствами, взрывным характером поступления, чувствительным к начальным условиям, детерминированным хаосом, а также самоподобным характером. Данные особенности сетевой нагрузки вызывают необходимость разработки более совершенного алгоритма ее распределения между информационными ресурсами ЦОД, способного отслеживать тенденции загрузки ее отдельных узлов, предотвращать перегрузки информационной системы, а также оперативно реагировать на флуктуации во входящем потоке за-

просов, обеспечивая этим существенное повышение качества обслуживания пользователей. В основу предлагаемого динамического алгоритма распределения нагрузки положена методика краткосрочного прогнозирования ее интенсивности, разработанная на основе подходов нелинейной динамики. При этом используется одно из важнейших свойств процессов нелинейной динамики, предполагающее, что аттрактор хаотического процесса может быть реконструирован по одной из его координат, определенной как скалярный временной ряд, представленный, в данном случае, в виде нормированных значений интенсивностей входного телекоммуникационного трафика. Использование краткосрочных прогнозных оценок интенсивности входной нагрузки ЦОД обеспечивает своевременное определение тенденций ее развития, эффективную загрузку и использование вычислительных ресурсов. На этой основе разработан метод локальной аппроксимации динамики процесса изменения интенсивности нагрузки, используемый для ее прогноза. Краткосрочное прогнозирование состояния входной нагрузки ЦОД обеспечивает решение задачи рационального динамического ее распределения между вычислительными ресурсами и повышение качества реализуемых сервисов.

## Материал и методы исследования

Задача распределения нагрузки имеет вид

$$P_{ij}(k_1, k_2, \dots, k_N) = f(k, N, \lambda), \quad (1)$$

$$\begin{aligned} P_{ij} &= [x_{ij}], \quad (i=1, M; j=1, N) \\ R_j(k) &= R_j(k-1) + \sum_{i=1}^N \lambda_{ij} \cdot x_{ij}(k), \end{aligned} \quad (2)$$

где  $x_{ij}$  – матрица распределения ресурсов;

$N$  – число серверов  $j = (1, N)$ ;

$M$  – число измерений нагрузки  $i = (1, M)$ ;

$\lambda$  – входная нагрузка ЦОД;

$\lambda_{ij}(k)$  – прогноз интенсивности  $i$ -ой нагрузки

на  $j$ -сервер на  $k$ -интервале.

Критерием оценки качества решения задачи является показатель  $H$  минимального отклонения текущей нагрузки серверов от предварительно заданной

$$H = \frac{\sum_{j=1}^N (\bar{R} - R_j(k))^2}{N} \rightarrow \min \quad (3)$$

при условии

$$\begin{aligned} \sum_{j=1}^N x_{ij}(k) &= 1, \quad i = \overline{(1, M)}; \\ \sum_{j=1}^N \lambda_{ij}(k) &= \lambda, \quad i = \overline{(1, M)}. \end{aligned} \quad (4)$$

Топологическое сходство поведения детерминированных хаотических систем и входной сетевой нагрузки ЦОД [4,5,6] дает возможность применения для ее исследования прикладной нелинейной динамики, прогнозирования поведения, способного отслеживать тенденции изменения нагрузки отдельных узлов ЦОД, а также оптимального ее распределения по серверам. Детерминированные хаотические процессы описывают эволюцию системы во времени в некотором фазовом пространстве, а аттрактор такого процесса, в соответствии с теоремой Такенса-Мане, может быть восстановлен с помощью метода задержки [7]. Определить свойства аттрактора динамического процесса можно путем построения псевдоаттрактора, в котором компонентами вектора в фазовом пространстве являются элементы временного ряда, полученные с некоторой временной задержкой. Для прогнозирования динамики подобного процесса необходимо определить  $m$  – размерность его вложения и  $\tau$  – лаг.

Если известна статистика временного ряда, а также количество его измерений  $M$ , то размерность фазового пространства будет равна

$M - (m-1)\tau$ , а прогнозная модель сетевой нагрузки имеет вид [8]

$$\begin{aligned} x_{i+1} &= f_1(x_i, x_{i-1}, \dots, x_{i-m+1}); \\ x_{i+2} &= f_2(x_i, x_{i-1}, \dots, x_{i-m+1}); \\ &\dots \\ x_{i+n} &= f_n(x_i, x_{i-1}, \dots, x_{i-m+1}), \end{aligned} \quad (5)$$

где  $x_i$  – элементы ряда;

$i = m-1, m, \dots, M-m-1$ ;

$f_n$  – полином степени  $n$ ;

$$f(x) = \sum_{l_1, l_2, \dots, l_n=0}^V C_{l_1, l_2, \dots, l_n} \prod_{i=1}^m x_i^{l_i}, \quad \sum_{i=1}^n l_i \leq V$$

$C_{l_1, l_2, \dots, l_n}$  – коэффициенты  $V$ -го полинома.

При этом численное значение  $m$  можно определить по тангенсу углу наклона графика зависимости  $\log C(e)$  от  $\log(e)$ , где

$$C(e) = \lim_{M \rightarrow \infty} \frac{1}{M(M-1)} \sum_{i,j=1}^N Q(e - p(x_i, x_j)), \quad (6)$$

$$Q(x) = \begin{cases} 1, & x < 0; \\ 0, & x \geq 0; \end{cases}$$

$$p(x_i, x_j) = \|x_i - x_j\|; \quad N = M - (m-1)\tau;$$

$e$  – окрестность точек аттрактора.

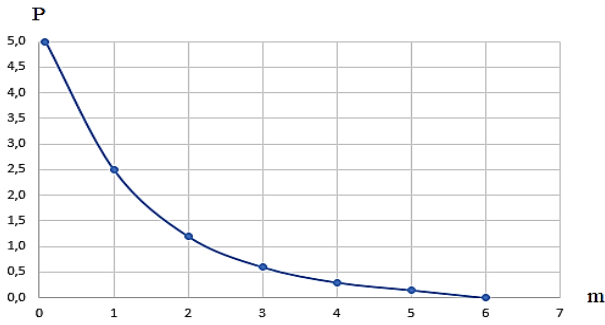
Для реальных детерминированных хаотических систем хорошим приближением для определения размерности фазового пространства  $m$  является метод Грасбергера и Прокаччи [9,10], при котором для всех точек временного ряда находят их ближайших соседей, вычисляются расстояния между ними и сравниваются с заданным порогом. Чтобы в восстановленном фазовом пространстве псевдоаттрактор однозначно соответствовал реальному аттрактору, необходимо выполнить условие Тейлора

$$\omega > \tau \left( \frac{2}{N} \right)^{\frac{2}{m}}. \quad (7)$$

При этом осуществляется многошаговая реализация выражения

$$R_i = \frac{\|\bar{x}(i+1) - \bar{x}(j+1)\|}{\|\bar{x}(i) - \bar{x}(j)\|}, \quad (8)$$

путем последовательного изменения  $m$  и определения числа ближайших точек  $P$ . При  $P/N = 0$ , получаем оптимальное значение  $m$  (рис. 1).


 Рис. 1. Зависимость  $P$  от  $m$ 

Критерием достаточности размерности вложения считается доля точек, расстояние между которыми превышают пороговое значение.

В основу определения временной задержки  $\tau$  [11, 12] положена функция

$$I(\tau) = -\sum_{i,j} P_{ij}(\tau) \ln \frac{P_{ij}(\tau)}{P_i P_j}, \quad (9)$$

где  $P_i$  и  $P_j(\tau)$  вероятность одновременного нахождения точек  $i$  и  $j$  в окрестностях точек аттрактора. При этом минимальное значение временной задержки вычисляется при первом наименьшем значении  $I(\tau)$  (рис. 2).

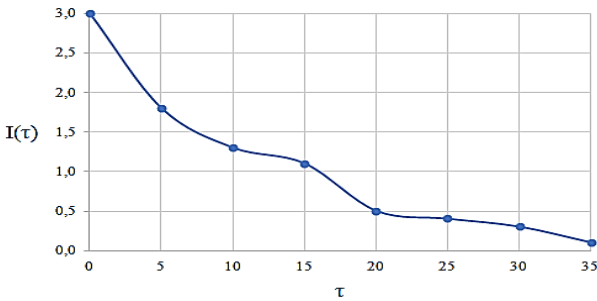
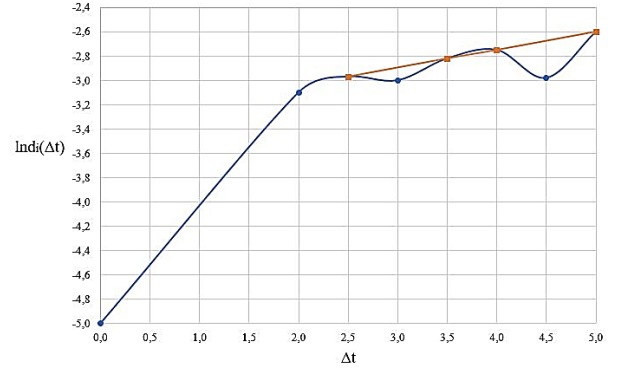


Рис. 2. График для определения временной задержки

Хаотичность входной сетевой нагрузки определяется путем расчета максимального показателя Ляпунова [13,14]  $\lambda_1$

$$\lambda_1(i, k) = \frac{1}{k \Delta t} \left( \ln \frac{d_j(i+k)}{d_j(i)} \right) = \frac{1}{k \Delta t} [\ln d_j(i+k) - \ln d_j(i)],$$

где  $\Delta t$  – период ряда;  $d_j(i)$  – расстояние между близкими соседями,  $d(t) = C e^{\lambda_1 t}$ ,  $d_j(i) = C_j e^{\lambda_1(i \Delta t)}$ ,  $\ln d_j(i) \approx \ln C_j + \lambda_1(i \Delta t)$ . Из графика, представленного на рис. 3, следует, что показатель Ляпунова изменяется в пределах 2.6-3.0.


 Рис. 3. График определения  $\lambda_1$ 

Для фильтрации шумов и случайных возмущений нагрузки информационной системы ЦОД используем метод главных компонент (SVD-метод), реализованный на программной платформе LinalgAlgebra [15,16]. При этом траекторная матрица сетевой нагрузки представляется в виде суммы элементарных матриц

$$X = U \sum V^T = \sum_{i=1}^L x_i, \quad (10)$$

$$x_i = \sigma_i u_i v_i^T,$$

$$c_i = \sigma_i^2 / \sum_{j=1}^L \sigma_j^2.$$

После этого производится усреднение матриц  $X_{I_k}$  и восстановление ряда  $S_N$  с новыми элементами  $x_n^k$

$$x_n^k = \begin{cases} \frac{1}{n} \sum_m X_{m, n-m+1} & \text{при } 1 \leq n < L \\ \frac{1}{L} \sum_{m=1}^L X_{m, n-m+1} & \text{при } L \leq n < K \\ \frac{1}{N-n+1} \sum_{m=n-k+1}^n X_{m, n-m+1} & \text{при } K+1 \leq n < N \end{cases} \quad (11)$$

$$f_n = \sum_{k=1}^m f_n^k.$$

Известно [17,18], что совокупность медленно меняющихся главных компонент определяет тренд временного ряда, т.е. восстановить тенденцию развития ряда удастся с помощью наиболее значимых его компонент и устранения случайных составляющих. Определить составляющие тренда удастся путем исследования графиков главных компонент временного ряда. Пример численных значений главных компонент исходного ряда, полученных на этапе декомпозиции, приведен на рис. 4. Рядом с номером главной компоненты показан ее вклад в структуру восстанавливаемого ряда. Из графиков видно, что более 60 % дисперсии данных



обеспечивают первые три компонента ряда, которые и определяют его тренд. Остальные компоненты ряда связаны с его периодическими и нежелательными шумовыми составляющими. Восстановление временного ряда, ис-

ключение из него периодических и шумовых составляющих производится путем построения матрицы группированных собственных троек и процедуры диагонального усреднения.

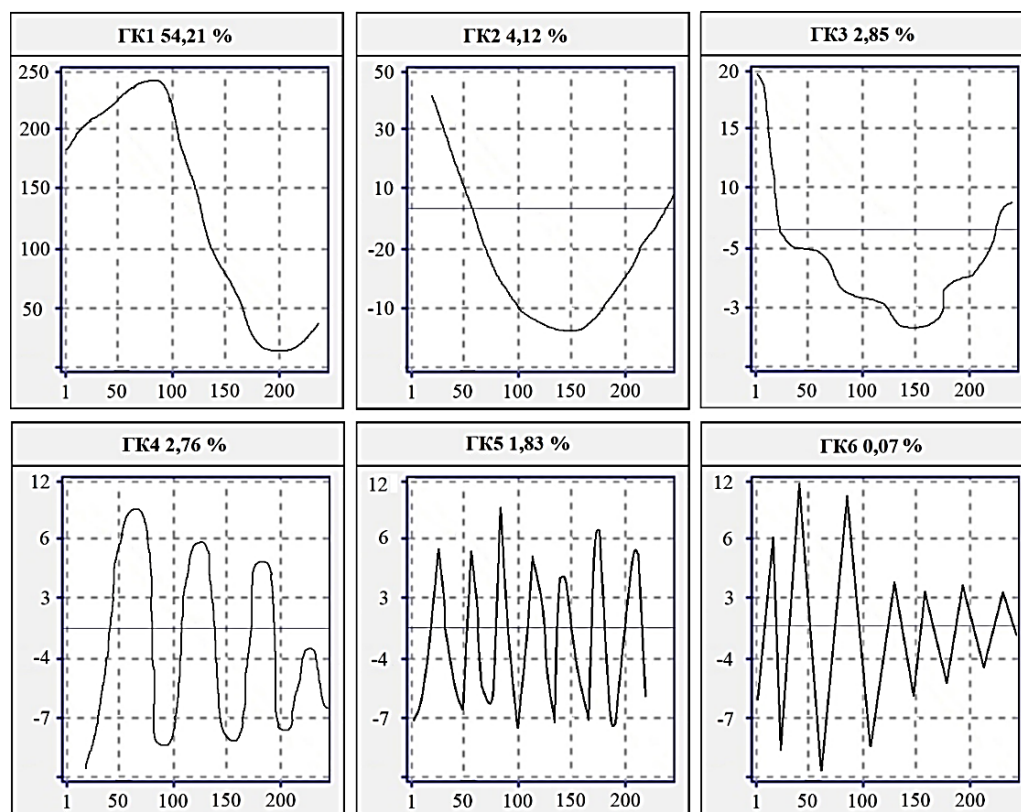


Рис. 4. Главные компоненты исходного временного ряда

Значение неустранимых аномалий нагрузки определяется выражением

$$W = \frac{\sum_i (A_i - x_i)^2}{\sum_i (R_i)^2} \cdot 100\% . \quad (12)$$

При этом числитель выражает разницу между реконструированными и реальными значениями временных рядов, а знаменатель – численное значение помех.

Таким образом, динамический алгоритм распределения нагрузки между вычислительными ресурсами ЦОД будет включать в себя пять основных шагов:

1. Определение хаотичности временного ряда сетевой нагрузки путем определения значения главного показателя Ляпунова

$$\lambda_1(i, k) = \frac{1}{k \Delta t} \left( \ln \frac{d_j(i+k)}{d_j(i)} \right) = \frac{1}{k \Delta t} [\ln d_j(i+k) - \ln d_j(i)] .$$

2. Восстановление фазового пространства

$$I(\tau) = - \sum_{i,j} P_{ij}(\tau) \ln \frac{P_{ij}(\tau)}{P_i P_j} .$$

$$C(e) = \lim_{M \rightarrow \infty} \frac{1}{M(M-1)} \sum_{i,j=1}^N Q(e - p(x_i, x_j)) .$$

3. Восстановление временного ряда по выбранным главным компонентам с использованием сингулярного спектрального анализа.

4. Разработка прогнозной модели

$$f(x) = \sum_{l_1, l_2, \dots, l_n=0}^V C_{l_1, l_2, \dots, l_n} \prod_{i=1}^m x_i^{l_i} , \quad \sum_{i=1}^n l_i \leq V .$$

5. Распределение сетевой нагрузки по серверам кластера ЦОД на основе ее прогнозных значений

$$R_j(k) = R_j(k-1) + \sum_{i=1}^N \lambda_{ij}(k) \cdot x_{ij}(k) .$$

### Экспериментальное исследование динамического алгоритма распределения нагрузки

Структурная схема вычислительных ресурсов информационной системы ЦОД состоит из совокупности физических серверов и виртуальных машин, блока сбора информации, блока принятия решений о распределении нагрузки, глобального и локального менеджеров [19, 20].

Экспериментальное исследование разработанного алгоритма проведено с использованием имитационной модели, построенной на основе пакета программ TISEAN 3.0.1., платформы Huawei 2488, маршрутизаторов Cisco Catalyst 2960G-48.

Интенсивность потоков данных между серверами равна 1 Гбит/с. Показатели миграции подчинены гауссову распределению. Результаты исследования представлены в табл. 1.

Таблица 1

Загрузка серверов										
Количество серверов	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
% загрузки серверов при Round Robin	27	43	35	51	32	35	30	41	29	27
% загрузки серверов при динамическом алгоритме	73	75	70	75	80	–	–	–	–	–
% использования памяти при Round Robin	32	23	27	39	21	25	20	32	28	17
% использования памяти при динамическом алгоритме	80	68	73	70	76	–	–	–	–	–

Из проведенного исследования следует, что динамический алгоритм распределения нагрузки между вычислительными ресурсами ЦОД обеспечивает достаточно равномерную загрузку его серверов. При заданной нагрузке ЦОД количество используемых вычислительных ресурсов сокращается приблизительно на 50 %, по сравнению с широко используемым алгоритмом Round Robin. Определена также зависимость эффективности использования ресурсов серверов ЦОД от точности предложенной модели прогнозирования.

В табл. 2 представлены численные значения измеренных и прогнозируемых значений временного ряда трафика компьютерной сети предприятия. Наибольшее отклонение прогнозных значений от реальных составило около 7 %. На рис. 5 представлена схема оценки точности прогноза.

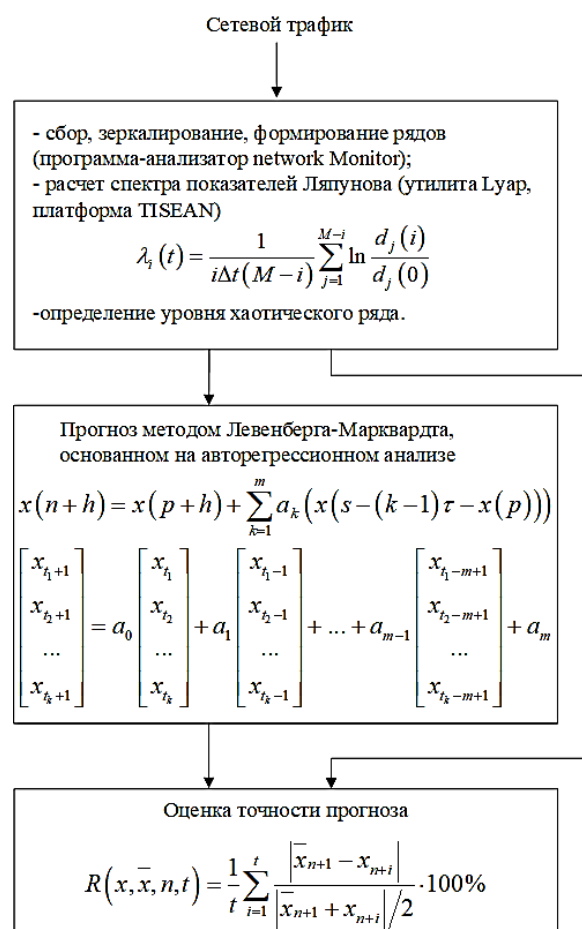


Рис. 5. Схема оценки точности прогноза

Таблица 2

## Параметры моделирования

Время, мин	10:00	10:10	10:20	10:30	10:40	10:50	11:00	11:10
Расчетные значения, Гбит/с	1.25	0.95	0.95	0.77	0.77	0.80	0.86	0.89
Измерения, Гбит/с	1.20	0.87	0.97	0.79	0.75	0.84	0.75	0.75
Время, мин	11:20	11:30	11:40	11:50	12:00	12:10	12:20	12:30
Расчетные значения, Гбит/с	0.87	0.98	0.87	0.83	1.25	0.84	0.81	1.15
Измерения, Гбит/с	0.78	0.95	0.84	0.87	1.16	0.89	0.74	1.00
Время, мин	12:40	12:50	13:00	13:10	13:20	13:30	13:40	13:50
Расчетные значения, Гбит/с	1.24	1.13	1.10	1.10	1.24	1.10	1.10	1.13
Измерения, Гбит/с	1.29	1.07	1.02	1.10	1.20	0.98	1.14	1.16
Время, мин	14:00	14:05	14:10	14:15	14:20	14:25	14:30	14:35
Расчетные значения, Гбит/с	1.26	1.14	1.15	0.95	0.95	0.98	0.97	1.17
Измерения, Гбит/с	1.29	1.15	1.12	0.98	0.93	0.89	0.96	1.20
Время, мин	14:40	14:45	14:50	14:55	15:00	15:05	15:10	15:15
Расчетные значения, Гбит/с	1.15	1.24	1.17	1.18	0.95	1.43	1.35	1.27
Измерения, Гбит/с	1.21	1.25	1.15	1.15	0.87	1.33	1.37	1.19
Время, мин	15:20	15:25	15:30	15:35	15:40	15:45	15:50	15:55
Расчетные значения, Гбит/с	1.36	1.38	1.29	1.19	1.34	1.35	1.27	1.35
Измерения, Гбит/с	1.30	1.30	1.25	1.17	1.32	1.34	1.20	1.30

**Обсуждение**

Традиционно, при распределении и балансировки сетевой нагрузки ЦОД, преимущественно используется стохастический подход и на его основе решаются задачи интерполяции и экстраполяции временных рядов телекоммуникационного трафика и в дальнейшем осуществляются прогнозные оценки их характеристик. Результаты многочисленных исследований современного трафика компьютерных сетей свидетельствуют о присутствии детерминированного хаоса в его распределении, а также о его самоподобном характере и фрактальной структуре. Поэтому в работе, на основе аппарата теории динамических систем и детерминированного хаоса, разработан алгоритм динамического распределения нагрузки между вычисли-

тельными ресурсами ЦОД, обеспечивающий учет предыдущего состояния нагрузки системы и основанный на аппарате нелинейной динамики. Фильтрация исходного временного ряда проведена с помощью метода главных компонент временного ряда путем выявления наиболее значимых компонент, устранения не значимых шумовых и восстановление временного ряда с более высоким отношением сигнал/шум.

**Заключение**

1. В основу динамического алгоритма распределения нагрузки между вычислительными ресурсами ЦОД положен метод локальной аппроксимации и краткосрочного прогнозирования ее состояния.

2. Хаотичность входной нагрузки определяется с помощью программ пакета TISEAN 3.0.1., с использованием утилиты lyar\_k.

3. Восстановление динамики сетевой нагрузки производится на основе использования нелинейного аппроксимирующего полинома.

4. Разработанный алгоритм включает в себя пять основных шагов, реализованных на основе теоремы Такенса-Мане, метода Левенберга-Марквардта, использования нелинейного аппроксимирующего полинома, метода сингулярного спектрального анализа.

5. В качестве критерия оценки эффективности разработанного алгоритма использован показатель равномерной загрузки серверов кластеров ЦОД.

6. Экспериментальное исследование показало, что применение данного алгоритма сокращает количество используемых вычислительных ресурсов приблизительно на 50%, по сравнению с широко используемым алгоритмом Round Robin.

#### Литература

1. Sheluchin O.I., Smolskiy S.M., Osin A.V. *Fraktal'nye processy v telekommunikatsiyah* [Fractal Processes in Telecommunications], M.: Radio Engineering, 2003. 479 p.
2. Self-similarity through high-variability: Statistical analysis of Ethernet LAN traffic at the source level / W. Willinger, M.S. Taqqu, R. Sherman, D.V. Wilson // *IEEE/ACM Trans. Netw.* 2007. Vol. 5. No. 1. P. 71-86.
3. Fuzzy Model of Dynamic Traffic Management in Software-Defined Mobile Networks / A. Vladyko, I. Letenko, A. Lezhepekov, M. Buinevich // *Lecture Notes in Computer Science*. 2016. Vol. 9870. P. 561-570.
4. An analytical model of a corporate software-controlled network / V.P. Mochalov, G.I. Linets, N.Y. Bratchenko, S.V. Govorova // *Scalable Computing*. 2020. 21 (2). P. 337-346.
5. Голяндина Н.Э. Метод «Гусеница»-SSA: анализ временных рядов: учеб. пособие. СПб: Изд-во СПбГУ, 2004. 76 с.
6. Multiscale analysis of complex time series integration of chaos and random fractal theory, and beyond / Gao J. [et al.] // John Wiley & Sons. New Jersey, 2007. 354 p.
7. Larsson C. Chapter 8 – Flow-Controlled Packet Networks. *Design of Modern Communication Networks. Methods and Applications*, 2014. P. 237-271.
8. Tsyrlunikov M.D. Stochastic modelling of model errors: a simulation study // *Quart. J. R. Meteorol. Soc.* 2005. Vol. 131. Issue 613 (October 2005. Part C). P. 3345-3371.
9. Мальцев Г.Н., Назаров А.В., Якимов В.Л. Алгоритм реконструкции фазового пространства динамической системы и его применение // Санкт-Петербург: Информационно-управляющие системы. 2014. № 2. С. 33-39.
10. Sheluchin O.I., Smolskiy S.M., Osin A.V. *Self-Similar Processes in Telecommunications*. New York: John Wiley & Sons, 2007. 320 p.
11. Hyperbolicity and the effective dimension of spatially-extended dissipative systems / H.-L. Yang, K.A. Takeuchi, F. Ginelli, H. Chat'e, G. Radons // *Phys. Rev. Lett.* 2009. Vol. 102. P. 074102.
12. Kuptsov P.V., Parlitz U. Strict and fussy modes splitting in the tangent space of the Ginzburg-Landau equation // *Phys. Rev. E*. 2010. Vol. 81. P. 036214.
13. Mochalov V.P., Bratchenko N.Y. Load Balancing Method for a Data Center Computing Cluster Proceedings – 2022 International Russian Automation Conference. *RusAutoCon 2022*. P. 755-760.
14. Hong Y.S., No J.H., Kim S.Y. DNS-based load-balancing in distributed web- serversystems, in: Fourth IEEE Workshop on Software Technologies for Future Embedded and Ubiquitous Systems (WCCIA 2006), 2006. P. 4.
15. Loskutov A. *Mathematical Foundations of Chaotic Dynamical Systems: a Course of Lectures*. Moscow: Lomonosov Moscow State University Publ., 2007. 78 p.
16. Ebada Sarhan, Atif Ghalwash. Queue Weighting Load-Balancing Technique for Database Replication in Dynamic Content Web Sites. Proceedings of the 9th WSEAS International Conference on APPLIED COMPUTER SCIENCE, 2009. P. 50-55.
17. Mochalov V.P., Bratchenko N.Y. Mathematical Model of Load Distribution for Data Center Server Clusters Proceedings // International Russian Automation Conference, *RusAutoCon*, 2021. P. 902-906.
18. Александров Ф.И., Голяндина Н.Э. Автоматизация выделения трендовых и периодических составляющих временного ряда в рамках метода «Гусеница- SSA». СПб: ООО «Издательство ВВМ», 2004. С. 152.
19. Федоров А.Я., Мелентьева Т.А., Мелентьева М.А. Стохастическая динамика систем // *Фундаментальные исследования*. 2008. № 2. С. 112-113.
20. Mochalov V.P., Bratchenko N.Y. Methods and models of resource allocation service in load balancing clusters for data centers Modeling // *Lecture Notes in Networks and Systems*. 2021. Vol. 230. P. 552-563.

Поступила 13.01.2025; принята к публикации 27.02.2025

#### Информация об авторах

**Мочалов Валерий Петрович** – д-р техн. наук, профессор департамента цифровых, робототехнических систем и электроники, Северо-Кавказский федеральный университет (355017, Россия, г. Ставрополь, ул. Пушкина, 1), e-mail: mochalov.valery2015@yandex.ru, тел.: 8 (962) 400-44-47, ORCID: 0000-0002-5131-5649

**Слюсарев Геннадий Васильевич** – д-р техн. наук, профессор департамента строительной инженерии и прототипирования, Северо-Кавказский федеральный университет (355017, Россия, г. Ставрополь, ул. Пушкина, 1), e-mail: gslusarev@ncfu.ru, тел.: 8 (8652) 94-40-10 доб. код 1498, ORCID: 0000-0002-7947-7682

**Братченко Наталья Юрьевна** – канд. физ.-мат. наук, доцент департамента цифровых, робототехнических систем и электроники, Северо-Кавказский федеральный университет (355017, Россия, г. Ставрополь, ул. Пушкина, 1), e-mail: nbratchenko@ncfu.ru, тел.: 8(8652) 95-69-97 доб. код 5360, ORCID: 0000-0002-4753-6705

Гостева Дарья Валерьевна – программист, Северо-Кавказский федеральный университет (355017, Россия, г. Ставрополь, ул. Пушкина, 1), e-mail: DVGus@yandex.ru, тел.: 8 (961) 495-81-53, ORCID: 0009-0005-6233-123X

## DYNAMIC ALGORITHM FOR LOAD DISTRIBUTION BETWEEN COMPUTING RESOURCES OF A DATA PROCESSING CENTER

V.P. Mochalov, G.V. Slyusarev, N.Yu. Bratchenko, D.V. Gosteva

North Caucasus Federal University, Stavropol, Russia

**Abstract:** this article is dedicated to the development of a dynamic algorithm for load distribution and balancing, characterized by nonlinear parameters and a fractal structure, across the computational resources of data processing centers (DPCs) in cloud environments. The justification for applying methods of nonlinear dynamics and chaos theory to this problem is provided, based on the topological similarity between the behavior of deterministic chaotic systems and the input network load of DPCs. The chaotic nature of the load is verified by calculating Lyapunov exponents. To eliminate noise components in network traffic, the principal component method for time series was applied. The phase space reconstruction task was solved using the delay method, based on the embedding theorem and the method of average mutual information. Based on this reconstruction, a method for forecasting load dynamics was developed, represented as a system of discrete mappings connected by an algebraic polynomial, which ensures successful forecasting of irregular time series. This method forms the foundation for constructing the resource distribution matrix of the DPC. The article's goal is to improve the efficiency of server cluster resources in DPCs under fractal network load conditions by developing a dynamic algorithm for load distribution and balancing based on nonlinear dynamics methods

**Key words:** load distribution, nonlinear dynamics, forecasting, local approximation

### References

1. Sheluchin O.I., Smolskiy S.M., Osin A.V. "Fractal Processes in Telecommunications", Moscow, Radio Engineering, 2003, 479 p.
2. Willinger W., Taqqu M.S., Sherman R., Wilson D.V. "Self-similarity through high-variability: Statistical analysis of Ethernet LAN traffic at the source level", *IEEE/ACM Trans. Netw.*, 2007, vol. 5, iss. 1, pp. 71–86. doi: 10.1109/90.554723
3. Vladenko A., Letenko I., Lezhepekov A., Buinevich M. "Fuzzy Model of Dynamic Traffic Management in Software-Defined Mobile Networks", *Lecture Notes in Computer Science*, 2016, vol. 9870, pp. 561–570.
4. Mochalov V.P., Linets G.I., Bratchenko N.Y., Govorova S.V. "An analytical model of a corporate software-controlled network", *Scalable Computing*, 2020, no. 21 (2), pp. 337–346.
5. Golyandina N. E. "The "Caterpillar"-SSA method: time series analysis: textbook", St. Petersburg, St. Petersburg State University, 2004, 76 p.
6. Gao J. et al. "Multiscale analysis of complex time series integration of chaos and random fractal theory, and beyond", John Wiley & Sons, New Jersey, 2007, 354 p.
7. Larsson C. "Chapter 8 – Flow-Controlled Packet Networks. Design of Modern Communication Networks", *Methods and Applications*, 2014, pp. 237–271. doi: 10.1016/B978-0-12-407238-1.00008-7.
8. Tsyrlunikov M.D. "Stochastic modelling of model errors: a simulation study", *Quart. J. R. Meteorol. Soc.*, 2005, vol. 131, iss. 613 (October 2005. Part C), pp. 3345–3371.
9. Maltsev G.N., Nazarov A.V., Yakimov V.L. "Algorithm for reconstruction of the phase space of a dynamic system and its application", *St. Petersburg: Information and control systems*, 2014, no. 2, pp.33–39.
10. Sheluchin O.I., Smolskiy S.M., Osin A.V. "Self-Similar Processes in Telecommunications", New York, John Wiley & Sons, 2007., 320 p.
11. Yang H.-L., Takeuchi K.A., Ginelli F., Chat'e H., Radons G. "Yperbolicity and the effective dimension of spatially-extended dissipative systems", *Phys. Rev. Lett.*, 2009, vol. 102, pp. 074102.
12. Kuptsov P.V., Parlitz U. "Strict and fussy modes splitting in the tangent space of the Ginzburg–Landau equation", *Phys. Rev. E.*, 2010, vol. 81, pp. 036214.
13. Mochalov V.P., Bratchenko N.Y. "Load Balancing Method for a Data Center Computing Cluster Proceedings", *2022 International Russian Automation Conference. RusAutoCon 2022*, 2022, pp. 755–760.
14. Hong Y.S., No J.H., Kim S.Y. "DNS-based load-balancing in distributed web- serversystems", *Fourth IEEE Workshop on Software Technologies for Future Embedded and Ubiquitous Systems (WCCIA 2006)*, 2006, p. 4.
15. Loskutov A. "Mathematical Foundations of Chaotic Dynamical Systems: a Course of Lectures", Moscow, Lomonosov Moscow State University, 2007, 78 p.
16. Ebada Sarhan, Atif Ghalwash "Queue Weighting Load-Balancing Technique for Database Replication in Dynamic Content Web Sites", *Proceedings of the 9th WSEAS International Conference on APPLIED COMPUTER SCIENCE*, 2009, pp. 50–55.
17. Mochalov V.P., Bratchenko N.Y. "Mathematical Model of Load Distribution for Data Center Server Clusters Proceedings", *International Russian Automation Conference, RusAutoCon 2021*, pp. 902–906, DOI:10.1109/RusAutoCon52004.2021.9537413.
18. Alexandrov F.I., Golyandina N.E. "Automation of the allocation of trend and periodic components of a time series within the framework of the Caterpillar- SSA method", St. Petersburg, 2004, p. 152.



19. Fedorov A.Ya., Melentyeva T.A., Melentyeva M.A. “Stochastic dynamics of systems”, *Fundamental Research*, 2008, No. 2. pp. 112-113. URL: <http://fundamental-research.ru/ru/article/view?id=2659> 250
20. Mochalov V.P., Bratchenko N.Y. “Methods and models of resource allocation service in load balancing clusters for data centers Modeling”, *Lecture Notes in Networks and Systems*, 2021, vol. 230, pp., 552-563, DOI: 10.1007/978-3-030-77442-4\_47, Scopus: 2-s2.0-85113378277.

Submitted 13.01.2025; revised 27.02.2025

#### Information about the authors

**Valery P. Mochalov** – Dr. Sc. (Technical), Professor, Department of Digital, Robotic Systems and Electronics, North Caucasus Federal University (1 Pushkina str., Stavropol 355017, Russia), e-mail: [mochalov.valery2015@yandex.ru](mailto:mochalov.valery2015@yandex.ru), tel.: +7 962 400-44-47, ORCID: 0000-0002-5131-5649

**Gennady V. Slyusarev** – Dr. Sc. (Technical), Professor, Department of Civil Engineering and Prototyping, North Caucasus Federal University (1 Pushkina str., Stavropol 355017, Russia), e-mail: [gslyusarev@ncfu.ru](mailto:gslyusarev@ncfu.ru), tel.: 8 (8652) 94-40-10 code 1498, ORCID: 0000-0002-7947-7682

**Natalya Yu. Bratchenko** – Cand. Sc. (Physical and Mathematical), Associate Professor, Department of Digital, Robotic Systems and Electronics, North Caucasus Federal University (1 Pushkina str., Stavropol 355017, Russia), e-mail: [nbratchenko@ncfu.ru](mailto:nbratchenko@ncfu.ru), tel.: +7 (8652) 95-69-97 code 5360, ORCID: 0000-0002-4753-6705

**Darya V. Gosteva** – Programmer, North Caucasus Federal University (1 Pushkina str., Stavropol 355017, Russia) e-mail: [DVGus@yandex.ru](mailto:DVGus@yandex.ru), tel.: +7 961 495-81-53, ORCID: 0009-0005-6233-123X



## МЕТОД МОДЕЛИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ ДЛЯ ПРАВИЛЬНОГО РАСЧЕТА АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С КОРОТКОЗАМКНУТЫМ РОТОРОМ

К.Е. Кононенко, А.В. Кононенко

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

**Аннотация:** когда необходимо наилучшим способом спроектировать асинхронный двигатель, в них следует обратить особое внимание на моделирование электромагнитного поля. На сегодня таким методом является численный метод конечных элементов. Умение рассчитывать электромагнитное поле во многом определяет результирующий эффект успешного проектирования электрической машины, когда ее параметры будут полностью соответствовать данным технического задания. Метод конечных элементов позволяет сделать процесс моделирования наглядным, выполнить его быстро и с хорошей точностью. Кроме метода конечных элементов существует еще традиционный метод, основанный на схемах замещения и круговых диаграммах асинхронной машины, однако он намного менее точный, чем метод конечных элементов. Существует метод, которым можно пользоваться без большой потери в точности расчетов. Для этого необходимо из проверенных данных многолетних расчетов авторов построить график, отражающий подмеченную закономерность. Построенный график позволяет работать с данными более свободно. Таким способом можно получить в обоснованных случаях следующие преимущества: уменьшение материальных средств на приобретение дорогостоящих программ, реализующих метод конечных элементов. Вместо того, чтобы каждый раз производить расчеты методом конечных элементов, можно просто воспользоваться уже имеющимися результатами. Оцениваем потерю точности по сравнению с самим методом конечных элементов как двойную. Основываясь на практическом опыте, ожидаем увеличение погрешности вычислений с 1 % до 2 %. Экономия времени, затрачиваемого на работу, делает такой подход достаточно привлекательным и обоснованным. Если же рассматриваемый диаметр ротора далеко отстоит от уже рассмотренных, избежать прямого применения метода конечных элементов не удастся.

**Ключевые слова:** асинхронная машина, режим работы двигателя, короткозамкнутый ротор, параметры схемы замещения, конечно-элементный анализ, электромагнитное поле, методики проектирования асинхронной машины

### Введение

В результате многолетних исследований в области асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором нами был определен рациональный подход к проектированию. С 2001 года такую работу поставил перед собой и своими аспирантами профессор Кононенко К.Е. По темам, связанным с асинхронными двигателями, было защищено 6 кандидатских диссертаций. Во всех работах исследовалось электромагнитное поле. Кроме этого, были выполнены исследования, в том числе в интересах Военно-морского флота РФ.

Основы теории электричества Тамм И.Е. [1] для того, кто моделирует поле в электрических машинах, служит надежным фундаментом и хорошим руководством. Применительно к асинхронным машинам можно рекомендовать читателям наше пособие [2]. В нем собраны результаты и данные проведенных испытаний и выполненных экспериментальных работ. Результаты работы аспирантов кафедры электромеханических систем и электроснабжения ВГТУ в области исследования асинхронных двигателей показали перспективное

направление: использование численного метода конечных элементов (МКЭ). Реализация этого метода возможна в программном продукте Ansoft Maxwell 2D.

В состав асинхронного двигателя входит ротор, который показан на рис. 1.



Рис. 1. Ротор асинхронного двигателя серии 5А

Асинхронные двигатели исследовали многие авторы, например [3].

Понятие о размерах асинхронной машины дает поперечное сечение асинхронной машины при ее модернизации (рис. 2).



Рис. 2. Общий вид активных размеров статора исследуемого двигателя

Сложная задача была поставлена профессором Ивановом-Смоленским А.В. в своей монографии [4]. Он показал, какие формулы в работах Максвелла наиболее подходят для использования в современных исследованиях, а от использования которых следует воздержаться. И поставленную задачу он решил [4] блестяще, использовав данные физического эксперимента.

### Электромагнитное поле асинхронной машины с короткозамкнутым ротором

При выполнении современных расчетов поля метод конечных элементов является основным [5, 6] и наиболее часто используемым.

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

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

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

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

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

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

При помощи специальной подстановки векторный магнитный потенциал можно записать в виде

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

Такое решение позволяет записать энергетический функционал и его минимизировать. Результатом является получение электромагнитного вращающего момента через тензоры натяжения в магнитном поле [4].

Последовательность расчета асинхронных двигателей, с нашей точки зрения, может быть следующей.

1. Вначале по справочнику [7] в соответствии с ТЗ на электродвигатель определяем геометрические размеры статора вместе с обмоточными данными.

2. Величину воздушного зазора также принимаем по справочнику [7].

3. Число пазов ротора можно брать любым, лучше четным на 2 меньше, чем статора.

4. Выполненные расчеты с экспериментами и внедрением (акты внедрения в производство по кандидатским диссертациям) дают основание учитывать следующее: площадь алюминия в роторе должна быть соответствующей величине, обеспечивающей оптимальный КПД для данного габарита (рассмотрено 7 габаритов роторов, как показано ниже в алгоритме для выбора площади алюминия ротора асинхронного двигателя).

5. Зная число пазов ротора, находим площадь паза, поделив суммарную площадь алюминия ротора на число его пазов.

6. Все: геометрия асинхронного двигателя оказалось определена, и что самое важное, с учетом данных расчета МКЭ (воспользуемся данными алгоритма для выбора площади алюминия ротора асинхронного двигателя).

### Алгоритм для выбора площади алюминия ротора асинхронного двигателя, обеспечивающий оптимальный КПД для выбранного габарита

Мощность – 1,5 Вт (двухполюсное исполнение), диаметр ротора – 18 мм, воздушный зазор – 0,1 мм, площадь алюминия в роторе – 43,0 мм<sup>2</sup>.

Мощность – 120 Вт (двухполюсное исполнение), диаметр ротора – 41 мм, воздушный зазор – 0,25 мм, площадь алюминия в роторе – 237,0 мм<sup>2</sup>.

Мощность – 3,0 кВт (четырёхполюсное исполнение), диаметр ротора – 105 мм, воздушный зазор – 0,3 мм, площадь алюминия в роторе – 1265 мм<sup>2</sup>.

Мощность – 5,5 кВт (четырёхполюсное исполнение), диаметр ротора – 125 мм, воздушный зазор – 0,3 мм, площадь алюминия в роторе – 1520 мм<sup>2</sup>.

Мощность – 7,5 кВт (четырёхполюсное исполнение), диаметр ротора – 145 мм, воздушный зазор – 0,35 мм, площадь алюминия в роторе – 2014 мм<sup>2</sup>.

Мощность – 11 кВт (четырёхполюсное исполнение), диаметр ротора – 145 мм, воздушный зазор – 0,35 мм, площадь алюминия в роторе – 2010 мм<sup>2</sup>.

Мощность – 15 кВт (четырёхполюсное исполнение), диаметр ротора – 185 мм, воздушный зазор – 0,5 мм, площадь алюминия в роторе – 2750 мм<sup>2</sup>.

Если ТЗ на асинхронный электродвигатель не содержится в данных указанного выше алгоритма, можно выполнить расчет МКЭ. Для этого можно использовать, например, пакет прикладных программ Ansoft Maxwell 2D.

Поле асинхронного двигателя серии 5А до модернизации в номинальном режиме работы (при номинальной частоте вращения ротора) покажем на рис. 3. Оптимизация по данным выполненных расчетов методом конечных элементов в программном продукте Ansoft Maxwell 2D дает несколько другую геометрию (рис. 4).

Если данные ТЗ на асинхронный электродвигатель попадают на просчитанные варианты роторов в соответствии с приведенным выше алгоритмом, то можно не считать поле МКЭ, а воспользоваться полученными данными. В этом случае погрешность, вероятно, будет больше (например, 2 %), но эта погрешность будет все равно меньше той, которая получается при использовании круговых диаграмм и схем замещения. В последнем случае погрешность может достигать 50 %. Налицо выигрыш во времени и в точности получаемых результатов.

На рис. 3 показано поле асинхронного двигателя серии 5А до модернизации.

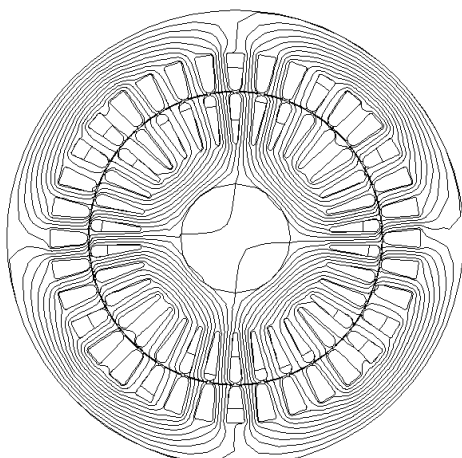


Рис. 3. Поле асинхронного двигателя серии 5А до модернизации

После модернизации геометрия электродвигателя показана на рис. 4. Здесь специально

не показаны магнитные силовые линии, чтобы лучше было видно геометрию пазовой зоны. Паза ротора на рис. 4 меньше, как это не покажется странным.

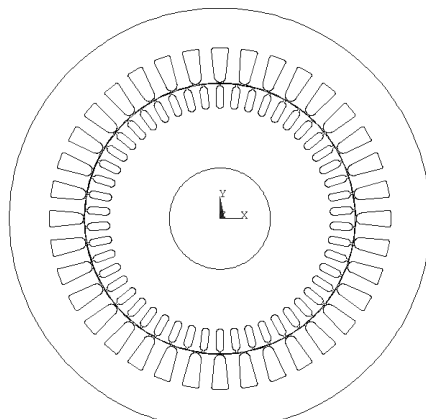


Рис. 4. Ротор модернизированного асинхронного двигателя при варьировании числа и формы пазов

Метод конечных элементов получил широкое распространение в расчетах электромагнитного поля в электрических машинах благодаря высокой точности получаемых результатов. На рис. 5 для оценки точности расчетов проведено сравнение с практическим использованием асинхронного двигателя и нагрузочного устройства, в качестве которого выступает порошковый тормоз.

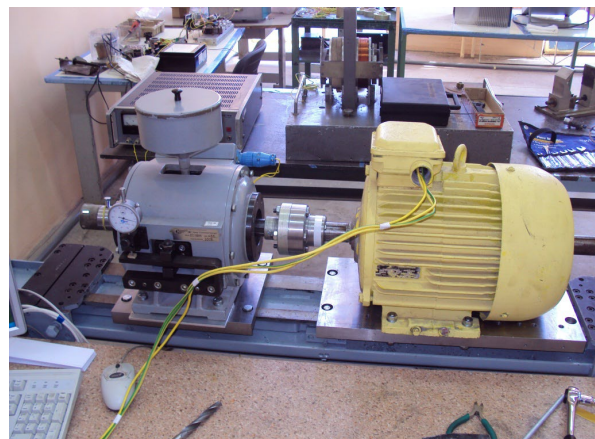


Рис. 5. Общий вид исследуемого двигателя и порошкового тормоза

## Заключение

Учитывая имеющийся у авторов хороший опыт в расчетах методом конечных элементов, который имеет относительную погрешность примерно 1 %, рекомендуется в тех случаях, которые попадают в рассмотренные варианты (алгоритма для выбора площади алюминия



ротора), не выполнять новые расчеты методом конечных элементов, а использовать уже имеющиеся данные.

Для быстрого получения результата необходимо обработать данные полученного алгоритма; построить на этой основе требуемый график, из которого определить искомую площадь алюминия в роторе. Как показали данные таких расчетов, погрешность будет выше в данном случае в два раза. Учитывая исходную погрешность в 1 %, получаем 2 %, а эта погрешность уже гораздо ниже, чем по круговым диаграммам и схемам замещения. Когда определена площадь алюминия в роторе по выбранному числу пазов ротора (практически произвольно, за исключением такого случая, когда число пазов ротора равно числу пазов статора). В этом случае происходит четырех-пяти кратное падение мощности двигателя.

Таким образом, пропадает необходимость пользоваться расчетами программного комплекса Ansoft Maxwell 2D. Можно сразу по суммарной площади алюминия в роторе определить площадь одного паза. Форма паза

ротора большой роли играть не будет. Многократная проверка данного факта является той практической значимостью, которую имеют проведенные исследования.

#### Литература

1. Тамм И.Е. Основы теории электричества. М.: Физматлит, 2003. 616 с.
2. Кононенко А.В., Кононенко К.Е. Устойчивость работы и переходные процессы электрических машин переменного тока. Воронеж: Издательство ВГТУ, 2014. 180 с.
3. Магнитопроводы асинхронных машин: Монография / К.Е. Кононенко, А.В. Кононенко, С.В. Крутских, Е.В. Луценко, В.В. Юрканов. Воронеж: Издательство «Научная книга», 2020. 327 с.
4. Иванов-Смоленский А.В. Электромагнитные силы и преобразование энергии в электрических машинах переменного тока: учеб. пособие для вузов по спец. «Электромеханика». М.: Высшая шк., 1989. 312 с.
5. Саббонадьер Ж.-К., Кулон Ж.-Л. Метод конечных элементов и САПР. М.: Мир, 1989. 190 с.
6. Сильвестр П., Феррари Р. Метод конечных элементов для радиоинженеров и инженеров-электриков. М.: Мир, 1986. 229 с.
7. Асинхронные двигатели серии 4А: справочник / А.Э. Кравчик и др. М.: Энергоатомиздат, 1982. 504 с.

Поступила 24.01.2025; принята к публикации 27.02.2025

#### Информация об авторах

**Кононенко Константин Евгеньевич** – д-р техн. наук, профессор, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), тел.: +7(903) 854-03-79, e-mail: kekononenko@yandex.ru, ORCID: 0000-0002-8958-0499

**Кононенко Анастасия Валентиновна** – канд. техн. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), тел.: +7(903) 854-02-43, e-mail: anastkononenko@yandex.ru, ORCID: 000-0001-9549-2519

## ELECTROMAGNETIC FIELD SIMULATION METHOD FOR CORRECT CALCULATION OF SQUIRREL CAGE INDUCTION MOTOR

K.E. Kononenko, A.V. Kononenko

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

**Abstract:** when it is necessary to design an asynchronous motor in the best way, special attention should be paid to modeling the electromagnetic field. Today, such a method is the numerical method of finite elements. The ability to calculate the electromagnetic field largely determines the resulting effect of successful design of an electric machine when its parameters fully comply with the technical specifications. The finite element method allows you to make the modeling process visual, perform it quickly and with good accuracy. In addition to the finite element method, there is also a traditional method based on substitution schemes and pie charts of an asynchronous machine, however, as will be shown in the article, it is much less accurate than the finite element method. There is a method that can be used without much loss in the accuracy of calculations. To do this, it follows from the verified data of the authors' long-term calculations to plot a graph reflecting the observed pattern. The constructed graph allows you to work with the data more freely. The discretely described seven engine sizes, when using a graph instead, allow for a noticeable advantage in representing the discrete seven options as a continuous relationship. In this way, the following advantages can be obtained in justified cases: reduction of material resources for the purchase of expensive programs implementing the finite element method. Instead of performing calculations using the finite element method every time, you can simply use the existing results. We estimate the loss of accuracy as double compared to the finite element method itself. Based on practical experience, we expect an increase in the calculation error from 1 % to 2 %. Saving time spent on work makes this approach quite attractive and reasonable. If the considered diameter of the rotor is far from those already considered, it will not be possible to avoid direct application of the finite element method

**Key words:** asynchronous machine, motor operating mode, squirrel cage rotor, parameters of the substitution scheme, finite element analysis, electromagnetic field, methods of designing an induction machine

#### References

1. Tamm I.E. "Fundamentals of the Theory of Electricity", Moscow, Fizmatlit, 2003, 616 p.
2. Kononenko A.V., Kononenko K.E. "Stability of work and transition processes of electric machines of alternating current", Voronezh, VSTU Publishing House, 2014, 180 p.
3. Kononenko K.E., Kononenko A.V., Krutskikh S.V., Lutsenko E.V., Yurkanov V.V. "Magnetic Pipelines of Asynchronous Machines: Monograph", Voronezh: Scientific Book Publishing House, 2020, 327 p.
4. Ivanov-Smolensky A.V. "Electromagnetic Forces and Energy Conversion in Electric Machines of Alternating Current. Manual for Higher Educational Institutions on Special. Electromechanics", Moscow, Vysshaya shk., 1989, 312 p.
5. Sabbonadière J.-C., Coulomb J.-L. "Method of finite elements and CAD", Moscow, Mir, 1989, 190 p.
6. Sylvester P., Ferrari R. "Method of finite elements for radio engineers and electrical engineers", Moscow, Mir, 1986, 229 p.
7. Kravchik A.E. et al. "Asynchronous motors of the 4A series: handbook", Moscow, Energoatomizdat, 1982, 504 p.

Submitted 24.01.2025; revised 27.02.2025

#### Information about the authors

**Konstantin E. Kononenko** – Dr. Sc. (Technical), Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: kekononenko@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8958-0499>, tel.: +7(903)854-03-79  
**Anastasia V. Kononenko** – Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: anastkononenko@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9549-2519>, tel.: +7(903)854-02-43

## ПРОЕКТИРОВАНИЕ СЕТЕВЫХ ХРАНИЛИЩ НА ВСТРАИВАЕМЫХ КОМПЬЮТЕРАХ МАЛОГО ПОТРЕБЛЕНИЯ АРХИТЕКТУРЫ ARM

Я.В. Любченко, Р.А. Панков, А.В. Бредихин, В.В. Сокольников

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

**Аннотация:** исследуется возможность использования одноплатных компьютеров для снижения общих затрат на обслуживание сетевых хранилищ. Рассматриваются недостатки ранее установленной системы, на основе анализа которой создаётся анализируемая система. Предлагается процессор, удовлетворяющий необходимым требованиям к скорости интерфейсов и имеющий аппаратное ускорение кодирования видео, подходящее для потоковой записи видео с камер наблюдения. Рассматриваются способы подключения дисков в условиях отсутствующих SATA-контроллеров и полноценных PCI-e слотов, в том числе с точки зрения надёжности, отказоустойчивости и возможности восстановления после сбоя, а также горячей замены дисков. Анализируются и тестируются способы умножения максимального количества подключенных дисков с помощью мультиплексоров SATA и USB. Предлагается архитектура системы для подключения полноценных жёстких дисков. Анализируются преимущества и ограничения выбранной архитектуры и методов подключения с тестированием скорости линейной записи и чтения. Рассматривается аномалия постоянного перезапуска дисковых приводов, вызванная системой мониторинга дисков, и рассказывается о способе её решения. Тестируются аппаратные возможности кодирования видео и предлагается перспектива на потоковую запись видео с камер наблюдения с низкой стоимостью и малым энергопотреблением с использованием конкретной сборки ffmpeg

**Ключевые слова:** сетевые хранилища (NAS), одноплатные компьютеры, архитектура ARM, встраиваемые компьютеры, жесткие диски, производительность, эффективность NAS

### Введение

Современные технологии используются пользователями и организациями для постоянного хранения и обработки больших массивов данных. Одним из наиболее распространённых решений для хранения информации являются жёсткие диски, благодаря своей высокой ёмкости и относительной ценовой доступности. Однако, с ростом требований к скорости доступа, а также с увеличением объёмов данных, стоимость обслуживания и эксплуатации жёстких дисков становится значительной проблемой, а из-за использования хранилищ несколькими пользователями одновременно выделяется необходимость использовать сетевые хранилища.

Сетевые хранилища, также известные как NAS, являются серверами, обладающими большим количеством подключенных жёстких дисков [1-2]. Значительной проблемой, с которой сталкиваются владельцы NAS, является относительно высокая цена аппаратных компонентов, что в свою очередь из-за попыток удешевления сервера может приводить к снижению производительности системы [3].

Для решения этой проблемы возможно применение альтернативных архитектур, например, предлагается архитектура NASD

(Network-Attached Secure Disk), в которой управляющий сервер является побочным по отношению к дискам и потому не ограничивает их производительность [3]. Таким образом, управляющее оборудование является единовременной затратой, не зависящей от количества подключенных дисков.

В последние годы наблюдается рост интереса к одноплатным компьютерам, которые предлагают компактные и экономически эффективные решения для различных вычислительных задач. Эти устройства, обладая достаточной производительностью и функциональностью, могут быть использованы для оптимизации процессов хранения и обработки данных вместо привычных серверных сетевых хранилищ.

Одноплатные компьютеры являются специализированными устройствами, заточенными под задачи встраиваемых систем [4]. Такие компьютеры основываются на маломощных процессорах с низким энергопотреблением и часто используют энергоэффективные архитектуры ARM. Однако с течением времени в этом классе стали появляться всё более производительные устройства, которые сохраняют свои основные преимущества: низкое энергопотребление и малое тепловыделение. Единственным существенным ограничением данных платформ является ограниченный набор аппаратных интерфейсов: чаще всего такие компьютеры не обладают ин-



терфейсами, пригодными для подключения конвенциональных типов дисковых приводов.

Ранее была предложена архитектура, использующая одноплатный компьютер Raspberry Pi 4 [5] в качестве сервера. В этой архитектуре диски также подключаются через интерфейс USB.

В рамках данной работы рассматриваются этот и подобные альтернативные способы подключения приводов к одноплатным компьютерам, а также предлагается перспектива на потоковую запись и архивирование видео с камер наблюдения с использованием одноплатного компьютера на процессоре RK3588s.

### **Подбор компонентов и характеристик одноплатного компьютера**

В первом прототипе рассматриваемой системы использовался одноплатный компьютер Raspberry Pi 3B на процессоре Broadcom BCM2837 (архитектура armv7). К этому компьютеру был подключен внешний жёсткий диск объёмом 1 ТБ. Система предназначалась для выполнения общих задач запуска серверных приложений и питалась от блока питания номиналом 12.5 Вт.

Рассмотрим недостатки данной конфигурации. Одноплатный компьютер Raspberry Pi 3B не оснащён интерфейсами USB 3.0, что ограничивало пропускную способность подключенного диска. При этом сетевой интерфейс ограничен 12.5 МБайт/с, что дополнительно ограничивало максимальную скорость чтения 20 МБайт/с. В связи с этим, следует выбирать одноплатные компьютеры, имеющие интерфейс USB 3.0 или новее, а также обладающие достаточно быстрым сетевым интерфейсом.

В качестве альтернативы был выбран Orange Pi 5 на процессоре RK3588s с архитектурой ARMv8. Данный одноплатный компьютер обладает USB 3.0 и гигабитным сетевым интерфейсом, что обеспечивает оптимальную производительность при подключении жёстких дисков. Потребление энергии одноплатного компьютера Orange Pi 5 лишь незначительно превышает таковое у Raspberry Pi 3: 20 ватт у Orange Pi 5 вместо 12.5 ватт у Raspberry Pi 3B.

Стоит отметить, что процессор RK3588s выделяется наличием аппаратных видеокодексов. Согласно документации [6], он способен обрабатывать до 480 кадров в секунду при разрешении 1080p, 120 кадров в секунду при разрешении 4K и 30 кадров в секунду при разрешении 8K (в соотношении сторон 16:9). Еще

примечательно то, что у RK3588s отсутствуют ограничения на количество одновременных потоков кодирования, в отличие от потребительских видеокарт NVidia, где такое ограничение составляет семь потоков. Это делает RK3588s перспективным решением для параллельного перекодирования видео с камер наблюдения в целях сжатия или для снижения качества архивных записей. Кроме того, процессор оснащён нейронными и другими аппаратными ускорителями, однако их использование не требуется в рамках рассматриваемой работы.

Для создания SATA-интерфейса можно использовать PCIe-контроллер SATA (в исполнении M.2) или USB-адаптер для жёсткого диска. Но PCIe 2.0 x1 слот, имеющийся на Orange Pi 5, поддерживает только платы расширения длиной не более 42 мм, что не позволяет подключить SATA контроллер. Вместо этого данный слот используется для установки твердотельного диска, который может использоваться как дисковый кэш. Другим вариантом создания SATA-интерфейсов является использование USB-адаптера на порт SATA с подключенным к нему мультиплексором портов SATA, но данное решение сопряжено с проблемами. Во-первых, многие контроллеры SATA не поддерживают мультиплексирование портов. Во-вторых, отказ какого-либо диска может привести к отказу всего SATA-контроллера, что может потребовать ручного вмешательства [7].

В таком случае следует воспользоваться мультиплексором USB-портов, также известным как USB Hub. Подключенные в него USB-адаптеры на порт SATA являются независимыми SATA контроллерами, что исключит возможности конфликтов и зависания шины, при этом широкая распространённость USB Hub не оставила бы возможные проблемы незамеченными. Дополнительным преимуществом этого метода подключения является гарантированная поддержка горячей замены дисков, поскольку шина USB предназначена для динамического подключения устройств. Это позволяет обеспечить необходимую отказоустойчивость системы при наличии нескольких дисков в резерве.

### **Проектирование архитектуры постоянной памяти жестких дисков с применением одноплатных компьютеров**

Рассматривается следующая архитектура системы (рис. 1): к одноплатному компьютеру подключен USB Hub, к которому через USB-SATA мосты подключены жёсткие диски. Диски

могут быть кластеризованы в RAID различных уровней либо использоваться по отдельности.

Отличия от привычной серверной архитектуры заключаются лишь в том, что вместо полноценного сервера используется одноплатный компьютер. Это снижает финансовые потери, связанные с большим энергопотреблением и неэффективным использованием выделенных ресурсов, при этом, как было описано ранее, они справляются с большинством малых и средних задач, являясь хорошим компромиссом.

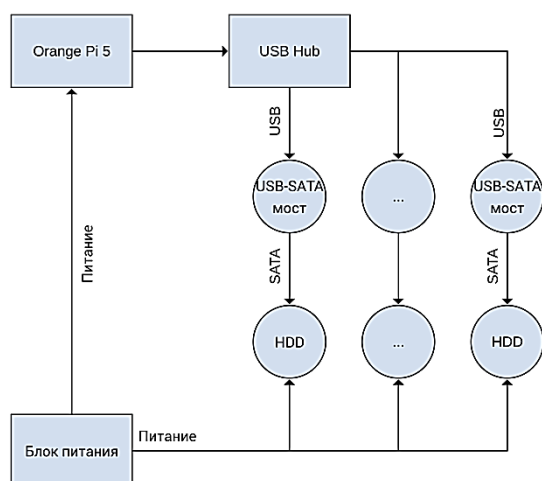


Рис. 1. Архитектура системы сетевого хранилища

### Экспериментальное исследование предложенной архитектуры

После установки системы было проведено тестирование случайного чтения, которое заключалось в открытии крупных файлов с диска через сеть Интернет и последующем конкурентном скачивании этих файлов другими участниками сети. В ходе тестирования не было зафиксировано нагрева, отключений и других аномалий. Также в процессе проверки производилась загрузка файлов из сети, одновременно с проверкой целостности уже находящихся на диске файлов и их отдачей в сеть Интернет. Диск демонстрировал стабильную скорость чтения на уровне 180 МБ/с, что объясняется тем, что проверка целостности осуществляется без участия интернет-соединения, и скорость записи в диапазоне 5-10 МБ/с, ограниченную пропускной способностью подключения к сети Интернет.

Затем было проведено тестирование линейного чтения при редком доступе к диску. Чтение производилось напрямую с диска без посредников в виде файловых систем, а запись производилась в файл на файловой системе

btrfs, чем объясняется отличие полученных скоростей чтения и записи. Результаты изображены на рис. 2 и рис. 3 соответственно. Таким образом было показано, что мост не ограничивает максимальные скорости чтения и записи отдельных дисков.

При этом, хоть шина USB теоретически ограничивает общую скорость чтения/записи в районе 500 МБ/с, на практике скорость чтения/записи ограничена скоростью сетевого интерфейса - 1 Гб/с (125 МБ/с), что часто является ограничением и на полноценных серверных платформах и потому не является недостатком само по себе.

Скорость чтения

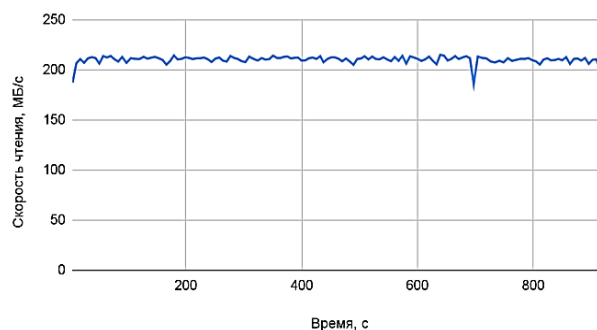


Рис. 2. График скорости линейного чтения блочного устройства от времени

Скорость записи

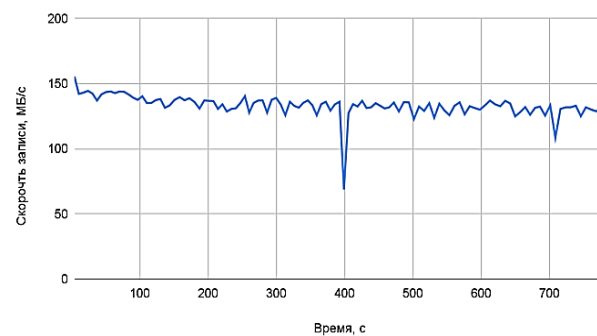


Рис. 3. График скорости линейной записи в файл от времени

Для тестирования производительности кодирования видео была применена сборка ffmpeg от Jellyfin. В качестве исходного файла был взят видеофайл разрешением 1920x1080 без звуковой дорожки. Подбором параметров удалось достичь заявленных производителем 480 кадров в секунду кодирования видео; после стабилизации это значение находится в диапазоне 470-486 кадров в секунду, превышая указанные производителем параметры. При этом исходный и выходной файл находились на од-

ном и том же диске, а нагрева процессора не было обнаружено.

Для кодирования видео на процессорах семейства RK3588 рекомендуются следующие параметры ffmpeg: `ffmpeg -init_hw_device rkmpp=rk -hwaccel rkmpp -hwaccel_output_format drm_prime -i "<входной поток>" -threads 2 -codec:v h264_rkmpp "<выходной поток>"`.

Последующий мониторинг работы системы на холостом ходу выявил аномалию в виде высокого количества перезапусков привода жё-

сткого диска (рис. 4): привод перезапускался раз в 15 минут. Анализ показал, что привод останавливается из-за отсутствия активности, а запускается из-за опроса параметров S.M.A.R.T., который проходил как раз каждые 15 минут. Снижение периода опроса на 5 минут привело к устранению проблемы. В связи с этим рекомендуется использование мониторинговых систем с настроенными предупреждениями об аномалиях, а также первоначальная ручная проверка работы системы.

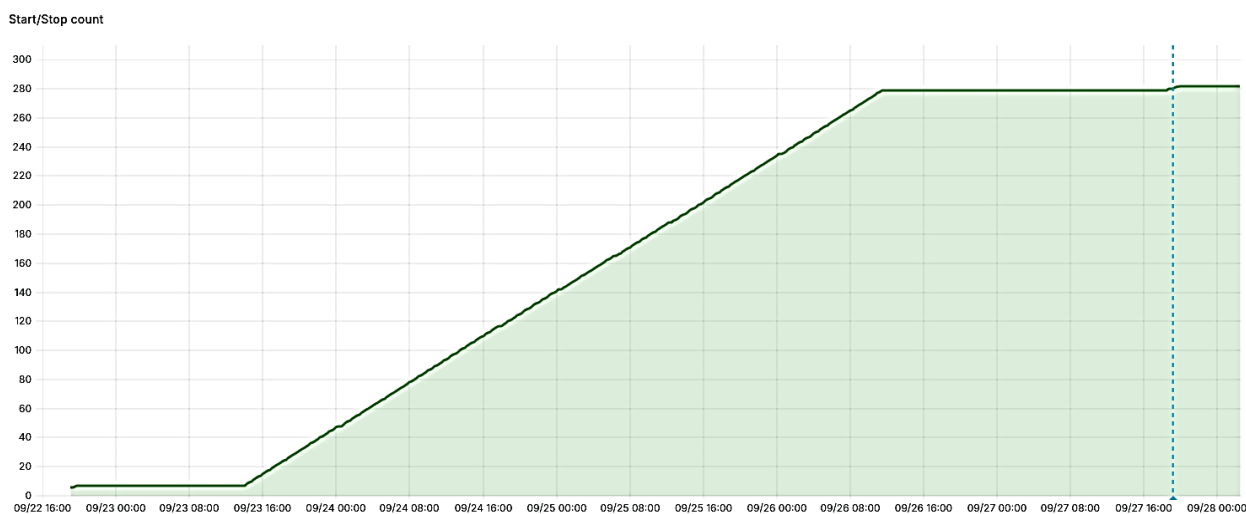


Рис. 4. График показателя «количество перезапусков привода»

## Заключение

В рамках данной статьи была выбрана альтернативная аппаратная платформа для создания сетевых хранилищ. Был рассмотрен прототип системы, на основе недостатков которой была предложена предпочтительная архитектура с использованием этой платформы для подключения жёстких дисков к хранилищу. Было проведено её тестирование: нагрузочное и на холостом ходу, а также обзор причин возможных проблем с мониторинговыми системами. В рамках этой же платформы был рассмотрен процесс кодирования видео, который может использоваться в задачах потоковой записи и архивирования видео с камер.

## Литература

1. Deng Y. Deconstructing network attached storage systems // *Journal of Network and Computer Applications*. 2009. Vol. 32. No. 5. P. 1064-1072.
2. Gibson G.A., Van Meter R. Network attached storage architecture // *Communications of the ACM*. 2000. Vol. 43. No. 11. P. 37-45.
3. A cost-effective, high-bandwidth storage architecture / G.A. Gibson [et al.] // *ACM SIGOPS operating systems review*. 1998. Vol. 32. No. 5. P. 92-103.
4. Ortmeyer C. A Brief History of Single Board Computers // *A Premier Farnell Company, Electronic Design Uncovered, USA*. 2014. No. 6. P. 11.
5. Storage Network Attached Using Raspberry PI / R. Chithambaramani [et al.] // *2023 International Conference on System, Computation, Automation and Networking (ICSCAN)*. IEEE, 2023. P. 1-6.
6. Rockchip RK3588S Datasheet. URL: <https://www.cnx-software.com/pdf/datasheet/Rockchip-RK3588S-Datasheet%20V1.0-20211221.pdf> (дата обращения: 19.11.2024).
7. SATA Port Multipliers Considered Harmful / P. Li, J. Hughes, J. Plocher, D.J. Lilja // *University of Minnesota*, 2013. P. 2.

Поступила 20.01.2025; принята к публикации 27.02.2025

Информация об авторах

**Любченко Ярослав Валерьевич** – студент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: yar444ik@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-5252-5589>

**Панков Роман Андреевич** – студент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: usbraidpaper2025@herobrine1st.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-5125-9097>

**Бредихин Алексей Вячеславович** – канд. техн. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: abredihin@cchgeu.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-7990-5280>

**Сокольников Виктор Владимирович** – старший преподаватель, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: Svp\_kitp@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-4572-0186>

**DESIGNING NETWORK STORAGE ON SMALL-CONSUMPTION EMBEDDED OF ARM COMPUTERS**

**Ya.V. Lyubchenko, R.A. Pankov, A.V. Bredikhin, V.V. Sokolnikov**

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

**Abstract:** this paper investigates the possibility of using single-board computers to reduce the overall cost of maintaining network storage. The paper firstly examines the shortcomings of a previously installed system and then analyses the system discussed in the paper. The paper proposes a processor that meets the necessary requirements for interface speed and has hardware acceleration of video encoding suitable for streaming video recording from surveillance cameras. The paper goes on to consider methods of connecting discs in conditions where SATA controllers and full-fledged PCI-e slots are missing, including from the point of view of reliability, fault tolerance and possibility of recovery after a failure, as well as hot-swapping of discs. Methods of multiplying the maximum number of connected drives using SATA and USB multiplexers are analysed and tested, and a system architecture for connecting full hard drives is proposed. The advantages and limitations of the proposed architecture and connection methods are analysed through linear write and read speed testing, and the anomaly of constant restart of disc drives caused by the disc monitoring system is considered and the method of its solution is described. The hardware video encoding capabilities are tested, and a perspective on streaming surveillance video with low cost and low power consumption using a particular ffmpeg build is offered

**Key words:** network-attached storage (NAS), single-board computer, ARM architecture, embedded computers, hard disk drives, performance, NAS efficiency

**References**

1. Deng Y. “Deconstructing network attached storage systems”, *Journal of Network and Computer Applications*, 2009, vol. 32, no. 5, pp. 1064-1072.
2. Gibson G.A., Van Meter R. “Network attached storage architecture”, *Communications of the ACM*, 2000, vol. 43, no. 11, pp. 37-45.
3. Gibson G.A. et al. “A cost-effective, high-bandwidth storage architecture”, *ACM SIGOPS operating systems review*, 1998, vol. 32, no. 5, pp. 92-103.
4. Ortmeyer C.A. “Brief History of Single Board Computers”, *A Premier Farnell Company, Electronic Design Uncovered*, USA, 2014, no. 6. p. 11.
5. Chithambaramani R. et al. “Storage Network Attached Using Raspberry PI”, *2023 International Conference on System, Computation, Automation and Networking (ICSCAN)*. – IEEE, 2023, pp. 1-6.
6. “Rockchip RK3588S Datasheet”, available at: <https://www.cnx-software.com/pdf/datasheet/Rockchip-RK3588S-Datasheet%20V1.0-20211221.pdf>. (date of access: 19.11.2024).
7. Peng Li, James Hughes, John Plocher, David J. Lilja “SATA Port Multipliers Considered Harmful”, University of Minnesota, 2013, p. 2.

Submitted 20.01.2025; revised 27.02.2025

**Information about the authors**

**Yaroslav V. Lyubchenko** – Student, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: yar444ik@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0003-5252-5589>

**Roman A. Pankov** – Student, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: usbraidpaper2025@herobrine1st.ru, <https://orcid.org/0009-0007-5125-9097>

**Alexey V. Bredikhin** – Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: abredihin@cchgeu.ru, <https://orcid.org/0009-0000-7990-5280>

**Viktor V. Sokolnikov** – Senior Lecturer, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: Svp\_kitp@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0002-4572-0186>

## РАЗРАБОТКА МОДУЛЯ УПРАВЛЕНИЯ МОНИТОРИНГОМ И СТАТИСТИКОЙ ЗАПАСОВ В КРОССПЛАТФОРМЕННЫХ ПРИЛОЖЕНИЯХ НА ОСНОВЕ FLUTTER

Ш.М. Иномжонов, В.Ф. Барабанов, Н.И. Гребенникова, А.Ю. Деревягин

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

**Аннотация:** объектом исследования является система управления запасами, одним из подходов к решению данной задачи является использование методов прогнозирования запасов, которые позволяют предсказать остатки на складе на основе данных о прошлых приходах и уходах. Целью данной работы являются разработка и внедрение математического обеспечения для прогнозирования запасов с применением методов скользящего среднего (SMA, WMA, EMA) и создание мобильного кроссплатформенного приложения на основе Flutter для интеграции этих методов в реальном времени. Рассмотрены три метода прогнозирования запасов: простое скользящее среднее (SMA), взвешенное скользящее среднее (WMA), экспоненциальное скользящее среднее (EMA). Модуль, разработанный на платформе Flutter, предоставляет пользователю удобный интерфейс для мониторинга текущих запасов и построения прогнозов на основании выбранного метода скользящего среднего. Визуализация данных позволяет пользователям легко отслеживать изменения остатков, а также своевременно принимать решения о пополнении запасов или их оптимизации. Проведенные расчеты показали, что предложенные методы обеспечивают приемлемые прогнозы, что позволяет предприятиям более эффективно управлять складскими запасами, минимизировать риски дефицита или избытка товаров и оптимизировать затраты на их хранение. Также отмечена возможность дальнейшей адаптации предложенной системы для других складских процессов

**Ключевые слова:** управления запасами, модуль управления, прогнозирование запасов, Flutter

### Введение

В современных условиях управления запасами на предприятиях требуется использование высокоэффективных решений, обеспечивающих поддержание оптимальных уровней складских запасов. Одним из перспективных подходов для улучшения этих процессов является внедрение мобильных кроссплатформенных приложений. Данная статья посвящена анализу методов управления запасами и разработке модуля мониторинга и статистики для подобных приложений на основе Flutter.

Особое внимание уделяется выбору современных алгоритмов управления запасами и их интеграции в мобильную среду. Разработка модуля включает создание удобного интерфейса, который предлагает пользователю инструменты для анализа данных, визуализации текущих запасов и предупреждения о критических уровнях. В статье рассмотрены ключевые аспекты работы модуля "Статистика и Мониторинг", где пользователь может получать актуальные сведения и рекомендации по оптимизации складских процессов.

Целью исследования является разработка функционального прототипа модуля управления запасами на платформе Flutter, который

обеспечит эффективный мониторинг и поддержку решений для оптимизации работы складов, а также может быть дополнен и модифицирован для внедрения в качестве плагина для других кроссплатформенных приложений на основе Flutter.

### Описание методов прогнозирования запасами

В системе управления запасами важно предсказать, сколько товаров будет на складе на определенный день, исходя из данных о прошлых приходах и расходах запасов. Для такого вида задач подходят временные ряды, в частности мы применяем метод скользящего среднего (Moving Average), который позволяет прогнозировать остатки на складе на основе последних нескольких дней [1, 4].

Метод скользящего среднего сглаживает данные и уменьшает влияние краткосрочных колебаний, предоставляя более точный прогноз.

1. Простое скользящее среднее (Simple Moving Average, SMA) [1, 3].

Для простого скользящего среднего используем окно размером  $N$  дней, что означает, что для прогноза мы берем последние  $N$  дней данных. Прогнозируемое количество остатков рассчитывается по следующей формуле [1]:



$$SMA_t = \frac{\sum_{i=t-N+1}^t P_i}{N} - \frac{\sum_{i=t-N+1}^t U_i}{N}, \quad (1)$$

где  $P_i$  — это приход запасов в день  $t$ ,

$U_i$  — это уход запасов в день  $t$ ,

$N$  — количество дней, которые мы берем для расчета среднего (размер окна).

Допустим, у нас есть данные о входах и выходах запасов за последние 10 дней.

Таблица 1

Пример данных для расчета

Время	Приход $P$	Уход $U$
1	190	150
2	200	170
3	190	150
4	180	160
5	210	200
6	210	170
7	185	160
8	180	160
9	220	180
10	210	200

Если берем окно  $N = 3$ , то для дня 11 прогнозируем остаток следующим образом.

1. Рассчитаем средний приход за последние 3 дня:

$$\text{Средний приход} = \frac{210 + 220 + 180}{3} = 203.33.$$

2. Рассчитываем средний уход за последние 3 дня:

$$\text{Средний уход} = \frac{200 + 180 + 160}{3} = 180.$$

3. Прогнозируемый остаток:

$$SMA_{11} = 203.33 - 180 = 23.33.$$

Таким образом, на 11-й день мы прогнозируем, что на складе останется 23,33 единицы товара, который представлен на рис. 1.

2. Простое скользящее среднее (Simple Moving Average, SMA).

В отличие от простого скользящего среднего, взвешенное скользящее среднее (WMA) придает большее значение недавним данным, что позволяет учитывать тенденции или изменения, происходящие в последние дни [1, 2].

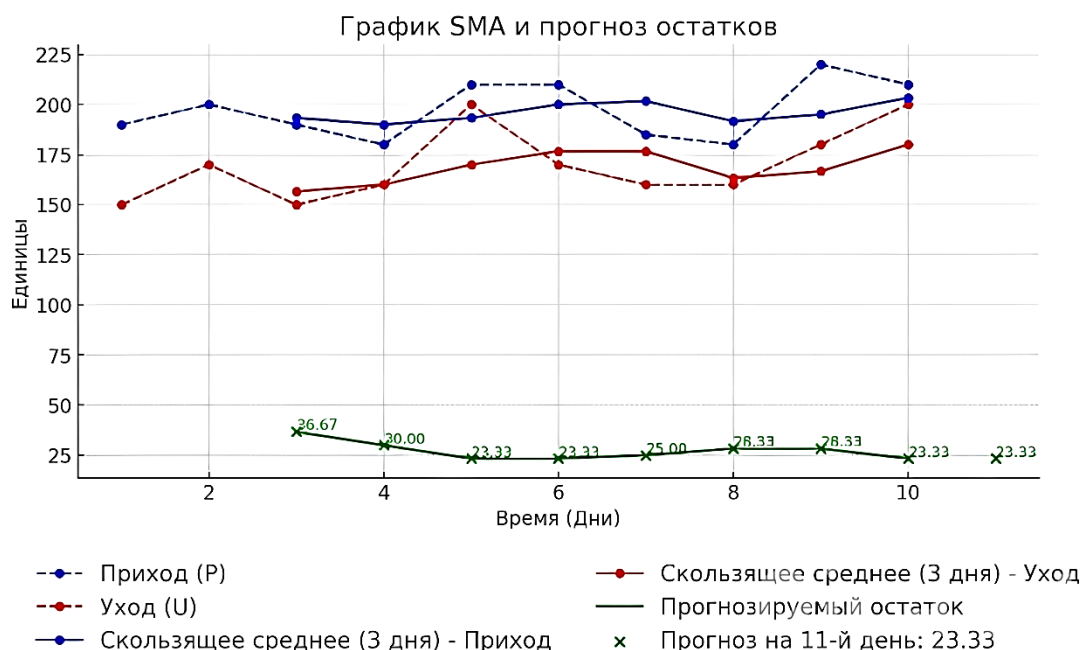


Рис. 1. Визуализация прогноза с использованием SMA

Это помогает получить более точный прогноз, особенно в случае, если последние дни оказывают большее влияние на текущую ситуацию. Прогнозируемое количество остатков рассчитывается по следующей формуле [1]:

$$WMA_t = \frac{\sum_{i=t-n+1}^t \omega_i P_i}{\sum_{i=t-n+1}^t \omega_i} - \frac{\sum_{i=t-n+1}^t \omega_i U_i}{\sum_{i=t-n+1}^t \omega_i}, \quad (2)$$

где  $P_i$  — это приход запасов в день  $i$ ,

$U_i$  — это уход запасов в день  $i$ ,

$\omega_i$  — вес для дня  $i$ , при этом  $\omega_1$  для самого нового дня больше, чем  $\omega_n$  для самого старого дня,

$n$  — количество дней в окне скользящего среднего (например, 3 дня),

$t$  — текущий день, для которого делаем прогноз.

Рассмотрим данные по приходу и уходу запасов за последнее 10 дней (табл. 1):

Пусть окно  $n = 3$ , и веса будут распределены как  $\omega_1 = 3$ ,  $\omega_2 = 2$ ,  $\omega_3 = 1$ , где  $\omega_1$  — наибольший вес у самого нового дня, а  $\omega_3$  наименьший у самого старого.

1. Рассчитываем взвешенный приход:

$$WMA_{\text{приход}} = \frac{3 \times 210 + 2 \times 220 + 1 \times 180}{3 + 2 + 1} = 208,33.$$

2. Рассчитываем взвешенный уход:

$$WMA_{\text{уход}} = \frac{3 \times 200 + 2 \times 180 + 1 \times 160}{3 + 2 + 1} = 186,67.$$

3. Прогнозируем остаток на 11-й день:

$$WMA_{11} = 208,33 - 186,67 = 21,66.$$

Таким образом, используя метод взвешенного скользящего среднего, прогнозируемый остаток на 11-й день составит 21.66 единиц товара, который представлен на рис. 2.

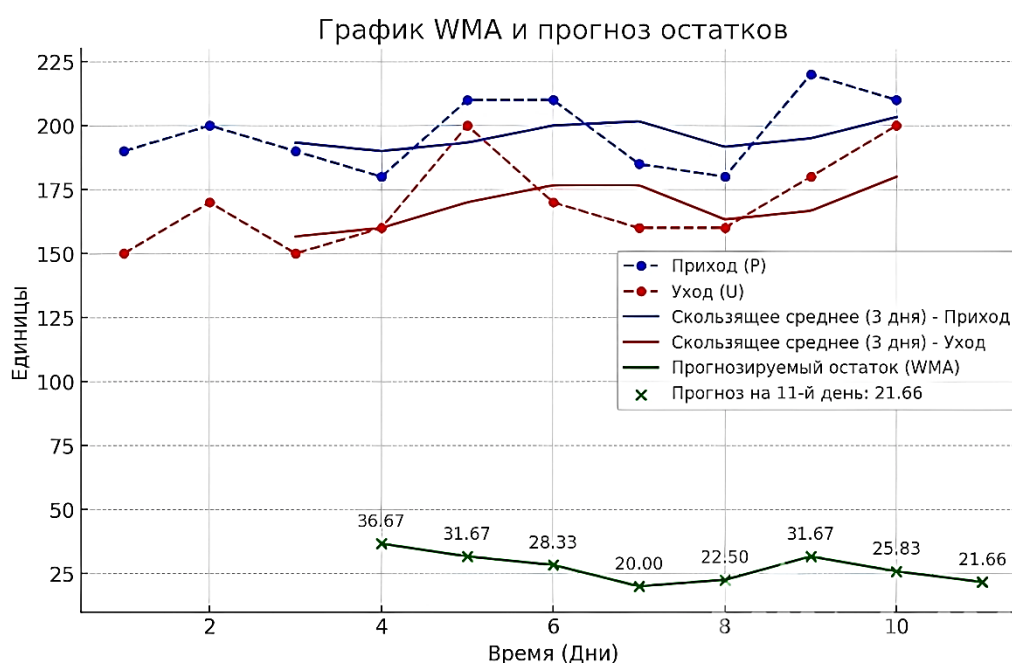


Рис. 2. Визуализация прогноза с использованием WMA

3. Экспоненциальное скользящее среднее (Exponential Moving Average, EMA)

Экспоненциальное скользящее среднее (EMA) является методом прогнозирования, где последние данные имеют больший вес, чем предыдущие, а вес уменьшается экспоненциально. Этот метод чувствителен к недавним изменениям данных, таких как приходы и уходы запасов на складе [1, 3].

Прогнозируемое количество остатков рассчитывается по следующей формуле [1]:

$$EMA_t = \alpha(P_t - U_t) + (1 - \alpha)EMA_{t-1}, \quad (3)$$

где  $P_t$  — это приход запасов в день  $t$ ,

$U_t$  — это уход запасов в день  $t$ ,

$EMA_t$  — прогнозируемый остаток на день  $t$ ,

$\alpha$  — коэффициент сглаживания, который определяется формулой [1]:

$$\alpha = \frac{2}{N+1}, \quad (4)$$

где  $N$  размер окна (в данном примере  $N = 3$ , тогда  $\alpha = 0,5$ ).

Для прогнозирования остатка на следующий день  $t + 1$  мы можем использовать приход  $P_t$ , расход  $U_t$ , и  $EMA_t$ , рассчитанные для предыдущего дня  $t$ .

Мы будем использовать данные из табл. 1, чтобы рассчитать прогнозируемый остаток на 11-й день, основываясь на экспоненциальном скользящем среднем для разницы между приходом и уходом товара за последние 10 дней.

1. Начальное значение для первого дня  $EMA_1$  берется как разница между приходом и уходом на первый день:

$$EMA_1 = P_1 - U_1 = 190 - 150 = 40.$$

2. Расчет для последующих дней с  $\alpha = 0,5$ :

$$EMA_2 = 0,5 \times (P_2 - U_2) + (1 - 0,5) \times EMA_1,$$

$$A_2 = 0,5 \times (200 - 170) + 0,5 \times 40 = 15 + 20 = 35.$$

Используя данную формулу находим все значения до  $EMA_{10} = 20,91$ .

3. Прогноз на 11-й день: для этого используем последний рассчитанный  $EMA_{10} = 20,91$  и спрогнозируем остаток запасов для 11-го дня.

$$EMA_{11} = 0,5 \times (P_{11} - U_{11}) + 0,5 \times EMA_{10},$$

$$EMA_{11} = 0,5 \times (210 - 200) + 0,5 \times 20,91 = 15,45.$$

Таким образом, прогнозируемый остаток на 11-й день составляет приблизительно 15,46 единиц товара, который представлен на рис. 3.

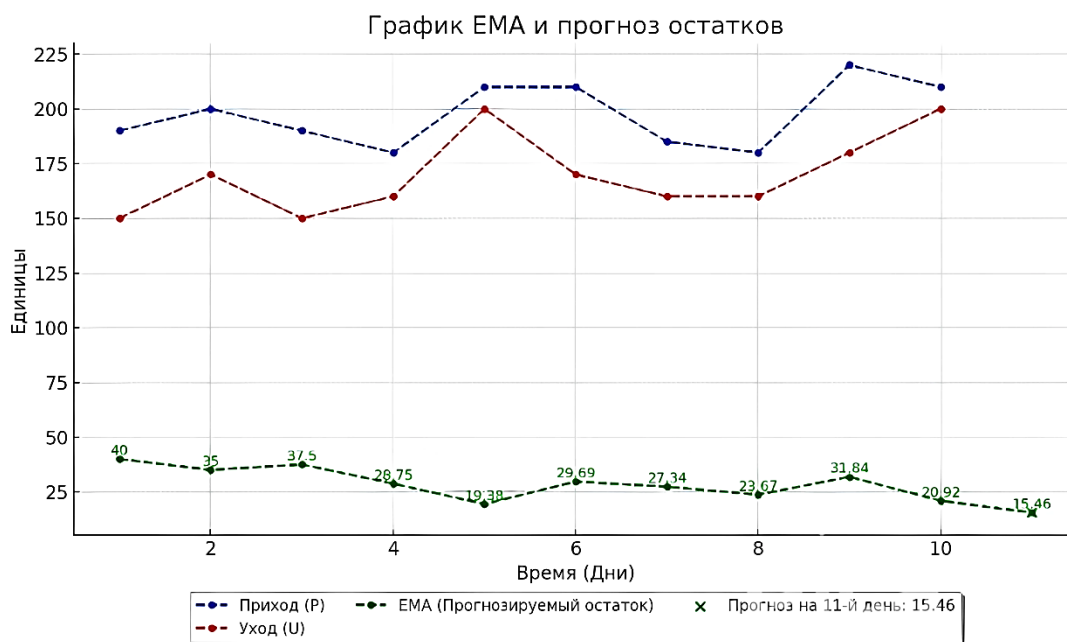


Рис. 3. Визуализация прогноза с использованием WMA

### Выбор и реализация метода прогнозирования

Теперь необходимо реализовать описанный ранее математический метод прогнозирования запасов в виде модуля управления запасами. Для этого мы выбрали простое скользящее среднее (SMA), которое позволит прогнозировать остатки на складе на основе исторических данных.

Шаги реализации:

1. Загрузка данных: сначала данные о приходах и уходах запасов загружаются из базы данных. Эти данные будут использоваться для последующего анализа и прогнозирования остатков.

2. Определение окна для скользящего среднего: программа задает фиксированный размер окна (например, 3 дня), в пределах ко-

торого рассчитывается среднее значение приходов и расходов.

3. Вычисление скользящего среднего. Для прогнозирования остатков на текущий день алгоритм состоит из следующих этапов:

- извлечение данные за последние  $N$  дней;
- расчёт средних прихода и расхода;
- прогнозирование остатка как разницы между средним приходом и средним расходом.

4. Проверка на отрицательные остатки: если результат прогноза отрицательный (т. е. расход превышает приход), программа устанавливает остаток на складе равным нулю, чтобы избежать отрицательных значений.

Алгоритм прогнозирования будет иметь следующий вид:

**Пока** не будут извлечены данные из базы данных

**Цикл** по  $i$  от 1 до  $N$

**Определить** приход за день  $i$

**Определить** расход за день  $i$

**Сохранить** данные о приходе и расходе

**Пока** не будет рассчитано скользящее среднее

**Цикл** по  $j$  от 1 до  $K$

**Повторять**

**Рассчитать** средний приход за последние  $N$  дней

**Рассчитать** средний расход за последние  $N$  дней

**Прогнозировать** остаток на складе на следующий день

**До тех пор**, пока не будут выполнены все временные ограничения

Для вычисления прогноза остатков запаса организован цикл. Если на основе данных о приходах и уходах за последние несколько дней можно корректно рассчитать средние значения, то прогноз будет сформирован, и программа продолжит свою работу. В противном случае данные будут проверены повторно до тех пор, пока не будут выполнены все условия для корректного расчета прогноза (рис. 4).

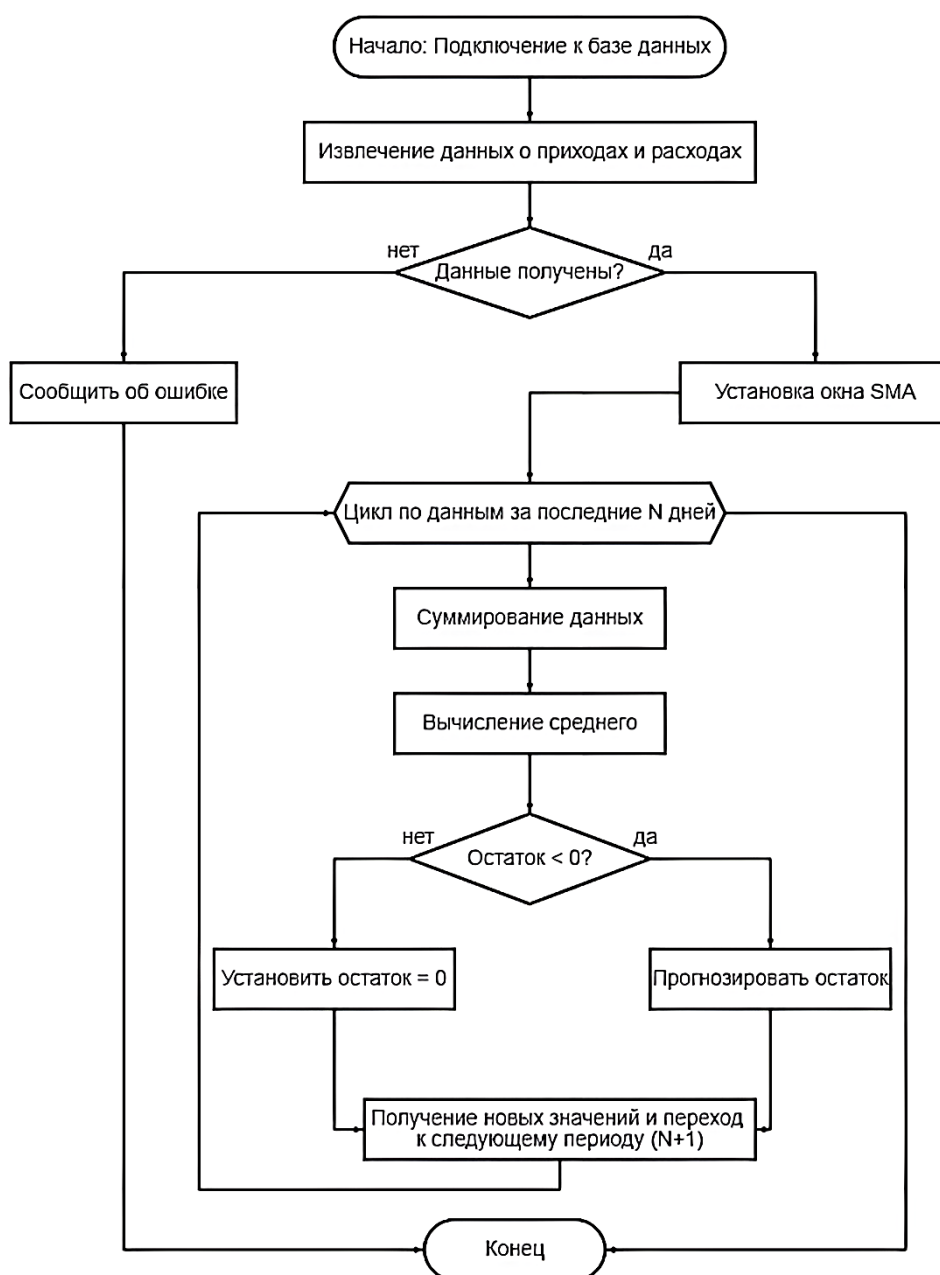


Рис. 4. Алгоритм прогнозирования SMA

## Реализация метода в приложении Flutter

Для практического применения разработанных методов прогнозирования запасов было реализовано мобильное приложение на основе Flutter, которое можно увидеть на рис. 5. Данное приложение предоставляет пользователю возможность удобно отслеживать складские запасы и прогнозировать их изменения на основе алгоритмов скользящего среднего (SMA, WMA, EMA) [4, 5].

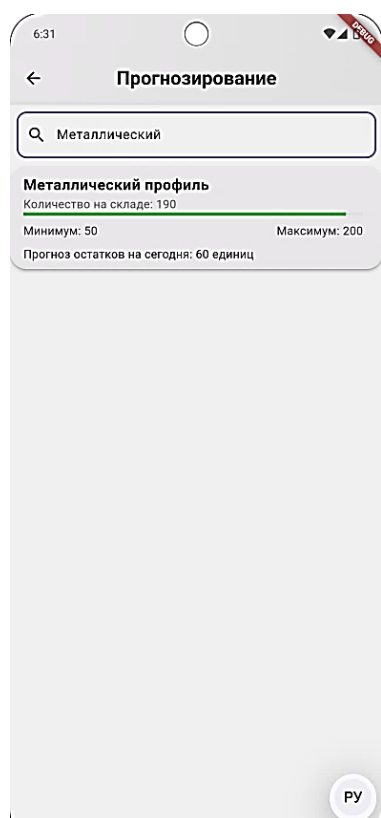


Рис. 5. Реализованный метод прогнозирования в приложении Flutter

Основные функции приложения могут включать:

- визуализацию текущих запасов с помощью графиков или прогресс строк;
- интерактивные элементы для настройки параметров прогнозирования, таких как окно для расчета скользящего среднего;
- автоматическое обновление данных о приходах и расходах товаров.

## Выводы

Целью данной работы являлись разработка методов прогнозирования складских запасов с использованием скользящего среднего и их интеграция в мобильное приложение на платформе Flutter.

Были получены следующие результаты.

1. Разработан и внедрен метод прогнозирования запасов: простое скользящее среднее (SMA).

2. Создана мобильная кроссплатформенная система для мониторинга и прогнозирования запасов, которая предоставляет пользователям удобный интерфейс для визуализации текущих запасов и прогнозов.

3. Предложенные методы были протестированы на наборе данных, продемонстрировав свою точность и способность учитывать краткосрочные колебания в поступлении и расходе товаров.

4. Разработанный подход может быть масштабирован и адаптирован для использования в других системах управления запасами или интегрирован в существующие решения.

Следующим этапом работы станет дальнейшая оптимизация мобильного приложения, тестирование на реальных данных и внедрение дополнительных функций для повышения его эффективности и удобства использования.

## Литература

1. Грешилов А.А., Стакун В.А., Стакун А.А. Математические методы построения прогнозов. М.: Радио и связь, 1997. 112 с.
2. Булашев С.В. Статистика для трейдеров. М.: Компания Спутник+, 2003. 245 с.
3. Кизбикенов К.О. Прогнозирование и временные ряды: учебное пособие. Барнаул: Алтайский государственный педагогический университет, 2017. 114 с.
4. Широченко Н.В., Гильц Н.Е. Управление запасами: учебное пособие для студентов бакалавриата. Красноярск: Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева, 2020. 98 с.
5. Заметти Ф. Flutter на практике: прокачиваем навыки мобильной разработки с помощью открытого фреймворка от Google; перевод А.С. Тищенко. М.: ДМК Пресс, 2020. 328 с.

Поступила 10.10.2024; принята к публикации 30.01.2025

## Информация об авторах

**Иномжонов Шахзодбек Муроджон угли** – магистрант, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, д. 84), e-mail: shaxzodpublic@gmail.com



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

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

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

## **ANALYSIS OF METHODS AND DEVELOPMENT OF A MODULE FOR INVENTORY MANAGEMENT WITH MONITORING AND STATISTICS IN CROSS-PLATFORM APPLICATIONS BASED ON FLUTTER**

**Sh.M. Inomzhonov, V.F. Barabanov, N.I. Grebennikova, A.Yu. Derevyagin**

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

**Abstract:** the object of this study is an inventory management system. One of the approaches to solving this problem is the use of forecasting methods that allow predicting stock levels based on past inflows and outflows. The purpose of this work is to develop and implement mathematical software for forecasting inventory using moving average methods (SMA, WMA, EMA) and to create a mobile cross-platform application based on Flutter for real-time integration of these methods. The study considers three inventory forecasting methods: simple moving average (SMA), weighted moving average (WMA), and exponential moving average (EMA). The module, developed using the Flutter platform, provides the user with a convenient interface for monitoring current inventory and generating forecasts based on the selected moving average method. The visualization of the data allows users to easily track changes in stock levels and make decisions regarding inventory replenishment or optimization. The conducted calculations demonstrate that the proposed forecasting methods provide accurate predictions, which allow businesses to effectively manage their stock levels, minimize the risk of stockouts or overstocking, and optimize storage costs. The work also highlights the potential for further adaptation of the proposed system for other inventory management processes

**Key words:** inventory management, control module, inventory forecasting, Flutter

### **References**

1. Greshilov A.A., Stakun V.A., Staku A.A. "Mathematical Methods of Forecasting", Moscow, Radio and Communications, 1997, 112 p.
2. Bulashov S.V. "Statistics for Traders", Moscow, Sputnik, 2003, 245 p.
3. Kizbikenov K. O. "Forecasting and Time Series: A Textbook", Barnaul, Altai State Pedagogical University, 2017, 114 p.
4. Shirochenko N.V., Gilts N.E. "Inventory Management: A Textbook for Undergraduate Students", Krasnoyarsk, Siberian State University of Science and Technology n. a. Academician M. . Reshetnev, 2020, 98 p.
5. Zametti F. "Flutter in Practice: Enhancing Mobile Development Skills with Google's Open Framework", trans. by A.S. Tishchenko, Moscow, DMK Press, 2020, 328 p.

Submitted 10.10.2024; revised 30.01.2025

### **Information about the authors**

**Shakhzodbek M. Inomzhonov** – Master's Student, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: shaxzodpublic@gmail.com

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

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

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

## СЕГМЕНТАЦИЯ МЕШЕЙ ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ БУЛЕВЫХ ОПЕРАЦИЙ НАД МЕШАМИ

Г.В. Петрухнова<sup>1</sup>, С.Л. Подвальный<sup>1</sup>, А.С. Точилин<sup>2</sup>

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

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

**Аннотация:** рассматриваются задача разбиения трехмерных мешей на основе множеств их пересечений и задача сегментации трехмерных мешей на основе контуров пересечений с последующей классификацией. Рассматриваются меши произвольной топологии, они могут быть как открытыми, так и закрытыми. Основная часть работы фокусируется на телах – мешах, не имеющих треугольников как элементов разбиения, у которых по ребрам меньше двух соседей. Основная цель работы – упрощение алгоритмов решения задач выполнения булевых функций над трехмерными мешами посредством уменьшения количества возможных случаев пересечения треугольников и самих мешей. Решение задачи сегментации позволяет определить операции независимо от характеристик мешей – только с учетом взаимного положения сегментов. Получены пять классов мешей, которые образуют собой составные части для операций булевого пересечения, объединения и вычитания мешей. Определяется набор операций для задач сегментации и классификации, приводятся ограничения. Итоговый алгоритм с набором абстрактных операций может использоваться для реализации модуля булевых операций. Приводится определение операции «сложения» мешей, реализация которой меняется в зависимости от требования к итоговому мешу. Эта операция может использоваться для предварительного просмотра меша, в котором лишние вершины никак не влияют на его отображение. Рассматриваются переходы между задачами разбиения трехмерных мешей и сегментации, демонстрируются результаты решения промежуточных задач. Получаемые сегменты могут использоваться для более сложных алгоритмов, работающих над незамкнутыми мешами или телами с полостями. Анализ работы алгоритма и тестовые результаты были получены в системе, написанной на языке программирования C++ с использованием API OpenGL.

**Ключевые слова:** пересечение мешей, объединение мешей, разность мешей, триангуляция, сегментация

### Введение

Булевы операции над мешами – это задача, которая была решена в программных пакетах, таких как CGAL [1] или Geogram [2]. Однако, при использовании указанных пакетов возникает сложность выполнения булевых операций с подклассами *открытых* мешей – мешей, содержащих хотя бы один треугольник, как элемент разбиения, у которого меньше 3-х соседей по ребрам. Также трудности возникают при выполнении операций с мешами, когда меши касаются друг друга в точках, ребрах или треугольниках.

Решение, рассматриваемое в данной работе, показало свою эффективность как в случае операций с замкнутыми мешами, так и с открытыми. Выбранный алгоритм для сегментации и последующей классификации позволяет перейти от задачи в трехмерном пространстве к аналогичной, но более простой задаче на основе множеств вершин-треугольников, которая потом сводится к задаче сегментирования на основе множеств сегментов. Конечная задача заключается в том, чтобы сделать выборку мешей из сегментированных классов, которая являлась бы результатом той или иной булевой

операции. Основная цель – упрощение алгоритмов решения задач выполнения булевых функций над трехмерными мешами посредством уменьшения количества возможных случаев пересечения треугольников и самих мешей. В статье рассматриваются переходы между задачами и демонстрируются результаты решения промежуточных задач.

### Постановка задачи

Имеются два пересекающихся меша. Необходимо построить меш, который является результатом пересечения, объединения или разности мешей.

Рассматриваются меши произвольной топологии, они могут быть как открытыми, так и закрытыми. Основная часть работ фокусируется на *телах* – мешах, не имеющих треугольников, как элементов разбиения, у которых по ребрам меньше 2-х соседей (открытых срезов). Однако решение задачи сегментации позволяет определить операции независимо от характеристик мешей – только с учетом взаимного положения сегментов. *Сегмент* – подмножество меш, вершин и треугольников. Сегменты могут пересекаться только в вершинах – у них нет общих треугольников. Контур пересечения

сегментов либо пустой, либо состоит только из существующих вершин сегмента. Подобные ограничения позволят объединять сегменты в тела, т.е. соблюдать ограничение об отсутствии открытых срезов.

Последним этапом задачи является классификация, цель которой – разбиение полученных сегментов на классы, комбинации которых будут являться результатами выполнения булевых операций над мешами.

### Обзор решаемых задач

Основным толчком для данной работы послужила статья [3], в которой авторы для упрощения работы с булевыми операциями над трехмерными мешами находят комплексы пересечения треугольников, а затем заменяют треугольники мешами, полученными при разбиении меша контурами пересечения. После этого авторы классифицируют треугольники при помощи GWN [4] – обобщения понятия «Winding Number» для трехмерного пространства. Двумерный случай хорошо подходит для задач классификации операций включения точки в самопересекающийся двумерный контур. Такой контур хорошо подходит для определения вхождения одной точки в меш с корректно ориентированными треугольниками, однако, проверять все вершины второй модели для классификации будет излишним.

Алгоритм перетриангуляции актуален и применяется в алгоритмах для упрощения получения результата. Так в работе [5] авторы после переразбиения мешей описывают разделение множества треугольников на лежащие снаружи или лежащие внутри исходной модели и концентрируют свое внимание на задаче проверки нахождения точки внутри меша.

Основная часть работ по сегментации мешей написана до середины 2010-х годов. В статьях рассматриваются задачи сегментации мешей с учетом функций кривизны, вероятностного распределения. Работа [6] делит задачи сегментации на три вида: низкоуровневую, интерактивную и сегментацию на основе алгоритмов обучения. При низкоуровневой сегментации используют метрики диффузного расстояния, минимального периметра среза и пр. При интерактивной сегментации пользователь в процессе использования программной среды вручную вводит параметры. Сегментация на основе обучения является самой популярной категорией подходов, по теме которой работы пишутся по сей день. Например, работа [7] использует блоки Бостера и нейронные сети для

классификации связанных компонент.

В данной работе для составления компонент используются алгоритмы присоединения соседних по ребрам треугольников. Для обхода сегмента применяется рекурсивный проход по соседям до тех пор, пока не закончатся соседние треугольники или же не будет достигнут исходный треугольник (если речь идет о выделении полосок из треугольников).

### Пересечение, сегментация и классификация мешей

Для нахождения пересечения используется алгоритм, который находит пересечение каждого треугольника одного меша с выборкой треугольников другого меша, используя расстояния от плоскости одного треугольника до вершин другого. Метод пересечения [8] отбрасывает очевидные случаи, когда все расстояния имеют одинаковый знак и отличны от нуля. После этого считаются параметры проекций двух точек треугольника на прямую пересечения для двух треугольников. Из четырех параметров на прямой выбирается участок пересечения, который и задает примитив пересечения: первый параметр – для точки пересечения, второй – для отрезка. При вычислении расстояний задается точность  $\varepsilon$ .

Для планарного случая, рассматриваемого в этой работе, предлагается использовать отдельный алгоритм, который ищет пересечения отрезков треугольников, а потом сортирует их в порядке возрастания угла между случайно выбранной точкой пересечения и всеми остальными. Таким образом, реализация алгоритма пересечения выдает от 0 до 6 вершин пересечения в отсортированном порядке.

Дальше пайплайн вычислений можно разделить на две части – перетриангуляция мешей по местам пересечения и объединение результатов в более крупные части. Первая часть заключается в применении алгоритма ограниченной триангуляции Делоне для треугольника и всех мест пересечения с ним. Поскольку в таком случае треугольник является выпуклой оболочкой, можно упростить порядок включения треугольников в триангуляцию.

Вторая часть заключается в том, чтобы по общим вершинам мешей пересечения планарных треугольников объединить их в единый меш. А также соединить все отрезки с общими конечными вершинами. Это можно сделать, организовав множество концов поли-линий, во множество, в которое либо добавляется новый отрезок, либо модифицируется одна из вершин

после соединения отрезков. Алгоритм работает рекурсивно, с каждой итерацией уменьшая количество поли-линий в итоговом множестве контуров пересечения. Если на очередной итерации количество контуров не поменялось — значит больше не нашлось ни одной поли-линии, которая совпадала бы концом с другой, все замкнутые контуры выделены.

На рис. 1 представлены две модели и контур их пересечения. После выделения контуров и мешей пересечения, можно выполнить сегментацию перетриангулированного меша. Сначала из него убираются все треугольники, образованные соприкасающимися гранями — они уже будут принадлежать отдельному классу сегментации. После этой операции останется меш с контурами пересечения, которые можно разбивать на части по контурам пересечения.

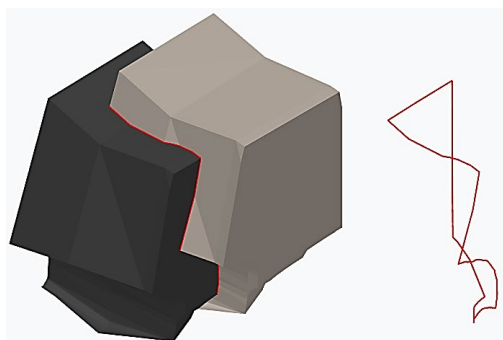


Рис. 1. Пересечение двух тел и контур, полученный путем рекурсивного объединения концов всех отрезков пересечения

Для разбиения потребуется бинарная операция над треугольниками, позволяющая отделить их по границе. Ее можно реализовать, зная индексы вершин или порядок их вхождения в контур: если две общие вершины входят в прямом или обратном порядке в контур, то треугольники принадлежат разным сегментам.

На итерации разбиения, выбирается случайный (нулевой) треугольник из меша и все соседние треугольники, не пересекающие границу контура, добавляются в сегмент, а также убираются из исходного меша. Итерация разбиения заканчивается, когда заканчивается список соседних не пройденных треугольников.

Таким образом, в конце итерации выделяется меш, в котором от любого треугольника можно по ребрам дойти до всех других треугольников без пересечения контуров. Также в исходном меше уменьшается количество треугольников. Если после итерации исходный меш не содержит ни одного треугольника — процесс сегментации окончен.

Для корректной работы алгоритма нужно

учитывать бинарную операцию соседства в сегменте относительно всех контуров сразу. В противном случае алгоритм не сможет правильно сегментировать тороид, пересеченный плоскостью, изображенный на рис. 2. Если учитывать всего один контур, поиск по соседям захватит все треугольники.

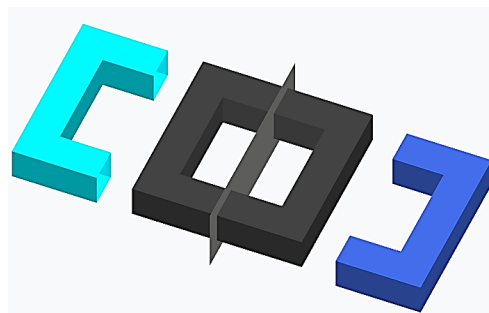


Рис. 2. Сегментация тороида по контурам пересечения с плоскостью

Результатом решения задачи сегментации является множество мешей, которое нужно разделить на 5 классов:

$$C : \{M\} \rightarrow \{l \circ R, l \bullet R, L \cap_{\Delta} R, r \circ L, r \bullet L\}, \quad (1)$$

где  $x \circ y$  означает, что треугольники меша  $x$  лежат «снаружи»  $y$ . Соответственно,  $x \bullet y$  —  $x$  лежит «внутри»  $y$ . Это абстрактные некоммутирующие операции, определение которых зависит от реализации. Можно лишь наделить их результат следующими свойствами:

$$\{l \circ R\} \cap_{\Delta} \{l \bullet R\} = \emptyset, \quad (2)$$

$$\{l \circ R\} \cap_{\Delta} \{L \cap_{\Delta} R\} = \emptyset, \quad (3)$$

$$\{l \bullet R\} \cap_{\Delta} \{L \cap_{\Delta} R\} = \emptyset, \quad (4)$$

$$\{l \circ R\} \cap_{\circ} \{L \cap_{\Delta} R\} = \{v\}, \quad (5)$$

$$\{l \bullet R\} \cap_{\circ} \{L \cap_{\Delta} R\} = \{v\}, \quad (6)$$

где  $\cap_{\Delta}$  — пересечение по треугольникам,

$\cap_{\circ}$  — пересечение по вершинам.

Другими словами, никакие из компонент сегментации не пересекаются в треугольниках (2)-(4), однако компоненты совпадают в контурах, полученных при пересечении мешей (5)-(6). Если два сегмента находятся по разную сторону границ, они относятся к двум разным классам — можно провести классификацию, используя только оператор (не)нахождения внутри одной точки (центра треугольника) и информацию о том, какие конкретные контуры были получены после итерации сегментации по контуру.

Оператор нахождения точки внутри тела



должен учитывать «полости». GWN для точки даст четное количество оберток — точка будет обернута как полостью, так и внешней поверхностью. Луч из точки пересечется с мешем четное число раз — значит, для точки внутри полости луч пересечется один раз с треугольником из полости, второй раз с треугольником из внешней поверхности.

Определим коммутативную ассоциативную операцию «сложения» мешей:

$$\begin{aligned} + : M_1, M_2 &\rightarrow M \\ L + R &:= \{L \cup_{\Delta} R, L \cup_{\circ} R\}, \end{aligned} \quad (7)$$

где  $\cup_{\Delta}$  — объединение по треугольникам,

$\cup_{\circ}$  — объединение по вершинам.

На операцию объединения не накладывается ограничение неповторяющихся точек. Сложение может быть реализовано с учетом уже вставленных вершин, чтобы после сложения они не повторялись. Однако в этом случае операция теряет свойство коммутативности —

меша будут теми же по топологии, но индексы вершин треугольников будут отличаться.

Для получения результатов объединения будем складывать между собой сегменты из классов, определенных в (2) – (6):

$$\begin{aligned} \cup : \{l \circ R\} + \{r \circ L\} + \{L \cap_{\Delta} R\} \\ \cap : \{l \bullet R\} + \{r \bullet L\} + \{L \cap_{\Delta} R\}. \end{aligned} \quad (8)$$

$$\setminus : \{l \circ R\} + \{r \bullet L\}$$

При объединении убираются сегменты, входящие в противоположные меша, — таким образом, в результирующем меше не будет внутренних стенок. Напротив, для пересечения необходимо оставить только внутренние сегменты и касающиеся части. При вычитании используются внешние части.

На рис. 3 приводятся результаты операций между двумя телами, представленными в виде мешей.

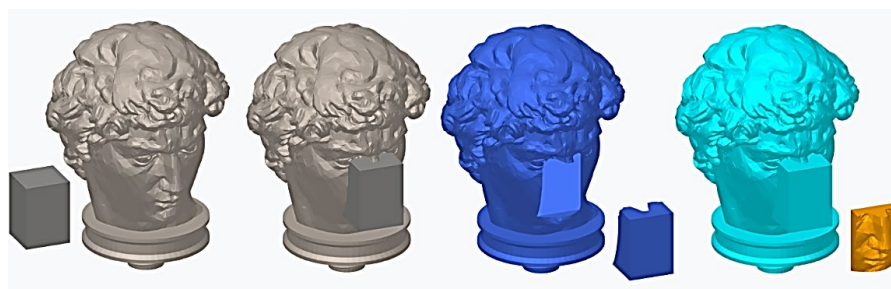


Рис. 3. Результаты булевых операций между головой статуи Давид и призмой

### Заключение

Рассматривались задача разбиения трехмерных мешей на основе множеств их пересечений и задача сегментации трехмерных мешей на основе контуров пересечений с последующей классификацией.

С использованием метода перетриангуляции задача о булевых операциях над трехмерными мешами свелась к задаче теории графов. Места пересечения были сведены к границам на множестве треугольников, по которым они разделялись на части. Для классификации полученных сегментов были введены и использованы абстрактные операции классификации сегмента, для которых достаточно проверить взаимное нахождение меша и точки центра любого треугольника.

Получаемые сегменты могут использоваться для более сложных алгоритмов, работающих над незамкнутыми мешами или телами с полостями. Анализ работы алгоритма и тес-

тирование результатов были проведены в системе, написанной на языке программирования C++ с использованием API OpenGL. По итогам были разработаны библиотека и система отображения мешей, в которой пользователь может интерактивно применять булевы операции к мешам: пересечение, вычитание и объединение. В дальнейшем планируется исследование булевых операций между открытыми мешами. Также планируется оптимизация разделения на сегменты при помощи представления меша в виде графа смежности треугольников, узла которого достаточно для выполнения бинарной операции нахождения в одном сегменте.

### Литература

1. The Computational Geometry Algorithms Library. URL: <https://www.cgal.org/> (дата обращения: 26.10.2024).
2. BrunoLevy/geogram: a programming library with geometric algorithms. URL: <https://github.com/BrunoLevy/geogram> (дата обращения: 26.10.2024).
3. Mesh Arrangement for Solid Geometry / Q. Zhou, E. Grinspun, D. Zorin, A. Jacobson // ACM Transactions on



Graphics (TOG). 2016. Vol. 35. No. 4. P. 1-15.

4. Jacobson A., Kavan L., Sorkine-Hornung O. Robust inside-outside segmentation using generalized winding numbers // ACM Transactions on Graphics (TOG). 2013. Vol. 32. No. 4. P. 1-12.

5. Interactive and robust mesh Booleans / G. Cherchi [et al.] // arXiv preprint arXiv:2205.14151. 2022. Vol. 41. №. 6. P. 1-14.

6. New evaluation metrics for mesh segmentation / Z. Liu [et al.] // Computers & graphics. 2013. Vol. 37. No. 6. P. 553-564.

7. A Deep Learning Approach to Mesh Segmentation / A. S. Gezawa [et al.] // CMES-Computer Modeling in Engineering & Sciences. 2023. Vol. 135. No. 2. P. 1745-1763.

8. Möller T. A fast triangle-triangle intersection test // Journal of graphics tools. 1997. Vol. 2. No. 2. P. 25-30.

Поступила 25.01.2025; принята к публикации 24.02.2025

#### 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: gypetruhnova@mail.ru

**Подвальный Семен Леонидович** – д-р техн. наук, профессор, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: spodvalny@yandex.ru

**Точилин Александр Сергеевич** – студент магистратуры, Воронежский государственный университет (394018, Россия, г. Воронеж, Университетская пл., 1), e-mail: alexgerggot@gmail.com

## MESH SEGMENTATION FOR BOOLEAN OPERATIONS

G.V. Petrukhnova<sup>1</sup>, S.L. Podvalny<sup>1</sup>, A.S. Tochilin<sup>2</sup>

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

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

**Abstract:** the paper considers the problem of splitting three-dimensional meshes based on sets of their intersections and the problem of segmentation of three-dimensional meshes based on intersection contours with subsequent classification. Meshes of arbitrary topology are considered, they can be both open and closed. Meshes of arbitrary topology are considered, they can be both open and closed. The main part of the work focuses on mesh bodies that do not have triangles as partition elements, which have fewer than two neighbors along the edges. Solving the segmentation problem allows you to define operations regardless of the characteristics of the meshes – only taking into account the relative position of the segments. Five classes of meshes have been obtained, which form components for Boolean intersection, union, and subtraction operations. The paper defines a set of operations for segmentation and classification tasks, and provides constraints. The resulting algorithm with a set of abstract operations can be used to implement a module of Boolean operations. The paper defines the operation of "adding" meshes, the implementation of which varies depending on the requirements for the resulting meshes. This operation can be used to preview a mesh in which extra vertices do not affect its display in any way. The article discusses the transitions between the tasks of splitting three-dimensional meshes and segmentation tasks and demonstrates the results of solving intermediate tasks. The resulting segments can be used for more complex algorithms working on open meshes or bodies with cavities. An analysis of the algorithm's operation and test results were obtained in a system written in the C++ programming language using the OpenGL API

**Key words:** mesh intersection, mesh union, mesh difference, triangulation, segmentation

Submitted 25.01.2025; revised 24.02.2025

#### References

1. "The Computational Geometry Algorithms Library", available at: <https://www.cgal.org/> (access date: 10.26.2024).
2. "BrunoLevy/geogram: a programming library with geometric algorithms", available at: <https://github.com/BrunoLevy/geogram> (access date: 10.26.2024).
3. Zhou Q., Grinspun E., Zorin D., Jacobson A. "Mesh Arrangement for Solid Geometry", *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, 2016, vol. 35, no. 4, pp. 1-15.
4. Jacobson A., Kavan L., Sorkine-Hornung O. "Robust inside-outside segmentation using generalized winding numbers", *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, 2013, vol. 32, no. 4, pp. 1-12.
5. Cherchi G. et al. "Interactive and robust mesh Booleans", arXiv preprint arXiv:2205.14151, 2022.
6. Liu Z. et al. "New evaluation metrics for mesh segmentation", *Computers & graphics*, 2013, vol. 37, no. 6, pp. 553-564.
7. Gezawa A.S. et al. "A Deep Learning Approach to Mesh Segmentation", *CMES-Computer Modeling in Engineering & Sciences*, 2023, vol. 135, no. 2.
8. Möller T. "A fast triangle-triangle intersection test", *Journal of graphics tools*, 1997, vol. 2, no. 2, pp. 25-30.

#### Information about the authors

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

**Semyon L. Podvalny** – Dr. Sc. (Technical), Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: viktortrubetsckoi@yandex.ru

**Alexander S. Tochilin** – Master's Student, Voronezh State University (1 University square, Voronezh 394018 Russia), e-mail: alexgerggot@gmail.com

## РАЗРАБОТКА СПОСОБА БАЛАНСИРОВКИ НАГРУЗКИ В РАСПРЕДЕЛЕННЫХ СИСТЕМАХ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ

Аунг Чжо Мьо<sup>1</sup>, Е.М. Портнов<sup>1</sup>, А.С. Волков<sup>1</sup>, М.В. Слюсарь<sup>1</sup>, А.В. Потапов<sup>2</sup><sup>1</sup>Национальный исследовательский университет  
«Московский институт электронной техники», г. Зеленоград, Россия<sup>2</sup>Завод «Протон», г. Москва, Россия

**Аннотация:** проблема балансировки нагрузки в центрах обработки информации является ключевой для распределенных систем, работающих с большими объемами передаваемых данных. Проведенный анализ известных алгоритмов показал, что возникает необходимость в разработке модифицированных алгоритмов балансировки нагрузки, направленных на обеспечение равномерной загруженности прокси и возможности быстрой смены схем маршрутизации при выводе из строя одного или нескольких из них. Настоящее исследование нацелено на создание математической модели и разработку алгоритмов, способствующих эффективной балансировке нагрузки в таких системах. Основная задача заключается в повышении эффективности передачи и обработки информации в распределенных системах. Представлена математическая модель процесса балансировки нагрузки, которая учитывает работу системы, передающей большие объемы данных через прокси с ограниченной пропускной способностью. Разработанная модель учитывает такие параметры, как атрибуты входящих информационных сообщений, размер очереди  $m$ -го прокси-сервера и его максимальную пропускную способность. Предложены алгоритмы работы устройства балансировки нагрузки, основанные на многопоточном принципе распределения задач и информационных сообщений по прокси внутри сервера в зависимости от времени обработки сообщения, его приоритетности и цены. Проведенные испытания показали эффективность работы алгоритма балансировки нагрузки, а также целесообразность его применения в системах, в которых существует проблема в распределении данных

**Ключевые слова:** распределенная система обработки данных, математическая модель, балансировка нагрузки, прокси-сервер, потоки, алгоритм

**Благодарности:** исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 24-29-00530)

## Введение

Важной составляющей процесса повышения эффективности информационных обменов в распределенных системах обработки данных является балансировка нагрузки, что особенно актуально при больших объемах передаваемых данных.

При отправке сообщений на центр обработки информации, который занимается отправкой сообщений, обычно бывает несколько подключений к периферийным прокси серверам. Требуется правильно организовать информационный обмен и передачу сообщений, чтобы они были доставлены без задержек. Если в системе отсутствует программное обеспечение, которое обеспечивает равномерное распределение нагрузки между прокси-серверами, конкретный центр обработки данных будет работать лишь с определенным прокси [1]. Для оптимального функционирования устройства балансировки нагрузки важно правильно выби-

рать сообщения из текущей очереди, принимая во внимание следующие параметры:

- $R = \{r_1, r_2, r_3 \dots r_n\}$  - множество сообщений в очереди;
- $O = \{o_1, o_2 \dots o_n\}$  - множество приоритетов каждого из сообщений в очереди;
- $T = \{t_1, t_2 \dots t_n\}$  - множество времен нахождения сообщений в очереди.

Введем коэффициенты допустимых задержек и определим приоритеты в дискретном диапазоне от 1 до 200, где сообщением с высшим приоритетом будет считаться то, которому присвоен приоритет 1. Величину  $X$ , отражающую важность сообщения для выборки, будем называть приоритетностью сообщения.

$$X \rightarrow \min.$$

Условие будет выполняться при:

$$O \rightarrow \min;$$

$$T \rightarrow \max.$$

При этом чем меньше значение  $X$ , тем выше приоритет сообщения для выборки. Процесс выбора сообщений будет осуществляться согласно следующему правилу:

$$X = \frac{0}{\sqrt{T}}.$$

В результате данного подхода в первую очередь будут обрабатываться сообщения с высоким приоритетом, однако и сообщения с низким приоритетом, находящиеся в очереди, также будут постепенно учитываться для выборки [1, 2].

Выделим следующие элементы:

$K = \{k_1, k_2, \dots, k_n\}$  - множество устройств связи с объектами;

$Z = \{z_1, z_2, z_3\}$  - множество серверов, с которыми непосредственно работает балансировщик нагрузки;

$S = \{s_1, s_2, \dots, s_m\}$  - множество прокси, отправляющих сообщения. Каждый прокси-сервер в среднем отправляет  $\mu_i$  сообщений в секунду (рис. 1).

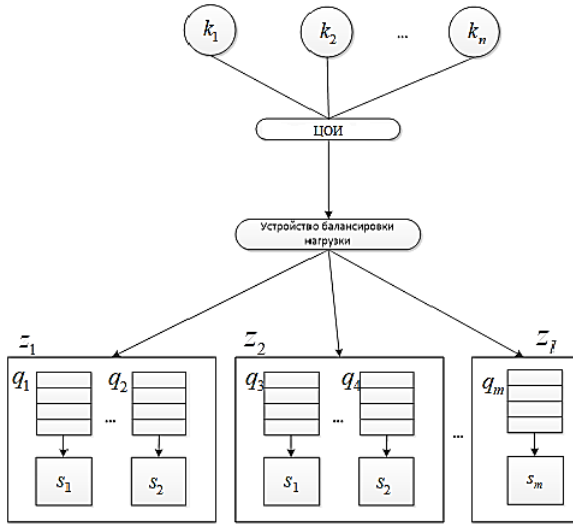


Рис. 1. Схема распределенной системы обработки сообщений

Характеристиками такой системы будут являться:

$A = \{a_1, a_2, a_3, \dots\}$  - множество атрибутов входных информационных сообщений;

$Q = \{q_1, q_2, \dots, q_m\}$  - размер очереди  $m$ -го прокси-сервера;

$P = \{p_1, p_2, \dots, p_m\}$  - максимальная пропускная способность  $m$ -го прокси.

Приведем математическое описание обработки входных данных с помощью прокси-серверов. Балансировка нагрузки  $W$  определяется следующим выражением:

$$W: R \rightarrow S. \quad (1)$$

## Равномерность загруженности прокси на отправку

Загруженность прокси  $s_i$  называется величина:

$$X_i = \frac{\mu_i}{p_i} \quad (2)$$

Определим среднее арифметическое множества  $\{X_{ij}\}$ :

$$\bar{X} = \frac{1}{m} * \sum_{i=1}^m X_i. \quad (3)$$

Введем понятие показателя равномерности загрузки:

$$\delta = \frac{\sqrt{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (X_i - \bar{X})^2}}{\bar{X}} * 100\%. \quad (4)$$

Таким образом, прокси загружены равномерно при  $\delta \rightarrow 0$  [3].

Выделим следующие элементы:

$E = \{e_1, e_2, \dots, e_m\}$  - цена отправки сообщений для конкретного прокси

Формализуем понятие наиболее эффективного распределения сообщений по прокси внутри одного сервера:

1) сообщения уходят на более приоритетный прокси;

2) загруженность прокси минимальна

( $X_i = \frac{\mu_i}{p_i} \rightarrow 1$ );

3) стоимость отправки одного конкретного сообщения для прокси оптимально ( $e \rightarrow \min$ ).

$$0 \rightarrow \min, q \rightarrow \max, q / \mu \rightarrow \min, e \rightarrow \min. \quad (5)$$

Принимая  $FA: R \rightarrow A$  как функцию получения атрибутов сообщений, имеем:

$$\forall k_i \forall r_{k_i} \exists a_i \in A: FA(r_{k_i}) = a_i. \quad (6)$$

Пусть  $G(k_i, z_k) = p$  количество сообщений от клиента  $k_i$  обработанных прокси  $z_k$ , тогда:

$$\forall i, i \in [1, n] \exists v, v \in [1, m]: \begin{cases} G(k_i, z_j) > 0, \text{ при } j=v \\ G(k_i, z_j) = 0, \text{ при } j \neq v \end{cases} \quad (7)$$

Таким образом, все сообщения от клиента  $k_i$  будут обрабатываться одним сервером  $z_v$  (рис. 2) [4].

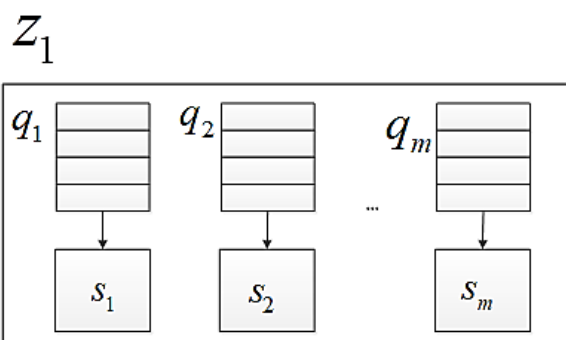


Рис. 2. Схема распределения сообщений внутри сервера

Для того чтобы эффективно использовать ресурсы ЦОИ, будем использовать различные потоки для выполнения различных задач внутри устройства балансировки:

- главный поток, (Main Thread), загружающий начальные значения, проверяющий прокси-сервера;

- Life Time Watcher - перезагружающий устройства балансировки нагрузки при его сбое или низкой эффективности ;

- Cleaner - отвечает за запись сообщений, обрабатываемых балансировщиком нагрузки, во временную таблицу.

- Settings Watcher - вносит изменения в настройки прокси-серверов в базе данных.

- Fake Gates - управляет потоками серверов, выделяя отдельный поток для каждого сервера в системе, который занимается распределением данных между реальными прокси для их отправки.

- Corrector - осуществляет корректировку текущей очереди сообщений в каналах для каждого прокси и регулирует максимальное количество сообщений согласно настройкам прокси.

- Router - распределяет сообщения между прокси на сервере и определяет сервер для обработки сообщения, учитывая время его нахождения в процессе, приоритет и стоимость одного сообщения на прокси.

- Logger - записывает все действия устройства балансировки нагрузки в лог-файл.

Устройство балансировки начинает свою работу с запуска основного потока, который запускает все потоки, необходимые для работы.

Основной поток продолжает свою работу после запуска всех потоков. Он хранит общие настройки, и к нему идет обращение из других потоков.

Поток Cleaner при запуске проверяет актуальность текущих записей во временной таблице и обновляет их, если они неактуальны (такое может произойти при некорректном или аварийном завершении работы устройства балансировки нагрузки). Каждые  $n$  секунд поток удаляет отработанные сообщения из временной таблицы (рис. 3).



Рис. 3. Схема работы алгоритма потока Cleaner

Работа потока, обновляющего текущие очереди крайне, важна для общей производительности устройства балансировки нагрузки. Необходимо постоянно обновлять информацию о текущих размерах очередей на прокси-серверах, и если они переполнены, устройство балансировки должно перенаправлять сообщения на другие реальные прокси (рис. 4).

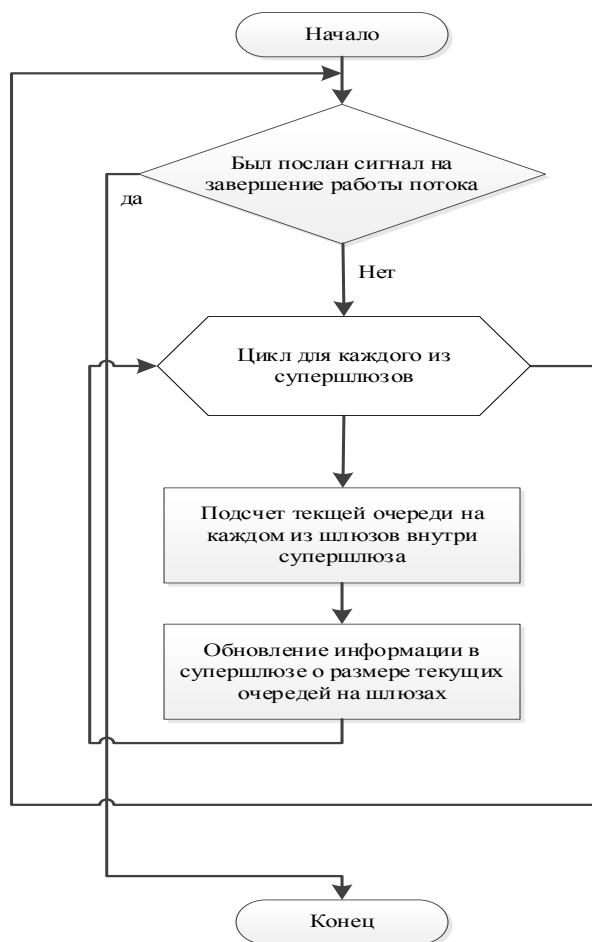


Рис. 4. Схема работы алгоритма потока Corrector

Основной алгоритм распределения сообщений по прокси реализуется в потоках Fake Gate и Router. Когда сообщения поступают на устройство балансировки, они имеют исходный сервер, с которым и будет взаимодействовать данное устройство.

Распределение задается в роутинговых схемах для клиентов заранее, и в зависимости от того, в какую страну идет отправка клиентом, сообщение будет распределено на требуемый сервер на центре обработки информации (ЦОИ), который обрабатывает входящие сообщения от клиентов (рис. 5).

Сначала происходит выбор прокси в список в определенном порядке, который определяется исходя из приоритета прокси внутри сервер, максимальной очереди прокси, пропускной способности прокси.

Прокси будут заполняться сообщениями в порядке, соответствующем их размещению в списке, что означает, что первый прокси станет наиболее приоритетным. Если в списке несколько прокси находятся на первой позиции, то выбор прокси для отправки сообщений будет осуществляться случайным образом. Сообщения для отправки на прокси отбираются согласно приоритету, времени пребывания в очереди и стоимости сообщения для клиента (которая рассчитывается как коэффициент относительно стандартной цены и всегда больше 1). После обработки сообщения происходит обновление таблицы, с которой будет работать прокси для дальнейшей отправки, а в временной таблице это сообщение отмечается как обработанное.

Важным требованием для проведения испытаний будет являться максимальная приближенность к реальным условиям работы алгоритма балансировки. Смоделируем ситуацию работы прокси-сервера с использованием таблицы распределения сообщений клиента по прокси, т.е. до разработки устройства балансировки и проанализируем, какой была суммарная пропускная способность прокси-серверов, и как изменялся размер текущей очереди сообщений на центральном сервере.

При большой очереди сообщений на центральном сервере усложняется выборка сообщений из очереди для отправки ее на конкретный прокси. При распределении сообщения клиента на конкретный прокси, он может быть загружен полностью, но при этом прокси, который способен выполнять отправки тех же сообщений, будет простаивать, в результате чего прокси будут использоваться неэффективно (рис. 6). Проанализировав этот эксперимент видно, что центр обработки информации не справляется с нагрузкой, которую создают поступающие сообщения и возникает большая очередь. Для решения этой проблемы попробуем использовать модифицированный алгоритм балансировки нагрузки и распределения данных по прокси, и сравним полученные результаты с результатами без использования алгоритма балансировки.



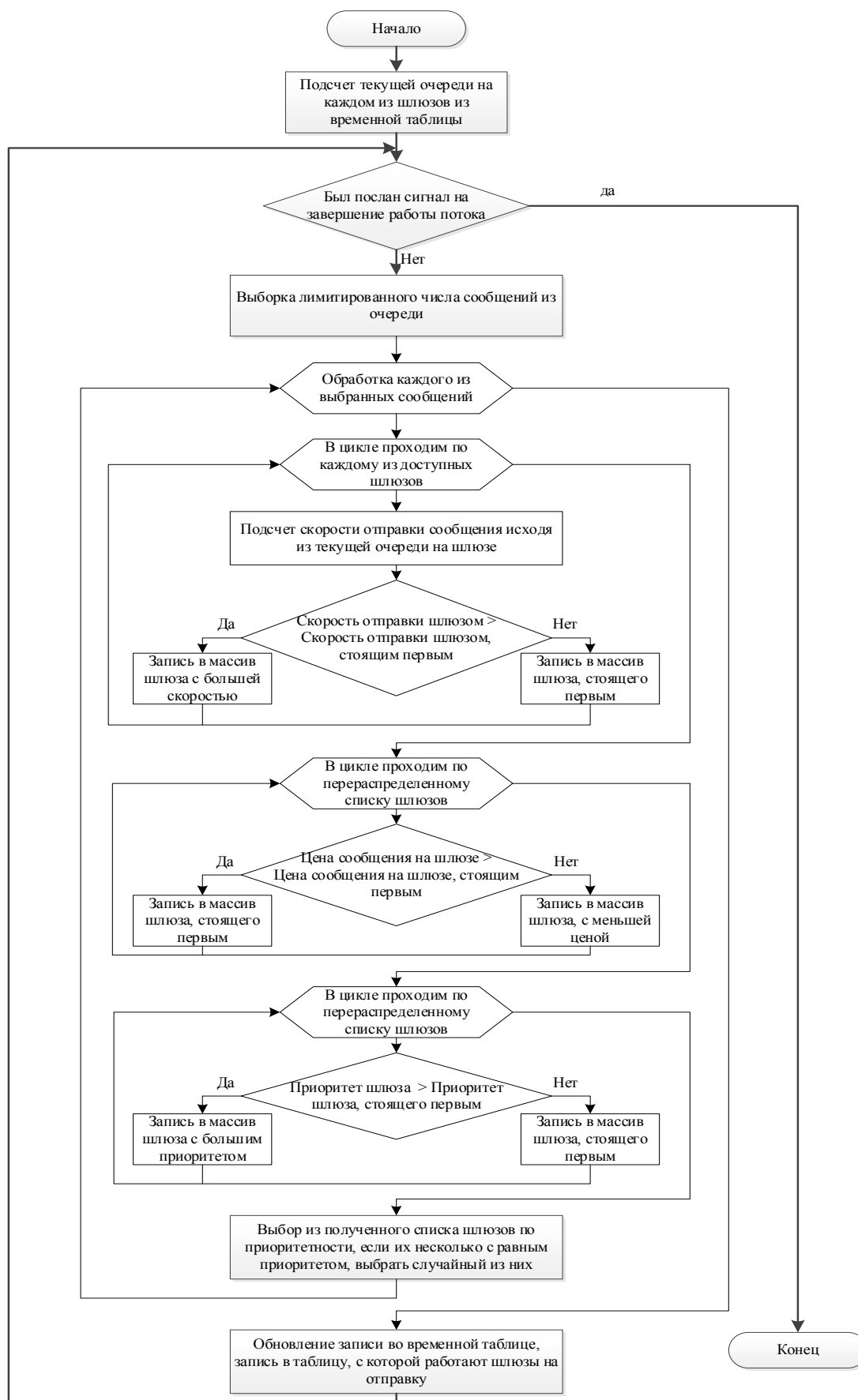


Рис. 5. Схема функционирования алгоритма потоков Fake Gate и Router, являющихся основными потоками устройства балансировки нагрузки

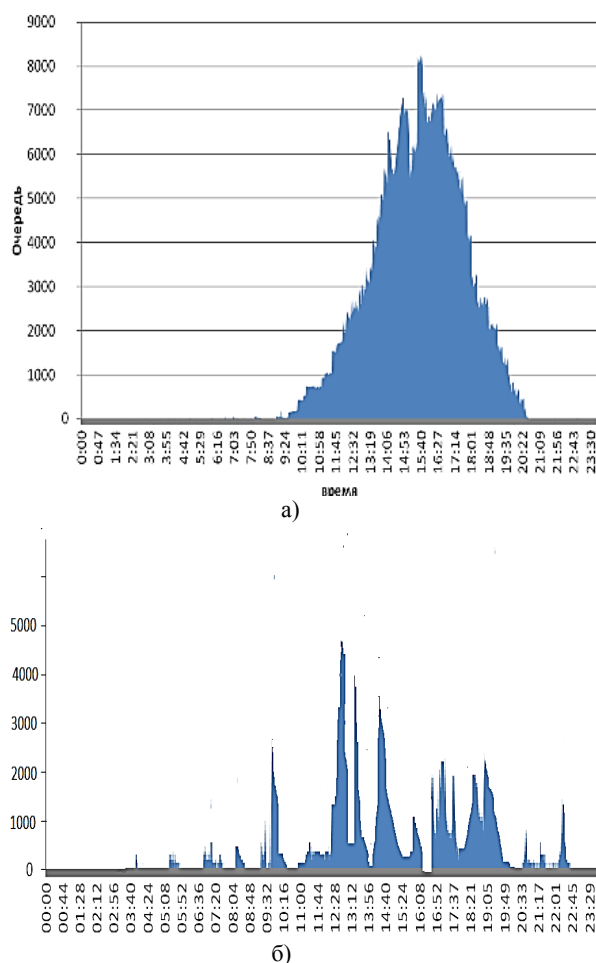


Рис. 6. График очереди сообщений на ЦОИ в зависимости от времени при высокой нагрузке (а), невысокой нагрузке (б) без устройства балансировки нагрузки

Сразу будем использовать долгосрочные испытания, то есть приложение будет работать сутки, замер скорости будет длиться с 0:00 до 23:59. В течение всего срока работы приложения будем вести и размер текущей очереди.

При моделировании работы ЦОИ будут участвовать несколько клиентов, с разными настройками маршрутизации, с сообщениями разного приоритета. Зададим скорость отправки ими сообщений таким образом, что в течение дня испытаний скорость будет меняться, с 11 до 19, скорость будет выше обычной, будет добавляться увеличивающий коэффициент. Также добавим резкое увеличение скорости поступающих сообщений в период с 14:30 по 15 часов. Скорость отправки клиентами будет переменной в течение суток и выбираться случайным образом, но в пределах настроек каждого из клиентов.

Для того чтобы смоделировать реальную ситуацию, необходимо создать несколько прокси. Пусть будет работать несколько прокси с

разной пропускной способностью: 3 прокси со скоростью 1 сообщение в секунду, 2 прокси со скоростью 1,5 сообщений в секунду, 1 прокси со скоростью 0,75 сообщений в секунду, 1 прокси со скоростью 0,40 сообщений в секунду и один прокси со скоростью 0,20 сообщений в секунду.

Также нам понадобятся центральные серверы. Для примера создадим два центральных сервера, которые будут выглядеть следующим образом (рис. 7):

Центральный сервер 1			
1	testGate_20	8	0,20
2	testGate_100_1	40	1
3	testGate_100_2	40	1
4	testGate_100_3	40	1
5	testGate_40	20	0,4

Центральный сервер 2			
1	testGate_150_1	30	1,50
2	testGate_150_2	30	1,50
3	testGate_75	15	0,75
4	testGate_100_3	25	1
5	testGate_100_2	25	1

Центральный сервер 3			
1	testGate40	20	0,40

Рис. 7. Схема настроек центральных серверов и расположение прокси в них по приоритетам

На рис. 7 в каждом из центральных серверов первая колонка – это приоритет, 2 – название прокси, 3 – максимальная очередь сообщений на прокси, 4 – скорость отправки сообщений прокси (сообщений в секунду).

Проанализировав скорость доставки в пиковые часы нагрузки на сервер (с 10:00 до 21:00) без устройства балансировки нагрузки, получаем, что средняя скорость отправки в эти часы была 2,895 сообщений в секунду. При этом существовала очередь сообщений на ЦОИ во все время пиковой нагрузки.

В случае же, когда было введено устройство балансировки нагрузки, средняя скорость в пиковые часы нагрузки была 4,947 сообщений в секунду, а очередь появлялась лишь в моменты увеличения количества сообщений, отправляемых на сервер, в сравнении с общей скоростью на отправку.

На рис. 8 представлены графики очереди сообщений на ЦОИ в зависимости от времени при обычной невысокой нагрузке и при высокой нагрузке при использовании устройства балансировки нагрузки.

По результатам, представленным на рис. 8, можно сделать вывод, что средняя очередь сообщений на ЦОИ при невысокой нагрузке сни-

зилась в 1,9 раз, а при высокой нагрузке в 1,75 раз за счет использования механизма балансировки нагрузки. При этом суммарная скорость на отправку сообщений выросла на 73 %, очередь на сервере стала появляться при больших нагрузках, что значительно увеличивает производительность прокси серверов. Проведенные сравнительные испытания показали эффективность работы алгоритма балансировки нагрузки, а также целесообразность его применения в системах, в которых существует проблема в распределении данных.

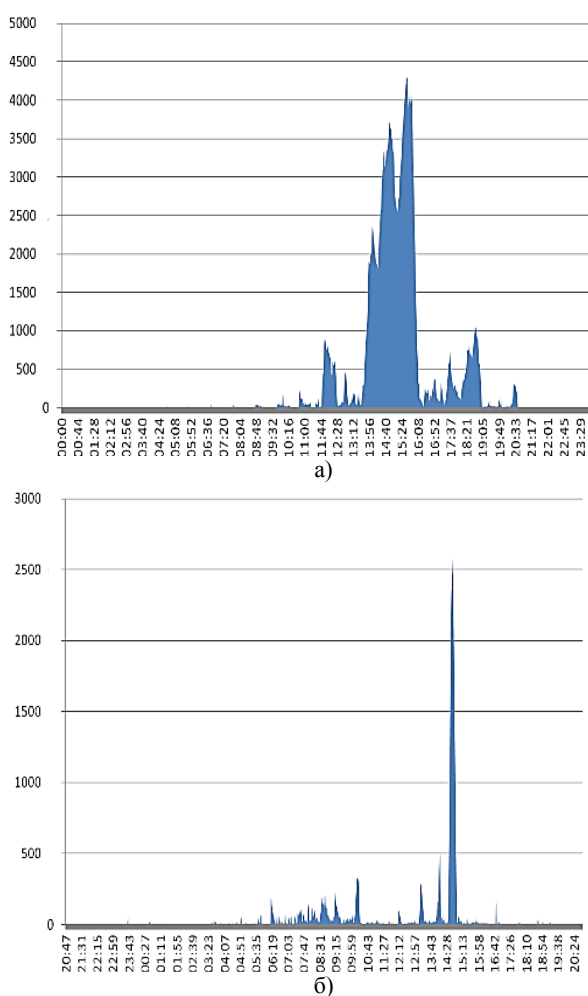


Рис. 8. График очереди сообщений на ЦОИ в зависимости от времени при высокой нагрузке (а), невысокой нагрузке (б) с использованием устройства балансировки нагрузки

Поступила 19.11.2024; принята к публикации 03.03.2025

#### Информация об авторах

**Аунг Чжо Мью** – канд. техн. наук, докторант, институт системной и программной инженерии и информационных технологий Национального исследовательского университета «Московский институт электронной техники» (124498, Россия, г. Москва, Зеленоград, Площадь Шокина, дом 1), e-mail: akuawmyo54@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4622-0634>  
**Портнов Евгений Михайлович** – д-р техн. наук, профессор, институт системной и программной инженерии и информационных технологий Национального исследовательского университета «Московский институт электронной техники» (124498, Россия, г. Москва, Зеленоград, Площадь Шокина, дом 1), e-mail: evgen\_uis@mail.ru

#### Заключение

1. Разработана математическая модель процесса балансировки нагрузки в системе с передачей больших объемов данных по прокси с ограниченной пропускной способностью, которая учитывает атрибуты входных информационных сообщений, размер очереди  $m$ -го прокси-сервера, максимальную пропускную способность  $m$ -го прокси.

2. Предложены алгоритмы работы устройства балансировки нагрузки, основанные на многопоточном принципе распределения задач и информационных сообщений по прокси внутри сервера в зависимости от времени обработки сообщения, его приоритетности и цены

3. Проведено моделирование работы центра обработки информации без алгоритма балансировки нагрузки и с алгоритмом балансировки нагрузки, которое показало, что средняя очередь сообщений на ЦОИ при невысокой нагрузке снизилась в 1,9 раз, а при высокой нагрузке в 1,75 раз за счет использования механизма балансировки нагрузки. При этом суммарная скорость на отправку сообщений выросла на 73%, очередь на сервере стала появляться при больших нагрузках, что значительно увеличивает производительность прокси серверов.

#### Литература

1. Никишин К.И. Балансировка нагрузки данных в распределенной сети через прокси-сервер NGINX // Известия Юго-Западного государственного университета. 2022. Т. 26. № 3. С. 98-111.
2. Аунг Ч.М., Маршалов В.Н., Портнов Е.М. Разработка методики прогнозирования нагрузки в распределенной вычислительной системе // Перспективы науки. 2020. № 11 (134). С. 187-192.
3. Разработка метода консистентного хеширования с весовыми коэффициентами для балансировки загрузки в системе управления энергообеспечением / А.С. Волков [и др.] // Перспективы науки. 2024. № 3 (174). С. 54-58.
4. Портнов Е.М., Савин А.С., Павлов М.С. Математическая модель процесса обработки запросов и перераспределения загрузки центров обработки информации // Аспирант и соискатель. 2024. № 3 (142). С. 10-14.

**Волков Александр Сергеевич** – старший преподаватель, институт системной и программной инженерии и информационных технологий Национального исследовательского университета «Московский институт электронной техники» (124498, Россия, г. Москва, Зеленоград, Площадь Шокина, дом 1), e-mail: alex.volkov9595@inbox.ru

**Слюсарь Мария Владимировна** – ассистент, институт системной и программной инженерии и информационных технологий Национального исследовательского университета «Московский институт электронной техники» (124498, Россия, г. Москва, Зеленоград, Площадь Шокина, дом 1), e-mail: mar\_vin@bk.ru

**Потапов Алексей Викторович** – заместитель генерального директора по хозяйственной деятельности, АО «Завод ПРОТОН» (124498, Россия, г. Москва, Зеленоград, Площадь Шокина, дом 6), e-mail: potapovav91@mail.ru

## DEVELOPMENT OF A METHOD OF LOAD BALANCING IN DISTRIBUTED DATA PROCESSING SYSTEMS

Aung Kyaw Myo<sup>1</sup>, E.M. Portnov<sup>1</sup>, A.S. Volkov<sup>1</sup>, M.V. Slyusar<sup>1</sup>, A.V. Potapov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>National Research University «Moscow Institute of Electronic Technology», Zelenograd, Russia

<sup>2</sup>«PROTON Plant», Moscow, Russia

**Abstract:** the issue of load balancing in data processing centers is crucial for distributed systems that handle large volumes of transmitted data. An analysis of existing algorithms has highlighted the need for the development of modified load-balancing algorithms aimed at ensuring an even distribution of load among proxies and enabling the rapid adjustment of routing schemes in the event of the failure of one or more proxies. This study focuses on the creation of a mathematical model and the development of algorithms to facilitate efficient load balancing in such systems. The primary objective of the research is to enhance the efficiency of data transmission and processing in distributed systems. The article presents a mathematical model of the load-balancing process, which considers the operation of a system that transmits large volumes of data through proxies with limited bandwidth. The proposed model accounts for parameters such as the attributes of incoming data messages, the queue size of the m-th proxy server, and its maximum throughput capacity. Additionally, load-balancing algorithms based on a multithreaded task distribution approach are proposed, ensuring the allocation of data messages among proxies within the server based on message processing time, priority, and cost. The conducted experiments have demonstrated the effectiveness of the proposed load-balancing algorithm and confirmed its feasibility for use in systems facing challenges in data distribution

**Key words:** distributed data processing system, mathematical model, load balancing, proxy server, flows, algorithm

**Acknowledgments:** the research was carried out with the support of a grant from the Russian Science Foundation (project no. 24-29-00530)

### References

1. Nikishin K.I. “Data Load Balancing in a Distributed Network via an NGINX Proxy Server”, *The Bulletin of the South-West State University*, 2022, vol. 26, no. 3, pp. 98-111.
2. Aung Ch.M., Marshalov V.N., Portnov E.M. “Development of a Load Forecasting Methodology in a Distributed Computing System”, *Prospects of Science*, 2020, no. 11 (134), pp. 187-192.
3. Volkov A.S., Bain A.M., Portnov E.M., Semenov M.Ju., Carapkin S.F. “Development of a Consistent Hashing Method with Weighting Coefficients for Load Balancing in an Energy Management System”, *Prospects of Science*, 2024, no. 3 (174), pp. 54-58.
4. Portnov E.M., Savin A.S., Pavlov M.S. “Mathematical model of the process of processing requests and redistribution of the workload of information processing centers”, *Postgraduate and Applicant*, 2024, no. 3 (142), pp. 10-14.

Submitted 19.11.2024; revised 03.03.2025

### Information about the authors

**Aung Kyaw Myo** – Cand. Sc. (Technical), Doctoral Student, Institute of systems and software engineering and information technology, National Research University of Electronic Technology «MIET» (1 Pl. Shokina, Zelenograd, Moscow 124498, Russia), e-mail: akyawmyo54@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4622-0634>

**Evgeny M. Portnov** – Dr. Sc. (Technical), Professor, Institute of system and software engineering and information technology, National Research University of Electronic Technology «MIET» (1 Pl. Shokina, Zelenograd, Moscow 124498, Russia), e-mail: evgen\_uis@mail.ru

**Alexander S. Volkov** – Senior Lecturer, Institute of systems and software engineering and information technology, National Research University of Electronic Technology «MIET» (1 Pl. Shokina, Zelenograd, Moscow 124498, Russia), e-mail: alex.volkov9595@inbox.ru

**Maria V. Slyusar** – Assistant, Institute of systems and software engineering and information technology, National Research University of Electronic Technology «MIET» (1 Pl. Shokina, Zelenograd, Moscow 124498, Russia), e-mail: mar\_vin@bk.ru

**Aleksey V. Potapov** – Deputy General Director for Economic Activities, «PROTON Plant» (1 Pl. Shokina, Zelenograd, Moscow 124498, Russia), e-mail: potapovav91@mail.ru

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ LORA-МОДУЛЯЦИИ НА ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТЬ КАНАЛА СВЯЗИ

М.А. Ромашенко, Д.В. Васильченко, Р.С. Сухомлинов, К.М. Черкашин

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

**Аннотация:** рассматриваются особенности метода модуляции и протокола передачи данных Long Range (LoRa) в задачах создания помехоустойчивых систем радиосвязи. Проанализированы существующие исследования по данной тематике и отмечены их недостатки. Описаны основные параметры модуляции - ширина полосы пропускания (BW), коэффициент расширения спектра (SF) и их влияние на помехоустойчивость системы передачи данных. Приведены теоретические обоснования, демонстрирующие влияние этих параметров на способность системы противостоять внешним помехам. Описан экспериментальный стенд на базе аппаратного модуля LoRa SX1276 и программно-определяемого радио HackRF. Данный стенд позволяет оценить зависимость величины потери информационных пакетов от ширины полосы пропускания и коэффициента расширения спектра при воздействии на канал связи белым гауссовским шумом с различной интенсивностью. Проведены экспериментальные измерения при варьировании  $SF = \{7; 12\}$  и  $BW = \{125, 250 \text{ и } 500 \text{ кГц}\}$ . Установлено, что увеличение коэффициента расширения спектра в сочетании с уменьшением ширины полосы пропускания способствует значительному повышению устойчивости сигнала. Полученные результаты позволяют выбрать наиболее эффективные параметры модуляции в зависимости от текущей электромагнитной обстановки

**Ключевые слова:** LoRa, помехоустойчивая связь, канал связи, линейная частотная модуляция, программно-определяемое радио

**Благодарности:** работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № FZGM-2024-0006)

### Введение

Развитие беспроводных технологий и телекоммуникационных систем сопровождается увеличением количества устройств, функционирующих в радиочастотном диапазоне. Такая тенденция приводит к росту плотности радиочастотных сетей и увеличению вероятности возникновения взаимных помех между ними. Помехи проявляются в виде наложения сигналов, что может вызывать интерференцию, искажение данных, снижение скорости передачи и увеличение вероятности ошибок приёма. Кроме того, источниками помех могут выступать внешние электромагнитные излучения от промышленных установок, бытовых устройств или других технологических систем. Особенно это необходимо учитывать в системах с ограниченной мощностью излучения, где даже небольшие помехи могут приводить к значительным потерям данных [1]. Так же немаловажным фактором обеспечения устойчивости связи является правильный выбор параметров моду-

ляции и спектральных характеристик сигнала. Минимальные изменения параметров могут оказывать существенное влияние на устойчивость системы к воздействию внешней помехи. В связи с этим все большее распространение находят технологий связи с расширением спектра, такие как Long Range (LoRa).

Технология LoRa — это метод модуляции и протокол передачи данных, обладающий высокой помехоустойчивостью и энергоэффективностью, позволяющий обеспечивать стабильную передачу данных даже при низкой мощности сигнала. За счет применения метода расширения спектра, в отличие от традиционной частотной модуляции, такой как Frequency Shift Keying (FSK), технология LoRa достигает более значительной дальности передачи. Основой LoRa является метод линейно-частотной модуляции (ЛЧМ). ЛЧМ увеличивает ширину спектра передаваемого сигнала, что позволяет снизить влияние помех и улучшить устойчивость к ним [2].

Главной особенностью LoRa является высокая чувствительность приёмника, что позволяет принимать сигналы даже когда они ниже уровня шума. Это достигается за счёт исполь-



зования методов помехоустойчивого кодирования, которые включают маскирование и перемежение данных. Высокая чувствительность приёмника позволяет использовать передатчик в режиме минимальной мощности, что делает технологию особенно привлекательной для создания систем связи управления беспилотными роботизированными аппаратами с ограниченными энергетическими ресурсами.

В подавляющем большинстве работ рассматриваются зависимость «symbol error rate» (SER) или «bit error rate» (BER), что представляет скорее академический интерес. Однако на практике, с учетом используемых способов построения помехоустойчивых каналов связи, поправок и корректировок, вносимых протоколом передачи LoRa, актуальной является именно зависимость «packet error rate» (PER), которая и исследуется в данной работе.

Другой отличительной особенностью представленной работы является проведение измерений именно на физическом аппаратном модуле LoRa. Например, в [3] исследуется имитационная модель, а все последующие данные получены исключительно математическим моделированием. Задача авторов была уйти от такого «теоретического идеализированного» подхода и рассмотреть использование существующих аппаратных решений LoRa в реальных условиях применения для построения помехоустойчивого канала связи.

Работа [4] близка по сути проведенному исследованию. В ней в качестве физических аппаратных устройств LoRa используются модули Libelium на базе чипов SX1272 управляемых испытательным стендом Colosseum. Основной новизной данной статьи является имитационная модель LoRa-трансивера на платформе SDR. Данная модель описывается закрытым программным кодом, а само исследование направлено на улучшение характеристик позиционирования (локализации) излучающих объектов.

### Постановка задачи

Для обеспечения эффективной работы системы связи на основе LoRa важно правильно настроить основные параметры влияющие на физические характеристики ЛВЧ-модуляции. Одним из таких параметров является полоса пропускания (BW), которая определяет диапазон частот, занимаемый сигналом. При этом надо учитывать, что чем шире полоса пропускания, тем выше скорость передачи

данных, но меньше дальность и помехоустойчивость канала связи. Вторым важным параметром является коэффициент расширения спектра (SF), который определяет количество бит данных, кодируемых в одном символе сигнала LoRa. Увеличение значения SF приводит к улучшению устойчивости к помехам и увеличению дальности передачи, но скорость передачи при этом становится ниже. Для стандартной полосы пропускания  $BW = 125$  кГц чаще всего используется  $SF = 7$ , обеспечивающий баланс между дальностью и скоростью.

При использовании модуляции LoRa, информация передается в виде последовательности символов, называемых линейно возрастающей частотной модуляцией (ЛВЧМ). Длительность такого символа определяется формулой  $T_s = \frac{2^{SF}}{B}$  [5].

Сигнал ЛВЧМ-символа определяются формулой (1)

$$s(t) = \exp \left( j2\pi \int_0^t \left[ (\beta x + \gamma_n) \bmod B - \frac{B}{2} \right] dx \right), \quad (1)$$

где  $B$  – используемая полоса пропускания, а  $\gamma_n$  – частотный сдвиг, полученный следующим образом:

$$\gamma_n = m_n \Delta_f = \frac{m_n}{T_s}, \quad (2)$$

где  $m_n$  – значение символа данных,

$n$  – индекс символа,

$\Delta_f$  – шаг по частоте между сдвигами.

Кроме того,  $\beta$  представляет наклон ЛВЧМ-символа, который является функцией полосы пропускания и определяется следующим образом:

$$\beta = \frac{f_h - f_l}{T_s} = \frac{Bw}{T_s}, \quad (3)$$

где  $f_h$  и  $f_l$  – нижняя и верхние границы частоты ЛВЧМ-символа соответственно.

Из вышесказанного следует, что значение символа кодируется в циклический сигнал ЛВЧМ, где начальная позиция ЛВЧМ-символа кодирует его значение. Чем более высокий SF, тем более длинный ЛВЧМ-сигнал, позволяющий кодировать больше битов на символ. Про-

должительность символа определяется формулой (4)

$$T_s = \frac{M}{B}, \quad (4)$$

где  $M = 2^{SF}$ , а  $B$  – используемая полоса пропускания.

Энергию символа можно определить по формуле (5)

$$E_s = P \cdot T_s. \quad (5)$$

С увеличением SF энергия на символ увеличивается, а вместе с этим улучшается и помехоустойчивость, но увеличивается время, требуемое для передачи сообщения.

Верхнюю границу для оценки спектральной эффективности LoRa можно вычислить по формуле (6)

$$\rho_{SF} = \frac{sf}{T_s BW} = \frac{SF}{2^{SF}}. \quad (6)$$

С увеличением SF спектральная эффективность в связи с увеличением длительности символа будет уменьшаться. Низкая спектральная эффективность является основным недостатком модуляции LoRa, но при этом обеспечивается высокая помехозащищённость.

В рамках эксперимента необходимо изучить зависимость уровня потери пакетов данных (packet error rate, PER) от изменения соотношения уровня сигнал-шум (signal noise rate, SNR) при варьировании основных параметров модуляции LoRa. Ширина полосы пропускания будет варьироваться в диапазоне от 125 до 500 кГц, а коэффициент расширения спектра от 7 до 12. Изучение зависимости позволит оценить влияния изменения параметров на помехоустойчивость системы.

Акцент был сделан на уход от распространенного подхода через математические и имитационные модели в сторону практического применения существующего коммерческого модуля LoRa SX1276 для построения помехоустойчивого канала связи. При этом характеристики этого модуля приводятся в техническом описании [2], однако не известно каким образом и в каких условиях они были получены (теоретическом моделировании, лабораторном исследовании, практической эксплуата-

ции). Кроме того, нет уверенности, что поставляемые модули соответствуют указанным техническим характеристикам.

## Методы решения и результаты

Вопросы эффективности связи на основе LoRa в условиях помех различной степени интенсивности и сильной многолучевости рассмотрены в [6-8]. Однако, в [6] для эксперимента используется безэховая камера, что ограничивает возможность воспроизводимости данного эксперимента. Кроме того, определение уровня соотношения сигнал/шум (SNR) производится путем оценки уровня выходной мощности на выходе генератора помех, что не гарантирует сохранение данного уровня SNR на входе приемника. В [7] в экспериментальной установке используются отдельные антенны для приемника и анализатора спектра. Несмотря на заявленную идентичность этих приемных антенн, нет уверенности, что уровень SNR, определенный на входе анализатора спектра, будет соответствовать уровню SNR на входе приемника. В [8] полезный сигнал и помеха одновременно подаются на вход передатчика, а затем уже смешанный сигнал излучается в эфир. Это не соответствует физической сущности реальной электромагнитной обстановки, а значит применяемый подход также нельзя считать абсолютно адекватным.

Для оценки влияния настроек параметров LoRa на устойчивость канала связи к белому гауссовскому шуму (AWGN) был собран экспериментальный стенд, структурная схема которого представлена на рис. 1, а практическая реализация представлена на рис. 2.

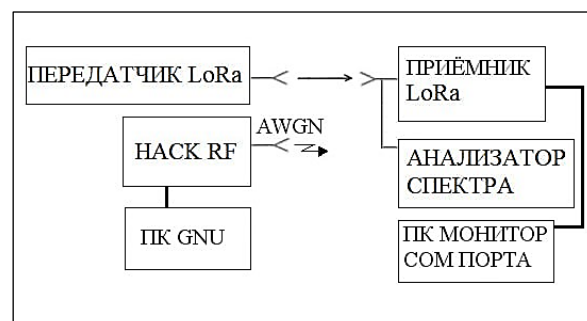


Рис. 1. Структурная схема экспериментального стенда

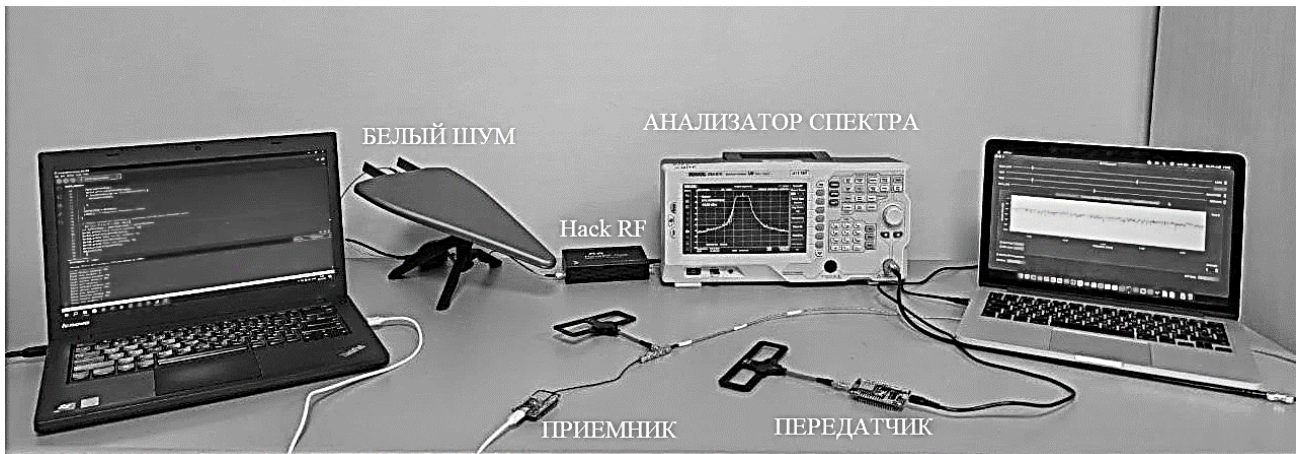


Рис. 2. Экспериментальный стенд

Для приема и передачи использовались два аппаратных модуля LoRa, для генерации помехи — программно-определяемое радио (SDR) Hack RF One, а для оценки результатов — анализатор спектра. Передатчик и приемник представляют устройства, состоящие из модуля LoRa SX1276, совмещенного с контроллером ESP32 в виде платы разработчика ESP32 Dev Module. Используются идентичные антенны типа Мохон с коэффициентом усиления 5.5 дБи. Антенны данного типа обеспечивают направленный характер излучения. Их использование приближает условия эксперимента к реальным, так как подобные антенны часто применяются в практических системах связи, где важно сочетание компактности, направленности и стабильности работы в заданном частотном диапазоне [9].

Используемые модули аппаратно поддерживают шесть различных коэффициентов расширения SF {7-12}, полосы пропускания 125, 250 и 500 кГц и скорости кодирования от 4/5 до 4/8. Сконфигурировав эти параметры в различных сочетаниях, можно получить необходимый для исследования сигнал. Передатчик был настроен на отправку фиксированного числа пакетов, состоящих из символов 16-ричной последовательности. Данные отправлялись с установленным временным интервалом, обеспечивающим равномерное распределение в канале связи.

В рамках эксперимента передатчик работал на фиксированной частоте 915 МГц, что является стандартом для технологии LoRa. Ширина полосы пропускания принимала значения 125, 250 и 500 кГц. Скорость кодирования была выставлена 4/8. Настройка параметров передачи и приема выполнялась при про-

шивке до начала работы и не менялась в ходе текущего этапа эксперимента.

HackRF One управлялся через ноутбук с установленным программным обеспечением (ПО) GNU Radio (рис. 3) [10]. Имитационная модель генератора белого шума позволяет выставить настройки центральной частоты помехи, частоту дискретизации, уровень помехи и её амплитуду.

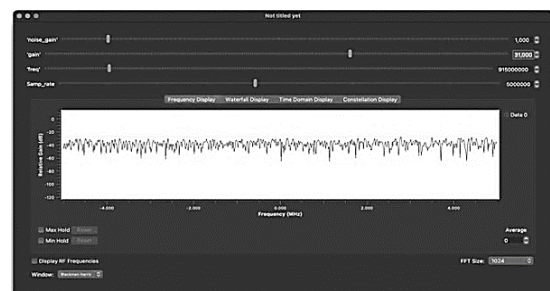


Рис. 3. Окно регулировки параметров белого шума

Для излучения помехи использовалась поверенная логопериодическая антенна Aaronia HyperLOG 70, работающая в диапазоне частот от 700 МГц до 6 ГГц [11].

Для оценки уровня полезного сигнала и излучаемой помехи использовался анализатор спектра Rigol DSA815 с диапазоном частот от 9 кГц до 1,5 ГГц. При измерении параметров анализатор и приемник подключался к общей антенне через согласованный разветвитель. Такой подход позволяет получить одинаковое значение SNR на входе приемника и анализатора спектра.

Информация о принятых пакетах выводилась в монитор последовательного порта. Фиксировались успешно принятые сообщения и случаи их потери, что позволяло провести анализ устойчивости канала связи при различных



параметрах передачи и условиях помехового воздействия.

Для каждого значения коэффициента расширения спектра первоначально проводилось измерение параметров полезного сигнала LoRa в условиях отсутствия помех (рис. 4). Используя анализатор спектра, фиксировались основные характеристики сигнала, включая мощность, частоту и ширину полосы пропускания. Полученные данные служили базовой точкой для последующего анализа влияния помехи на устойчивость канала связи.

Далее, при помощи SDR, через программное обеспечение GNU Radio генерировался сигнал белого гауссовского шума. Помеховый сигнал передавался через логопериодическую антенну, которая обеспечивала стабильное и равномерное излучение помехи в диапазоне рабочих частот передатчика LoRa. Сигнал уровня помехи на входе приемника измерялся анализатором спектра, что позволило фиксировать его параметры и рассчитывать текущее отношение SNR (рис. 5). Это соотношение служило критерием для оценки влияния помехового воздействия на устойчивость канала связи.

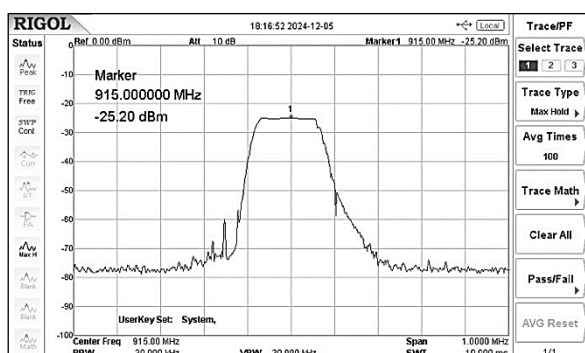


Рис. 4. Спектрограмма полезного сигнала

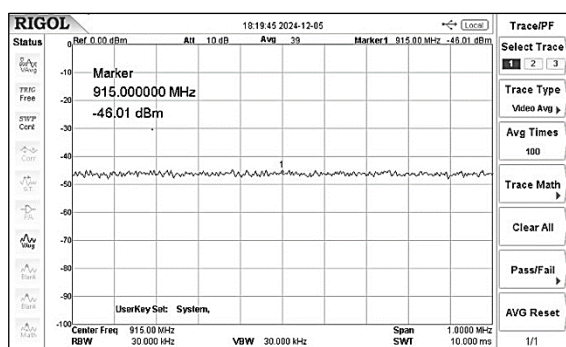


Рис. 5. Спектрограмма помехового воздействия

Персональный компьютер, подключённый к приёмнику LoRa, фиксировал результаты

приема данных через монитор последовательного порта. Для каждого значения SF уровень помехи постепенно увеличивался до тех пор, пока канал связи не был полностью подавлен. Подавление фиксировалась в случае трёх последовательных неудачных процессов приема-передачи. После достижения условий полного подавления канала для текущего значения SF параметры передатчика изменялись на следующее значение SF, и процесс повторялся.

### Анализ результатов и выводы

Во время эксперимента было изучено влияние параметров модуляции LoRa на количество принятых пакетов при воздействии помехи. Ширина полосы принимала значения 125, 250 и 500 кГц, а коэффициент расширения спектра — шесть значений в диапазоне от 7 до 12. Для каждой комбинации параметров отправлялось 1000 фиксированных пакетов, состоящих из символов 16-ричной последовательности. При этом значения CR оставались неизменными, а интенсивность помехи постепенно увеличивалась до тех пор, пока значение PER не становилось равным 1, что означает полностью подавленную связь.

В табл. 1 представлены полученные численные результаты для SF=7 и BW=125 кГц. Аналогичные результаты были получены и для остальных комбинаций параметров.

Таблица 1  
Результаты эксперимента для SF=7 и BW=125 кГц

SNR, дБ	Принято	Потеряно	PER
0.12	1000	0	0
-1.03	1000	0	0
-2.07	1000	0	0
-3	1000	0	0
-4.1	1000	0	0
-4.98	1000	0	0
-6.01	901	100	0.1
-6.52	808	193	0.19
-7	769	232	0.23
-7.57	634	369	0.37
-8.53	388	618	0.62
-9.22	271	728	0.73
-10.09	0	1000	1

На рис. 6 представлен график, отображающий зависимость PER от каждого значе-

ния SF при BW=125 кГц. На рис. 7 представлена зависимость PER от SF при BW=250 кГц, а на рис. 8 — при BW=500 кГц.

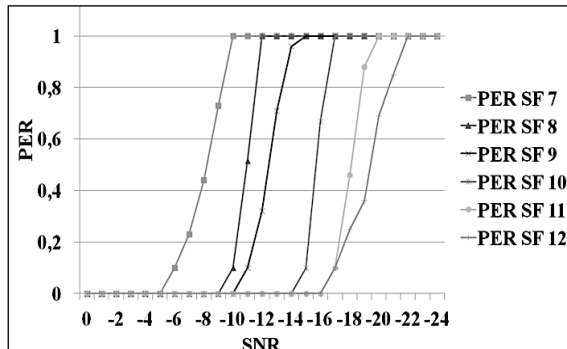


Рис. 6. Зависимость PER от SNR при BW=125 кГц

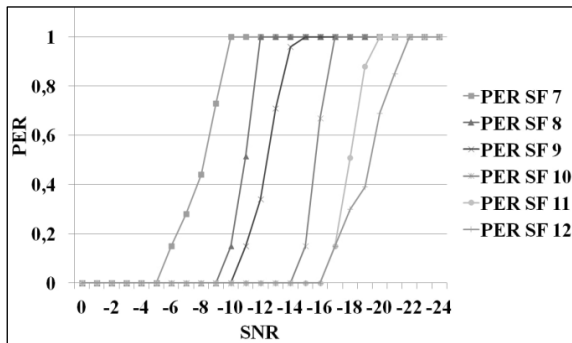


Рис. 7. Зависимость PER от SNR при BW=250 кГц

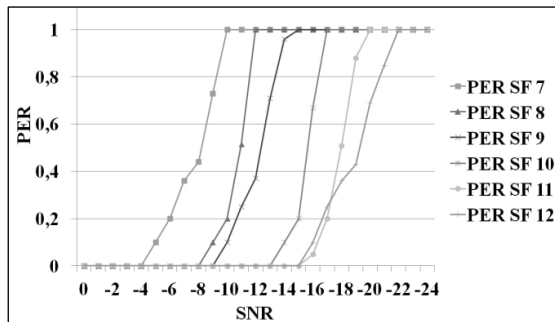


Рис. 8. Зависимость PER от SNR при BW=500 кГц

Проанализировав полученные результаты, можно сделать следующие выводы. Явно прослеживается зависимость между значением SF и устойчивостью связи при различных уровнях SNR. Так при более низком значении SF = 7, для полной потери передаваемых пакетов требуется значение SNR равное -9.5 дБ. В то время как при увеличении значения SF до 12, для того чтобы сигнал был подавлен до уровня, при котором происходит полная потеря пакетов, необходимо значительно более низкое значение SNR равное -22 дБ. Это свидетельствует о том, что при более высоком значении SF сиг-

нал обладает большей помехоустойчивостью и способен сохранять стабильность передачи данных при более высоком уровне помехи.

Установлено, что при уменьшении BW с 500 кГц до 250 кГц понижается значение отношения сигнал-шум (SNR), при котором канал связи полностью подавляется ( $PER > 0.9$ ), что характеризует улучшение помехоустойчивости системы. Т.е. канал связи продолжает функционировать при более высоком уровне помех при неизменном уровне полезного сигнала или при более низких уровнях полезного сигнала при существующем уровне помех. Аналогично, при дальнейшем уменьшении BW до 125 кГц, значение SNR может снижаться еще ниже, что делает канал связи более устойчивым к помехам. Таким образом, уменьшение ширины полосы пропускания повышает помехоустойчивость системы связи.

### Заключение

Полученные результаты экспериментального исследования демонстрируют схожесть с данными, представленными в технической документации на модуль LoRa SX1276. Также подтверждают выводы других исследователей, представленные в рассмотренных статьях. Показано, что увеличение значения коэффициента расширения спектра и уменьшение ширины полосы пропускания действительно улучшает помехоустойчивость канала связи, что подтверждается как теоретическими расчетами, так и на практике.

Таким образом, подводя итоги с прикладной точки зрения, можно сделать выводы:

- в практических задачах построения канала связи на основе аппаратного модуля LoRa sx1276 с большей степенью уверенности можно руководствоваться данными из технической документации;

- из широкого разнообразия имитационных и математических моделей других исследователей можно выбрать наиболее адекватную полученным результатам для дальнейшего моделирования системы связи на основе LoRa.

В дальнейших исследованиях планируется проведение аналогичного эксперимента в среде имитационного моделирования GNU Radio. Сопоставление результатов, полученных в реальной среде и с помощью моделирования, даст возможность не только подтвердить, но и оценить адекватность используемой имитационной модели. Подход позволит более



точно оценить влияние параметров системы на помехоустойчивость и выявить возможные отклонения между реальной и имитационной средой.

#### Литература

1. Ромашенко М.А., Васильченко Д.В., Пухов Д.А. Современное состояние задач повышения помехоустойчивости канала управления беспилотных авиационных систем на основе искусственного интеллекта // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2023. Т. 19. № 6. С. 142-146.
2. Lora-alliance [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://loraalliance.org/>, свободный (дата обращения: 08.12.2024).
3. On the Error Rate of the LoRa Modulation with Interference / O. Afisiadis, M. Cotting, A. Burg, A. Balatsoukas // IEEE Transactions on Wireless Communications. 2019. Vol. 19. No. 2. pp. 1292-1304.
4. SDR-LoRa, an open-source, full-fledged implementation of LoRa on Software-Defined-Radios: Design and potential exploitation / B. Fabio [et al.] // Computer Networks. 2024. Vol. 241. pp. 110-124.
5. Степанов Н.В. Систематизированный обзор особенностей реализации физического уровня протокола LORA // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2023. Т. 17. № 11. С. 11-26.
6. Staniec K., Kowal M. LoRa Performance under Variable Interference and Heavy Multipath Conditions // Wireless Communications and Mobile Computing. 2018. pp. 1-9.
7. LoRa Protocol Performance Assessment in Critical Noise Conditions / L. Angrisani [et al.] // 2017 IEEE 3rd International Forum on Research and Technologies for Society and Industry (RTSI). 2017. pp. 1-5.
8. Guo Q., Yang F., Wei J. Experimental Evaluation of the Packet Reception Performance of LoRa // Sensors. 2021. Vol. 21. No. 4. pp. 1071.
9. Basbug S. Moxon Antenna Array Design and Pattern Synthesis Technique // Academic Platform Journal of Engineering and Science. 2019. Vol. 7. pp. 424-429.
10. GNU Radio [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.gnuradio.org/>, свободный (дата обращения: 01.12.2024).
11. Active broadband antenna up to 6GHz [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.batronix.com/> (дата обращения 13.12.2024)

Поступила 20.01.2025; принята к публикации 17.02.2025

#### Информация об авторах

**Ромашенко Михаил Александрович** – д-р техн. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет (394006, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, д. 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, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, д. 84), e-mail: [Shadow951@bk.ru](mailto:Shadow951@bk.ru), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1045-0841>  
**Сухомлинов Роман Сергеевич** – лаборант-исследователь, Воронежский государственный технический университет (394006, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, д. 84), e-mail: [sukhomlinov03@mail.ru](mailto:sukhomlinov03@mail.ru), ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-6852-1067>  
**Черкашин Константин Михайлович** – студент, Воронежский государственный технический университет (394006, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, д. 84), e-mail: [const.cherkashin@yandex.ru](mailto:const.cherkashin@yandex.ru), ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-4929-4363>

## INVESTIGATION OF THE INFLUENCE OF LORA MODULATION PARAMETERS ON THE NOISE IMMUNITY OF THE COMMUNICATION CHANNEL

M.A. Romashchenko, D.V. Vasilchenko, R.S. Sukhomlinov, K.M. Cherkashin

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

**Abstract:** the features of the modulation method and the Long Range data transmission protocol (LoRa) in the tasks of creating noise-resistant radio communication systems are considered. The existing research on this topic is analyzed and their shortcomings are noted. The main parameters of the modulation are described - the bandwidth (BW), the spectrum expansion coefficient (SF) and their effect on the noise immunity of the data transmission system. Theoretical justifications are given to demonstrate the effect of these parameters on the system's ability to withstand external interference. An experimental stand based on the LoRa SX1276 hardware module and a software-defined HackRF radio is described. This test bench makes it possible to evaluate the dependence of the loss of information packets on the bandwidth and the coefficient of spectrum expansion when exposed to white Gaussian noise with varying intensity on the communication channel. Experimental measurements were carried out with variations of  $SF = \{7; 12\}$  and BW 125, 250 and 500 kHz. It has been found that an increase in the spectrum expansion coefficient combined with a decrease in bandwidth contributes to a significant increase in signal stability. The results obtained make it possible to select the most effective modulation parameters depending on the current electromagnetic environment

**Key words:** LoRa, noise-resistant communication, communication channel, linear frequency modulation, software-defined radio

**Acknowledgments:** the work was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (project no. FZGM-2024-0006)

## References

1. Romashchenko M.A. "Current state of the problems of increasing the noise immunity of the control channel of unmanned aircraft systems based on artificial intelligence", *The Bulletin of Voronezh State Technical University*, 2023, vol. 19, no. 6, pp. 142–146. (In Russ)
2. Lora alliance, available at: <https://loraalliance.org/>, free (accessed: December 8, 2024).
3. Afisiadis O., Cotting M., Burg A., Balatsoukas A. "On the Error Rate of the LoRa Modulation with Interference", *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2019, vol. 19, no. 2, pp. 1292–1304.
- Fabio B., Stefano M., Sergio P., Francesco R., Ilenia T. "SDR-LoRa, an open-source, full-fledged implementation of LoRa on Software-Defined-Radios: Design and potential exploitation", *Computer Networks*, 2024, vol. 241, pp. 110-124.
- 4.
5. Stepanov N.V. "A systematic review of the features of the implementation of the physical layer of the LORA protocol", *T-Comm: Telecommunications and Transport*, 2023, vol. 17, no. 11, pp. 11–26.
6. Staniec K., Kowal M. "LoRa Performance under Variable Interference and Heavy Multipath Conditions", *Wireless Communications and Mobile Computing*, 2018, pp. 1–9.
7. Angrisani L., Arpaia P., Bonavolonta F., Conti M., Liccardo A. "LoRa Protocol Performance Assessment in Critical Noise Conditions", *2017 IEEE 3rd International Forum on Research and Technologies for Society and Industry (RTSI)*, 2017, pp. 1–5.
8. Guo Q., Yang F., Wei J. "Experimental Evaluation of the Packet Reception Performance of LoRa", *Sensors* 21, 2021, vol. 21, no. 4, pp. 1071.
9. Basbug S. "Moxon Antenna Array Design and Pattern Synthesis Technique", *Academic Platform Journal of Engineering and Science*, 2019, vol. 7, pp. 424–429.
10. GNU Radio. Available at: <https://www.gnuradio.org/>, free (accessed December 1, 2024).
11. Active broadband antenna up to 6GHz. Available at: <https://www.batronix.com/>, free (accessed December 1, 2024).

Submitted 20.01.2025; revised 17.02.2025

## Information about the authors

**Mikhail A. Romashchenko** – Dr. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: [kipr@vorstu.ru](mailto:kipr@vorstu.ru), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5629-6056>

**Dmitriy V. Vasilchenko** – Graduate Student, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: [Shadow951@bk.ru](mailto:Shadow951@bk.ru), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1045-0841>

**Roman S. Sukhomlinov** – Laboratory Research Assistant, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: [sukhomlinov03@mail.ru](mailto:sukhomlinov03@mail.ru), ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-6852-1067>

**Konstantin M. Cherkashin** – Student, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: [const.cherkashin@yandex.ru](mailto:const.cherkashin@yandex.ru), ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-4929-4363>

## ОПТИМИЗАЦИИ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПЛАСТИН С ПОМОЩЬЮ НЕЙРОТЕХНОЛОГИЙ CNN

О.Н. Чирков, А.Б. Антиликаторов, К.М. Шкаровский, М.Н. Тамбовцев

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

**Аннотация:** показан один из немногих современных методов автоматизации оценки качества полупроводниковых пластин с помощью нейросетей, а точнее, внедрение в производство полупроводников нейротехнологий современных методов нахождения дефектов на полупроводниковых пластинах. Современное производство полупроводников является одной из самых важных отраслей промышленности, а потому оно и требует высокоточных и эффективных методов контроля качества. Одним из ключевых элементов этого процесса является оценка качества полупроводниковых пластин – тонких дисков, на которых формируются микрочипы. Традиционные методы оценки качества, основанные на ручном анализе или простых алгоритмах обработки изображений, уже не удовлетворяют растущим требованиям к скорости и точности производства. Предложено использовать технологии искусственного интеллекта, в частности, глубокие нейронные сети, способные обучаться на больших объемах данных и выявлять сложные зависимости, недоступные для традиционных алгоритмов ввиду чрезмерных объемов информации, и вследствие этого традиционные методы алгоритмов просто не могут дать точной оценки. Современные нейросети не работают с информацией так, как это делают простые ИИ модели. Они способны сами строить алгоритмы, что, конечно, имеет свои результаты в более широком масштабе автоматизировать интеллектуальную деятельность. Нейросеть сможет самообучаться на действующих алгоритмах. Используя идеи оптимизации и распараллеливания, применяемые в алгоритмах декодирования, предложена разработанная нейронная сеть на основе архитектуры CNN (сверточной нейронной сети) для автоматической оценки качества полупроводниковых пластин по их фотографиям

**Ключевые слова:** CNN, оптимизация, нейронная сеть, алгоритм автоматизации, полупроводниковая пластина

### Введение

В мире, стремящемся к миниатюризации и ускорению, полупроводниковая индустрия играет ключевую роль. Миниатюрные чипы, созданные на полупроводниковых пластинах, питают смартфоны, компьютеры, автомобили и бесчисленное множество других устройств, определяя темп развития современного общества. Спрос на более быстрые, мощные и энергоэффективные чипы растет с каждым днем, вынуждая производителей искать инновационные решения для повышения производительности и снижения затрат.

В этой гонке за совершенством контроль качества играет первостепенную роль. Даже мельчайшие дефекты на полупроводниковых пластинах, невидимые невооруженным глазом, могут привести к отказам чипов, снижению производительности и значительным финансовым потерям. Традиционные методы контроля качества, основанные на оптической микроскопии и ручном анализе, становятся все менее эффективными, особенно с учетом растущей сложности и миниатюризации чипов.

Здесь на помощь приходят нейронные сети – мощный инструмент искусственного интеллекта (ИИ), способный к обучению и совершенствованию. Обладая способностью анализировать огромные объемы данных и выявлять сложные закономерности, нейросети демонстрируют впечатляющие результаты в обнаружении дефектов на полупроводниковых пластинах, превосходя традиционные методы по скорости, точности и эффективности. Сверточные нейронные сети – это тип глубоких нейронных сетей, специально разработанных для анализа изображений. Они обладают способностью «видеть» и извлекать сложные пространственные закономерности из данных, что делает их идеальным инструментом для анализа изображений полупроводниковых пластин.

Обучение CNN для оценки качества пластин будет происходить на наборе данных, состоящем из фотографий пластин, каждая из которых предварительно классифицирована экспертами на предмет наличия дефектов. В процессе обучения CNN «учится» распознавать на изображениях характерные признаки, указывающие на различные типы дефектов, и сопоставлять их с категориями качества.

Как и в случае с оптимизацией алгоритмов декодирования, ключевыми моментами в разработке CNN для оценки качества пластин

являются распараллеливание вычислений и оптимизация параметров сети.

Распараллеливание, использующее многоядерные процессоры или графические ускорители, позволяет значительно ускорить процесс обучения CNN, ведь обработка огромного количества изображений, необходимых для достижения высокой точности, требует значительных вычислительных ресурсов.

Оптимизация параметров CNN, таких как количество слоев, типы слоев, функции активации и скорость обучения, играет критически важную роль в достижении максимальной точности прогнозирования. В этом контексте нелинейные методы оптимизации, упомянутые в статье в контексте алгоритмов декодирования, могут быть адаптированы для поиска оптимальных параметров CNN.

### Стандартные технологии оценки качества полупроводниковых пластин, их достоинства и недостатки

Полупроводниковые пластины, или вафли, являются основой для производства множества электронных устройств, включая микропроцессоры и светодиоды. Качество этих пластин имеет критическое значение для надежности и производительности конечной продукции. Поэтому разработаны различные технологии оценки качества полупроводниковых пластин, каждая из которых имеет свои достоинства и недостатки. В этой статье мы рассмотрим основные методики и их особенности.

#### 1. Визуальный осмотр

Достоинства:

- простота и низкая стоимость: визуальный осмотр не требует сложного оборудования;
- быстрота: позволяет быстро выявить явные дефекты на поверхности пластины.

Недостатки:

- ограниченная точность: не все дефекты могут быть обнаружены визуально;
- субъективность: результаты могут зависеть от квалификации оператора.

На рис. 1. приведен образец неисправной полупроводниковой пластины под микроскопом.

#### 2. Оптическая микроскопия

Достоинства:

- высокая разрешающая способность: позволяет увидеть мелкие дефекты и неоднородности;
- возможность анализа структуры: обеспечивает детальный анализ структуры и морфологии поверхности.

Недостатки:

- ограниченная глубина анализа: не позволяет оценить внутренние дефекты;
- зависимость от подготовки образца: качество подготовки пластины влияет на результаты.

#### 3. Электронная микроскопия

Достоинства:

- высокая разрешающая способность: может выявлять дефекты на атомарном уровне;
- многофункциональность: возможен анализ как поверхности, так и внутренних структур.

Недостатки:

- высокая стоимость: требует дорогого оборудования и квалифицированного персонала;
- долгое время анализа: подготовка образцов и сам процесс могут занимать много времени.

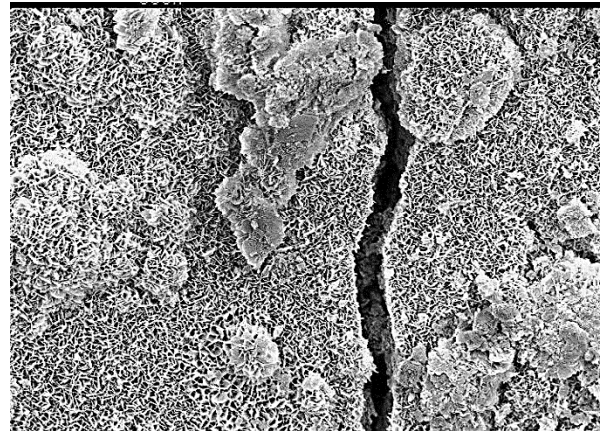


Рис. 1. Дефект полупроводниковой пластины *трещина* в основании под микроскопом

#### 4. Рентгеновская дифракция

Достоинства:

- позволяет получать информацию о кристаллической структуре и ориентации;
- может использоваться для определения внутренних напряжений и дефектов.

Недостатки:

- сложность в интерпретации данных: требует высокой квалификации для анализа результатов;
- ограниченная доступность оборудования: не во всех лабораториях есть необходимое оборудование.

5. EDXS (Energy Dispersive X-ray Spectroscopy — Метод энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии)

Достоинства:

- позволяет выполнять элементный анализ материалов;



— может быть использован совместно с электронной микроскопией для дополнительной информации.

Недостатки:

— ограниченная глубина анализа: в основном касается поверхностных слоев;  
— сложность получения точных количественных данных.

6. Тестирование на механическую прочность

Достоинства:

— позволяет оценить долговечность и надежность материала;  
— может выявить скрытые дефекты, влияющие на прочность.

Недостатки:

— не дает информации о других аспектах качества, таких как электрофизические свойства;  
— может требовать разрушения образца.

### Преимущества CNN для оценки качества полупроводниковых пластин

**Высокая точность:** CNN способны обучаться на больших наборах данных и выявлять даже незначительные дефекты, которые могут быть незаметны для человеческого глаза.

**Скорость и эффективность:** после обучения CNN может анализировать изображения пластин значительно быстрее человека, что существенно ускоряет процесс контроля качества. На рис. 2 приведен принцип работы CNN нейросети.

**Объективность:** в отличие от ручного анализа, оценка качества, выполняемая CNN,

свободна от субъективности и не зависит от опыта или усталости оператора.

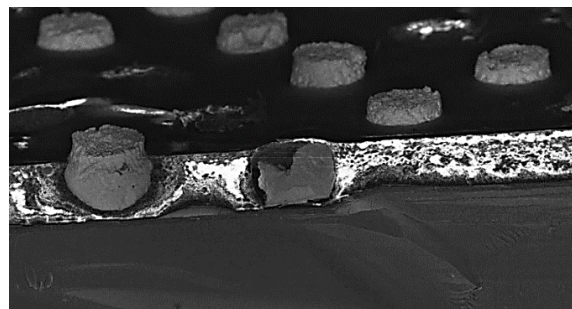


Рис. 2. Дефект полупроводниковой пластины – попадание частиц пыли на пластину во время химической травли и как итог неисправные элементы чипа

**Автоматизация труда:** основной причиной актуальности данного проекта является непосредственная автоматизация производства без участия человека в сложных операциях и протоколах. Для производства актуального количества выпускаемых полупроводников требуется большое количество обученного человеческого ресурса, к тому же человеческий фактор всегда присутствует и остается актуальным, в отличие от предложенной технологии решения проблемы. Данная технология позволяет очень точно и быстро определять дефекты и их природу, главное ПО является нейросетью, это гарантирует, что за каждой опосредованной ошибкой нейросети — она будет находить все более новые и новые способы самосовершенствования. Также основным фактором является дешевизна самой технологии. На рис. 3 приведены графики эксперимента работы нейросети.

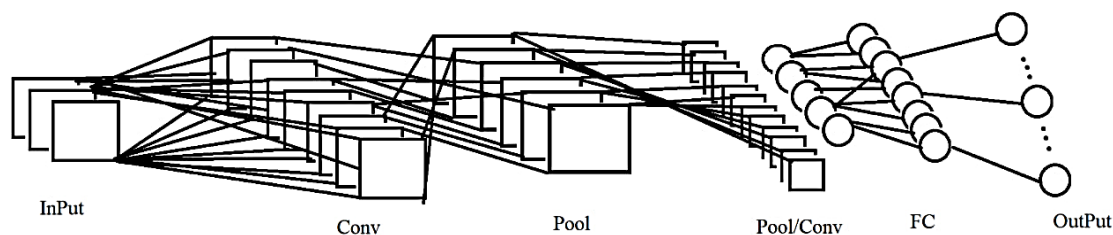


Рис. 3. Схематическое представление системы CNN нейросети

**Недостатки:** допустимых недостатков нет, данная технология является самым совершенным и универсальным методом решения проблем, которая позволяет добиться как высокой эффективности и работоспособности, так и не требовательной к человеческому ресурсу и к материальным средствам.

**Объективность:** в отличие от ручного анализа, оценка качества, выполняемая CNN,

свободна от субъективности и не зависит от опыта или усталости оператора.

### Алгоритм сверточной нейросети

Свёрточные нейронные сети (CNN) обрабатывают изображения как многомерные массивы чисел, применяя к ним математические операции для извлечения признаков и класси-



фикации. Вот основные математические принципы работы CNN:

### 1. Свёртка (Convolution):

Ядро свёртки (filter/kernel): маленькая матрица, содержащая веса (параметры, которые сеть настраивает в процессе обучения).

Операция свёртки: ядро скользит по входному изображению (или по выходу предыдущего слоя), поэлементно умножая свои значения на значения пикселей изображения и суммируя результаты. Эта операция вычисляет скалярное произведение ядра и части изображения, создавая карту признаков.

Шаг (stride): определяет, насколько ядро смещается на каждом шаге.

Дополнение нулями (padding): добавление нулей по краям изображения для сохранения размеров при свёртке.

Математически: выход одного элемента карты признаков  $\backslash (i, j) \backslash$  после свёртки:

$$\text{output}(i, j) = f\left(\sum_{m=1}^k \sum_{n=1}^l w_{(m,n)} \text{input}(i+m-1, j+n-1)\right)$$

$\backslash f \backslash$  - функция активации

$\backslash k, l \backslash$  - размеры ядра

$\backslash w_{(m,n)} \backslash$  - вес ядра в позиции  $(m, n)$

$\backslash \text{input}(i+m-1, j+n-1) \backslash$  - значение пикселя

на входе

$\backslash b \backslash$  - смещение (bias)

### 2. Функция активации (Activation function):

Применяется к выходу слоя свёртки для внесения нелинейности в модель, позволяя сети обучаться более сложным зависимостям.

Примеры: ReLU, sigmoid, tanh.

3. Пулинг (Pooling): уменьшает размер карты признаков, сохраняя при этом наиболее важную информацию. Типы пулинга: max pooling (выбирает максимальное значение в окне), average pooling (вычисляет среднее значение).

Размер окна: определяет размер области пулинга.

4. Полносвязный слой (Fully connected layer): используется после нескольких слоёв свёртки и пулинга для классификации.

Каждый нейрон в полносвязном слое соединён со всеми нейронами предыдущего слоя.

Использует функцию активации (softmax для многоклассовой классификации).

5. Обратное распространение ошибки (Backpropagation):

Алгоритм обучения, используемый для настройки весов сети.

Вычисляет градиенты функции потерь по отношению к весам сети. Веса корректируются в направлении, уменьшающем ошибку где  $\beta$  – константа, удовлетворяющая  $\beta > 0$ .

1. Изображение подаётся на вход CNN.

2. Слои свёртки извлекают признаки изображения, применяя операции свёртки.

3. Слои пулинга уменьшают размер карт признаков.

4. Полносвязные слои классифицируют изображение на основе извлечённых признаков.

5. Алгоритм обратного распространения ошибки используется для настройки весов сети во время обучения [1]. Вычисление одного элемента карты признаков:

$$\text{output}(i, j) = f\left(\sum_{m=1}^k \sum_{n=1}^l w_{(m,n)} \text{input}(i+m-1, j+n-1) + b\right)$$

Где:

$\backslash \text{output}(i, j) \backslash$ : Значение элемента карты признаков в позиции  $(i, j)$ .

$\backslash f \backslash$ : Функция активации (например, ReLU, sigmoid).

$\backslash k, l \backslash$ : Размеры ядра свёртки.

$\backslash w_{(m,n)} \backslash$ : Вес ядра в позиции  $(m, n)$ .

$\backslash \text{input}(i+m-1, j+n-1) \backslash$ : Значение входного изображения (или предыдущего слоя) в позиции  $(i+m-1, j+n-1)$ .

$\backslash b \backslash$ : Смещение (bias).

Кросс-корреляция (используется вместо свёртки в некоторых реализациях) [2]:

$$\text{output}(i, j) = \sum_{m=1}^k \sum_{n=1}^l w_{(m,n)} \text{input}(i+m-1, j+n-1) + b$$

Разница в том, что ядро не переворачивается перед операцией.

Функции активации:

ReLU (Rectified Linear Unit):

$$f(x) = \max(0, x)$$

Sigmoid:

$$f(x) = 1 / (1 + \exp(-x))$$

Tanh (Hyperbolic Tangent):

$$f(x) = (\exp(x) - \exp(-x)) / (\exp(x) + \exp(-x))$$

### 3. Пулинг 2 (Pooling2):

Max Pooling:

$$\text{output}(i, j) = \max(\text{input}(is:is+p, js:js+p))$$

Где:  $\backslash s \backslash$ : Шаг пулинга (stride).  $\backslash p \backslash$ : Размер окна пулинга.

Функции активации акт 2:

ReLU (Rectified Linear Unit):

$$f(x) = \max(0, x)$$

Sigmoid:

$$f(x) = 1 / (1 + \exp(-x))$$

Tanh (Hyperbolic Tangent):

$$f(x) = (\exp(x) - \exp(-x)) / (\exp(x) + \exp(-x))$$

Пулинг.

Max Pooling:

$$\text{output}(i, j) = \max(\text{input}(is:is+p, js:js+p))$$

Где:  $\backslash s \backslash$ : Шаг пулинга (stride).

$\backslash p \backslash$ : Размер окна пулинга.

Average Pooling:

$$\text{output}(i, j) = (1 / (p - p)) \sum_{m=1}^n \text{input}(m, n)$$

Полносвязный слой (Fully Connected Layer):

Вычисление выхода нейрона:

$$\text{output}_j = f(\sum_{i=1}^n w_{ij} \text{input}_i + b_j)$$

где:  $\text{output}_j$ : Выход нейрона  $j$ .

$f$ : Функция активации.

$n$ : Количество нейронов в предыдущем слое.

$w_{ij}$ : Вес связи между нейроном  $i$  предыдущего слоя и нейроном  $j$  текущего слоя.

$\text{input}_i$ : Выход нейрона  $i$  предыдущего слоя.

$b_j$ : Смещение (bias) нейрона  $j$ .

Обновление весов:

$$w_{ij} = w_{ij} - \alpha (\partial L / \partial w_{ij})$$

где:  $\alpha$ : Скорость обучения (learning rate).

$\partial L / \partial w_{ij}$ : Градиент функции потерь ( $L$ ) по отношению к весу  $w_{ij}$ .

Average Pooling:

$$\text{output}(i, j) = (1 / (p - p)) \sum_{m=1}^n \text{input}(m, n)$$

Вычисление выхода нейрона:

$$\text{output}_j = f(\sum_{i=1}^n w_{ij} \text{input}_i + b_j)$$

где:  $\text{output}_j$ : Выход нейрона  $j$ .

$f$ : Функция активации.

$n$ : Количество нейронов в предыдущем слое.

$w_{ij}$ : Вес связи между нейроном  $i$  предыдущего слоя и нейроном  $j$  текущего слоя.

$\text{input}_i$ : Выход нейрона  $i$  предыдущего слоя.

$b_j$ : Смещение (bias) нейрона  $j$ .

Обратное распространение ошибки (Backpropagation):

Обновление весов:

Проблемы анализа изображений нейросетями и пути их решения

Анализ изображений нейросетями — это мощный инструмент с широким спектром применения, от распознавания лиц до медицинской диагностики. Однако, несмотря на впечатляющие результаты, эта технология все еще сталкивается с рядом проблем, которые ограничивают ее эффективность и надежность.

### Актуальные проблемы разработанной нейросети и их решение

#### 1. Недостаток данных:

Проблема: для эффективного обучения нейросети требуются огромные объемы размеченных данных. Сбор, обработка и аннотиро-

вание таких данных — трудоемкий и дорогостоящий процесс.

Решения:

— трансферное обучение: использование предобученных на больших датасетах моделей и их дообучение на меньшем количестве целевых данных;

— аугментация данных: искусственное увеличение объема данных путем применения различных преобразований к существующим изображениям (поворот, масштабирование, изменение яркости и т.д.);

— синтетические данные: генерация искусственных изображений с помощью алгоритмов компьютерной графики.

#### 2. Переобучение:

Проблема: нейросеть «запоминает» тренировочные данные и плохо обобщает на новых, не виденных ранее примерах.

Решения:

— регуляризация: введение штрафов за сложность модели, что предотвращает переобучение;

— выброс (dropout): случайное отключение нейронов во время обучения, что заставляет модель обучаться более общим закономерностям;

— кросс-валидация: разделение данных на несколько частей и использование их для последовательного обучения и оценки модели.

#### 3. Смещение данных:

Проблема: нейросеть перенимает предубеждения, присутствующие в обучающих данных, что приводит к неточным или несправедливым результатам. Например, модель, обученная на изображениях преимущественно светлокожих людей, может плохо распознавать лица людей с темной кожей.

Решения:

— балансировка данных: создание наборов данных с равномерным представлением различных классов и подгрупп;

— аудит данных: анализ и выявление потенциальных предубеждений в данных;

— разработка алгоритмов, устойчивых к смещению: исследования в области создания алгоритмов, которые менее подвержены влиянию смещения данных.

#### 4. Интерпретируемость:

Проблема: нейронные сети часто рассматриваются как «черные ящики», поскольку сложно понять, на основе каких признаков они принимают решения.

Решения:

— визуализация признаков: использование методов визуализации для отображения

областей изображения, которые наиболее важны для принятия решения моделью;

— методы, основанные на внимании (attention-based methods): разработка моделей, которые фокусируются на определенных частях изображения при принятии решений;

— объяснимое ИИ (Explainable AI, XAI): разработка методов и алгоритмов, которые делают решения нейронных сетей более прозрачными и понятными для человека.

#### 5. Устойчивость к шуму и искажениям:

Проблема: небольшие изменения в изображении (шум, сжатие, изменение освещения) могут привести к значительным ошибкам в работе нейросети.

Решения:

— аугментация данных с использованием искажений: включение в тренировочные данные изображений с различными типами искажений;

— разработка алгоритмов, устойчивых к искажениям: исследования в области создания алгоритмов, которые менее чувствительны к шуму и искажениям в данных.

### Моделирование

На рис. 4 приведены графики эксперимента работы нейросети.

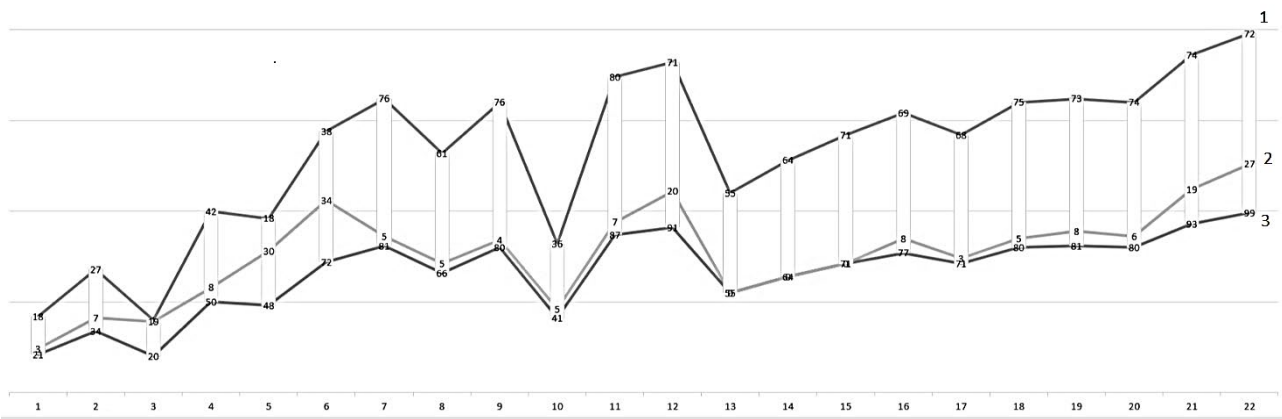


Рис. 4. График работы двух систем ИИ

На графике рис. 4 ломанная 1 – представленная CNN модель, ломанная 3 – ИИ, использующийся для прототипных оценок, ломанная 2 – разница между положительными результатами экспериментов нейросети и обычного ИИ. Вертикальная цифро-шкала – проценты угаданных исправных или не исправных фото с полупроводниками, по горизонтали – номера опытов, каждый опыт проводится по 1000 раз с разными полупроводниками и дефектами, каждый последующий опыт сложнее предыдущего. Разница между положительными данными между двумя моделями достигает более 50 %, такой результат был получен благодаря природе самообучаемости нейросети.

### Заключение

Предложенная модель реализации автоматизации проверки качества изделия на базе CNN нейросети является актуально-технологичным методом современности. В

проведенном эксперименте были получены положительные результаты опытов, которые во многом обгоняют модели ИИ. Общий результат получил превосходящую оценку более 50 % относительно положительных результатов другой ИИ модели, такая успешная модель была получена в результате совершенствования самообучения нейросети. В статье были изложены актуальные трудности, и способы их решения, с которыми может столкнуться реализация технологии на крупном производстве.

### Литература

1. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024684516 Российская Федерация. Программа контроля дефектов полупроводниковых пластин в фотолитографии при технологии изготовления 350 нм с использованием CNN нейросети: № 2024683496: заявл. 10.10.2024; опубл. 17.10.2024 / О.Н. Чирков, М.Н. Тамбовцев; заявитель ФГБОУ «Воронежский государственный технический университет».
2. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024666477 Российская Федерация. Программа контроля дефектов полупроводниковых пластин с использованием компьютерного зрения и алго-

ритмов глубокого машинного обучения : № 2024665362 :  
заявл. 04.07.2024 : опубл. 15.07.2024 / О.Н. Чирков,

А.А. Пирогов, М.Н. Тамбовцев ; заявитель ФГБОУ «Воронежский государственный технический университет».

Поступила 24.12.2024; принята к публикации 17.02.2025

#### Информация об авторах

**Чирков Олег Николаевич** – старший преподаватель, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: chir\_oleg@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2250-2100>  
**Антиликаторов Александр Борисович** – доцент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: antilikatorov62@mail.ru  
**Шкаровский Константин Михайлович** – студент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: s.kostya1403@gmail.com  
**Тамбовцев Максим Николаевич** – студент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: kibr@vorstu.ru

## OPTIMIZATION OF SEMICONDUCTOR WAFER QUALITY ASSESSMENT USING CNN NEUROTECHNOLOGIES

O.N. Chirkov, A.B. Antilikatorov, K.M. Shkarovsky, M.N. Tambovtsev

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

**Abstract:** the article shows one of the few modern methods for automating the assessment of the quality of semiconductor plates using neural networks, or rather the introduction of neurotechnologies into semiconductor manufacturing of modern methods for finding defects on semiconductor plates. Modern semiconductor manufacturing is one of the most important industries, and therefore it requires highly accurate and effective quality control methods. One of the key elements of this process is the assessment of the quality of semiconductor wafers - thin disks on which microchips are formed. Traditional quality assessment methods based on manual analysis or simple image processing algorithms no longer meet the growing demands for production speed and accuracy. It is proposed to use artificial intelligence technologies, in particular, deep neural networks capable of learning from large amounts of data and identifying complex dependencies that are inaccessible to traditional algorithms due to excessive amounts of information and, as a result, traditional algorithm methods simply cannot give an accurate assessment. Modern neural networks do not work with information the way simple AI models do. They are able to build algorithms themselves, which of course has its results in a broader way to automate intellectual activity. The neural network will be able to self-study on existing algorithms. Using the ideas of optimization and parallelization used in decoding algorithms, a developed neural network based on the CNN architecture (convolutional neural network) is proposed for automatic assessment of the quality of semiconductor wafers from their photographs

**Keywords:** CNN, optimization, neural network, automation algorithm, semiconductor wafer

#### References

1. Certificate of state registration of the computer program No. 2024684516 Russian Federation. The program for the control of defects in semiconductor wafers in photolithography with 350 nm manufacturing technology using CNN neural networks: No. 2024683496: application 10.10.2024: publ. 17.10.2024 / O. N. Chirkov, M. N. Tambovtsev; applicant Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Voronezh State Technical University".
2. Certificate of state registration of the computer program No. 2024666477 Russian Federation. Semiconductor wafer defect control program using computer vision and deep machine learning algorithms : No. 2024665362 : application 04.07.2024 : publ. 15.07.2024 / O. N. Chirkov, A. A. Pirogov, M. N. Tambovtsev ; applicant Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Voronezh State Technical University".

Submitted 24.12.2024; revised 17.02.2025

#### Information about the authors

**Oleg N. Chirkov** – Senior Lecturer, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: chir\_oleg@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2250-2100>  
**Alexander B. Antilikatorov** – Associate Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: antilikatorov62@mail.ru  
**Konstantin M. Shkarovsky** – Student, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: s.kostya1403@gmail.com  
**Maxim N. Tambovtsev** – Student, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: kibr@vorstu.ru

## МЕТОДИКА УПРАВЛЕНИЯ ПАРАМЕТРАМИ ДИАГРАММЫ НАПРАВЛЕННОСТИ ЛИНЕЙНОЙ ФАЗИРОВАННОЙ АНТЕННОЙ РЕШЁТКИ

Е.Н. Буйлов<sup>1</sup>, А.С. Солонар<sup>1</sup>, Ю.Н. Егоров<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ОАО «КБ Радар» – управляющая компания холдинга «Системы радиолокации», г. Минск,  
Республика Беларусь

<sup>2</sup>Военная академия Республики Беларусь, г. Минск, Республика Беларусь

**Аннотация:** цель исследования – разработка методики управления параметрами диаграммы направленности линейной эквидистантной фазированной антенной решетки за счет изменения фазового распределения. Рассмотрены вопросы аналитического расчёта диаграммы направленности эквидистантной линейной фазированной антенной решетки. Предложен способ синтеза фазового распределения на основе математической модели, сочетающей общую теорию систем излучателей и алгоритмы численной оптимизации. Данный подход позволяет для антенной решетки заданной конструкции сформировать диаграмму направленности с главным лепестком специальной формы. Предложен критерий синтеза фазового распределения (минимум квадрата суммарной ошибки), на основании которого получена целевая функция. Разработана методика управления параметрами диаграммы направленности линейной эквидистантной антенной решетки. Представлены результаты сопоставительного анализа расчёта диаграммы направленности антенной решетки при использовании линейного и синтезированного фазовых распределений

**Ключевые слова:** линейная эквидистантная фазированная антенная решётка, синтезированное фазовое распределение, управление параметрами диаграммы направленности, метод роя частиц

### Введение

На сегодняшний день при совершенствовании существующих и разработке новых фазированных антенных решёток (АР) широко используются специализированные программные комплексы (например, CST, FEKO, MMANA и др.). Высокая степень достоверности полученных с их помощью результатов не вызывает сомнений у специалистов и многократно подтверждена различными практическими испытаниями.

Помимо типовых случаев проектирования на практике часто возникают задачи, когда для АР с заданной конструкцией необходимо получить диаграмму направленности (ДН) с главным лепестком (ГЛ) специальной (например, секторной) формы и с требуемым уровнем бокового излучения [1-3]. При этом в качестве инструмента достижения этой цели может использоваться только фазовое распределение (ФР) в излучающей системе, а амплитудное распределение должно быть равномерным для достижения максимальной излучаемой мощности. Применение в таких случаях специализированных программных комплексов характеризуется существенными трудностями, связанными в первую очередь с их ограниченным функционалом в части, касающейся решения задач синтеза амплитудно-фазового распределения.

Для эффективного решения задач синтеза ФР на основе общей теории систем излучателей [1, 2] с учетом перечисленных выше требований целесообразно использовать программы математического моделирования, наиболее известными из которых являются MatLab, Mathematica, MathCad. Благодаря широкому спектру встроенных функций и оптимальным алгоритмам их реализации [4] рассматриваемая задача синтеза ФР по заданной форме и параметрам ДН равномерно возбужденной линейной АР может решаться за счет использования алгоритмов численной оптимизации, обеспечивающих поиск глобального экстремума. К указанным методам относятся: метод роя частиц, Ньютона, наискорейшего спуска, сопряженных направлений и др.) [5, 6].

Постановка оптимизационной задачи подразумевает выбор оцениваемого параметра, критерия его оптимальности и составление целевой функции, определяющей взаимосвязь между оцениваемым параметром и целевыми показателями, в роли которых выступают форма и параметры ДН. Решение задачи оптимизации сводится к нахождению экстремума целевой функции [5, 6, 7].

Цель исследований авторов статьи заключается в разработке методики управления параметрами диаграммы направленности (ДН) линейной эквидистантной фазированной АР за счет изменения ФР. В качестве целевых пара-



метров выступают ширина ГЛ, уровень его провала, а также максимальный уровень бокового излучения. Для построения математической модели ДН АР и реализации оптимизационной задачи управления её параметрами используется программа MatLab, а в качестве оптимизационной функции – метод роя частиц.

Данная статья включает в себя несколько разделов, посвящённых описанию математической модели ДН АР, выбору критерия оптимальности, составлению целевой функции, разработке методики управления параметрами ДН, оценке результатов моделирования.

### Математическая модель диаграммы направленности линейной эквидистантной антенной решётки

Типовая антенная решётка представляет собой систему одинаково направленных излучателей, расположенных друг от друга на расстоянии  $d$ , обычно меньшем рабочей длины волны  $\lambda$ . В качестве излучателей решётки в основном используются слабонаправленные антенны: вибраторные, щелевые, волноводные, рупорные, антенны бегущей волны, патч-антенны и т.д. Как правило, все излучатели решетки имеют одинаковое конструктивное исполнение и расположены на одинаковых расстояниях друг от друга (эквидистантно) [1, 2, 8, 9].

Диаграмму направленности линейной эквидистантной фазированной АР, состоящей из  $N$  одинаково направленных излучающих элементов (ИЭ), возбуждаемых сигналами одинаковой амплитуды и фазы и разнесённых на одинаковое расстояние  $d$  друг от друга, можно представить как произведение множителя АР  $f_c(\theta)$  на ДН ее элемента  $f_1(\theta)$  [1, 2, 10, 11]:

$$f(\theta) = f_1(\theta)f_c(\theta) = f_1(\theta)\left|\sum_{n=1}^N \exp(j(n-1)kd \sin \theta)\right|, \quad (1)$$

где  $k = 2\pi/\lambda$  – волновое число;

$\theta$  – угловая координата, отсчитываемая от нормали к оси антенной решетки.

Для удобства анализа и изображения ДН представляется в нормированном виде:

$$F(\theta) = \frac{f(\theta)}{f_{\max}} = F_1(\theta)F_c(\theta), \quad (2)$$

где  $f_{\max}$  – максимальное значение ДН  $f(\theta)$ ;

$F_1(\theta)$  – нормированная ДН излучающего элемента АР;

$F_c(\theta)$  – нормированный множитель АР.

В случае слабой направленности ИЭ их можно примерно считать изотропными, т.е.  $F_1(\theta) \approx 1$ . В результате выражение (2) с учетом равенства (1) преобразуется к виду:

$$F(\theta) \approx \frac{1}{f_{\max}} \left| \sum_{n=1}^N \exp(j(n-1)kd \sin \theta) \right|. \quad (3)$$

Отклонение ГЛ ДН АР на угол  $\theta_m$  от нормали можно обеспечить путем дискретного линейного изменения фазы сигнала от элемента к элементу так, чтобы разность фаз между соседними излучателями составляла  $kd \sin \theta_m$ . Тогда выражение для расчёта ДН сканирующей линейной эквидистантной АР принимает вид:

$$F(\theta) \approx \frac{1}{f_{\max}} \left| \sum_{n=1}^N \exp(j(n-1)kd(\sin \theta - \sin \theta_m)) \right|. \quad (4)$$

Выражения (1)–(4) соответствуют линейному масштабу представления ДН (масштабу по полю). Переход к квадратичному масштабу (по мощности) выполняется по формуле

$$F_p(\theta) = F^2(\theta) \approx \frac{1}{f_{\max}^2(\theta)} \left| \sum_{n=1}^N \exp(j(n-1)kd(\sin \theta - \sin \theta_m)) \right|^2. \quad (5)$$

Диаграмма направленности решётки изотропных излучателей имеет только один ГЛ, если выполняется условие [1, 9]:

$$\frac{d}{\lambda} < \frac{1}{1 + |\sin \theta_m|}.$$

В предельном случае, согласно данному неравенству, пики дифракционных лепестков наблюдаются при  $90^\circ$ , когда сканирование происходит до угла  $\theta_m$  [1, 9].

### Критерий синтеза фазового распределения по раскрытию апертуры антенной решетки

В большинстве случаев целью выбора параметров ДН АР является минимизация потерь коэффициента усиления антенны и потенциала локатора с одновременным обеспечением минимальной изрезанности, требуемой ширины ГЛ и уровня БЛ. Очевидно, что формирование соответствующих амплитудно-фазовых распределений и тем более полное отключение активных элементов (для уменьшения апертуры) приведёт к потере не только коэффициента усиления, но и потенциала. Поэтому для достижения поставленной цели в качестве приоритетного выбран подход, заключающийся в поиске подходящего ФР в равномерно возбуж-

дённой излучающей системе. В общем случае алгоритм решения такой задачи может быть построен только на основе оптимизационных методов.

Для решения оптимизационных задач хорошо себя проявил метод роя частиц (Particle Swarm Optimization) [3, 12–15], который нашел широкое применение в алгоритмах машинного обучения (в частности, для обучения нейросетей и распознавания изображений), параметрической и структурной оптимизации (форм, размеров и топологий) и в настоящее время реализован в виде встроенной функции пакета математического моделирования MatLab (функция – particleswarm()) [4]. Суть метода состоит в итеративном поиске оптимального результата начиная с набора (популяции) возможных вариантов, называемых в данном контексте роем частиц, в котором все частицы знают глобальное и индивидуально наилучшее положение. На каждой итерации скорость и положение частиц в рое, представленные многомерными векторами, корректируются на основе индивидуальных и коллективных знаний о повторяющихся направлениях полёта над пространством возможных решений, пока не будет удовлетворён подходящий критерий остановки.

Преимущество метода в сравнении с другими состоит в низкой алгоритмической сложности и простоте реализации, поскольку не требуется знание точного градиента (вектора, указывающего направление наискорейшего роста скалярной величины) оптимизируемой функции, что делает его более предпочтительным для решения задачи синтеза ФР.

В ходе изучения особенностей применения метода роя частиц в задаче оптимизации ДН АР за счёт управления ФР в равномерно возбуждённой излучающей системе установлено, что любое полученное решение приводит к изрезанности ГЛ и росту уровня БЛ [11, 16, 17]. С учётом этого обстоятельства алгоритм синтеза ФР дополнен критериями ограничений по следующим параметрам ДН (рис. 1): ширине ( $2\theta_{0.5}$ ) и максимальному провалу ГЛ ( $F_{пр\_max}$ ), максимальному уровню БЛ ( $F_{бл}$ ).

В качестве критерия синтезирования фазового распределения  $\varphi_{син}$  выбран минимум квадрата суммарной ошибки  $\Delta_{\Sigma}(\varphi_{син})$  (метод наименьших квадратов [18]) между эталонной ( $F_{эт}(\theta)$ ) и синтезированной ( $F_{син}(\theta_i, \varphi_{син})$ ) ДН АР (рис. 1), алгоритм которой имеет следующий вид:

$$\Delta_{\Sigma}(\varphi_{син}) = \underbrace{\sum_{i=s_1}^{s_2} (|F_{эт}(\theta_i) - F_{син}(\theta_i, \varphi_{син})|^2)}_{\text{Область ГЛ}} + \underbrace{k_{бл} \left( \sum_{i=0}^{s_1-1} (|F_{син}(\theta_i, \varphi_{син}) - F_{бл}|^2) \right)}_{\text{Область БЛ}} + \underbrace{\sum_{i=s_2+1}^{s_{end}} (|F_{син}(\theta_i, \varphi_{син}) - F_{бл}|^2)}_{\text{Область БЛ}} \Bigg|_{F_{син}(\theta_i, \varphi_{син}) > F_{бл}} \quad (6)$$

где нормированная синтезированная ДН  $F_{син}(\theta_i, \varphi_{син})$  описывается выражением:

$$F_{син}(\theta_i, \varphi_{син}) = \frac{1}{f_{син\_max}} \left| \sum_{n=1}^N \exp(j((n-1)kd \sin \theta + \varphi_{син\ n})) \right|; \quad (7)$$

$f_{син\_max}$  – максимальное значение функции

$$\left| \sum_{n=1}^N \exp(j((n-1)kd \sin \theta + \varphi_{син\ n})) \right|;$$

$s_{1(2)} = \text{ceil}(\theta_i / \Delta\theta_h)$  – левая (правая) граница ГЛ соответственно (номер  $i$ -го отсчёта угловой координаты);

$\text{ceil}(\cdot)$  – функция округления к большему целому значению;

$\Delta\theta_h$  – шаг изменения угловой координаты;

$s_{end}$  – количество отсчётов угловой координаты;

$k_{бл}$  – коэффициент, учитывающий величину превышения требуемого уровня БЛ (по умолчанию  $k_{бл} = 60$ ).

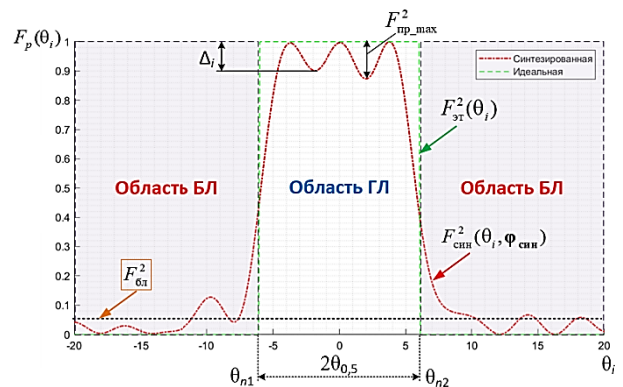


Рис. 1. К пояснению критерия синтеза ФР

Эталонная ДН представляет собой функцию, у которой уровень БЛ  $F_{бл} = 0$ , а ГЛ имеет вид сектора единичной окружности шириной  $2\theta_{0.5}$ . (изрезанность отсутствует, максимальный провал  $F_{пр\_max} = 0$ ). Тогда, с учётом выше сказанного, алгоритм оценки ФР по критерию

минимума квадрата суммарной ошибки примет вид:

$$\hat{\varphi}_{\text{син}} = \arg \left[ \min_{F_{\text{син}}(\theta, \varphi_{\text{син}})} (\Delta_{\Sigma}(\varphi_{\text{син}})) \right]. \quad (8)$$

Таким образом, выражения (6)–(8) представляют алгоритм оценки ФР, позволяющий синтезировать ДН АР с требуемыми характеристиками (шириной, изрезанностью и максимальным провалом ГЛ, уровнем БЛ) при условии равномерного возбуждения АР.

### Методика управления параметрами диаграммы направленности антенной решётки

В соответствии с предложенным критерием синтеза ФР разработана методика управления параметрами ДН АР, блок-схема которой представлена на рис. 2. Рассмотрим особенности реализации пунктов методики управления параметрами ДН при фиксированной структуре линейной эквидистантной АР за счет изменения ее ФР.

#### 1. Ввод параметров АР.

Для расчёта ДН эквидистантной линейной фазированной АР необходимо ввести следующие параметры (выражение (3)):

- длину волны  $\lambda$ ;
- количество излучающих элементов  $N$ ;
- расстояние между излучающими элементами  $d$ ;
- угловое положение ГЛ  $\theta_m$ .

#### 2. Установка параметров синтезируемой ДН.

На данном этапе вводятся требуемые характеристики синтезируемой ДН:

- максимальный провал ГЛ  $F_{\text{пр\_max}}$  (от «0» до «1»);
- ширина ГЛ  $2\theta_{0,5}$ ;
- уровень БЛ  $F_{\text{бл}}$  (от «0» до «1»).

Дальнейшие пункты методики (п. 3–8) предполагают решение оптимизационной задачи, основанной на поиске такого ФР по апертуре АР, при котором обеспечивается минимум квадрата суммарной ошибки формы  $\Delta_{\Sigma}(\varphi_{\text{син}})$  между синтезированной и эталонной ДН.

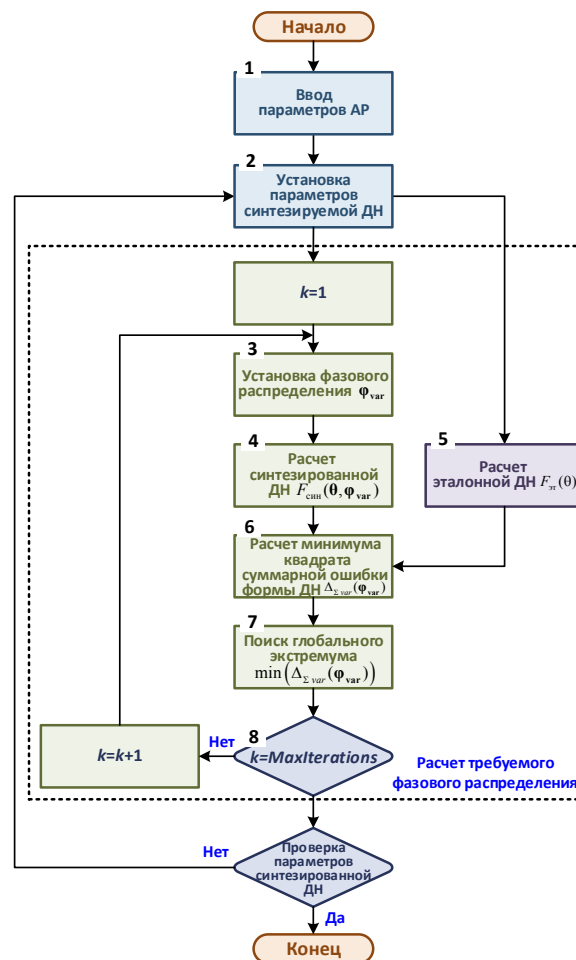


Рис. 2. Блок-схема управления параметрами ДН АР

#### 3. Установка фазового распределения.

В качестве оптимизационной функции поиска оптимального ФР используется метод роя частиц, реализованный в пакете математического моделирования MatLab в виде функции *particleswarm()*.

Для правильной работы алгоритма роя частиц необходимо задать целевую функцию (выражение (8)) и область ее определения (диапазон изменения ФР):  $\varphi_{\min} = -\pi$ ,  $\varphi_{\max} = \pi$ . Количество переменных  $n_{\text{vars}}$  определяется числом ИЭ  $N$  линейной АР. Как правило, число частиц в рое должно быть не менее, чем  $\text{SwarmSize} \geq 10N$ . По умолчанию, максимальное количество итераций функции *particleswarm()* составляет  $\text{MaxIterations} = 200N$ .

Каждая частица представляет собой  $n_{\text{vars}}$ -мерный вектор и характеризуется собственным ФР. На каждой итерации в пространстве параметров задачи оптимизации они имеют некоторое положение и вектор скорости. Для каждого положения частицы вычисляется

соответствующее значение целевой функции (выражение (8)), зависящей от ФР  $\varphi_{var}$  (рис. 2). На этой основе по определенным правилам (учёт информации о наилучшей частице из числа «соседей», информации о данной частице на той итерации, когда её положение соответствовало наилучшему значению целевой функции и др.) частица меняет своё положение и скорость в пространстве поиска, что в конечном итоге и определяет искомое фазовое распределение  $\varphi_{син}$ .

#### 4. Расчёт синтезированной ДН.

В соответствии с выражением (7) и введенных в п. 2 методики требуемых параметров осуществляется расчёт синтезированной ДН АР  $F_{син}$ .

#### 5. Расчёт эталонной ДН.

Эталонная ДН в области ГЛ (соответствует требуемой ширине  $2\theta_{0,5}$ , рис. 1) имеет вид сектора единичной окружности и рассчитывается в соответствии с выражением:

$$F_{эт}(\theta_i) = \begin{cases} 1, & \text{если } \theta_{s_1} \leq \theta_i \leq \theta_{s_2}; \\ 0, & \text{если } \theta_i < \theta_{s_1} \vee \theta_{s_2} < \theta_i, \end{cases} \quad (9)$$

где  $\theta_{s_1}$ ,  $\theta_{s_2}$  – дискретные угловые координаты границ ГЛ.

#### 6. Расчёт минимума квадрата суммарной ошибки формы ДН.

В данном пункте методики в соответствии с выражением (6) оценивается минимум квадрата суммарной ошибки  $\Delta_{\Sigma var}(\varphi_{var})$  синтезированной ДН АР  $F_{син}(\theta, \varphi_{син})$  относительно эталонной  $F_{эт}(\theta)$  (рис. 2).

#### 7. Поиск глобального экстремума (минимума) оптимизационной функции.

Оценка ФР  $\hat{\varphi}_{син}$  основывается на решении оптимизационной задачи поиска глобального экстремума (минимума) целевой функции  $\min(\Delta_{\Sigma var}(\varphi_{var}))$  в соответствии с алгоритмом (8).

#### 8. Проверка параметров синтезированной ДН.

На данном этапе оцениваются характеристики синтезированной ДН АР  $F_{син}(\theta, \varphi_{син})$ : максимальный провал  $F_{пр\_max}$  и ширина  $2\theta_{0,5}$  ГЛ, уровень БЛ  $F_{бл}$ . В том случае, если какой-либо из параметров не соответствует предъявляемым требованиям, то процесс поиска ФР

повторяется (п. 3–8). При этом необходимо изменить требуемые параметры синтезируемой ДН (п. 2 методики). В ином случае расчёт заканчивается.

### Результаты исследований и их обсуждение

В соответствии с разработанной методикой управления параметрами ДН выполнен синтез ФР и расчёт ДН линейной эквидистантной АР. Количество излучающих элементов  $N = 32$ , а период АР  $d/\lambda = 0,6$ . Требуемые параметры синтезируемой ДН: максимальный провал ГЛ (-1,6 дБ), ширина ГЛ  $2\theta_{0,5} = 11^\circ$ , уровень БЛ  $F_{бл}^2 = 0,05$  (-13 дБ), амплитудное распределение равномерное.

В табл. 1 представлен результат синтеза ФР по раскрытию АР (в соответствии с представленной в предыдущем разделе методики), обеспечивающего формирование ДН с требуемыми параметрами для углового положения ГЛ  $\theta_m = 0^\circ$ . Расчеты выполнялись с помощью пакета математического моделирования MatLab.

Таблица 1  
Синтезированное ФР по раскрытию АР

Положение ГЛ	Фазовое распределение по раскрытию АР, град
$\theta_m = 0^\circ$	260,3; -206,6; -71,9; -6,6; -108,1; -30,1; -96,6; -4,5; 4,0; 5,3; 52,7; 48,0; 33,1; 55,3; 47,9; 62,6; 49,4; 42,8; 56,3; 19,3; 44,6; -47,6; 52,8; -51,1; -88,4; -19,6; -114,5; -40,0; -92,3; -149,2; 45,0; -180,0

На рис. 3 представлены законы изменения фазы на раскрытии апертуры АР, полученные классическим способом (линейное ФР, кривая 1 ( $\theta_m = 5^\circ$ ) и кривая 2 ( $\theta_m = -5^\circ$ )) и с использованием разработанной методики (синтезированное ФР, кривая 3).

На рис. 4 представлены ДН фазированной АР, рассчитанные при использовании линейного (рис. 4, кривая 1  $\theta_m = \pm 5^\circ$ ) и синтезированного ФР (рис. 4, кривая 2 при отсутствии и кривая 3 при наличии амплитудно-фазовых ошибок), а в табл. 1 – их основные характеристики (ширина, максимальный провал и средний уровень ГЛ, максимальный и средний уровень БЛ).





Рис. 3. Закон изменения ФР на раскрытии апертуры АР:  
1 – линейное ( $\theta_m = 5^\circ$ ); 2 – линейное ( $\theta_m = -5^\circ$ ); 3 – синтезированное ФР

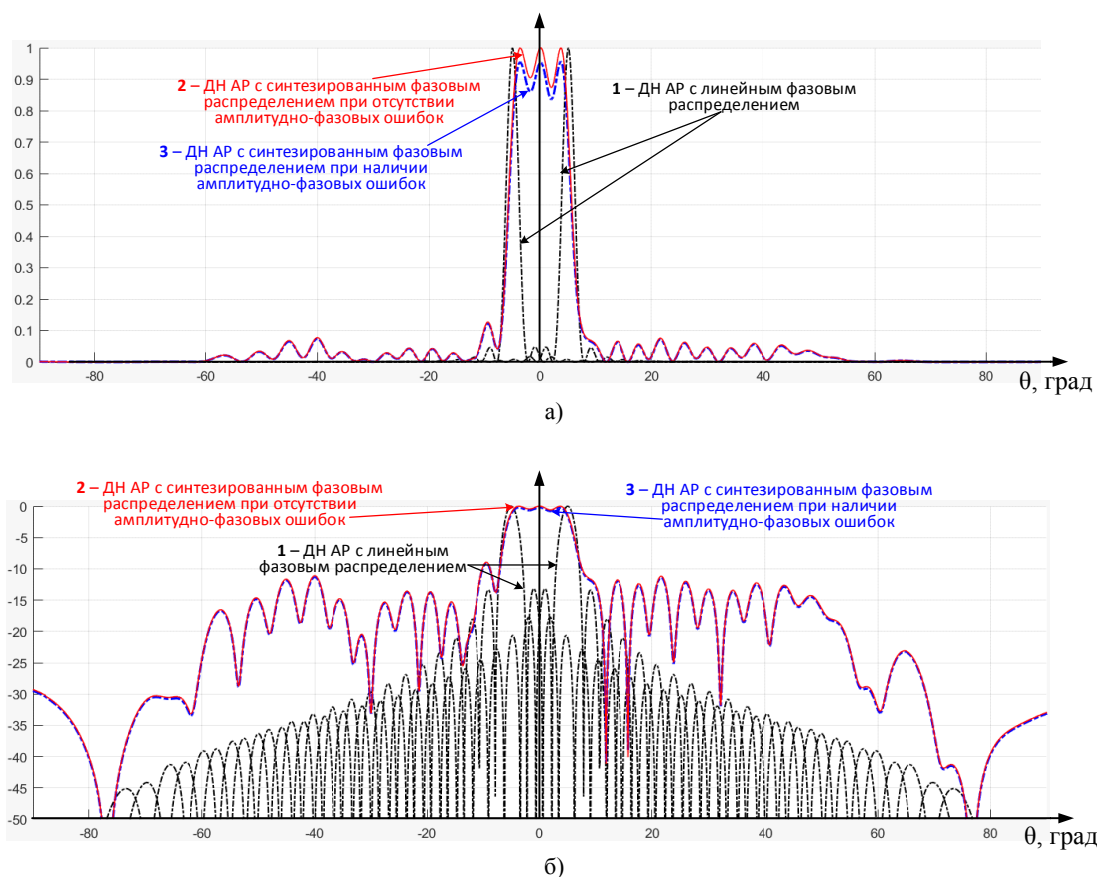


Рис. 4. ДН линейной АР: 1 – с линейным ФР; 2 – с синтезированным ФР при отсутствии амплитудно-фазовых ошибок; 3 – с синтезированным ФР при наличии амплитудно-фазовых ошибок: а – по мощности; б – в логарифмическом масштабе

При оценке результатов решения задачи синтеза полагалось, что значения амплитуд и фаз сигналов на входах излучателей АР нестабильны и подвержены случайным ошибкам, что характерно для реальных условий аппаратной реализации модулей фазированной АР. Влияние случайных искажений требуемого ам-

плитудно-фазового распределения на ДН АР получено при следующих условиях:

средние квадратические отклонения относительных амплитуд и фаз возбуждения излучателей составляют  $\sigma_a = 0,1$  и  $\sigma_\phi = 25^\circ$  соответственно [2];



статистическая оценка получена по результатам проведения  $N_{\text{эк}} = 512$  опытов, соответствующих доверительной вероятности

0,9 и погрешности измерений не более 10 % [19].

Таблица 2

Характеристики ДН АР

Наименование параметра	ДН АР с линейным ФР	ДН АР с синтезированным ФР при отсутствии амплитудно-фазовых ошибок	ДН АР с синтезированным ФР при наличии амплитудно-фазовых ошибок	Величина изменения параметра, %
Ширина ГЛ, град	2,4	11,30	11,13	1,5
Максимальный провал ГЛ	—	0,87 (-0,59 дБ)	0,82 (-0,87 дБ)	6,3
Максимальный уровень БЛ	0,05 (-13,3 дБ)	0,13 (-8,94 дБ)	0,12 (-9,07 дБ)	2,9

Анализ полученных результатов (рис. 4 и табл. 2) показал, что рассчитанная ДН АР (выражение (7)), в основном, соответствует заданным требованиям. Так, при отсутствии амплитудно-фазовых ошибок ширина ГЛ составляет  $2\theta_{0,5} = 11,3^\circ$  (требуемая не меньше  $2\theta_{0,5} = 11,0^\circ$ ), максимальный провал ГЛ  $F_{\text{пр\_max}}^2 = 0,87$  (-0,59 дБ) (требуемый не ниже  $F_{\text{пр\_max}}^2 \geq 0,7$  (-1,6 дБ). Небольшие отклонения наблюдаются для первых БЛ ДН, максимальный уровень которых составляет  $F_{\text{бл}}^2 = 0,13$  (-8,94 дБ) (требуемый не выше  $F_{\text{бл}}^2 = 0,05$  (-13 дБ). При этом в целом уровень БЛ синтезированной ДН значительно выше уровня БЛ ДН с линейным ФР.

Случайные искажения амплитудно-фазового распределения ДН АР приводят к незначительному изменению характеристик синтезированной ДН АР (табл. 2). Так, например, ши-

рина ГЛ уменьшилась на 1,5 %, максимальный провал ГЛ увеличился на 6,3 %, а максимальный уровень БЛ уменьшился на 2,9 %.

Кроме того, следует помнить, что расширение ГЛ ДН АР приводит к уменьшению коэффициента направленного действия АР в 4,75 раза (6,8 дБ), что будет влиять, например, на уменьшение дальности обнаружения радиолокационной станции.

Проверка эффективности (адекватность результатов, полученных при математическом моделировании) использования разработанной методики управления параметрами ДН АР осуществлялась с помощью САПР. В качестве излучающего элемента использовалась патч-антенна. На рис. 5 представлен результат моделирования ДН линейной эквидистантной АР с синтезированным ФР (табл. 2, рис. 3) и ее множитель.

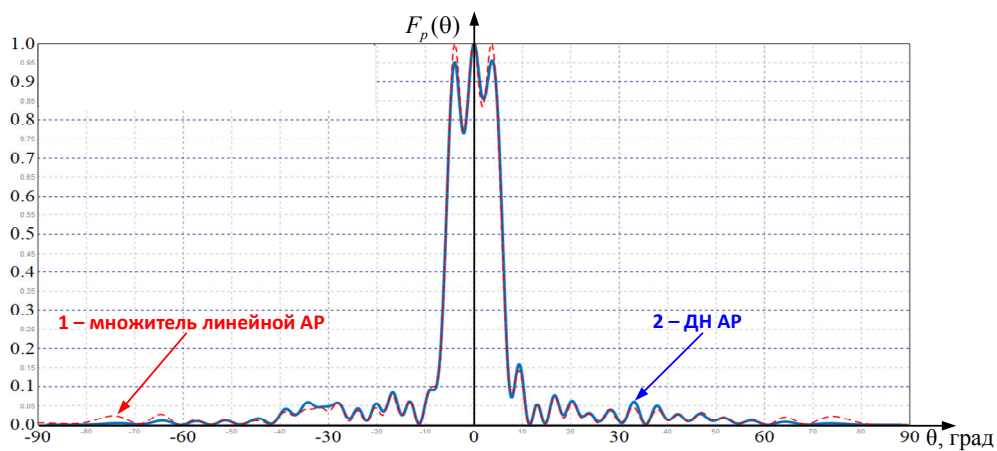


Рис. 5. ДН АР по мощности: 1 – множитель линейной АР; 2 – ДН АР с синтезированным ФР

Полученные результаты (рис. 4 и рис. 5) подтвердили высокую степень сходства аналитического расчета и численного моделирования. Ширина ГЛ составляет  $2\theta_{0,5} = 11,1^\circ$  (расчитанная  $2\theta_{0,5} = 11,3^\circ$ ), максимальный провал ГЛ  $F_{пр\_max}^2 = 0,78$  (-1,1 дБ) (расчитанный  $F_{пр\_max}^2 = 0,87$  (-0,59 дБ), максимальный уровень первого БЛ  $F_{бл}^2 = 0,15$  (-8,2 дБ) (расчитанный  $F_{бл}^2 = 0,13$  (-8,94 дБ). Полученные расхождения вызваны тем, что предложенная методика расчёта ДН не учитывает взаимного влияния ИЭ.

### Заключение

Разработана методика управления параметрами ДН АР за счёт изменения ФР. В основе методики лежит аналитическая модель линейной дискретной системы излучателей, реализованная в программе математического моделирования MatLab. Такой подход позволяет решить задачу синтеза ФР в равномерно возбуждённой линейной эквидистантной фазированной АР за счет использования оптимизационной функции (метод роя частиц), обеспечивающей поиск глобального экстремума. В качестве критерия синтеза ФР заложен минимум квадрата суммарной ошибки между эталонной и расчитанной ДН АР.

Проведён анализ влияния случайных искажений требуемого амплитудно-фазового распределения на ДН АР при условиях, что средние квадратические отклонения относительных амплитуд и фаз возбуждения излучателей составляют  $\sigma_a = 0,1$  и  $\sigma_\phi = 25^\circ$  соответственно. Результаты моделирования показали, что наличие искажений приводит к изменению характеристик синтезированной ДН АР на 1,5...6,3 %. Такие незначительные изменения параметров ДН, полученной на основе синтезированного ФР, свидетельствуют о её устойчивости к случайным искажениям амплитудно-фазового распределения.

Разработанная методика управления параметрами ДН линейной эквидистантной АР обеспечивает:

- высокую скорость решения задач как синтеза, так и анализа;
- гибкость представления результатов;
- высокую степень соответствия формы и параметров ДН исходным данным, что подтверждается не только решением задачи анализа на основе общей теории систем излучателей, но и результатами моделирования в САПР.

Помимо управления параметрами ДН АР, разработанная математическая модель в программе MatLab на основе общей теории систем излучателей позволяет оценить влияние амплитудно-фазовых ошибок и выхода из строя излучающих элементов АР на форму и параметры ее ДН, что, например, вызывает существенные трудности при решении данных задач в САПР.

### Литература

1. Активные фазированные антенные решетки / Под ред. Д.И. Воскресенского и А.И. Канащенкова. М.: Радиотехника, 2004. 488 с.
2. Устройства СВЧ и антенны. Проектирование фазированных антенных решёток / Под ред. Д.И. Воскресенского. 3-е изд., доп. и перераб. М.: Радиотехника, 2003. 632 с.
3. Формирование секторной диаграммы направленности и анализ статистических характеристик волноводной антенной решётки / Е.В. Овчинникова [и др.] // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. 2021. Т. 185. № 6. С. 25-37.
4. Brown A.D. Electronically Scanned Arrays MATLAB® Modeling and Simulation. CRC Press: Boca Raton, 2012. 229 p.
5. Hager W.W., Zhang H. A new conjugate gradient method with guaranteed descent and an efficient line search // SIAM Journal on Optimization. 2005. Vol. 16. P. 170-192.
6. Nocedal J., Wright S.J. Numerical Optimization. Second Edition. Springer, 2006. 663 p.
7. Оськин А.Ф. Алгоритм и программа численной оптимизации, реализующие метод роя частиц // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия С. 2022. № 4. С. 26-31.
8. Справочник по радиолокации. Под ред. М. Скольника. Нью-Йорк, 1970, Пер. с англ. Под общей ред. К.Н. Трофимова. Том 2. Радиолокационные антенные устройства. Под. ред. П.И. Дудника. М.: Сов. радио, 1977, 408 с.
9. Справочник по радиолокации / М.И. Скольник [и др.] ; пер. с англ. под ред. В.С. Вербы. М. : Техносфера, 2014. Кн. 1. 672 с.
10. Моделирование линейной антенной решётки для спутниковой связи современных телекоммуникационных систем / С.А. Антипов [и др.] // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2020. Т. 16. № 4. С. 64-69.
11. Анализ диаграммы направленности плоской многоэлементной активной фазированной антенной решетки / В.И. Тепликова [и др.] // Труды МАИ. 2022. № 125. С. 1-121.
12. Poli R. An analysis of publications on particle swarm optimisation applications // Technical Report CSM-469. Department of Computer Science, University of Essex, UK. 2007. P. 57.
13. Poli R. Analysis of the Publications on the Applications of Particle Swarm Optimisation // J. of Artificial Evolution and Applications. 2008. P. 1-10.
14. Казакова Е.М. Применение метода роя частиц в задачах оптимизации // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2022. № 5 (109). С. 48-57.
15. Asma A., Sadok B. PSO-based dynamic distributed algorithm for automatic task clustering in a robotic swarm // Procedia Computer Science. 2019. Vol. 159. P. 1103-1112.

16. Метод синтеза линейной виртуальной антенной решётки / Л.В. Винник [и др.] // Журнал радиоэлектроники. 2020. № 1. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/jan20/2/text.pdf>. (дата обращения: 10.01.2025).

17. Андропов А.В., Кузьмин С.В. Методика синтеза диаграмм направленности антенных решёток с произвольным расположением излучающих элементов // Труды учебных заведений связи. 2022. Т. 8. № 2. С. 15-28.

18. Сергиенко А.Б. Цифровая обработка сигналов: учеб. пособие. 3-е изд. СПб.: БХВ-Петербург, 2011. 768 с.

19. Косачев И.М., Нефедов Д.С. Методики расчёта показателей достоверности и точности оцениваемых тактико-технических характеристик вооружения, военной и специальной техники // Вестник ВА РБ. 2015. № 1. С. 107-134.

Поступила 20.01.2025; принята к публикации 18.02.2025

#### Информация об авторах

**Буйлов Евгений Николаевич** – канд. техн. наук, доцент, старший научный сотрудник, ОАО «КБ Радар» – управляющая компания холдинга «Системы радиолокации» (220026, Республика Беларусь, г. Минск, пр-т Партизанский, 64а), e-mail: [lerka.by@mail.ru](mailto:lerka.by@mail.ru), ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-7088-9403>

**Солонар Андрей Сергеевич** – канд. техн. наук, доцент, ведущий научный сотрудник, ОАО «КБ Радар» – управляющая компания холдинга «Системы радиолокации» (220026, Республика Беларусь, г. Минск, пр-т Партизанский, 64а), e-mail: [andssnew@yandex.ru](mailto:andssnew@yandex.ru), ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-7769-3980>

**Егоров Юрий Николаевич** – канд. техн. наук, доцент, начальник кафедры радиотехники и электроники, Военная академия Республики Беларусь (220057, Республика Беларусь, г. Минск, пр-т Независимости, 220), e-mail: [egorov\\_yury@mail.ru](mailto:egorov_yury@mail.ru), ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-4703-074X>

## METHODOLOGY FOR CONTROLLING THE PARAMETERS OF THE DIRECTIONAL DIAGRAM OF A LINEAR PHASED ANTENNA ARRAY

E.N. Builov<sup>1</sup>, A.S. Solonar<sup>1</sup>, Yu.N. Egorov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Managing Company of «Radar Systems» Holding, Minsk, Republic of Belarus

<sup>2</sup>Military Academy of the Republic of Belarus, Minsk, Republic of Belarus

**Abstract:** the purpose of the study is to develop a technique for controlling the parameters of the radiation pattern (DP) of a linear equidistant phased antenna array by changing the phase shift. The issues of analytical calculation of the radiation pattern of an equidistant linear phased antenna array are considered. A method for synthesizing the phase distribution based on a mathematical model combining the general theory of radiator systems and numerical optimization algorithms is proposed. This approach allows one to form a radiation pattern with a specially shaped main lobe for an antenna array of a given design. A criterion for synthesizing the phase distribution (minimum squared total error) is proposed, based on which the target function is obtained. A technique for controlling the parameters of the radiation pattern of a linear equidistant antenna array has been developed. The results of a comparative analysis of calculating the radiation pattern of an antenna array using linear and synthesized phase distributions are presented

**Key words:** linear equidistant phased antenna array, synthesized phase distribution, control of radiation pattern parameters, particle swarm method

#### References

1. "Active phased antenna arrays", ed. by D.I. Voskresensky and A.I. Kanashchenkov, Moscow, Radio Engineering, 2004, 488 p.
2. "Microwave devices and antennas. Design of phased antenna arrays", ed. by D.I. Voskresensky. 3rd ed., supplemented and revised. Moscow, Radio Engineering, 2003, 632 p.
3. Ovchinnikova E.V. "Formation of a sector radiation pattern and analysis of statistical characteristics of a waveguide antenna array", *Issues of Electromechanics. Proceedings of VNIIEM*, 2021, vol. 185, no. 6, pp. 25-37.
4. Brown A.D. "Electronically Scanned Arrays MATLAB® Modeling and Simulation", CRC Press: Boca Raton, 2012, 229 p.
5. Hager W.W., Zhang H. "A new conjugate gradient method with guaranteed descent and an efficient line search", *SIAM Journal on Optimization*, 2005, vol. 16, pp. 170-192.
6. Nocedal J., Wright S.J. "Numerical Optimization. Second Edition", Springer, 2006, 663 p.
7. Oskin A.F. "An algorithm and program for numerical optimization implementing the particle swarm method", *The Bulletin of Polotsk State University. Series S*, 2022, no. 4, pp. 26-31.
8. "Handbook of radar", ed. by M. Skolnik, New York, 1970, trans. from Eng., Chief editor K.N. Trofimova, vol. 2. R"adar antenna devices", ed. by P.I. Dudnik, Moscow, 1977, 408 p.
9. Skolnik M.I. et al. "Handbook of radar", trans. from Eng., ed. by V.S. Verba, Moscow, 2014, Book 1, 672 p.
10. Antipov S.A. et al. "Modeling of a linear antenna array for satellite communications of modern telecommunication systems", *The Bulletin of Voronezh State Technical University*, 2020, vol. 16, no. 4, pp. 64-69.

11. Teplikova V.I. et al. "Analysis of the radiation pattern of a flat multi-element active phased antenna array", *Proceedings of MAI*, 2022, no. 125, pp. 1-121.
12. Poli R. "An analysis of publications on particle swarm optimisation applications", *Technical Report CSM-469*, Department of Computer Science, University of Essex, UK, 2007. p. 57.
13. Poli R. Analysis of the Publications on the Applications of Particle Swarm Optimisation // *J. of Artificial Evolution and Applications*. 2008. P. 1-10.
14. Kazakova E.M. "Application of the particle swarm method in optimization problems", *The Bulletin of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*, 2022, no. 5(109), pp. 48-57.
15. Asma A., Sadok B. "PSO-based dynamic distributed algorithm for automatic task clustering in a robotic swarm", *Procedia Computer Science*, 2019, vol. 159, pp. 1103-1112.
16. Vinnik L.V. et al. "Method for Synthesizing a Linear Virtual Antenna Array", *Journal of Radio Electronics*, 2020, no. 1, available at: <http://jre.cplire.ru/jre/jan20/2/text.pdf>. (Date of access 10.01.2025).
17. Andropov A.V., Kuzmin S.V. "Methodology for Synthesizing Directional Patterns of Antenna Arrays with Arbitrary Arrangement of Radiating Elements", *Proceedings of Educational Institutions of Communications*, 2022, vol. 8., no. 2., pp. 15-28.
18. Sergienko A.B. "Digital Signal Processing: textbook", 3rd ed., St. Petersburg, BHV-Petersburg, 2011, 768 p.
19. Kosachev I.M., Nefedov D.S. "Methods for calculating the reliability and accuracy indicators of the assessed tactical and technical characteristics of weapons, military and special equipment", *The Bulletin of the Military Academy of the Republic of Belarus*, 2015, no. 1, pp. 107-134.

Submitted 20.01.2025; revised 18.02.2025

#### Information about the authors

**Evgeny N. Builov** – Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Senior Researcher at OJSC «KB Radar» – Management Company of the Holding Company «Radar Systems» (64a Partizansky Prosp., Minsk 220026, The Republic of Belarus), e-mail: [lerka.by@mail.ru](mailto:lerka.by@mail.ru), ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-7088-9403>

**Andrey S. Solonar** – Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Leading Researcher at OJSC «KB Radar» – Management Company of the Holding Company «Radar Systems» (64a Partizansky Prosp., Minsk 220026, The Republic of Belarus), e-mail: [andssnew@yandex.ru](mailto:andssnew@yandex.ru), ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-7769-3980>

**Yury N. Egorov** – Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Head of the Department of Radio Engineering and Electronics, Military Academy of the Republic of Belarus (220 Prosp. Nezavisimosti, Minsk 220057, The Republic of Belarus), e-mail: [egorov\\_yury@mail.ru](mailto:egorov_yury@mail.ru), ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-4703-074X>

**ВЛИЯНИЕ КОМПОНОВКИ И МАТЕРИАЛОВ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И ОПТИМИЗАЦИЮ ПАРАМЕТРОВ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ****И.С. Бобылкин, О.Н. Чирков, А.А. Кузёмкин****Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия**

**Аннотация:** рассмотрены проблемы, затрагивающие главный функциональный узел любого импульсного источника питания – планарный трансформатор. Показана зависимость расположения сердечников относительно друг друга в пространстве от электрических и магнитных свойств силового трансформатора. Продемонстрирован процесс передачи энергии в магнитопроводе при нулевом и ненулевом немагнитном зазоре сердечника. Выявлены отличия в количественных показателях таких физических величин, как индуктивность намагничивания, индуктивность рассеяния, магнитная проницаемость, коэффициент связи между обмотками. Определены уязвимые места при проектировании модулей электропитания с планарным трансформатором, а также рассмотрены основные причины образования дефектов в конструкции. Проведена оценка потерь при нарушении конструкции планарного трансформатора с помощью современных систем автоматизированного проектирования. В полном объеме проведены эксперименты по выявлению наиболее оптимального компаунда для применения в производстве. Составлена методика по определению свойств и состава «идеального» компаунда для фиксации сердечников трансформатора и для заливки модулей электропитания. Результаты, полученные путем моделирования системы или расчетов, носят только теоретический характер, поэтому полноценную работоспособность данного метода необходимо проверять на опытных образцах. Особенно это актуально для серийного производства, чтобы процент ошибки был минимален

**Ключевые слова:** планарный трансформатор, зазор, сердечник, оптимальный компаунд, оценка потерь, магнитопровод

**Введение**

Конструкция планарных трансформаторов, несмотря на большое количество преимуществ перед традиционныммоточным исполнением, имеет ряд нерешенных проблем. Одна из таких проблем — формирование немагнитного зазора в магнитопроводе, образованном соединенными между собой сердечниками. Немагнитный зазор в конструкции магнитопровода приводит к изменению электрических и магнитных характеристик трансформатора в целом [1]. Таким образом, контролируя величину немагнитного зазора, инженер имеет возможность спрогнозировать поведение изделия при эксплуатации. Соответственно, наиболее благоприятный результат исследования заключается в определении критериев оптимального адгезива, способствующего с минимальными, после полимеризации, потерями получить плотный контакт сердечников друг с другом.

Планарные трансформаторы также имеют некоторые ограничения, рассмотрим их подробнее.

Занимаемая площадь на печатной плате. Обмотки печатной платы расположены в горизонтальном направлении, а части сердечника направлены вертикально, что частично способствует увеличению занимаемой площади.

Низкий коэффициент заполнения медью — это причина конструктивных отличий традиционного тороидального трансформатора от планарного. Это исключает возможность применения одного типоразмера сердечников под несколько конфигураций многослойных печатных плат [2].

Ограниченное количество витков для намотки печатной платы — дает низкий коэффициент заполнения медью. Кроме того, увеличение количества витков требует дополнительного количества слоев.

Рассмотрим конструкцию традиционного планарного трансформатора, представленную на рис. 1. В качестве магнитопровода трансформатора используются два низкопрофильных ферритовых сердечника [3].

Печатная плата состоит из нескольких слоев, на которых располагаются первичная и вторичная обмотки. Количество этих слоев может ограничиваться производственно-технологическими возможностями производителя печатных плат или электрическими и магнитными параметрами разрабатываемого трансформатора.

Для изоляции слоев друг от друга применяются специальные диэлектрические материалы. Как правило, это полиимидные пленки, обладающие высокой прочностью изоляции, широким диапазоном рабочей температуры. Оба сердечника зафиксированы друг с другом с помощью клея [4].



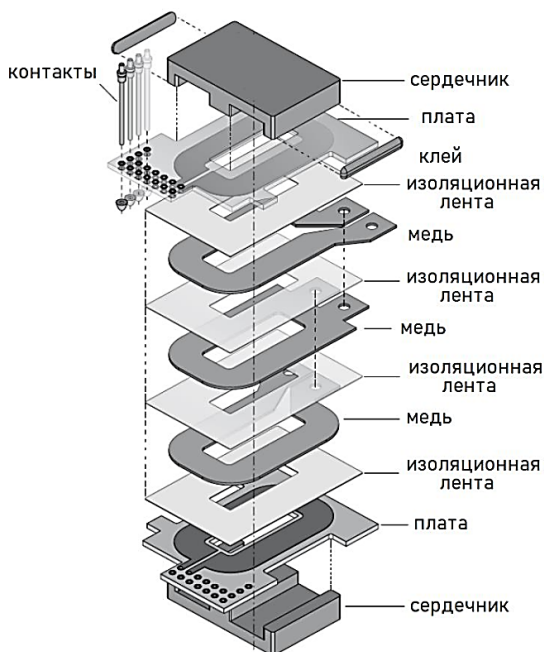


Рис. 1. Структура планарного трансформатора

Исходя из анализа конструкции планарного трансформатора [1-4], можно сделать несколько выводов. Наиболее уязвимое место в конструкции трансформатора — это образование немагнитного зазора между двумя сердечниками в процессе его сборки. Это, в первую очередь, определяет качество модуля электропитания, так как трансформатор относится к главному функциональному элементу всей системы [5].

Таким образом, выделены основные задачи, решаемые в ходе исследования:

1. Провести эксперимент по сборке планарного трансформатора с применением разных видов компаундов. Выполнить сравнительный анализ результатов. Определить критерии к используемому компаунду для фиксации сердечников друг с другом.

2. Провести эксперимент по заливке планарного трансформатора с применением разных видов компаундов. Выполнить сравнительный анализ результатов. Определить критерии к используемому компаунду для заливки модулей электропитания.

### Компенсация потерь немагнитного зазора

Проведем подборку материалов немагнитного зазора в конструкции планарного трансформатора с целью исключить влияние величины зазора на магнитные и электрические характеристики системы. Таким образом, при определении параметров материала, от-

крывается возможность применять модифицированный компаунд с нужным количеством специальных компонентов. Также открывается возможность составить приблизительные теоретические расчеты, где четко прослеживается зависимость физических величин от других параметров системы [6].

Примем магнитную проницаемость сердечника - 1000, установим зазор величиной 0,2 мм. Выполним моделирование в программной среде ANSYS Maxwell 3D [7-8] (рис. 2-3).

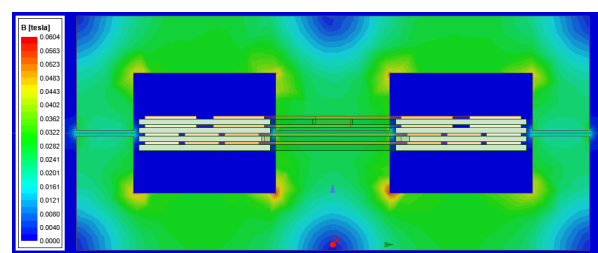


Рис. 2. Плотность магнитной индукции при зазоре 0,2 мм (вид сбоку)

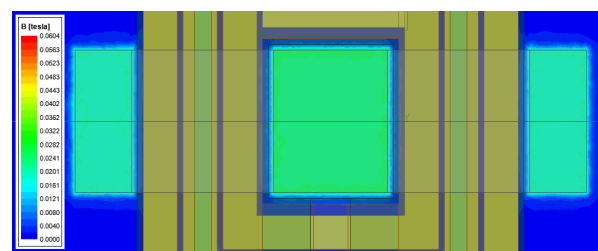


Рис. 3. Плотность магнитной индукции при зазоре 0,2 мм (вид сверху)

Результаты моделирования отражены в табл. 1.

Таблица 1

#### Результаты моделирования

Модель	L1, мкГн	L2, мкГн	K	В, Тл
Эталон	18,1	40,7	0,99795	0,9735
Зазор 0,2 мм	1,3	3	0,97273	0,0604

Для оценки влияния зазоров сердечника на характеристики трансформатора введем идентичный материал, но с меньшей магнитной проницаемостью, в соотношении [5]:

$$\mu_m = \frac{\mu_c}{2}, \quad (1)$$

где  $\mu_m$  — магнитная проницаемость зазора,

$\mu_c$  — магнитная проницаемость материала сердечника.

Определим, приблизительные пропорции состава компаунда с ферромагнитным порошком [5]. Магнитная проницаемость феррита, из которого выполнен сердечник,  $\mu_c = 1000$ , а зазора  $\mu_m = 500$ . Для магнитной проницаемости зазора в 1000 максимальная величина маг-

нитной индукции составляла 0,9735 Тл, в то время как для  $\mu_m = 500$ ,  $B_{max} = 0,8041$  Тл. Потери составляют 18 % при полном заполненном объеме компаунда, что совсем не подходит для решения проблемы. При этом напряженность магнитного поля изменяется в таком же соотношении.

### Моделирование

Выполним подобный эксперимент в САПР FEMM [9-10]. Для более точных результатов построим простую модель планарного трансформатора в двухмерном пространстве. Характеристики трансформатора представлены в табл. 2.

Таблица 2

Технические характеристики планарного трансформатора

Технические параметры	Величина
Количество слоев печатной платы	4 слоя
Базовая толщина медного слоя	105 мкм
Количество обмоток	2 обмотки
Количество витков первичной обмотки	2 витка
Количество витков вторичной обмотки	6 витков
Сердечники	2 шт. (без зазора)

Выбран материал сердечников из доступных в библиотеке — 1006 Steel. Это углеродистая сталь, которая содержит около 0,4 % кремния и 1,2 % марганца. Хром, никель, алюминий, медь и молибден также присутствуют в небольших количествах.

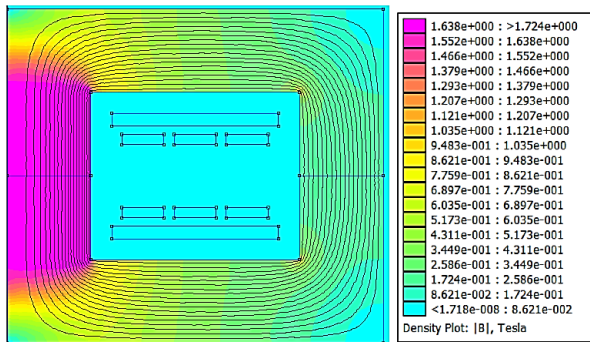


Рис. 4. Плотность магнитной проницаемости (без зазора)

Рассмотрим результаты при идеальных условиях (рис. 4). Максимальная величина магнитной проницаемости составляет  $B_{max1} = 1,638$  Тл. Индуктивность первичной обмотки составляет  $L_{11} = 89,6$  мкГн, индуктивность вторичной обмотки составляет  $L_{12} = 269,5$  мкГн.

Введем в конструкцию небольшой зазор. Например, 0,3 мм. Результаты представлены на рис. 5.

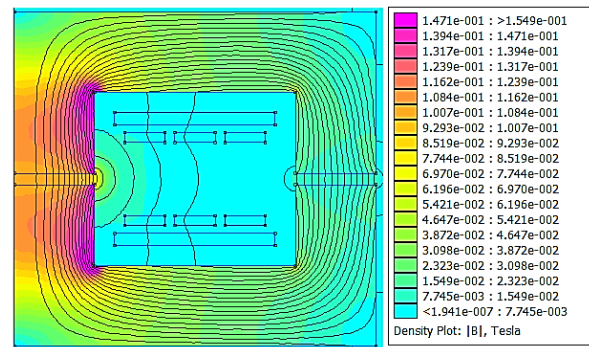


Рис. 5. Плотность магнитной проницаемости, зазор 0,3 мм

Вычислим потери при такой величине зазора: максимальная величина магнитной проницаемости составляет  $B_{max2} = 0,471$  Тл, индуктивность первичной обмотки  $L_{21} = 7,3$  мкГн, индуктивность вторичной обмотки составляет  $L_{22} = 22,4$  мкГн. Таким образом, значения величин уменьшились практически в 11 раз.

Исходя из литературного источника [11], у нас есть возможность «нивелировать» негативные потери, образованные немагнитным зазором с помощью компаунда, заполненного частицами с хорошими магнитными свойствами.

Подберем материал исходя из доступных в библиотеке программной среды FEMM.

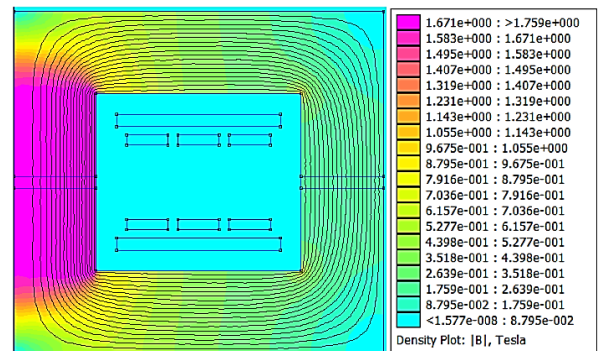


Рис. 6. Плотность магнитной проницаемости, зазор 0,3 мм заполнен компаундом с материалом 1117 Steel (коэффициент заполнения  $D = 100$  %)

Линейная магнитная проницаемость материала Steel 1006 составляет примерно  $\mu_1 \approx 1404$ , а для 1117 Steel — около  $\mu_2 \approx 1777$ . С помощью программы FEMM можно редактировать характеристики материалов в библиотеке. Для создания немагнитного зазора вводится компаунд со свойствами материала 1117 Steel и максимальной магнитной проницаемостью приблизительно  $\mu_2 \approx 1777$ . Коэффициент заполнения компаунда по объему составляет 100 % (рис. 6).

Как результат, некоторые величины увеличились: максимальное значение магнитной

проницаемости теперь составляет  $B_{max3} = 1,671$  Тл, индуктивность первичной обмотки -  $L_{31} = 89,5$  мкГн, а индуктивность вторичной обмотки -  $L_{32} = 269,1$  мкГн.

Теперь будем уменьшать коэффициент заполнения магнитных частиц компаунда до тех пор, пока значения величин не достигнут начальных или  $B_{max1}$ ,  $L_{11}$ ,  $L_{12}$ .

Оценим результаты моделирования при максимальной магнитной проницаемости  $\mu_3 \approx 55$  (коэффициент заполнения будет составлять 3 % от максимальной величины 1777, рис. 7).

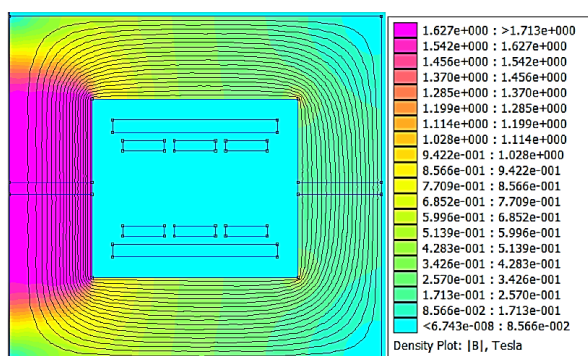


Рис. 7. Плотность магнитной проницаемости, зазор 0,3 мм заполнен компаундом с материалом 1117 Steel (коэффициент заполнения  $D = 3\%$ )

Из графика данного моделирования видно, что значения близки к исходным условиям, значит, описанная модель подборки компаунда работает.

Немагнитный зазор можно заполнить компаундом с частицами, обладающими определенными магнитными свойствами [11]. В данной работе были исследованы материалы 1006 Steel и 1117 Steel в качестве примера. Однако, описанная технология выбора материала для заполнения немагнитного зазора также применима и для других материалов.

### Заключение

Проведение моделирования и экспериментов в совокупности позволяет определить методику, необходимую для получения достоверных количественных и качественных результатов по составу и свойствам «идеального» компаунда для планарных трансформаторов. По результатам работы сделаны следующие выводы:

1. Требуется подобрать количественное соотношение порошка и компаунда. Для этого понадобится использовать дорогостоящие измерительные инструменты или устройства,

чтобы обеспечить достаточную точность для дальнейших манипуляций с компаундом.

2. Подборка компаунда — это дополнительная технологическая операция. Смешение компаунда требует специальной оснастки и изолированного от внешней среды помещения.

3. Результаты, полученные путем моделирования системы или расчетов, носят только теоретический характер, поэтому полноценную работоспособность данного метода необходимо проверять на опытных образцах. Особенно это актуально для серийного производства, чтобы процент ошибки был минимален.

4. Главное требование к компаунду с частицами — это равномерное распределение порошка феррита по всему объему.

### Литература

1. Проектирование трансформаторов и дросселей. Справочник. 3-е издание, пересм. и доп. / Перевод с англ. В.В. Попов. М.: ДМК Пресс, 2016. 476 с.
2. Семенов Б.Ю. Силовая электроника: от простого к сложному. М.: СОЛОН-Пресс, 2005. 416 с.
3. Ouyang Z. Advances in Planar and Integrated Magnetics. PhD thesis, October 2011. DTU Electrical Engineering Technical University of Denmark. 2011. 228 с.
4. 3F46 Material specification data sheet 2016 March 03. URL: <https://www.infinite-electronic.ru/datasheet/bf-EP17-3F46.pdf> (дата обращения: 25.06.2024).
5. Башкиров А.В., Бобылкин И.С., Кузёмкин А.А. Анализ образования дефектов в конструкции планарного трансформатора в модуле электропитания // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2023. Т. 19. № 6. С. 107-114.
6. Денисов О.Ю., Моисеенко А.А., Федоров С.М. Методика оптимизации топологии витков планарной обмотки // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2022. Т. 18. № 6. С. 87-92.
7. Применение программного комплекса Ansys Electronics для исследования электрических машин / М.А. Берлов [и др.] // Развитие современной науки и технологий в условиях трансформационных процессов: сб. материалов XVII Междунар. науч.-практ. конф., С-Пб.: Печатный цех, 2023. С. 85-89.
8. Пьянзин А.А., Захарин А.С., Золотухин Н.С. Исследование инструментов разработки приложений в САЕ - пакете ANSYS с помощью технологии ANSYS act // Инновационные технологии в науке нового времени: сб. ст. Междунар. науч.-практ. конф. Уфа: Общество с ограниченной ответственностью «Аэтерна», 2017. Т. 3. С. 95-98.
9. Буль О.Б. Книга о методах расчета магнитных систем и программе FEMM // Энергосбережение и водоподготовка. 2007. № 3(47). С. 78.
10. Пилотная оценка канала радиосвязи в MIMO-OFDM системах / О.Н. Чирков, М.А. Ромашенко, И.С. Бобылкин [и др.] // Труды международного симпозиума «Надежность и качество». 2019. Т. 2. С. 87-90.
11. Полимерные композиционные материалы, структура, свойства, технология: учебное пособие; под редакцией академика А.А. Берлина. 5-е издание. СПб.: Издательство «Профессия», 2019. 624 с.



Информация об авторах

**Бобылкин Игорь Сергеевич** – канд. техн. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: bobylikin@bk.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7489-2249>  
**Чирков Олег Николаевич** – старший преподаватель, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: chir\_oleg@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2250-2100>  
**Кузёмкин Андрей Александрович** – студент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: andreyhillsa@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2013-8862>

**INVESTIGATION OF THE EFFECT OF COMPOUNDS ON THE CHARACTERISTICS  
OF A PLANAR TRANSFORMER IN A POWER SUPPLY MODULE**

**I.S. Bobylkin, O.N. Chirkov, A.A. Kuzemkin**

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

**Abstract:** the problems considered in the work affect the main functional node of any pulsed power source. Using software tools, it was possible to detect the dependence of the location of the cores relative to each other in space on the electrical and magnetic properties of the power transformer. Differences in the quantitative indicators of such physical quantities as magnetization inductance, scattering inductance, magnetic permeability, and the coupling coefficient between the windings are revealed. The vulnerabilities in the design of power supply modules with a planar transformer are identified, and the main causes of defects in the structure are considered. An assessment of losses in case of structural failure of a planar transformer using modern computer-aided design systems has been carried out. Experiments have also been carried out in full to identify the most optimal compound for use in production. As a result of the study, a methodology has been developed to determine the properties and composition of the "ideal" compound for fixing transformer cores and for filling power supply modules. The results obtained by modeling the system or calculations are only theoretical in nature, therefore, the full performance of this method must be checked on prototypes. This is especially important for mass production, so that the percentage of error is minimal

**Key words:** planar transformer, gap, core, optimal compound, loss estimation, magneto-wire

**References**

1. "Design of transformers and chokes. Guide. 3rd edition, revised. and additional", trans. from Eng. by Popov V.V., Moscow, DMK Press, 2016, 476 p.
2. Semenov B.Y. "Power electronics: from simple to complex", Moscow, SOLON-Press, 2005, 416 p.
3. Ziwei Ouyang "Advances in Planar and Integrated Magnetics", PhD thesis, October 2011, DTU Electrical Engineering Technical University of Denmark, 2011, 228 p.
4. 3F46 Material specification data sheet 2016 March 03, available at: <https://www.infinite-electronic.ru/datasheet/bf-EP17-3F46.pdf> (date of access: 06.25.2024).
5. Bashkurov A.V., Bobylkin I.S., Kuzemkin A.A. "Analysis of the formation of defects in the design of a planar transformer in an electrical power module", *The Bulletin of Voronezh State Technical University*, 2023, vol. 19, no. 6, pp. 107-114.
6. Denisov O.Yu., Moiseenko A.A., Fedorov S.M. "Methodology for optimizing the topology of turns of planar winding", *The Bulletin of Voronezh State Technical University*, 2022, vol. 18, no. 6, pp. 87-92.
7. Berlov M.A., Karimov R.D., Gorbunov A.S., Bakirov A.A. "Application of the Ansys Electronics software package for the study of electric machines", *Development of modern science and technology in conditions of transformational processes: Collection of materials of the XVII International Scientific and Practical Conference*, Moscow, December 28, 2023, St. Petersburg: Pechatny tsekh, 2023, pp. 85-89.
8. Pyanzin A.A., Zakharin A.S., Zolotukhin N.S. "Research of application development tools in the ANSYS CAE package using ANSYS act technology", *Innovative technologies in modern science: Collection of articles of the International Scientific and Practical Conference*, Ufa, February 01, 2017, the responsible editor is Sukiasyan Asatur Albertovich, vol. 3, Ufa, Aeterna Limited Liability Company, 2017, pp. 95-98.
9. Buhl O.B. "Book on methods of calculating magnetic systems and the FEMM program", *Energy saving and water treatment*, 2007, no. 3(47), p. 78.
10. Chirkov O.N., Romashchenko M.A., Bobylkin I.S. et al. "Pilot evaluation of the radio communication channel in MIMO-OFDM systems", *Proceedings of the international Symposium "Reliability and Quality"*, 2019, vol. 2, pp. 87-90.
11. "Polymer composite materials, structure, properties, technology", 5th edition, a study guide, Profession Publishing House, ed. by Academician A.A. Berlin, St. Petersburg, 2019, 624 p.

Submitted 02.09.2024; revised 23.12.2024

**Information about the authors**

**Igor S. Bobylkin** – Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: bobylikin@bk.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7489-2249>  
**Oleg N. Chirkov** – Senior Lecturer, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: chir\_oleg@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2250-2100>  
**Andrey A. Kuzemkin** – Student, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: andreyhillsa@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2013-8862>

## АНТЕННАЯ РЕШЕТКА НА ОСНОВЕ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО МАССИВА ПАТЧ-АНТЕНН

С.М. Фёдоров<sup>1,2</sup>, О.М. Пещерин<sup>3</sup><sup>1</sup>Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия<sup>2</sup>Международный институт компьютерных технологий, г. Воронеж, Россия<sup>3</sup>ООО «Микролинк-Связь», г. Москва, Россия

**Аннотация:** рассматривается антенная фазированная решетка, представляющая последовательный патч-массив, состоящий из 16 элементов с центральным питанием на рабочей частоте 4,99 ГГц. В системе автоматизированного проектирования (САП) «CST STUDIO» были рассмотрены два варианта конструктивного исполнения антенной решетки с металлическими и диэлектрическими полиамидными втулками между патчами и землей. Питание антенной решетки осуществляется в одной центральной точке, конструктивно-симметрично, коаксиальным кабелем 50 Ом. Результаты исследования антенной фазированной решетки, состоящей из последовательно соединенных 16 патч-антенн, расположенных на расчетном расстоянии друг от друга и в одной фазе, показывают высокий суммированный коэффициент усиления и направленные свойства на частоте 4,99 ГГц, что позволяет эффективно использовать данную фазированную решетку в канале передачи данных автономных мобильных беспилотных комплексов. Для подтверждения полученных результатов были произведены испытания опытного образца антенны. Преимуществом данной конструкции также является низкая себестоимость изготовления. Полученные данные измерений фазированной антенной решетки подтверждают результаты моделирования на частоте 4,99 ГГц

**Ключевые слова:** патч-массив, полосковая антенна с воздушным диэлектриком

**Благодарности:** работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания «Молодежная лаборатория» № FZGM-2024-0003

### Введение

В автономных беспилотных комплексах антенны должны обладать высоким коэффициентом усиления и направленными свойствами [1]. Реализация связи с этими параметрами является важной и актуальной задачей, особенно при использовании помехозащищенных каналов. Фазированная решетка, состоящая из последовательно соединенных 16-ти патч-антенн, расположенных на расчетном расстоянии друг от друга и в одной фазе, позволяет получить высокий, суммированный коэффициент усиления.

### Характеристики антенной решетки с металлическими втулками между облучающими элементами и землей

Конструкция антенны разработана в САП «CST STUDIO». Размеры антенной решетки (АР): рефлектор, 158x439мм (сталь, толщина — 1мм); излучатели, в количестве 16 штук, 34x26мм (сталь, толщина — 1мм), находятся от земли на расстоянии 3мм и устанавливаются на металлические втулки с центральным расположением [2, 4].

В данной конструкции используется сталь марки СТ10 (аналог импортной стали Steel-1010).

В результате моделирования АР получены следующие характеристики: коэффициент усиления (КУ) — 20,4дБ;  $f = 4,99$  ГГц; ширина диаграммы направленности (ДН) основного лепестка  $\pm 7,3$ deg [3] (рис. 3, 4).

Конструкция антенны представлена на рис. 1.

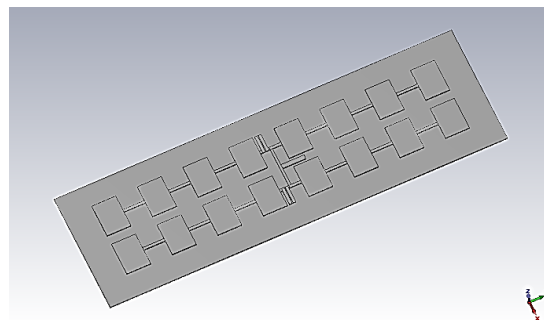


Рис. 1. Конструкция антенны

Питание данной АР осуществляется в одной точке конструктивно-симметрично, коаксиальным кабелем 50 Ом [2, 4] (рис. 2).



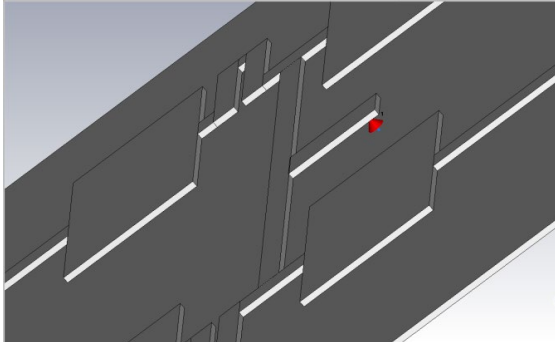


Рис. 2. Питание антенны

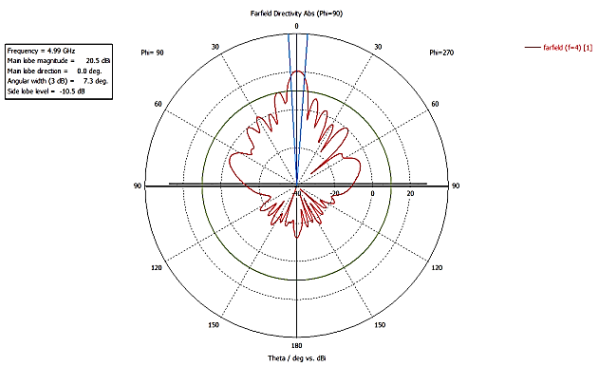


Рис. 3. Диаграмма направленности

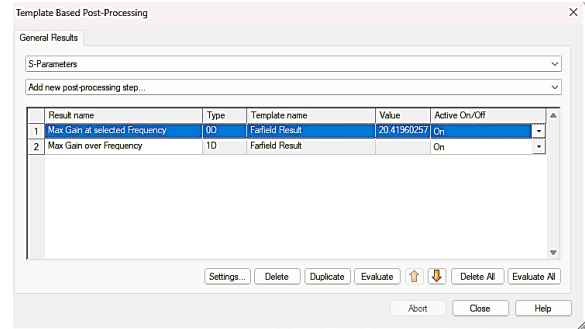


Рис. 4. Расчет коэффициента усиления антенны с металлическими втулками

Концентрация излучаемой энергии представлена на рис. 5. Из параметра S1.1 следует, что антенна максимально излучает на частоте 4,99ГГц, (S1.1 = -20,4 dB) (рис. 6).

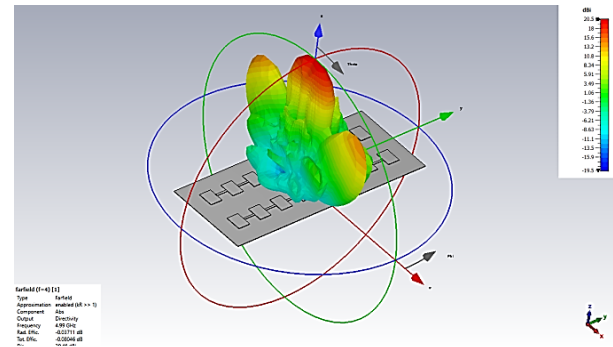


Рис. 5. Концентрация излучаемой энергии

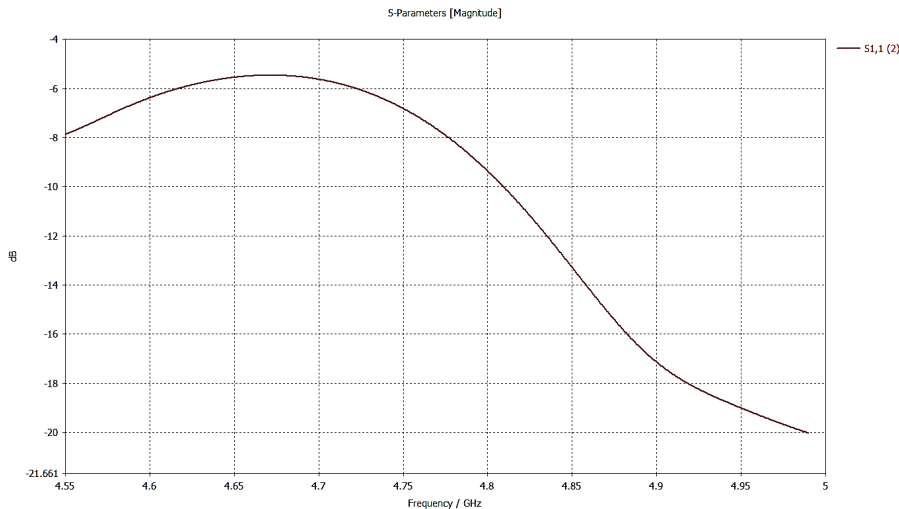


Рис. 6. Параметр S1.1

### Характеристики антенной решетки с диэлектрическими втулками между излучающими элементами и землей

Также была разработана антенная решетка с диэлектрическими втулками между излучающими элементами и землей. Размеры антенной

решетки не менялись. Излучатели располагаются от рефлектора на расстоянии 3 мм и устанавливаются на полиамидные диэлектрические втулки с центральным расположением. Питание данной антенны осуществляется также в одной точке, конструктивно-симметрично, коаксиальным кабелем 50 Ом [2].

В результате моделирования АР получены следующие характеристики: КУ – 16,46 dB;  $f = 4,99$  ГГц, Ширина ДН основного лепестка  $\pm 7,0$  deg [3] (рис. 7, 8).

Концентрация излучаемой энергии представлена на рис. 9. Из параметра S1.1 следует, что антенна максимально излучает на частоте 4,99 ГГц, (S1. = 16,462 dB) (рис. 10).

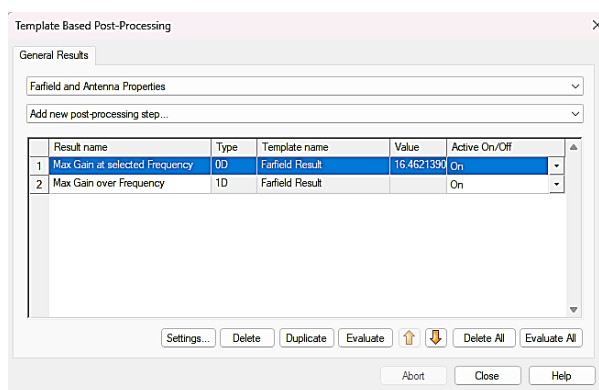


Рис. 7. Расчет коэффициента усиления антенны с диэлектрическими втулками

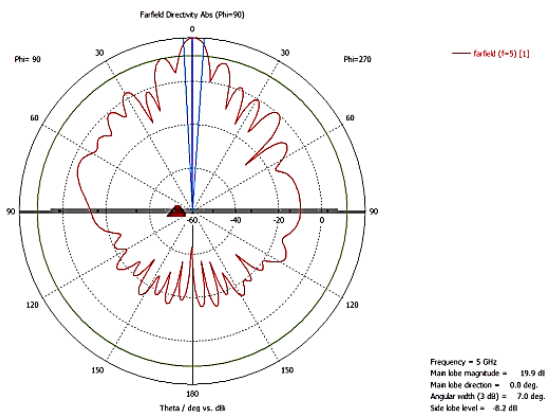


Рис. 8. Диаграмма направленности

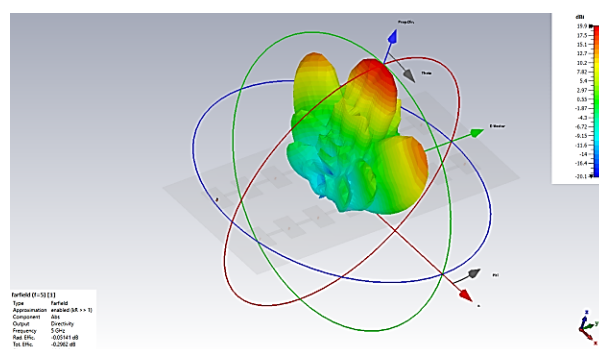


Рис. 9. Концентрация излучаемой энергии

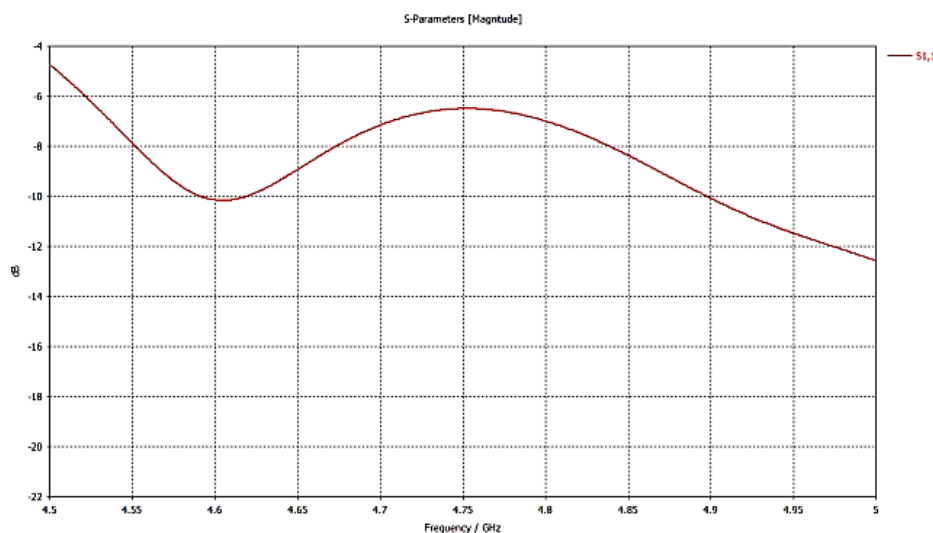


Рис. 10. Параметр S1.1

## Заключение

Антенная решетка, состоящая из последовательно соединенных 16 патч антенн, расположенных на расчетном расстоянии друг от друга и в одной фазе, позволяет получить высокий, суммированный коэффициент усиления [3].

Также следует отметить низкую себестоимость данной антенны, так как может изготавливаться из стали бюджетной марки СТ10.

Вариант исполнения антенны с металлическими втулками, между излучателями и землей имеет более высокий коэффициент усиления (КУ= 20,419 dB), чем антенна с полиамидными диэлектрическими втулками (КУ=16,462dB). Высокий КУ и направленные свойства антенной решетки позволяют эффективно использовать данную антенну в канале передачи данных автономных мобильных комплексов [1].

### Литература

1. Эксплуатация и применение беспилотных летательных аппаратов (FPV-дронов): учебное пособие / А.В. Ананьев [и др.]. Воронеж: ВУНЦ ВВС «ВВА», 2023. 235 с.

2. Сазонов Д.М. Антенны и устройства СВЧ: учеб. для радиотехнич. спец. вузов. М.: Высш. шк., 1988. 432 с.

3. Баранов С.А. Устройства СВЧ и антенны: учебное пособие для вузов. М.: Горячая линия – Телеком. 2022. 344 с.

4. Ротхаммель К. Антенны. СПб: Изд-во «Бояныч», 1998. 656 с.

Поступила 02.12.2024; принята к публикации 17.02.2024

### Информация об авторах

**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), тел. +7(473)243-77-29, e-mail: fedorov\_sm@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9027-6163>

**Пешерин Олег Михайлович** – руководитель направления, ООО «Микролинк-связь» (111020, Россия, г. Москва, проезд Вешняковский 1-й, 7), тел. +7(952)959-61-21, e-mail: olegpnmsk@me.com

## ANTENNA ARRAY BASED ON A SERIAL ARRAY OF PATCH ANTENNAS

S.M. Fedorov<sup>1,2</sup>, O.M. Peshcherin<sup>3</sup>

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

<sup>2</sup>International Institute of Computer Technologies, Voronezh, Russia

<sup>3</sup>LLC «Mikrolink-Svyaz», Moscow, Russia

**Abstract:** a phased array antenna representing a sequential patch array consisting of 16 centrally powered elements at an operating frequency of 4.99 GHz is considered. In the CST STUDIO automated design system, two design options for an antenna array with metal and dielectric polyamide bushings between the patches and the ground were considered. The antenna array is powered at one central point, structurally symmetrical, with a 50 ohm coaxial cable. The results of the study of a phased array antenna consisting of 16 patch antennas connected in series, located at an estimated distance from each other and in the same phase, show a high cumulative gain and directional properties at a frequency of 4.99 GHz, which makes it possible to effectively use this phased array in the data transmission channel of autonomous mobile unmanned complexes. To confirm the results obtained, tests of a prototype antenna were carried out. The advantage of this design is also the low cost of manufacturing. The obtained measurement data of the phased array antenna confirms the simulation results at a frequency of 4.99 GHz

**Key words:** patch array, strip antenna with air dielectric

**Acknowledgments:** 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. Ananyev A.V. et al. "Operation and application of unmanned aerial vehicles (FPV drones): a tutorial", Voronezh, 2023, 235 p
2. Sazonov D.M. "Antennas and microwave devices: a tutorial". Moscow 1988, 432 p.
3. Baranov S.A. "Microwave devices and antennas: a tutorial for universities", Moscow, 2022, 344 p.
4. Rotkhammel K. "Antennas", St. Petersburg, 1998, 656 p.

Submitted 02.12.2024; revised 17.02.2024

### Information about authors

**Sergey M. Fedorov** – Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Department of Radioelectronic Devices and Systems, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia); Associate Professor of the Department of Information Security and Communication Systems, International Institute of Computer Technologies (29b Solnechnaya St., Voronezh 394026, Russia), tel.: +7(473)243-77-29, e-mail: fedorov\_sm@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9027-6163>

**Oleg M. Peshcherin** – Head of Department, LLC «Mikrolink-Svyaz» (7 1-y Veshnyakovsky Proezd, Moscow 111020, Russia), tel.: +7(952)959-61-21, e-mail: olegpnmsk@me.com

## СФ-БЛОКИ ПРИЕМНИКА И ПЕРЕДАТЧИКА LVDS ДЛЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА 180 НМ

А.В. Белявцев<sup>1</sup>, А.В. Русанов<sup>2</sup>, Д.О. Лялин<sup>2</sup>

<sup>1</sup>АО «Научно-исследовательский институт электронной техники», г. Воронеж, Россия

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

**Аннотация:** представлены два сложно-функциональных (СФ/ІР) блока для интегральных схем: приемник и передатчик низковольтной дифференциальной передачи сигналов (Low voltage differential signal - LVDS). Раздел статьи, посвященный передатчику LVDS, содержит подробное описание структурной схемы СФ-блока и электрических схем его составных частей, результаты моделирования, временные диаграммы работы и основные электрические параметры устройства. Отдельное внимание уделено особенностям схемотехнических решений, использованных при проектировании. Раздел, посвященный СФ-блоку приемника LVDS, содержит краткое описание электрической схемы, результаты моделирования, временные диаграммы работы и основные электрические параметры блока. СФ-блоки разработаны на базе отечественного технологического процесса АО «Микрон» с проектными нормами 180 нм. Разработка схемы и топологии проводилась в специализированной системе автоматизированного проектирования (САПР) интегральных схем, использовалась специализированная автоматизированная система верификации топологии. Для моделирования схемы использовались математические модели полупроводниковых приборов (транзисторов, конденсаторов, резисторов и пр.), предоставленные фабрикой изготовителем АО «Микрон». Обе топологии прошли успешную верификацию на соблюдение проектных норм (Design rule check, DRC) и соответствия топологии исходной схеме (Layout vs. Schematic, LVS)

**Ключевые слова:** аналоговый СФ-блок, LVDS-приемник, LVDS-передатчик, интегральная схема

**Благодарности:** работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № FSMR-2023-0008)

### Введение

Стандарт LVDS позволяет выпускать разнообразные решения дифференциального интерфейса, способного поддерживать скорость передачи до 1 Гбит/с на расстояния до 10 м. LVDS означает передачу информации дифференциальными сигналами малых напряжений (типовое значение 350 мВ) по двум линиям печатной платы или сбалансированному кабелю. В сравнении с обычными однопроводными системами, дифференциальный метод благодаря ослаблению синфазного сигнала обеспечивает лучшую помехоустойчивость и работу при меньших значениях напряжения, меньшую потребляемую мощность, меньшую чувствительность к электромагнитным помехам и большую скорость передачи. Основным стандартом, определяющим характеристики LVDS, является TIA/EIA-644 [1].

В простом варианте архитектура линии передачи данных LVDS состоит из драйвера (передатчика) и приемника (рис. 1) [2].

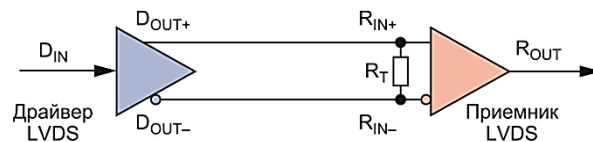


Рис. 1. Пример архитектуры линии передачи данных LVDS

В статье представлено описание разработанных СФ-блоков LVDS-приемника и передатчика для КМОП технологического процесса 180 нм АО «Микрон».

### СФ-блок передатчика LVDS

Передатчик LVDS состоит из двух функциональных блоков – генератора тока (ГТ) 3,5 мА и схемы формирования сигналов управления (ФСУ) ключами генератора тока (рис. 2).

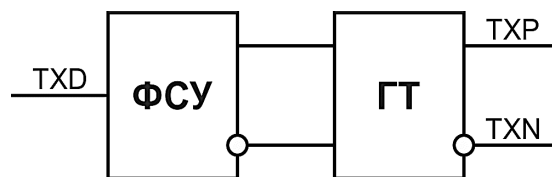


Рис. 2. Структурная схема LVDS-передатчика

Электрическая схема генератора тока

представлена на рис. 3.

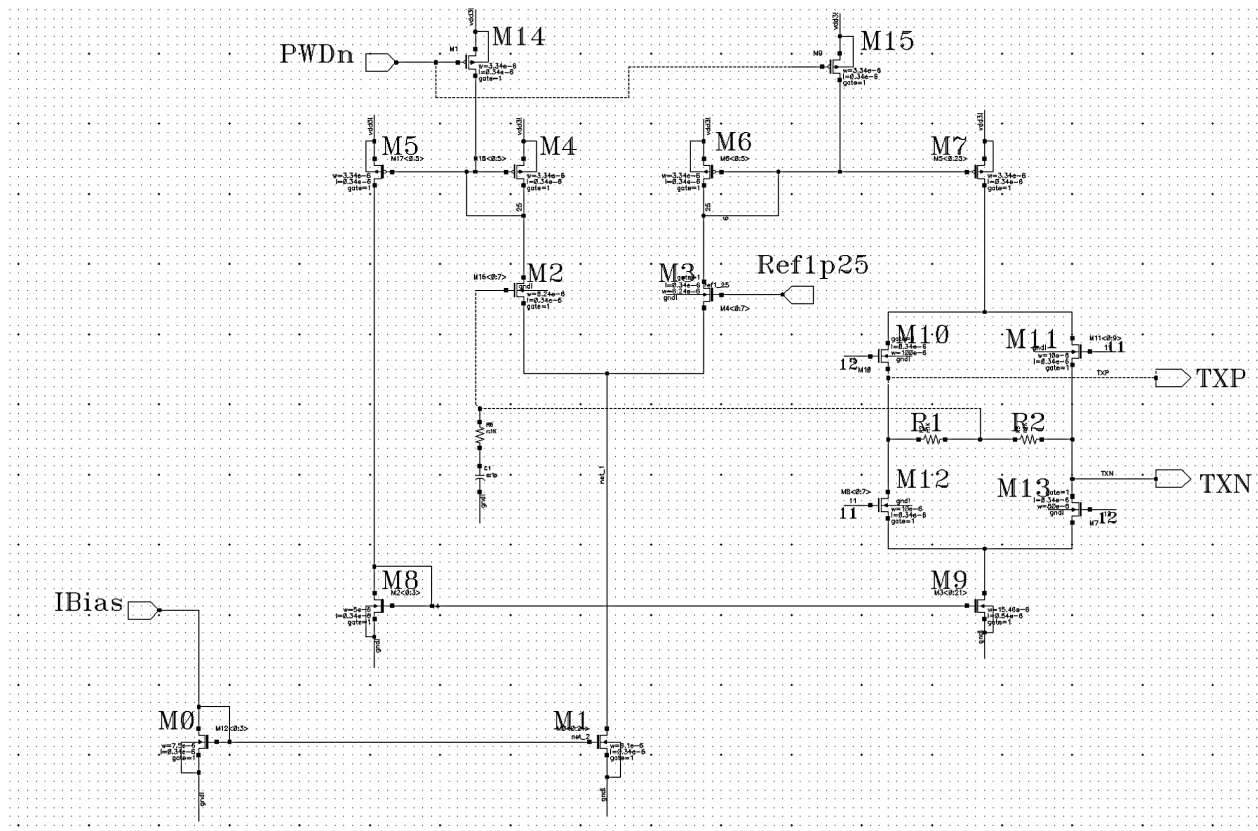


Рис. 3. Электрическая схема генератора тока 3,5 мА

Генератор построен на базе операционного усилителя (ОУ) с отрицательной обратной связью с коэффициентом передачи – 1. Входной каскад ОУ спроектирован на дифференциальной паре n-канальных МОП (металл оксид полупроводник)-транзисторов M2 и M3. Токое зеркало на транзисторах M0 и M1 задает входной ток дифференциальной пары. Токое зеркало на транзисторах M4 - M5 и транзисторах M6 - M7 являются нагрузкой дифференциальной пары. Токое зеркало M8 - M9 формирует несимметричный выход ОУ, при этом транзисторы M7 и M9 образуют выходной каскад. Ток выходного каскада является выходным током, который передается в линию передачи данных LVDS (шины TXP и TXN). В рассматриваемом техническом решении транзисторы M7 и M9 подобраны так, что величина выходного тока составляла 3,5 мА. N-канальные МОП-транзисторы M10 - M13, расположенные в цепи выходного каскада ОУ, представляют собой ключи, предназначенные для изменения направления протекания выходного тока по линии передачи данных. Управление ключами M10 - M13 осуществляется по шинам «11» и «12».

Петля обратной связи подключаемая к затвору входного транзистора M2 через резистивный делитель R1 - R2 обеспечивает заданный уровень постоянной составляющей выходного напряжения. Конфигурация схемы включения ОУ представляет собой повторитель напряжения, поэтому постоянная составляющая выходного сигнала эквивалентна величине входного напряжения на затворе транзистора M3 (Ref1p25).

Таким образом, схемотехническое решение генератора тока, изображенное на рис. 3, решает две задачи: формирования тока величиной 3,5 мА для линии передачи данных LVDS и установки величины синфазного выходного напряжения драйвера LVDS.

Транзисторы M13 - M14 – ключи, которые включают / выключают схему (если уровень сигнала PWDn высокий – генератор тока работает).

Направление протекания выходного тока определяется сигналами на шинах «11» и «12». Формирование управляющих сигналов осуществляется схемой, изображенной на рис. 4.



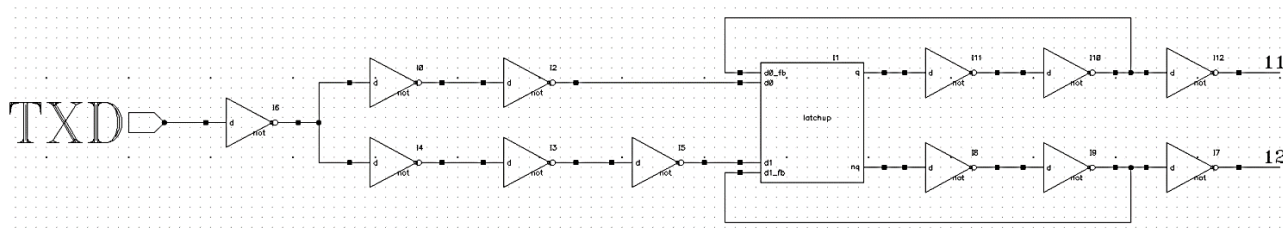


Рис. 4. Схема формирования сигналов управления ключами генератора тока

Схема формирования сигналов управления ключами генератора тока представляет собой последовательность КМОП (комплментарных металл оксид полупроводник) инверторов; стоит отметить, что каждый последующий инвертор обладает большей нагруз-

очной способностью, чем предыдущий. На вход TXD поступают данные с уровнем логической единицы 1,1 В, которые далее преобразуются схемой сдвига уровня до 3,3 В. Электрическая схема устройства сдвига уровня представлена на рис. 5.

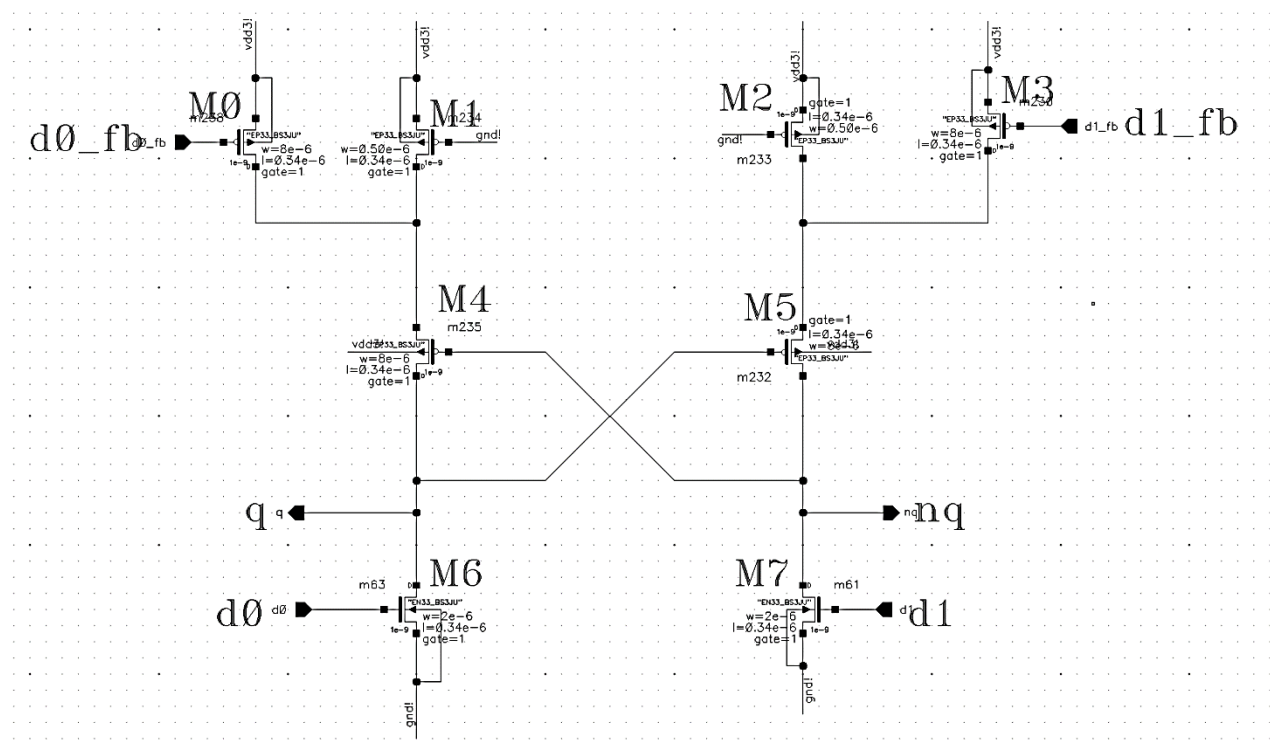


Рис. 5. Схема сдвига уровня

На входы «d0» и «d1» подаются цифровые данные с уровнем логической единицы 1,1 В, с выходов «q» и «nq» снимают цифровые данные с уровнем логической единицы 3,3 В. Р-канальные транзисторы M1 и M2 используются в качестве резисторов и задают минимальный ток, протекающий через транзисторы M4, M6 и транзисторы M5, M7 соответственно. Стоит отдельно обратить внимание на транзисторы M0 и M3. На их затворы поступают сигналы обратной связи, таким образом, что фаза выходного сигнала блока совпадает с фазой сигнала обратной связи. Например, если на выходе «q» схемы сдвига уровня – логический «0», то сигнал об-

ратной связи на входе «d0\_fb» также логический «0». Таким образом, транзисторы M0 и M3 обеспечивают дополнительную накачку тока в моменты переключения выхода схемы из состояния логического «0» в «1». Применение транзисторов M0 - M3 позволяет существенно снизить фронт нарастания выходного сигнала и временную задержку выходного сигнала схемы формирования сигналов управления ключами генератора. На рис. 6 представлены временные диаграммы работы схемы сдвига уровня для трех различных вариантов схемы: наличие обратной связи через транзисторы M0 и M3 (штриховая линия); транзисторы M0 и M3 от-

ключены (порты d0\_fb, d1\_fb подключены к питанию) (пунктирная линия); транзисторы M0 - M3 отсутствуют в схеме (исток транзисторов M4 и M5 подключены к питанию) (штрихпунктирная линия). Из представленных графиков видно, что наилучшие результаты бы-

ли достигнуты с применением обратной связи через транзисторы M0 и M3, сплошная линия на графике – входное воздействие на схему.

Временные диаграммы работы LVDS-передатчика представлены на рис. 7.

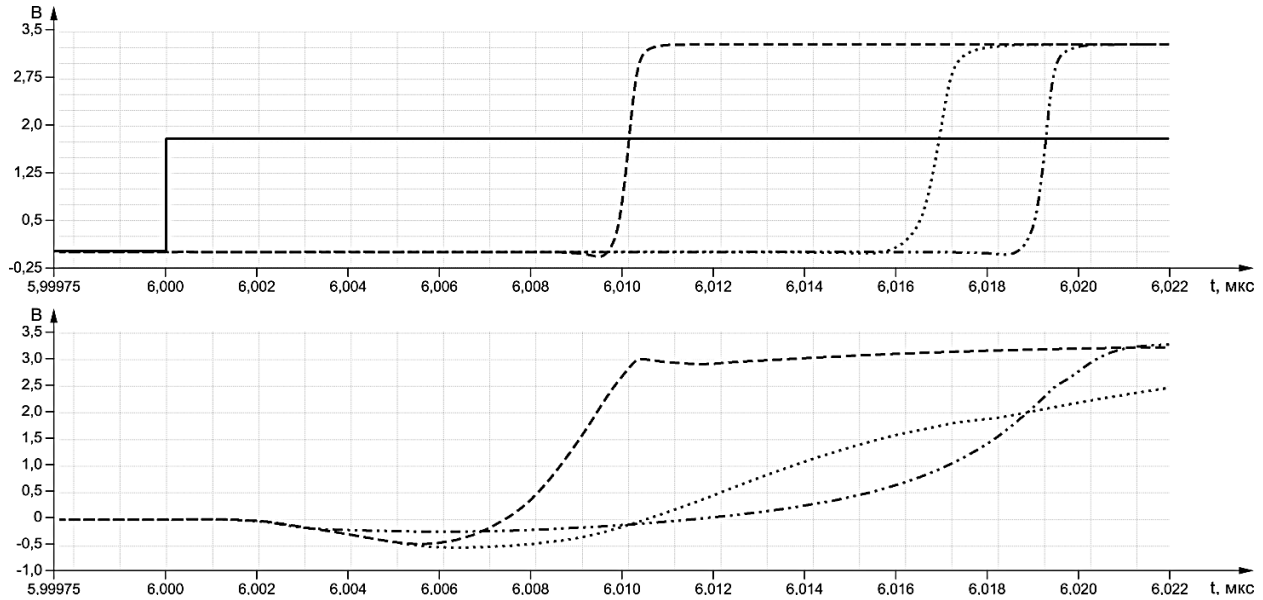


Рис. 6. Временные диаграммы работы схемы сдвига уровня

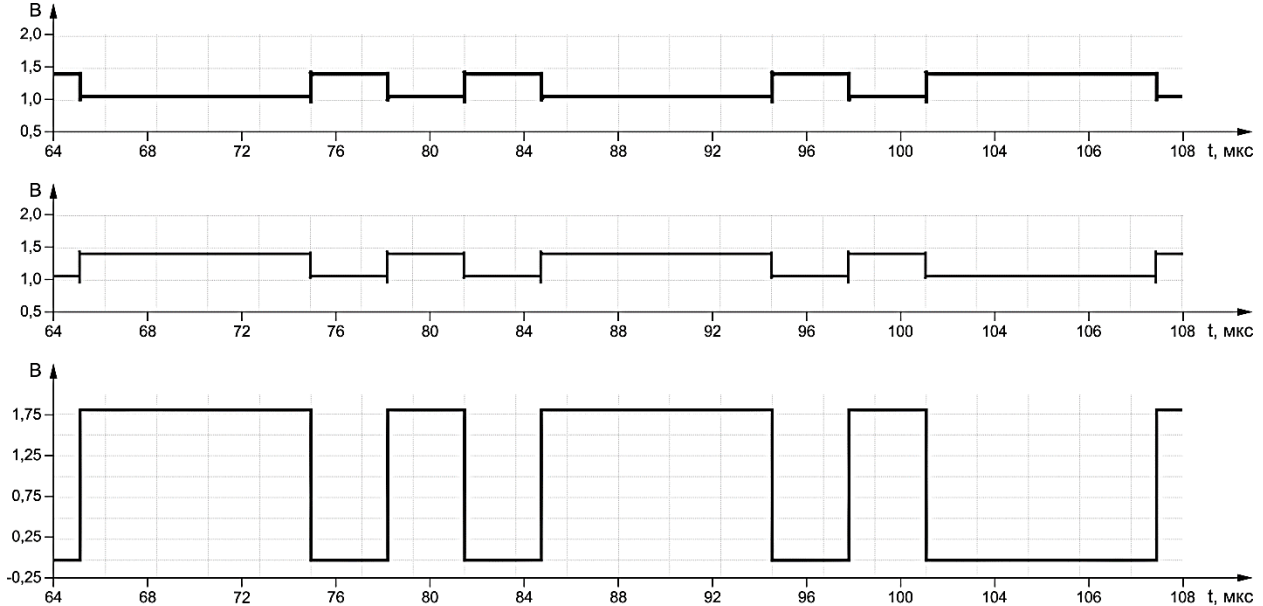


Рис. 7. Временные диаграммы работы LVDS-передатчика

На вход передатчика LVDS поступает последовательность входных импульсов TXD с уровнем логической единицы 1,8 В; с выхода передатчика снимаются два противофазных сигнала TXP и TXN. Для выходного сигнала характерны: постоянная составляющая (в дан-

ном случае 1,25 В), размах выходного напряжения от пика до пика – 350 мВ.

Основные электрические параметры СФ-блока LVDS-передатчика представлены в табл. 1.

Таблица 1

Основные электрические параметры СФ-блока LVDS-передатчика (ёмкость нагрузки 100 фФ)

Параметр	Значение			Ед. изм.
	мин.	тип.	макс.	
Время задержки переключения при переходе TXD из состояния логического 0 в 1	558	820	1170	пс
Время задержки переключения при переходе TXD из состояния логической 1 в 0	581	840	1180	пс
Время нарастания дифференциального выходного сигнала	250	460	1344	пс
Время спада дифференциального выходного сигнала	222	435	1900	пс
Амплитуда дифференциального выходного напряжения	155	170	182	мВ
Синфазное выходное напряжение в установившемся режиме	1,22	1,24	1,25	В
Напряжение питания аналоговое		3,3		В
Напряжение питания цифровое		1,8		В
Ток потребления	3	4,1	5,5	мА

Электрические параметры СФ-блока рассчитаны при температурах окружающей среды -60, 27, 125 °С и трех технологических углах: типовой, малая скорость – малое энергопотребление и высокая скорость – большое энергопотребление.

Топология СФ-блока разработана с использованием 4 слоев металлизации и имеет габаритные размеры 120 × 125 мкм.

### СФ-блок приёмника LVDS

Электрическая схема приемника LVDS представлена на рис. 8.

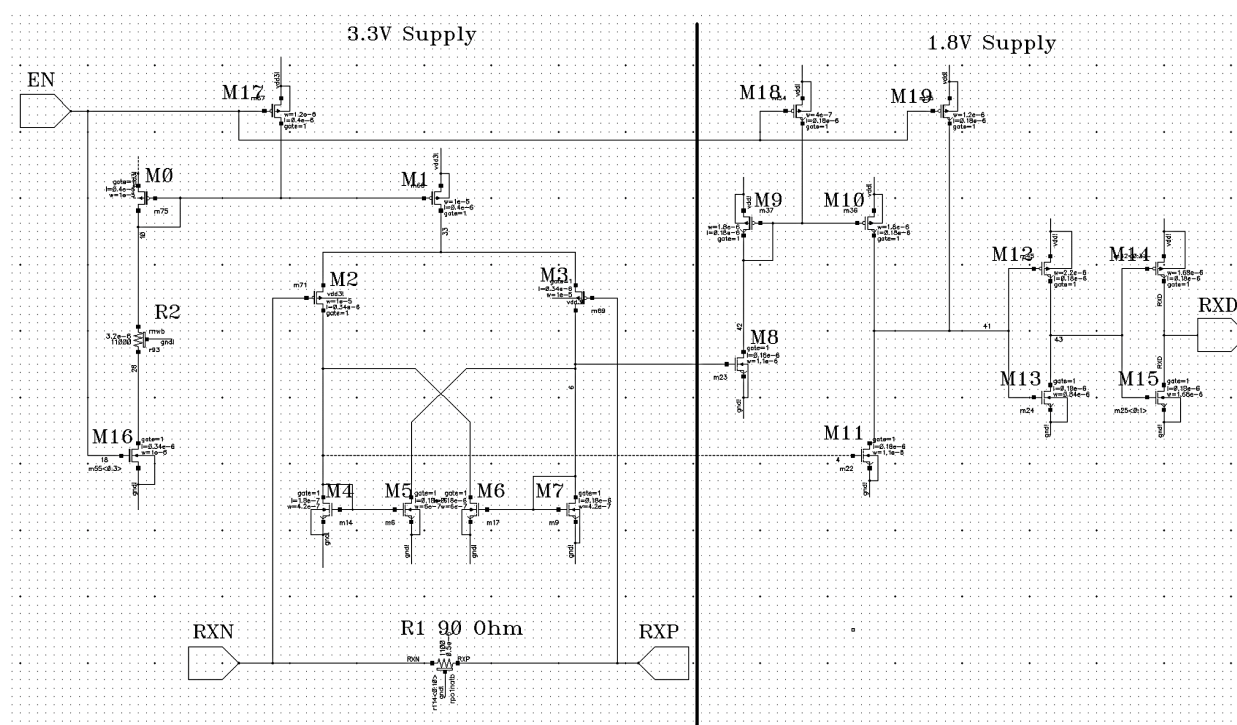


Рис. 8. Электрическая схема LVDS-приёмника

Приемник LVDS представляет собой компаратор напряжения, выполненный по архитектуре с гистерезисом [3, 4]. В схеме можно выделить две особенности: два домена питания 3,3 В и 1,8 В, балластный резистор линии связи LVDS интегрирован в СФ-блок приемника (резистор R1 на схеме рис. 8).

Входной каскад компаратора – дифференциальная пара транзисторов M2 и M3, нагрузкой которой являются два токовых зеркала M4 - M5, M6 - M7 (рис. 8). Ток питания входного каскада задается с помощью резистора R2 и токового зеркала на транзисторах M0 и M1. Транзисторы M16 и M17 – ключи, которые включают / выключают схему (если уровень

сигнала EN высокий – схема работает). Транзисторы M8 - M11 согласующий каскад, преобразующий сигналы из домена питания 3,3 В в сигналы домена 1,8 В. Последовательность инверторов на транзисторах M12 - M15 согласуют выходной сигнал с нагрузкой.

Временные диаграммы работы СФ-блока LVDS-приемника представлены на рис. 9.

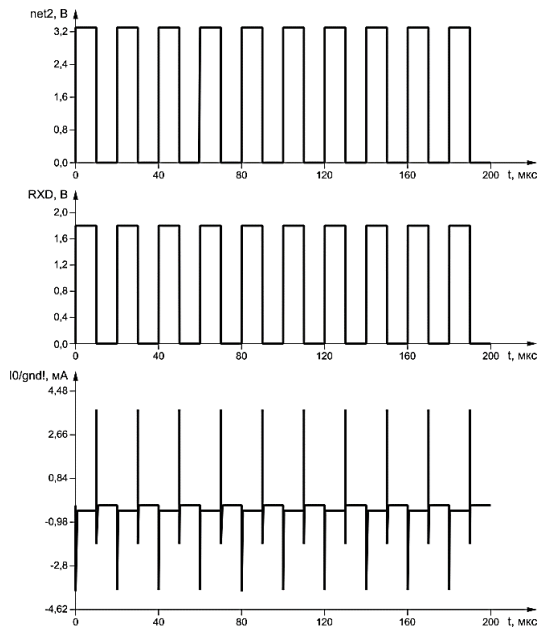


Рис. 9. Временные диаграммы работы СФ-блока LVDS-приёмника

Основные электрические параметры СФ-блока приемника LVDS представлены в табл. 2.

Электрические параметры СФ-блока рассчитаны при температурах окружающей среды -60, 27, 125 °С и трех технологических углах: типовой, малая скорость – малое энергопотребление и высокая скорость – большое энергопотребление.

Топология СФ-блока разработана с использованием 4 слоёв металлизации и имеет габаритные размеры 82 × 60 мкм.

Временные диаграммы работы LVDS-линии передачи данных представлены на рис. 10. Сигнал TXD – входная последовательность данных; TXN и TXP – прямой и инверсный выходы LVDS-передатчика; RXD – выходная последовательность данных. Задержка переключения выходного сигнала относительно входного составляет 1 нс, скорость передачи 200 Мбит/с, нагрузка LVDS-линии передачи 100 фФ.

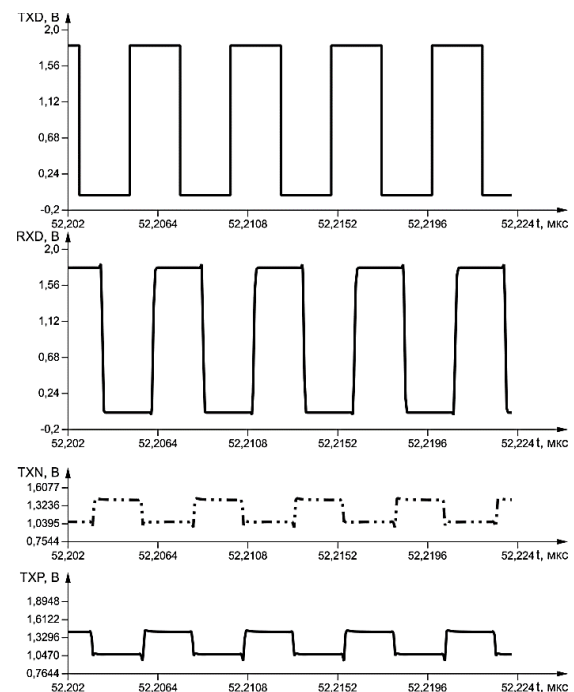


Рис. 10. Временные диаграммы работы LVDS-линии передачи данных

Таблица 2

Основные электрические параметры СФ-блока LVDS-приёмника (ёмкость нагрузки 100 фФ)

Параметр	Значение			Ед. изм.
	мин.	тип.	макс.	
Входное дифференциальное пороговое напряжение высокого уровня	8	24	36	мВ
Входное дифференциальное пороговое напряжение низкого уровня	-36	-24	-8	мВ
Время нарастания выходного сигнала	116	185	275	пкс
Время спада выходного сигнала	90	135	210	пкс
Время задержки переключения из состояния логического 0 в 1	350	590	1000	пкс
Время задержки переключения из состояния логической 1 в 0	245	375	580	пкс
Напряжение питания аналоговое		3,3		В
Напряжение питания цифровое		1,8		В
Ток потребления	230	390	630	мкА

### Заключение

В данной статье представлены СФ-блоки LVDS-приемника и передатчика пригодные для

организации обмена данными по высокоскоростному LVDS-интерфейсу. СФ-блоки разработаны для отечественного технологического процесса с проектными нормами 180 нм. Мик-

росхема выполнена по государственному заданию Минобрнауки в прикладной НИР «Разработка методики прототипирования электронной компонентой базы на отечественных микроэлектронных производствах на основе сервиса MPW» (FSMR-2023-0008) в рамках федерального проекта «Подготовка кадров и научного фундамента для электронной промышленности» по КМОП техпроцессу HCMOS8D с минимальными проектными нормами 0,18 мкм.

#### Литература

1. TIA/EIA-644 Standard. Electrical Characteristics of Low Voltage Differential Signaling (LVDS) Interface Circuits pp. 40.
2. Уоттерсон К. Руководство по реализации схем с интерфейсами LVDS и M-LVDS // Компоненты и технологии. 2013. № 8. С. 122-130.
3. Эннс И. Проектирование аналоговых К-МОП микросхем. Краткий справочник разработчика / под редакцией В.И. Эннса, Ю.М. Кобзева. 2-е издание, стереотип. М.: Горячая линия – Телеком. 2016. 454 с.
4. Phillip E. Allen, Douglas R. Holdberg CMOS analog circuit design – Oxford University Press, 2017 pp. 590.

Поступила 14.11.2024; принята к публикации 17.02.2025

#### Информация об авторах

**Белявцев Андрей Владимирович** – инженер-конструктор, АО «Научно-исследовательский институт электронной техники» (394033, Россия, г. Воронеж, ул. Ст. Большевиков, д. 5), тел. +7 (473) 226-29-37

**Русанов Александр 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: ralval@rambler.ru

**Лялин Денис Олегович** – аспирант, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: lyalin.denis@mail.ru

### LVDS RECEIVER AND TRANSMITTER BLOCKS FOR 180 NM PROCESS

A.V. Belyavtcev<sup>1</sup>, A.V. Rusanov<sup>2</sup>, D.O. Lyalin<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Research Institute of Electronic Technology, Voronezh, Russia

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

**Abstract:** the article presents two IP blocks for integrated circuits: a low-voltage differential signaling (LVDS) receiver and transmitter. The section of the article devoted to the LVDS transmitter contains a detailed description of the IP block structure and electrical circuits of its components, simulation results, and the main electrical parameters of the device. Special attention is paid to the features of the circuit solutions used in the design. The section devoted to the IP block of the LVDS receiver contains a brief description of the electrical circuit, simulation results, and the main parameters of the block. The IP blocks were developed on the basis of a domestic technological process with 180 nm design standards. The circuit and topology were developed in a specialized CAD system for integrated circuits. Mathematical models of semiconductor devices provided by the manufacturer were used to simulate the circuit. The generator topology has successfully passed verification for compliance with design rules check (DRC) and conformity of the topology to the original schematic (Layout vs. Schematic, LVS)

**Key words:** analog IP block, LVDS receiver, LVDS transmitter, integrated circuit

**Acknowledgements:** the work was carried out with the support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (project no. FSMR-2023-0008)

#### References

1. TIA/EIA-644 Standard. Electrical Characteristics of Low Voltage Differential Signaling (LVDS) Interface Circuits. pp. 40
2. Watterson Conel “Guide to Implementing LVDS and M-LVDS Interface Circuits”, *Components and Technologies*, no. 8, 2013, pp. 122-130.
3. Enns V.I., Kobzev Yu.M. “Design of analog C-MOS microcircuits. Developer's Quick Reference Guide”, ed. by V.I. Enns, – 2-nd edition, Moscow, Hotline-Telecom, 2016, 454 p.
4. Phillip E. Allen, Douglas R. Holdberg “CMOS analog circuit design”, Oxford University Press, 2017, pp. 590.

Submitted 14.11.2024; revised 17.02.2025

#### Information about the authors

**Andrey V. Belyavtcev** – Engineer, JSC «Research Institute of Electronic Technology» (5 St. Bolshevikov str., Voronezh 394033, Russia), tel.: +7(473)226-29-37

**Alexander V. Rusanov** – Cand. Sc. (Technical), Department of Radio Electronics Devices and Systems, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: ralval@rambler.ru

**Denis O. Lyalin** – Postgraduate Student, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: lyalin.denis@mail.ru



## РАЗРАБОТКА МИМО-АНТЕННОЙ СИСТЕМЫ С ТОРОИДАЛЬНОЙ ДИАГРАММОЙ НАПРАВЛЕННОСТИ ДЛЯ ПОМЕХОУСТОЙЧИВЫХ КАНАЛОВ

Е.Д. Егорова<sup>1</sup>, Е.А. Ищенко<sup>1</sup>, Ю.Г. Пастернак<sup>1</sup>, Д.К. Проскурин<sup>1</sup>, С.М. Фёдоров<sup>1,2</sup>

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

<sup>2</sup>Международный институт компьютерных технологий, г. Воронеж, Россия

**Аннотация:** представлены результаты разработки и исследования МИМО (Multiple Input Multiple Output)-антенной системы с тороидальной диаграммой направленности для систем связи с беспилотными летательными аппаратами. Описана конструкция антенны на основе коаксиального волновода с заполнением из полистирола, обеспечивающая работу в диапазоне частот 5.95-6.2 ГГц с возможностью формирования двух ортогональных круговых поляризаций. Приведены результаты электродинамического моделирования основных характеристик антенной системы, включая S-параметры, эффективность излучения, коэффициент стоячей волны по напряжению и диаграммы направленности. Показано, что разработанная антенна обеспечивает коэффициент усиления до 9.5 дБ при эффективности излучения не хуже -0.3 дБ во всем диапазоне рабочих частот. Проанализированы особенности формирования диаграммы направленности для различных режимов работы и частот. Особое внимание уделено анализу характеристик антенны в угло-местной плоскости, где достигнута ширина основного лепестка 9.7° при уровне боковых лепестков -11.1 дБ. Продемонстрирована возможность эффективного разделения каналов в системе МИМО за счет использования ортогональных круговых поляризаций. Предложенное техническое решение обеспечивает высокую помехоустойчивость канала связи в условиях многолучевого распространения радиоволн при минимальных массогабаритных характеристиках антенной системы

**Ключевые слова:** МИМО-антенна, тороидальная диаграмма направленности, круговая поляризация, волноводно-щелевая антенна, коаксиальный волновод, многолучевое распространение

**Благодарности:** работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № FZGM-2024-0006)

### Введение

В современных телекоммуникационных системах технология МИМО (Multiple Input Multiple Output) является ключевым элементом обеспечения высокой пропускной способности и помехоустойчивости каналов связи. Стремительное развитие беспроводных технологий, включая системы 4G и 5G, требует разработки инновационных подходов к проектированию антенных систем, способных эффективно функционировать в условиях сложной электромагнитной обстановки и многолучевого распространения волн.

В работе [1] проведен анализ технологии миллиметровых волн в массивных МИМО-системах. Авторы экспериментально доказали, что использование гибридного прекодирования позволяет снизить энергопотребление на 35 % при сохранении производительности системы. Предложенная архитектура с уменьшенным числом радиочастотных цепей продемонстрировала повышение спектральной эффективности на 40 % по сравнению с традиционными

решениями. Разработанные методы формирования диаграммы направленности обеспечили подавление интерференции на уровне -25 дБ. В исследовании [2] продемонстрировано влияние пространственной нестационарности на характеристики массивных МИМО-систем. Разработанные авторами аналитические выражения для SINR (Signal Interference + Noise Ratio – показатель отношения полезного сигнала к помехам от посторонних источников) позволили достичь улучшения отношения сигнал/шум на 4 дБ при использовании метода нулевого форсирования и на 7 дБ при применении MMSE-детектирования (Minimum mean square error – минимальная среднеквадратическая ошибка). Экспериментальная верификация показала, что предложенный подход обеспечивает устойчивую работу системы при вариации числа антенных элементов от 32 до 128. Как указано в [3], реализованная архитектура с полной приемной линейной решеткой и двухэлементной передающей решеткой позволила достичь разрешающей способности в 1.5 раза выше по сравнению с традиционными системами. При этом уровень боковых лепестков был снижен до -26 дБ, что на 13 дБ лучше существующих решений. Автор также продемонстрировал

возможность эффективного использования ортогональных линейно частотно модулированных (ЛЧМ)-сигналов для разделения каналов. В работе [4] внедрили новаторский метод нормализованного распределения мощности (NGDPA) для систем MIMO-NOMA. Экспериментальные результаты показали увеличение суммарной скорости передачи на 29.1 % по сравнению с традиционным методом GRPA (Gain ratio power allocation – коэффициент усиления распределенной мощности). Авторы достигли стабильной работы системы при различном числе пользователей и продемонстрировали улучшение характеристик на 16.7 % при работе на границе зоны покрытия. Согласно результатам работы [5] был разработан эффективный метод блочной диагонализации с предварительным кодированием для многопользовательских массивных MIMO-систем. Внедрение предложенного подхода позволило достичь улучшения показателя BER (Коэффициент битовых ошибок) на 2 дБ при использовании двух приемных антенн, на 4 дБ при четырех антеннах и на 7 дБ при восьми антеннах. При этом вычислительная сложность алгоритма была снижена на 25 %. Авторы работы [6] представили результаты экспериментальной оценки алгоритмов детектирования для MIMO-систем. Авторы показали, что при  $BER=10^{-2}$  алгоритм MMSE демонстрирует преимущество в 4 дБ над ZF в условиях коррелированного канала. Разработанные модели позволили точно предсказывать деградацию характеристик системы при различных уровнях пространственной корреляции. Как показано в [7], был разработан алгоритм SASUSP (sparsity update subspace pursuit – обновление разреженности и подпространственное преследование сигнальной матрицы) для OFDM (мультиплексирование с ортогональным частотным разделением каналов)-систем миллиметрового диапазона. Предложенный метод обеспечил точность оценки канала, близкую к границе Крамера-Рао, при снижении объема пилотных сигналов на 40 %. Алгоритм продемонстрировал устойчивую работу при различных отношениях сигнал/шум, превзойдя существующие решения. В работе [8] создали компактную четырехэлементную сверхширокополосную (UWB) MIMO-антенну размером  $6 \times 5$  см<sup>2</sup>. Использование асимметричной копланарной линии питания обеспечило работу в диапазоне 3-10.6 ГГц при коэффициенте отражения менее -10 дБ и развязке между элементами более 18 дБ. Коэффициент корреляции огибающих не превысил 0.004 во всем

рабочем диапазоне. Согласно выводам работы [9], был разработан фреймворк глубокого обучения для оптимизации water-filling алгоритма в MIMO-системах. Предложенное решение обеспечило производительность, близкую к оптимальной, при снижении вычислительной сложности на 30 %. Экспериментальные результаты показали устойчивость системы к изменениям SNR и масштабируемость при увеличении числа антенных элементов.

Проведенный анализ современного состояния исследований демонстрирует необходимость разработки MIMO-антенных систем с тороидальной диаграммой направленности для обеспечения высокой помехоустойчивости каналов связи. Особую важность представляет комплексное решение задач оптимизации геометрии антенной системы, методов формирования диаграммы направленности и алгоритмов обработки сигналов с учетом достижений в области машинного обучения и адаптивной обработки сигналов.

### **Принцип построения MIMO-антенной системы с тороидальной диаграммой направленности**

В данной работе представлена разработанная MIMO-антенная система с тороидальной диаграммой направленности, предназначенная для обеспечения высокоэффективной многоканальной связи с беспилотными летательными аппаратами. Антенная система функционирует в частотном диапазоне 5.95-6.2 ГГц, что соответствует перспективным требованиям современных систем управления беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) и передачи данных. Ключевой особенностью разработанной антенны является её способность работать одновременно на двух ортогональных круговых поляризациях – левой (Left Hand Circular Polarization, LHCP) и правой (Right Hand Circular Polarization, RHCP), что обеспечивает существенное повышение помехоустойчивости канала связи в условиях многолучевого распространения радиоволн. Конструктивно антенная система выполнена в компактном форм-факторе с оптимизированными габаритными размерами: общая длина составляет 298.6 мм при внешнем диаметре 12.2 мм, что обеспечивает минимальное аэродинамическое сопротивление при установке на БПЛА. Такие массогабаритные характеристики в сочетании с тороидальной диаграммой направленности и коэффициентом направленного действия около 10 дБ позволяют эффективно использо-

вать антенну в составе бортового оборудования современных беспилотных летательных аппаратов различного назначения.

Разработанная антенная система реализована на основе волноводно-щелевой технологии, где в качестве основного излучающего механизма выступают специально спрофилированные щели в внешнем проводнике коаксиального волновода. Принцип действия антенны основан на возбуждении электромагнитных волн в коаксиальном волноводе с последующим их излучением через систему щелей, геометрия и расположение которых оптимизированы для формирования требуемой тороидальной диаграммы направленности. Конструктивно волновод выполнен в коаксиальной конфигурации, где пространство между внутренним и внешним проводниками заполнено полистиролом с тщательно подобранными электрофизическими характеристиками: диэлектрическая проницаемость  $\epsilon = 2.48$  и тангенс угла диэлектрических потерь  $\text{tg}\delta = 0.0002$ . Выбор данного материала обусловлен необходимостью обеспечения оптимального волнового сопротивления линии передачи и минимизации диэлектрических потерь в рабочем диапазоне частот. Геометрические параметры волновода оптимизированы для эффективной передачи электромагнитной энергии: диаметр внутреннего проводника составляет 3.4 мм, а внутренний диаметр внешней проводящей оболочки – 12 мм, что обеспечивает требуемое волновое сопротивление и подавление высших типов мод в рабочем диапазоне частот. На рис. 1 представлен вид антенны, демонстрирующий расположение и геометрию излучающих щелей на поверхности внешней оболочки коаксиального волновода.

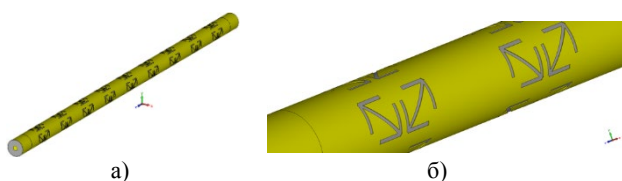


Рис. 1. Вид МИМО-антенны: а) общий вид антенны; б) вид излучающих щелей, сформированных во внешней оболочке

Особое внимание стоит уделить геометрии и расположению излучающих элементов. Щели выполнены в форме стрелок с рассчитанными геометрическими параметрами, что обеспечивает оптимальное распределение электромагнитного поля. Такая конфигурация щелей была выбрана с учетом их четвертьволнового резонанса при излучении волн. Данное конструктивное решение обусловлено двумя ключевыми

факторами: во-первых, это позволяет минимизировать взаимное влияние соседних излучающих элементов, а во-вторых, обеспечивает возможность компактного размещения двух ортогональных щелей в каждой паре на расстоянии четверти длины волны друг от друга для их эффективного квадратурного возбуждения. Щели равномерно размещаются в проводящей оболочке антенны с шагом в  $90^\circ$ , что обеспечивает формирование симметричной тороидальной диаграммы направленности благодаря их синфазному возбуждению.

### Расчет и моделирование ключевых параметров антенны

Для оценки эффективности разработанной антенной системы было проведено электродинамическое моделирование с использованием CST Studio Suite. В рамках исследования были изучены ключевые характеристики антенны, определяющие её функциональные возможности в составе МИМО-системы связи с БПЛА.

Первым этапом анализа стало исследование S-параметров антенны в диапазоне частот 5.9-6.2 ГГц, результаты которого представлены на рис. 2. Полученные характеристики демонстрируют высокое качество согласования обоих портов антенны: коэффициенты отражения  $S_{11}$  и  $S_{22}$  в рабочем диапазоне частот не превышают -10 дБ, достигая минимальных значений менее -20 дБ на частоте 6.15 ГГц для порта 2. Особенно важным является тот факт, что коэффициенты передачи между портами ( $S_{21}$  и  $S_{12}$ ) стабильно находятся на уровне около -10 дБ во всём рабочем диапазоне, что свидетельствует о хорошей развязке между входами антенны и минимальном взаимном влиянии каналов.

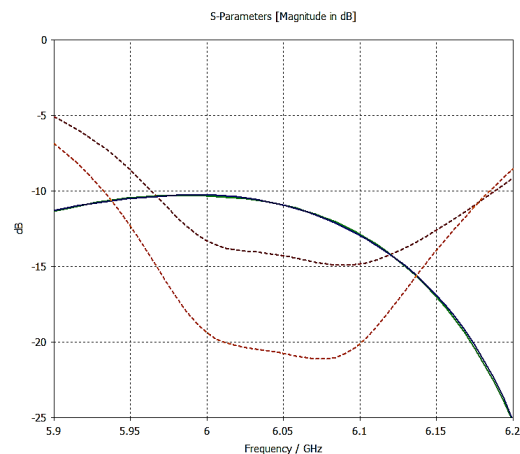


Рис. 2. S-параметры антенны при размещении портов на обоих концах

Асимметрия характеристик портов, наблюдаемая на нижней границе рабочего диапазона (около 5.9 ГГц), где  $S_{11}$  достигает -6 дБ, а  $S_{22}$  составляет -15 дБ, объясняется особенностями конструктивного исполнения входов антенны. Тем не менее, по мере увеличения частоты согласование первого порта существенно улучшается, что обеспечивает эффективную работу антенной системы во всем исследуемом диапазоне частот. Результаты анализа S-параметров подтверждают высокое качество согласования разработанной антенны с питающими линиями и демонстрируют возможность её эффективного использования в системах ММО-связи за счет хорошей развязки между портами.

Следующим этапом исследования характеристик антенной системы стал анализ эффективности излучения и полной эффективности, результаты которого представлены на рис. 3. Эффективность излучения (Radiation Efficiency), характеризующая потери в проводниках и диэлектрике антенны, демонстрирует исключительно высокие показатели для обоих портов во всем исследуемом диапазоне частот. Значения данного параметра стабильно находятся вблизи 0 дБ (верхние линии [1] и [2] для 1 и 2 портов соответственно), что свидетельствует о минимальных потерях энергии при преобразовании подводимой мощности в электромагнитное излучение.

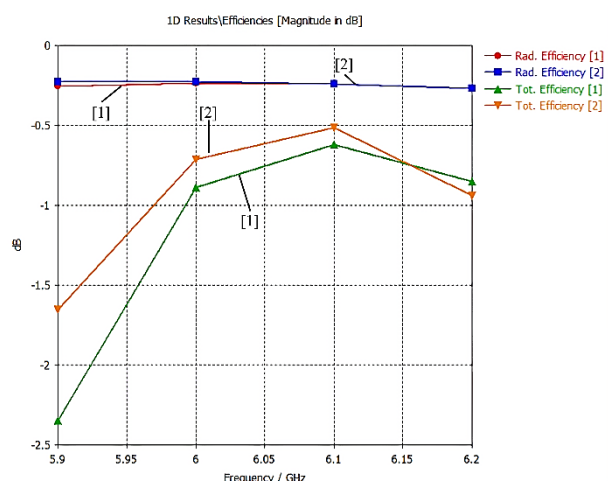


Рис. 3. Эффективность излучения и полная эффективность антенны

Полученные результаты указывают на высокую эффективность разработанной антенной системы, особенно в центральной части рабочего диапазона частот (около 6.0 ГГц), где потери на рассогласование минимальны, а эффективность излучения близка к теоретическому мак-

симуму. Незначительное снижение полной эффективности на краях диапазона обусловлено преимущественно потерями на рассогласование и не оказывает существенного влияния на работоспособность антенной системы в целом.

Проведем анализ характеристик диаграмм направленности исследуемой антенны во всем исследуемом диапазоне рабочих частот. На рис. 4-6 приводятся характеристики диаграмм направленности при запитывании первого порта на частотах 5.9, 6.0 и 6.1 ГГц соответственно. Благодаря использованию резонансных щелей и их эффективному запитыванию удалось сформировать высоконаправленную тороидальную диаграмму направленности.

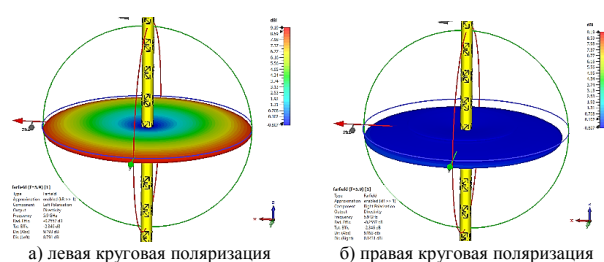


Рис. 4. Диаграммы направленности, разработанной ММО антенны на частоте 5.9 ГГц

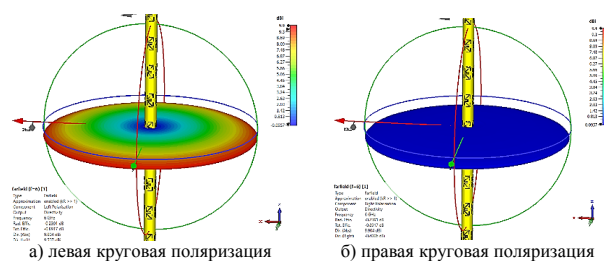


Рис. 5. Диаграммы направленности, разработанной ММО-антенны на частоте 6.0 ГГц

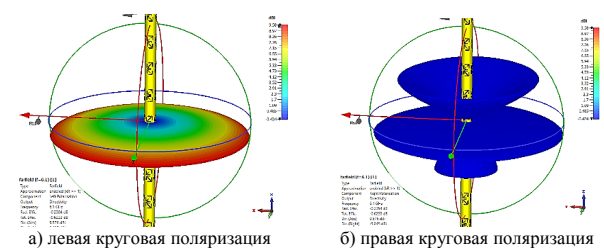


Рис. 6. Диаграммы направленности, разработанной ММО-антенны на частоте 6.1 ГГц

На частоте 5.9 ГГц наблюдается ярко выраженная асимметрия характеристик излучения для разных поляризаций. Так, при возбуждении первого входа в режиме левой круговой поляризации достигается максимальное усиление 8.791



дБ. При этом для правой круговой поляризации усиление существенно ниже и составляет всего 0.1431 дБ. При этом при использовании для запитки второго порта будет обратная ситуация – прием правополяризованных волн с высоким уровнем усиления и изоляция левополяризованных, что повышает универсальность разработанной антенны при работе в ММО-режиме благодаря возможности поляризационной изоляции портов. Аналогичные характеристики сохраняются во всем исследуемом диапазоне рабочих частот, что подтверждается рис. 5-6.

Важной особенностью разработанной антенной системы является стабильность характеристик излучения во всем рабочем диапазоне частот. Несмотря на некоторые вариации максимального усиления (от 6.7 до 9.5 дБ), сохраняется высокая эффективность излучения (не ниже -0.3 дБ) и изоляция поляризаций. Тороидальная форма диаграммы направленности обеспечивает равномерное покрытие в азимутальной плоскости, что особенно важно для применения в системах связи с БПЛА при установке на высокомобильный носитель. Помимо высокого уровня коэффициента направленного действия (КНД) антенны благодаря формированию тороидальной формы диаграммы направленности удастся сформировать узкий луч, так ширина главного лепестка по уровню половинной мощности во всем диапазоне рабочих частот не превышает 12 градусов, а уровень боковых лепестков не более -10 дБ. Такое подавление паразитного излучения в побочных направлениях способствует минимизации влияния многолучевого распространения и повышает помехоустойчивость системы связи в целом. Наблюдаемая диаграмма направленности оптимально соответствует требованиям применения в системах управления БПЛА, где критически важны как высокое усиление в основном направлении, так и подавление нежелательных переотражений, при этом позволяет применять два БПЛА на одной частоте с изоляцией между собой на основе приема разнополяризованных волн.

Полученные характеристики позволяют реализовать надежный канал связи с БПЛА при относительно небольших габаритах антенной системы. Узкая диаграмма направленности в угло-местной плоскости в сочетании с тороидальной формой в азимутальной плоскости обеспечивает оптимальное покрытие рабочей зоны и высокую энергетическую эффективность радиолинии, при этом возможность регулировки ширины диаграммы направленности

(до значений, превышающих  $10^\circ$ ) позволяет адаптировать характеристики антенной системы под конкретные условия применения и требования к зоне обслуживания.

### Заключение

В результате проведенного исследования разработана и детально исследована ММО-антенная система с тороидальной диаграммой направленности, предназначенная для организации помехоустойчивых каналов связи с БПЛА. Антенная система, выполненная на основе коаксиального волновода с заполнением из полистирола, обеспечивает работу в частотном диапазоне 5.95-6.2 ГГц с возможностью формирования двух ортогональных круговых поляризаций.

Проведенное комплексное электродинамическое моделирование в CST Studio Suite позволило подтвердить высокую эффективность предложенного технического решения. Достигнутый коэффициент усиления составляет до 9.5 дБ в оптимальном режиме работы при эффективности излучения не ниже -0.3 дБ во всем рабочем диапазоне. Ширина диаграммы направленности в угло-местной плоскости составляет  $9.7^\circ$  при уровне боковых лепестков -11.1 дБ, что обеспечивает эффективную пространственную селекцию сигналов.

Особое внимание при разработке было уделено обеспечению эффективной работы антенны в режиме ММО. Достигнутая развязка между входами в сочетании с ортогональностью поляризаций обеспечивает возможность создания независимых каналов передачи данных с высокой помехоустойчивостью к многолучевому распространению. Конструктивное исполнение антенной системы с возможностью замены внутреннего проводника на коаксиальный кабель существенно упрощает её практическое применение.

Компактные размеры (длина 298.6 мм, диаметр 12.2 мм) и малая парусность делают разработанную антенную систему оптимальным решением для установки на БПЛА. При этом возможность использования от одной до четырех антенн позволяет гибко масштабировать систему связи, получая от 2 до 8 независимых ММО-каналов. Дополнительным преимуществом является возможность плавной регулировки линейной поляризации излучения при одновременной запитке двух входов с управляемым фазовым сдвигом.



### Литература

1. Zhang Z., Gui G., Liang Y.  $\ell_{1/2}$ -Regularization Based Sparse Channel Estimation for MmWave Massive MIMO Systems // 2018 IEEE International Conference on Communications (ICC). Kansas City, MO, USA. 2018. pp. 1-6.
2. Ali A., de Carvalho E., Heath Jr. R.W. Linear Receivers in Non-stationary Massive MIMO Channels with Visibility Regions // IEEE Wireless Communications Letters. 2019. pp. 885-888.
3. Brookner E. MIMO Radar for Automobiles // 2019 IEEE International Symposium on Phased Array Systems & Technology (ARRAY). Boston, MA, USA, 14-18 октября 2019. 8 P.
4. On the Performance of MIMO-NOMA-Based Visible Light Communication Systems / C. Chen, W.-D. Zhong, H. Yang, P. Du // IEEE Photonics Technology Letters. 2018. Vol. 30. № 4. P. 307-310.
5. Performance Analysis of the Singular Value Decomposition with Block-Diagonalization Precoding in Multi-User Massive MIMO Systems / V.-F. Crășmariu, M.-O. Arvinte, A.-A. Enescu, S. Ciochină // 2016 IEEE International Conference on Communications. Bucharest, Romania, 2016. 4 P.
6. Kalachikov A.A., Shelkunov N.S. Performance Evaluation Of The Detection Algorithms For MIMO Spatial Multiplexing Based On Analytical Wireless MIMO Channel Models // XIV Международная научно-техническая конференция АПЭП-2018 (APEIE). Новосибирск, 2018. С. 180-183.
7. Optimal Uplink Channel Estimation Algorithm for OFDM Based MmWave Massive MIMO Systems / M. Hajjaj, A. Mejri, R. Bouallegue, S. Hasnaoui // 2018 IEEE Symposium on Computers and Communications (ISCC). Natal, Brazil, 2018. P. 796-800.
8. Ibrahim A.A., Abdalla M.A., Volakis J.L. 4 Elements UWB MIMO Antenna for Wireless Applications // 2017 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation & USNC/URSI National Radio Science Meeting (AP-S). San Diego, CA, USA, 2017. pp. 1651-1652.
9. Deep Learning Water-Filling for Single-User MIMO and MIMO-MAC Transmission / S. Wang [et al.] // 2019 IEEE 5th International Conference on Computer and Communications (ICCC). Чэнду, Китай, 2019. С. 2044-2049.

Поступила 20.11.2024; принята к публикации 10.02.2025

### Информация об авторах

**Егорова Евгения Дмитриевна** – студент кафедры радиоэлектронных устройств и систем, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: evgenia\_egorova23@mail.ru

**Ищенко Евгений Алексеевич** – аспирант, инженер кафедры радиоэлектронных устройств и систем, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: kursk1998@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5270-0792>

**Пастернак Юрий Геннадьевич** – д-р техн. наук, профессор кафедры радиоэлектронных устройств и систем, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: pasternakyg@mail.ru

**Проскурин Дмитрий Константинович** – канд. физ.-мат. наук, ректор, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: rector@cchgeu.ru

**Фёдоров Сергей Михайлович** – канд. техн. наук, доцент кафедры радиоэлектронных устройств и систем, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84); доцент кафедры информационной безопасности и систем связи, Международный институт компьютерных технологий (394026, Россия, г. Воронеж, ул. Солнечная, д. 296), e-mail: fedorov\_sm@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9027-6163>

## DEVELOPMENT OF A MIMO ANTENNA SYSTEM WITH A TOROIDAL RADIATOR PATTERN FOR INTERFERENCE-RELIABLE CHANNELS

E.D. Egorova<sup>1</sup>, E.A. Ishchenko<sup>1</sup>, Yu.G. Pasternak<sup>1</sup>, D.K. Proskurin<sup>1</sup>, S.M. Fedorov<sup>1,2</sup>

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

<sup>2</sup>International Institute of Computer Technologies, Voronezh, Russia

**Abstract:** the article presents the results of development and study of MIMO antenna system with toroidal radiation pattern for communication systems with unmanned aerial vehicles. The design of antenna based on coaxial waveguide with polystyrene filling is described, providing operation in the frequency range of 5.95-6.2 GHz with the possibility of forming two orthogonal circular polarizations. The results of electrodynamic modeling of the main characteristics of the antenna system are presented, including S-parameters, radiation efficiency, voltage standing wave ratio and radiation patterns. It is shown that the developed antenna provides a gain of up to 9.5 dB with a radiation efficiency of no worse than -0.3 dB in the entire range of operating frequencies. The features of radiation pattern formation for various operating modes and frequencies are analyzed. Particular attention is paid to the analysis of the antenna characteristics in the angular plane, where the width of the main lobe of 9.7° is achieved with a side lobe level of -11.1 dB. The possibility of effective channel separation in the MIMO system by using orthogonal circular polarizations is demonstrated. The proposed technical solution ensures high noise immunity of the communication channel under conditions of multipath propagation of radio waves with minimal weight and size characteristics of the antenna system

**Key words:** MIMO antenna, toroidal radiation pattern, circular polarization, waveguide slot antenna, coaxial waveguide, multipath propagation

**Acknowledgments:** the work was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (project No. FZGM-2024-0006)

#### References

1. Zhang Z., Gui G., Liang Y. “ $\ell_1/2$ -Regularization Based Sparse Channel Estimation for MmWave Massive MIMO Systems”, *2018 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, Kansas City, MO, USA, 2018, pp. 1-6.
2. Ali A., de Carvalho E., Heath Jr. R.W. “Linear Receivers in Non-stationary Massive MIMO Channels with Visibility Regions”, *IEEE Wireless Communications Letters*, 2019, pp. 885-888.
3. Brookner E. “MIMO Radar for Automobiles”, *2019 IEEE International Symposium on Phased Array Systems & Technology (ARRAY)*, Boston, MA, USA, October 14-18, 2019, 8 p.
4. Chen C., Zhong W.-D., Yang H., Du P. “On the Performance of MIMO-NOMA-Based Visible Light Communication Systems”, *IEEE Photonics Technology Letters*, 2018, vol. 30, no. 4, pp. 307-310.
5. Crăsmariu V.-F., Arvinte M.-O., Enescu A.-A., Ciochină S. “Performance Analysis of the Singular Value Decomposition with Block-Diagonalization Precoding in Multi-User Massive MIMO Systems”, *2016 IEEE International Conference on Communications*, Bucharest, Romania, 2016, 4 p.
6. Kalachikov A.A., Shelkunov N.S. “Performance Evaluation Of The Detection Algorithms For MIMO Spatial Multiplexing Based On Analytical Wireless MIMO Channel Models”, *XIV International Scientific and Technical Conference APEP-2018 (APEIE)*, Novosibirsk, 2018, pp. 180-183.
7. Hajjaj M., Mejri A., Bouallegue R., Hasnaoui S. “Optimal Uplink Channel Estimation Algorithm for OFDM Based MmWave Massive MIMO Systems”, *2018 IEEE Symposium on Computers and Communications (ISCC)*, Natal, Brazil, 2018, pp. 796-800.
8. Ibrahim A.A., Abdalla M.A., Volakis J.L. “4 Elements UWB MIMO Antenna for Wireless Applications”, *2017 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation & USNC/URSI National Radio Science Meeting (AP-S)*, San Diego, CA, USA, 2017, pp. 1651-1652.
9. Wang S. et al. “Deep Learning Water-Filling for Single-User MIMO and MIMO-MAC Transmission”, *2019 IEEE 5th International Conference on Computer and Communications (ICCC)*, Chengdu, China, 2019, pp. 2044-2049.

Submitted 20.11.2024; revised 10.02.2025

#### Information about authors

**Evgeniya D. Egorova** – Student, Department of Radioelectronic Devices and Systems, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: [evgenia\\_egorova23@mail.ru](mailto:evgenia_egorova23@mail.ru)

**Evgeny A. Ishchenko** – Postgraduate student, Engineer, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: [kursk1998@yandex.ru](mailto:kursk1998@yandex.ru), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5270-0792>

**Yuriy G. Pasternak** – Dr. Sc. (Technical), Professor, Department of Radioelectronic Devices and Systems, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: [pas-ternakyg@mail.ru](mailto:pas-ternakyg@mail.ru)

**Dmitry K. Proskurin** – Cand. Sc. (Physical and Mathematical), Rector, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: [rector@cchgeu.ru](mailto:rector@cchgeu.ru)

**Sergey M. Fedorov** – Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Department of Radioelectronic Devices and Systems, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia); Associate Professor of the Department of Information Security and Communication Systems, International Institute of Computer Technologies (29b Solnechnaya str., Voronezh 394026, Russia), e-mail: [fedorov\\_sm@mail.ru](mailto:fedorov_sm@mail.ru), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9027-6163>

## LDPC-ДЕКОДЕР НА БАЗЕ ПЛИС СО СВЕРХДЛИННЫМИ КОДАМИ

И.В. Свиридова, И.В. Остроумов, О.Н. Чирков

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

**Аннотация:** представлена архитектура декодера, которая характеризуется высокой производительностью, низкой сложностью и высокой скоростью работы для сверхдлинных квазициклических LDPC-кодов. Описывается архитектура и работа LDPC-декодера, реализованного на программируемой логической интегральной схеме (ПЛИС). Особое внимание уделяется структуре считывания и записи данных в процессе итеративного декодирования, где для адресации памяти PCM (Phase Change Materials, фазопереходные материалы) используется простой счетчик, а параллельный ввод-вывод управляется таблицей поиска. Подробно рассмотрен механизм чтения и записи, с акцентом на их переупорядочивание перед обработкой в NPU (Node Processing Units). Описан модуль принятия решения, проверяющий успешность декодирования путем сравнения рассчитанного синдрома с полученным, а также модуль, генерирующий выходные биты на основе знаковых. Приведены результаты моделирования, демонстрирующие производительность декодера через параметры битовой ошибки (BER), среднее количество итераций, пропускную способность и потребление ресурсов. Показано, что производительность алгоритма суммы-произведения (SPA) превосходит алгоритм минимальной суммы (MSA), хотя MSA имеет меньшую сложность. Отмечена зависимость среднего количества итераций от отношения сигнал/шум (SNR), а также незначительное влияние числовых схем с фиксированной запятой на этот параметр. Результаты показывают достижение низких значений SNR для успешного декодирования за счет сверхдлинной длины кода и низкой скорости кодирования. Представленная архитектура декодера обладает хорошей производительностью при отношении сигнал/шум (SNR), достигающем -0,6 дБ

**Ключевые слова:** декодер с низкой плотностью проверки на четность (LDPC), сверхдлинные коды, алгоритм минимальной суммы

### Введение

ПЛИС (программируемая логическая интегральная схема) — это микросхема, логическая структура которой может быть запрограммирована пользователем после её изготовления. Это означает, что вы можете настроить внутреннюю схему ПЛИС для выполнения конкретных задач, что делает их очень гибкими и мощными инструментами в электронике. ПЛИС — это мощный и гибкий инструмент для разработки электронных устройств. Их программируемая природа делает их очень привлекательными для прототипирования, быстрой разработки и приложений, где требуется адаптация и гибкость. Они играют важную роль во многих современных технологиях и продолжают развиваться, предоставляя еще большую производительность и функциональность.

Существует два основных типа ПЛИС, различающихся по архитектуре и способу программирования:

1) FPGA (Field-Programmable Gate Array) — самый распространенный тип, основанный на матрице логических элементов, соединенных настраиваемыми соединениями.

Обладает высокой гибкостью и производительностью.

2) CPLD (Complex Programmable Logic Device) — обладает более простой архитектурой, чем у FPGA. Обычно используется для менее сложных задач, таких как логические контроллеры и интерфейсы.

LDPC (Low-Density Parity-Check)-декодеры, реализованные на ПЛИС, играют ключевую роль во многих современных системах связи и хранения данных. Их применение обусловлено способностью LDPC-кодов обеспечивать высокую эффективность при исправлении ошибок, что крайне важно для надежной передачи и хранения информации.

Для реализации LDPC-декодера на ПЛИС требуется выбрать: алгоритм декодирования; архитектуру декодера; баланс потребления ресурсов [1].

Выбор алгоритма декодирования: существует несколько алгоритмов декодирования LDPC, таких как алгоритм суммы-произведения (SPA), алгоритм минимальной суммы (MSA) и его варианты [1]. Выбор конкретного алгоритма зависит от требуемой производительности, сложности реализации и энергопотребления.

Архитектура декодера: разработка эффективной архитектуры декодера на ПЛИС требу-

ет оптимизации таких параметров, как параллелизм обработки, распределение памяти и управление потоком данных.

Оптимизация ресурсов ПЛИС: необходимо эффективно использовать логические элементы, память и DSP-блоки ПЛИС для достижения максимальной производительности и минимального потребления энергии.

Перед разработчиками стоит задача найти оптимальный баланс между пропускной способностью и потреблением ресурсов.

Следует обратить внимание, что существующие декодеры на основе ПЛИС не всегда могут удовлетворить потребности специальных приложений, например, согласование информации в системах квантового распределения ключей с непрерывной переменной (CV QKD). Это критически важный этап постобработки, который следует за квантовой передачей сигнала и до извлечения окончательного общего секретного ключа. Его цель — скорректировать ошибки, возникшие при передаче квантового сигнала по открытому каналу, и превратить некогерентную общую информацию в общую когерентную битовую последовательность.

В отличие от дискретных переменных, где информация кодируется в дискретных состояниях поляризации фотона, в CV QKD используются непрерывные переменные, такие как амплитуда и фаза световой волны. Это делает процесс квантовой передачи и согласования информации несколько более сложным и требующим применения иных математических подходов [2].

### Алгоритмы декодирования LDPC

Для улучшения характеристик декодеров LDPC можно использовать фазопереходные материалы (PCM, Phase Change Materials), которые относятся к способам и методам проектирования, изготовления и интеграции материалов, способных менять свое агрегатное состояние (фазу), в различных устройствах и системах для накопления и управления тепловой энергией. Эти материалы играют ключевую роль в терморегулировании и энергосбережении. Алгоритмы декодирования LDPC, особенно алгоритмы суммы-произведения (Sum-Product Algorithm), требуют больших вычислительных ресурсов. Некоторые конструкции с использованием PCM могут помочь ускорить эти вычисления, но это связано с дополнительной сложностью реализации. На-

пример, специализированные микросхемы, основанные на PCM, могут быть настроены для реализации отдельных этапов алгоритма декодирования с целью ускорения.

Целью построения PCM является определение связи между переменными узлами и проверочными узлами, которая называется «ребром». PCM могут быть представлены в виде факторного графа или матрицы, как показано на рис. 1, эти два представления эквивалентны. Были предложены некоторые методы размещения ребер. Коды, созданные случайным образом, потенциально обеспечивают более высокую производительность декодирования благодаря максимальной степени свободы, которую они предоставляют.

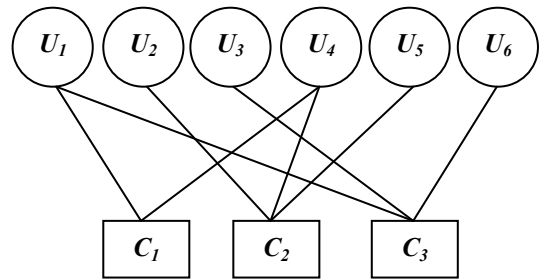


Рис. 1. Факторный граф для кода LDPC

Каждая подматрица имеет свой коэффициент смещения, и все единичные коэффициенты смещения образуют матрицу смещения. На рис. 2 представлен PCM-код LDPC, базовая матрица  $H_b$  и матрица смещения  $Q$  которого задаются формулами (1) и (2) соответственно.

$$H_b = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$Q = \begin{bmatrix} 0 & - & - & 1 & - & - \\ - & 1 & - & 2 & 0 & - \\ 2 & - & 0 & - & - & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$H = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

Рис. 2. Расширенный PCM с конструкцией контроля качества

Для построения базовой матрицы используется алгоритм случайного построения или



привязки, а затем используется метод контроля качества для расширения РСМ. Согласно характеристикам чтения и записи, данных ПЛИС, при построении базовой матрицы добавляется ограничивающее условие, то есть интервал между двумя соседними ненулевыми элементами в базовой матрице должен быть достаточно большим. Поскольку обработчик строк и обработчик столбцов работают совместно, строки, которые пересекаются (в одном и том же столбце есть ненулевые элементы), не могут быть обработаны одновременно. Кроме того, поскольку результаты обработки будут рассчитаны через несколько тактов, пересекающиеся строки следует обрабатывать последовательно с интервалом в несколько тактов. Чтобы повысить степень параллельности, код должен быть специально сконструирован таким образом, чтобы преодолеть это ограничение.

В случае алгоритмов, основанных на мягком принятии решений, таких как min-sum алгоритм, входными данными декодера являются вероятности каналов, представленные в виде логарифмического отношения, которое также известно, как логарифмическое отношение правдоподобия. В целом, алгоритм распространения доверия имеет наилучшую частоту ошибок. Хотя он был наименее предпочтителен для аппаратной реализации из-за своей вычислительной сложности. Для получения наилучшей производительности декодирования, что имеет решающее значение для согласования информации в CV QKD, используется алгоритм распространения доверия.

Для повышения эффективности декодирования LDPC-кодов будем использовать алгоритм SI-LBP (Sum-Product with Iterative Learning Based Pre-processing), предназначен для ускорения и повышения эффективности декодирования LDPC-кодов на основе ПЛИС. Он представляет собой модификацию классического алгоритма суммы-произведения (Sum-Product Algorithm), дополненную предварительной обработкой, основанной на обучении [3].

Основная идея SI-LBP заключается в оптимизации процесса декодирования при прогнозировании вероятностных значений (называемых логарифмическими вероятностями) на ранних итерациях. Это достигается с помощью предварительной обработки, обученной на большом объеме данных. Предварительная обработка позволяет уменьшить количество итераций, необходимых для достижения заданного уровня корректировки ошибок, и, как следст-

вие, уменьшить временные затраты декодирования.

### Архитектура LDPC-декодера на базе ПЛИС

Предлагаемая архитектура LDPC-декодера на базе ПЛИС Xilinx основана на алгоритме SI-LBP. Архитектура представляет собой основу для декодера, способного декодировать любые коды LDPC.

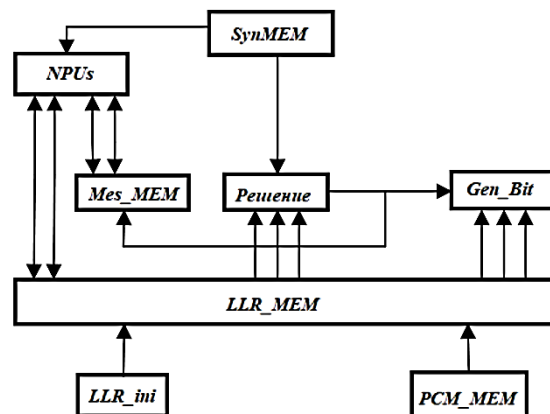


Рис. 3. Логическая структура предлагаемого LDPC-декодера на основе ПЛИС

На рис. 3 показана общая архитектура предлагаемого LDPC-декодера на основе ПЛИС. Декодер состоит из четырех типов памяти: PCM\_MEM, LLR\_MEM, Mes\_MEM и Syn\_MEM.

1) PCM\_MEM (Parity Check Matrix Memory) — это память, в которой хранится информация о матрице проверки на чётность LDPC-кода. Эта матрица задаёт связи между переменными и проверочными узлами графа, используемого для декодирования. В этой памяти хранится, как правило, разреженная матрица (матрица с небольшим количеством ненулевых элементов).

2) LLR\_MEM (Log-Likelihood Ratio Memory) — это память, в которой хранятся значения логарифмических отношений правдоподобия для каждого бита полученного кодового слова. Эти значения обновляются на каждой итерации алгоритма SPA [4]. На самом начальном этапе (до итераций декодирования) эта память инициализируется на основе данных, полученных из канала передачи.

3) Mes\_MEM (Message Memory) — это память, которая хранит сообщения, передаваемые между узлами переменной и проверочными узлами графа LDPC. В процессе итераций SPA узлы вычисляют и обновляют эти со-





## Моделирование

Производительность декодера может быть охарактеризована четырьмя важными параметрами: частотой ошибок в битах (BER), средним числом итераций, пропускной способностью и потреблением аппаратных ресурсов. Для сверхдлинного LDPC-декодера на базе ПЛИС ключевым фактором, ограничивающим производительность, является встроенный в ПЛИС источник памяти.

Высокая пропускная способность является ключевым преимуществом LDPC-декодеров, реализуемых с помощью устройства ПЛИС.

На рис. 5 показаны зависимости битовых ошибок BERs от отношения сигнал/шум SNR для алгоритма суммы-произведения SPA и MSA (Shifted Minimum Sum Algorithm — смещенный алгоритм минимальной суммы). Исходя из BERs и минимального значения SNR для успешного декодирования, можно видеть, что производительность декодирования, достигаемая SPA, выше, чем при смещенном MSA.

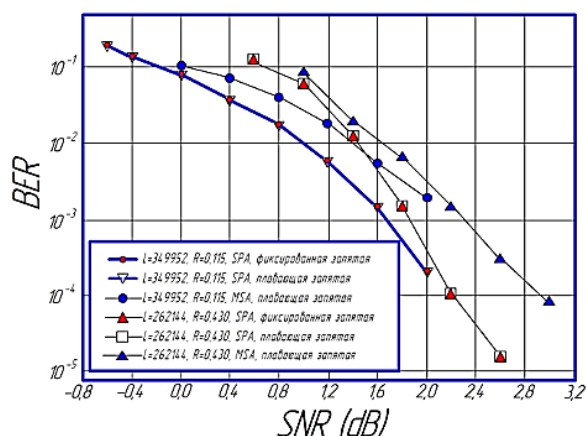


Рис. 5. Сравнение BER между MSA и SPA.

Среднее число итераций уменьшается с увеличением SNR (рис. 6). Результаты моделирования показывают, что числовые схемы с фиксированной запятой слабо влияют на среднее число итераций. Следовательно, влиянием числовых схем с фиксированной запятой на пропускную способность можно пренебречь.

Для повышения гибкости декодера можно использовать более крупные BRAM для адаптации к различным PCM. Результаты, полученные на основе ПЛИС, показывают, что минимальное значение SNR для успешного декодирования двух PCM может достигать 0,6 дБ и -0,6 дБ соответственно.

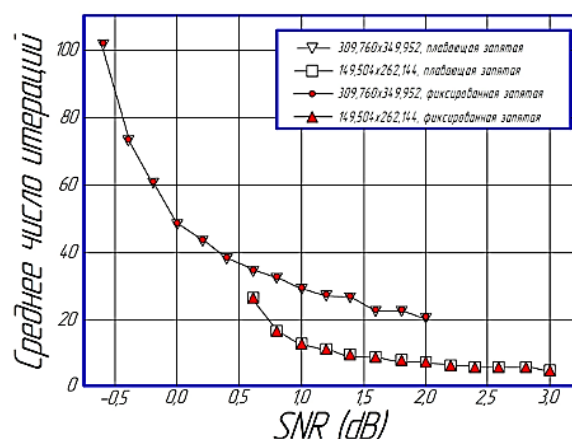


Рис. 6. Среднее число итераций для LDPC-кодов от SNR

Производительность декодирования, которая может достигать таких низких значений SNR, обусловлена сверхдлинной длиной кода и низкой скоростью кодирования.

## Заключение

Разработан LDPC-декодер на базе ПЛИС с использованием алгоритма SI-LBP, который позволяет достичь наилучшего соотношения между производительностью декодирования и сложностью реализации. Для экономии ресурсов памяти и снижения сложности реализации используется единая схема квантования. Предлагаемый LDPC-декодер со сверхдлинной длиной кода обладает хорошей производительностью декодирования и пропускной способностью при SNR всего лишь -0,6 дБ. Декодер с данной производительностью может быть легко применен для согласования информации в системах квантового распределения ключей с непрерывной переменной, а также может найти потенциальное применение в другой области связи.

## Литература

1. Верификация LDPC-кодов / Н.В. Астахов, А.В. Башкиров, А.С. Костюков [и др.] // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2017. Т. 13. № 1. С. 74-77.
2. Чирков О.Н. Оценка пропускной способности высокоуровневых видов модуляции m-qam // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2012. Т. 8. № 6. С. 12-13.
3. Низкоплотностные коды малой мощности декодирования / А.В. Башкиров, А.В. Муратов, М.В. Хоршайлова [и др.] // Радиотехника. 2016. № 5. С. 32-37.
4. Свиридова И.В. Сравнение сложности аппаратной реализации и исправляющей способности стохастических декодеров с памятью отслеживания прогнозов (TFM) и внешней памятью (ЕМ) // Вестник Воронежско-

го государственного технического университета. 2018. Т. 14. № 3. С. 120-124.

5. 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.

6. Хорошайлова М.В. Архитектура для стохастических LPPC-декодеров с использованием эффективной площади кристалла на основе ПЛИС // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2018. Т. 14. № 1. С. 95-100.

Поступила 24.12.2024; принята к публикации 17.02.2025

#### Информация об авторах

**Свиридова Ирина Владимировна** – старший преподаватель, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: ri-ss-ka@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5279-0807>

**Остроумов Иван Владимирович** – канд. техн. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет, (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: vanik07@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2796-2886>

**Чирков Олег Николаевич** – старший преподаватель, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: chir\_oleg@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2250-2100>

### LDPC-FPGA-BASED DECODER WITH ULTRA-LONG CODES

I.V. Sviridova, I.V. Ostroumov, O.N. Chirkov

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

**Abstract:** the decoder architecture is presented, which is characterized by high performance, low complexity and high speed for ultra-long quasi-cyclic LDPC codes. The architecture and operation of an LDPC decoder implemented on an FPGA are described. Special attention is paid to the structure of reading and writing data in the process of iterative decoding, where a simple counter is used to address PCM memory (Phase Change Materials, phase transition materials), and parallel I/O is controlled by a lookup table. The mechanism of reading and writing is considered in detail, with an emphasis on their reordering before processing in NPU (Node Processing Units). A decision-making module is described that checks the success of decoding by comparing the calculated syndrome with the received one, as well as a module that generates output bits based on signed ones. Simulation results are presented demonstrating decoder performance through bit error (BER) parameters, average number of iterations, bandwidth and resource consumption. It is shown that the performance of the sum-product algorithm (SPA) is superior to that of the minimum sum algorithm (MSA), although MSA has less complexity. The dependence of the average number of iterations on the signal-to-noise ratio (SNR) is noted, as well as the insignificant influence of fixed-point numerical schemes on this parameter. The results show the achievement of low SNR values for successful decoding due to the extremely long code length and low encoding speed. The presented decoder architecture has good performance with a signal-to-noise ratio (SNR) reaching -0.6 dB

**Key words:** low-density parity check decoder (LDPC), ultra-long codes, minimum sum algorithm

#### References

1. Astakhov N.V., Bashkirov A.V., Kostyukov A.S. et al. "Verification of LDPC codes", *The Bulletin of Voronezh State Technical University*, 2017, vol. 13, no. 1, pp. 74-77.
2. Chirkov O.N. "Evaluation of the throughput of high-level types of m-qam modulation", *The Bulletin of Voronezh State Technical University*, 2012, vol. 8, no. 6, pp. 12-13.
3. Bashkirov A.V., Muratov A.V., Khoroshailova M.V. et al. "Low-density codes of low decoding power", *Radio engineering*, 2016, no. 5, pp. 32-37.
4. Sviridova I.V. "Comparison of the complexity of hardware implementation and the correcting ability of stochastic decoders with tracking forecast memory (TFM) and external memory (EM)", *The Bulletin of Voronezh State Technical University*, 2018, vol. 14, no. 3, pp. 120-124.
5. Khoroshailova M.V. "Channel coding architecture based on FPGA for 5G wireless network using high-level synthesis", *The Bulletin of Voronezh State Technical University*, 2018, vol. 14, no. 2, pp. 99-105.
6. Khoroshailova M.V. "Architecture for stochastic LPPC decoders using effective crystal area based on FPGA", *The Bulletin of Voronezh State Technical University*, 2018, vol. 14, no. 1, pp. 95-100.

Submitted 24.12.2024; revised 17.02.2025

#### Information about authors

**Irina V. Sviridova** – Senior Lecturer, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: ri-ss-ka@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5279-0807>

**Ivan V. Ostroumov** – Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: vanik07@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2796-2886>

**Oleg N. Chirkov** – Senior Lecturer, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: chir\_oleg@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2250-2100>

## СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВЫЯВЛЕНИЯ ОНКОЛОГИЧЕСКИХ НОВОООБРАЗОВАНИЙ МОЛОЧНОЙ ЖЕЛЕЗЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ АНТЕНН

Е.А. Ищенко, А.И. Сукачев, Р.В. Кузьменко, Е.Д. Егорова

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

**Аннотация:** рассматривается эффективность выявления онкологических новообразований молочной железы путем использования электродинамического метода. Применение такого метода возможно благодаря изменению диэлектрических характеристик тканей ввиду изменения характеристик клеток. При исследовании производилось сравнение эффективности выявления для наиболее простых в реализации антенн: рупорных антенн, антенн Вивальди, планарных двухслойных патч-антенн. Основным требованием к антеннам, которые используются для применения такого метода, является обеспечение широкополосности для минимизации ложных характеристик. Показано, что использование электродинамического метода позволяет выявить новообразование путем измерения  $S_{21}$ -параметров, характеристик сигнала на приемной стороне, а также построение Фурье-спектров на приемной стороне. Проводится исследование как во временной, так и в частотной областях. Показано, что развитие электродинамического метода выявления новообразований позволяет обеспечить выявление заболевания более дешевым и безопасным методом по сравнению с магнитной резонансной томографией (МРТ) и спиральной компьютерной томографией (СКТ), которые связаны с облучением пациента, или высоким уровнем магнитного поля или путем применения рентгеновских лучей высокой интенсивности. Показана зависимость характеристик измерения поля от типов антенны. Полученные результаты проиллюстрированы зависимостями характеристик поля от типов используемых антенн при выявлении новообразования в структурах тканей

**Ключевые слова:** электродинамический метод, диэлектрические характеристики, рупорная антенна, антенна Вивальди, планарная патч-антенна

### Введение

Рак молочной железы по данным Всемирной организации здравоохранения является самым распространенным злокачественным заболеванием, так в 2020 году было выявлено более 2.2 миллиона случаев заболевания. Особо важной задачей в лечении и эффективной борьбе с заболеванием является выявление на ранних стадиях, когда опухолевый объект располагается на месте без инвазивного роста в тканях. При этом из-за выявления на поздних стадиях заболевания имеется высокий риск гибели пациента ввиду особенностей метастазирования заболевания на рядом расположенные органы. В 2020 году от рака молочной железы скончалось порядка 685 000 пациентов. Особенно стоит отметить, что смертность от данного заболевания коррелируется с уровнем дохода и уровнем жизни в государствах [1, 2]. Такая зависимость может быть объяснена недоступностью дорогостоящего медицинского обследования, но на основе многих научных исследований известно, что любые онкологические ткани приводят к серьезному изменению ди-

электрических характеристик тканей, что подтверждается работами [3-5].

На основе информации о такой особенности онкологических тканей становится возможным предложить метод выявления заболевания на основе электромагнитных радиоволн, которые при прохождении через ткани тела человека покажут малейшие аномальные значения в распространении радиоволн через ткани тела человека. Как было показано авторами в работе [6], при использовании сигналов с гауссовской огибающей возможно также избежать «ложного» затемнения и ошибочной реакции на заболевание, при этом электромагнитное излучение является намного более безопасным по сравнению с рентгеновским.

Исследования по попытке выявления онкологических заболеваний на основе распространения электромагнитных волн являются актуальной задачей, так как это позволит снизить стоимость и сделать обследование намного более доступным для человека. В работах [7, 8] авторами приводится технология выявления опухолей в головном мозге на основе системы из антенн Вивальди, в которых производится прием отраженных от тканей сигналов, ввиду различных диэлектрических характеристик способных показать наличие онкологического новообразования в тканях. Но у такого метода



имеются недостатки, так как обнаружение на основе отраженных сигналов не позволит выявить опухоли, находящиеся в глубоких слоях тканей. В работе [9] предлагается метод выявления онкологического заболевания в молочной железе на основе отраженных электромагнитных волн путем поступательного сканирования антенной вокруг органа. Недостатком является то, что изменения являются незначительными, следовательно обнаружение затрудняется.

В данной работе предлагается алгоритм, который основывается на формировании канала передачи из двух антенн, на основе чего становится возможным выявление новообразования в здоровых тканях, но из-за особенностей формы и тканей в молочной железе важной задачей является выбор антенного элемента, который позволит наиболее чувствительно определить новообразование.

### Исследуемая модель

В исследуемой модели определяются основные ткани тела человека – рис. 1.

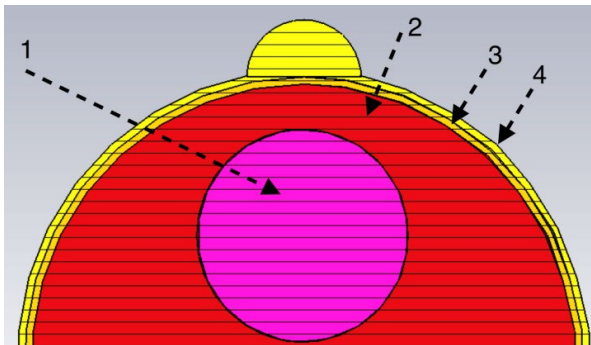


Рис. 1. Ткани тела человека в модели: 1) онкологическая ткань (опухоль); 2) фибро-гранулярная ткань; 3) жировая прослойка; 4) слой кожи

Для того, чтобы определить эффективность выявления новообразований разными антеннами были определены следующие размеры: толщина слоя кожи – 0.5 мм; толщина жировой прослойки – 0.5 мм; толщина фибро-гранулярной ткани – 38 мм; опухоль представляет собой сферу с радиусом 7.5 мм, что должно позволить упростить выявление опухоли для ситуации, когда она присутствует. Так как ткани человека явно отличаются друг от друга по диэлектрическим параметрам, в процессе моделирования использовались следующие модели тканей – табл. 1.

Таблица 1

### Диэлектрические характеристики тканей

Тип тканей	$\epsilon_r$	$\delta$ (f, ГГц)
Кожа (эпителий)	17.7	0.93 (33)
Жировая ткань	3.4	0.16 (33)
Фибро-гранулярная ткань	16	0.94 (33)
Опухоль	32	1.05 (33)

Как видно из моделей ткани, опухоль обладает намного большей диэлектрической проницаемостью по сравнению с окружающими тканями, а также большим тангенсом угла потерь. В процессе исследования ткани тела будут облучаться системой из двух антенн, которые формируют канал передачи. Рассматривались три типа антенн: пирамидальный рупор, антенна Вивальди, двухслойная планарная патч-антенна. Особенностью всех выбранных антенн является их широкополосность, что позволяет обеспечить сканирование в широком диапазоне частот. Для выявления эффективности методов будут использоваться как характеристики принятых сигналов, так и  $S_{21}$  параметр канала передачи данных.

### Моделирование характеристик выявления опухоли разными антеннами

В процессе исследования возможности выявления новообразований электромагнитным методом особую роль играет выбор антенн. Так, для оценки характеристик проходящих через ткани волн необходимо обеспечить широкополосное сканирование, таким образом, выбранные антенны должны обеспечивать широкий диапазон рабочих частот, при этом обладать высоконаправленным излучением. С точки зрения теории антенн наиболее подходящими теоретически выступают апертурные антенны, например, пирамидальные рупорные, которые в данном случае были разработаны с использованием CST Studio Suite для обеспечения работы в диапазоне частот более 22 ГГц, что позволяет обеспечить малые размеры, при этом минимальное обратное излучение (передне-заднее отношение), однако их изготовление и габаритные размеры не позволяют обеспечить их удачное размещение, особенно с учетом размера раскрыва рупора. Другим вариантом таких антенн выступает печатная рупорная антенна или антенна Вивальди, которая в данном случае выполнялась на Rogers RO4003C, чтобы обеспечить оптимальную работу в диапазоне частот



25 ГГц и более, что позволяет обеспечить малые размеры антенны, а также обеспечить работу в максимально широком диапазоне частот. Дополнительно была сформирована многослойная патч-антенна, которая работает в диапазоне 32-37 ГГц, при этом обладает высокими направленными свойствами. При этом важно отметить, что с точки зрения диапазонов рабочих частот характеристики антенн не так важны, важно лишь чтобы:

1) антенна была миллиметрового диапазона волн – обеспечивала максимальное разрешение при проникновении волн;

2) антенна имела малые размеры, чтобы упростить их размещение;

3) антенна имела направленную диаграмму направленности, чтобы сконцентрировать

излучение на исследуемой области;

4) антенна была максимально широкополосной, чтобы проводить измерения на нескольких частотах, следовательно, снизить ложную ошибку.

В процессе моделирования рассматривались 3 случая, каждый из которых соответствовал миллиметровому диапазону радиоволн (частоты выше 15 ГГц). Рассматривались случаи, когда для выявления использовались рупорные антенны (рис. 2а), антенны Вивальди (рис. 2б) и двухслойные патч-антенны (рис. 2в). Все рассматриваемые антенны обладают малыми размерами, что обеспечивает удобство их использования.

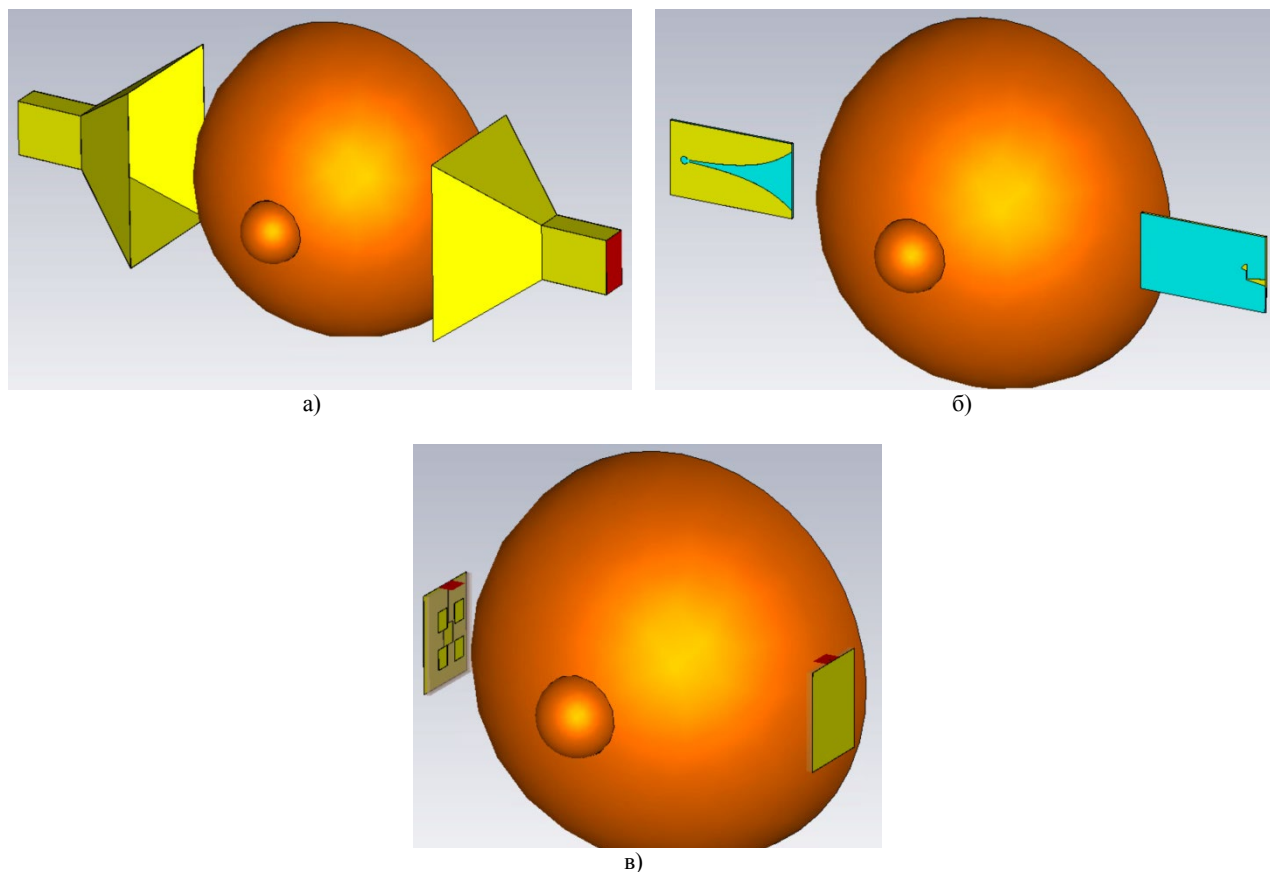


Рис. 2. Исследуемые задачи в процессе моделирования: а) облучение рупорными антеннами; б) облучение антеннами Вивальди; в) облучение двухслойными патч-антеннами

Для исследования характеристик рассматриваемых задач, а также эффективности выявления новообразования в тканях, возможно измерение следующих характеристик: графику  $S_{21}$  (прямой коэффициент передачи по напряжению при нулевом сигнале на выходе); принятому сигналу на приемной антенне, а также его

Фурье-спектру (рис. 3). Для определения влияния новообразования на характеристики канала, а также эффективности выявления рассматривались две задачи: опухоль отсутствовала, в тканях присутствует опухоль в виде сферы радиусом 7.5 мм. Рассмотрим графики  $S_{21}$  для всех рассматриваемых случаев.

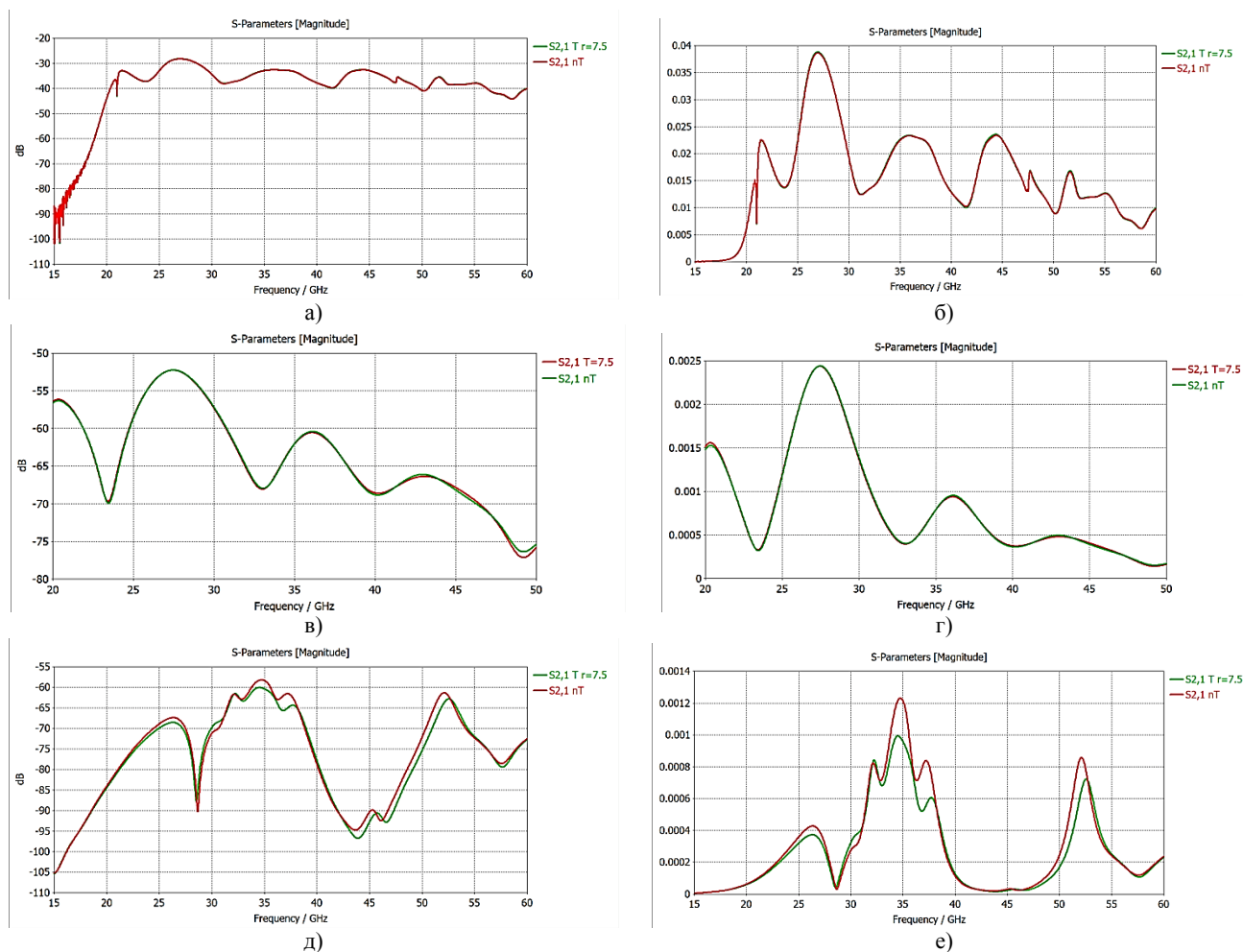


Рис. 3. Графики  $S_{21}$ -параметра для рассматриваемых ситуаций: а) рупорный облучатель логарифмический масштаб; б) рупорный облучатель линейный масштаб; в) антенна Вивальди логарифмический масштаб; г) антенна Вивальди линейный масштаб; д) патч-антенна логарифмический масштаб; е) патч-антенна линейный масштаб

Как видно по полученным результатам, выявление новообразования из-за особенностей формы органа, а также характеристик тканей, затруднено и наиболее оптимально при использовании только патч-излучателя. При этом на полученных зависимостях для патч-антенны

видно, что ткани с новообразованием значительно хуже обеспечивают проникаемость для электромагнитных волн. Максимальные значения данных графиков, а также их отличия приводятся в табл. 2.

Таблица 2

Разница в  $S_{21}$  параметрах для рассмотренных случаев

Тип антенны	$S_{21}$ , дБ		$S_{21}$ , лин.		Разница, %
	Нет опухоли	опухоль	Нет опухоли	опухоль	
Рупорная антенна (26.97 ГГц)	-28.26	-28.22	0.0386	0.0388	0.52
Антенна Вивальди (27.47 ГГц)	-52.25	-52.26	0.002439	0.002437	0.08
Патч-антенна (34.755 ГГц)	-58.19	-60.15	0.0012	0.0009	25

Произведем сравнение характеристик сигналов на приемной стороне, а также их Фурье-спектров, при этом при облучении на вход пе-

редающей антенны передавался сигнал с гауссовской огибающей [6]. Полученные зависимости приводятся на рис. 4.

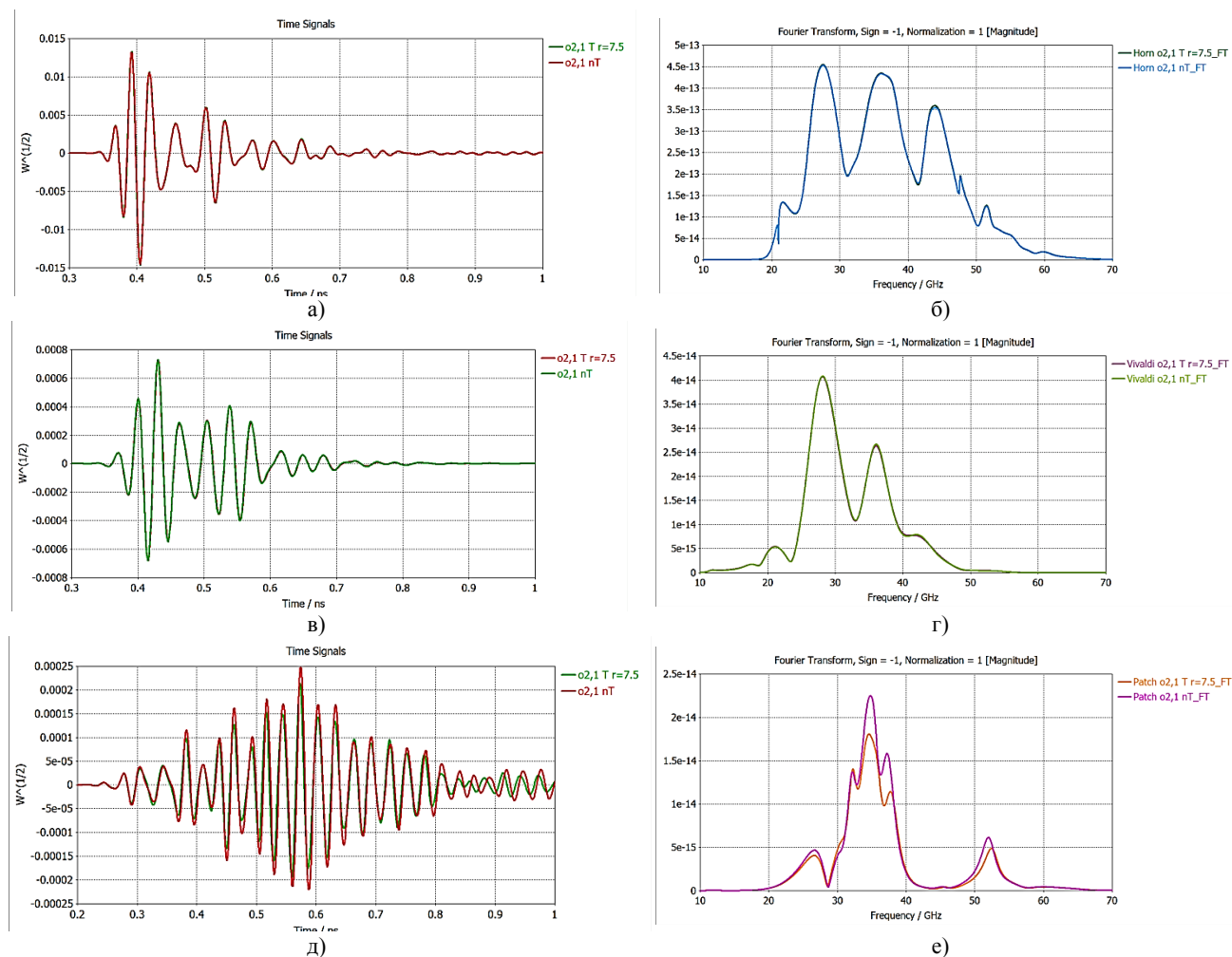


Рис. 4. Графики сигналов для рассматриваемых случаев: а) сигналы на приемной антенне при рупорных антеннах; б) Фурье-спектры принятых сигналов при использовании рупорных антенн; в) сигналы на приемной антенне при использовании антенн Вивальди; г) Фурье-спектры принятых сигналов при использовании антенн Вивальди; д) принятые сигналы при использовании патч-антенн; е) Фурье-спектры сигналов при использовании патч-антенн

Как видно, при использовании патч-антенн удается выявить новообразование наиболее эффективно, что показывается различием амплитуд сигналов на принятой стороне, а также разной высотой Фурье-спектра. Как видно, патч-антенны позволяют обеспечить эффективность выявления новообразований, так как позволяют обеспечить фокусировку электромагнитного излучения через ткани.

### Заключение

Как видно по полученным результатам, для выявления новообразований молочной железы наиболее эффективными являются патч-излучатели, так как они наименее подвержены

влиянию отражений от формы тканей, обеспечивает лучшую фокусировку электромагнитных волн в тканях. Благодаря отличиям в диэлектрической проницаемости изначальной ткани и онкологической возможно выявление на основе характеристик протекающих электромагнитных волн. Применение электродинамического метода выявления онкологических заболеваний позволяет повысить доступность медицинских услуг, а также снизить их вред для человека (по сравнению с компьютерной томографией).

### Литература

1. Wild C.P., Wiederpass E., Stewart B.W. World Cancer Report: Cancer Research for Cancer Prevention. World Health Organization, 2020. 612 p.

2. Defining priority medical devices for cancer management: a WHO initiative/ A.V. Berumen, G.J. Moyao, N.M. Rodriguez, A.M. Ilbawi, A. Migliore, L.N. Shulman // *The Lancet Oncology*. 2018. Vol. 19. Iss. 12. PP. e709-e719.

3. Cheng Y., Fu M. Dielectric properties for non-invasive detection of normal, benign, and malignant breast tissues using microwave theories // *Thorac Cancer*. 2018. Vol. 9, No. 4. PP. 459-465.

4. Dielectric characterization of healthy and malignant colon tissues in the 0.5-18 GHz frequency band / A. Fornes-Leal, C. Garcia-Pardo, M. Frasson, V. Pons Beltrán, N. Cardona // *Phys Med Biol*. 2016. Vol. 61, No. 20. PP. 7334-7346.

5. Permittivity measurements of brain cancer cell towards the electric characterisation of single Cancer Stem Cells / W. Gamal, R. Pinto, M. Tanori, A. Casciati, M. Mancuso, L. Persano, G. Viola, S. Saada, B. Bessette, F. Lalloue, A. Pothier, C. Palego, C. Merla // 1st EMF-Med World Conference on Biomedical Applications of Electromagnetic Fields, 2018, Split, Croatia. 2 p.

6. A comparison between two algorithms for microwave breast cancer detection / S.M. Salvador, G. Vecchi, G. Pagana, C. Cacciato, R. Maggiora, E.A. Attardo // *Union Radio-Scientifique Internationale, URSI*. Paper ID: KBEp8. 2021. 4 p.

7. A smart antenna array for brain cancer detection / H. Zhang, A.O. El-Rayis, N. Haridas, N.H. Noordin, A.T. Erdogan, T. Arslan // 2011 Loughborough Antennas & Propagation Conference. 2011. PP. 1-4.

8. Microwave imaging for brain tumour detection using an UWB Vivaldi Antenna array / H. Zhang, B. Flynn, A.T. Erdogan, T. Arslan // 2012 Loughborough Antennas & Propagation Conference (LAPC). 2012. PP. 1-4.

9. Movement effect on electrical properties of UWB microwave antenna during breast tumor diagnostic scanning / A. Dewiani, E. Amir, E. Palantei, I.S. Areni, A. Achmad // 2015 IEEE Asia Pacific Conference on Wireless and Mobile (APWiMob). 2015. PP. 188-191.

Поступила 02.07.2024; принята к публикации 16.12.2024

#### Информация об авторах

**Ищенко Евгений Алексеевич** – аспирант, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: kursk1998@yandex.ru, ORCID: 0000-0002-5270-0792

**Сукачев Александр Игоревич** – старший преподаватель кафедры радиоэлектронных устройств и систем, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: mag.dip@yandex.ru

**Кузьменко Роман Валентинович** – д-р физ.-мат. наук, доцент, профессор кафедры радиоэлектронных устройств и систем, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: roman\_kuzmenko@inbox.ru

**Егорова Евгения Дмитриевна** – студент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, д. 84), e-mail: evgenia\_egorova23@mail.ru, ORCID: 0009-0005-1983-3103

## COMPARATIVE ANALYSIS OF THE EFFICIENCY OF DETECTION OF BREAST CANCER NEOPLASMS USING DIFFERENT TYPES OF ANTENNAS

E.A. Ishchenko, A.I. Sukachev, R.V. Kuzmenko, E.D. Egorova

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

**Abstract:** the article considers the efficiency of detection of breast cancer neoplasms by using the electrodynamic method. Application of such a method is possible due to the change of dielectric characteristics of tissues due to changes in the characteristics of cells. In the study we compared the detection efficiency of the simplest antennas: horn antennas, Vivaldi antennas, planar two-layer patch antennas. The main requirement for antennas that are used to apply this method is to ensure broadband to minimize false characteristics. It is shown that the use of the electrodynamic method allows the detection of a new formation by measuring S21-parameters, signal characteristics on the receiving side, as well as the construction of Fourier spectra on the receiving side. Thus, the study is carried out both in time and frequency domain. It is shown that the development of the electrodynamic method of neoplasm detection allows to provide detection of the disease by a cheaper and safer method in comparison with MRI and SCT, which are connected with irradiation of the patient or high level of magnetic field or by application of X-rays of high intensity. The results obtained show the dependence of the field measurement characteristics on the types of antenna. The results obtained are illustrated by the dependencies of field characteristics on the types of antennas used in the detection of neoplasm in tissue structures

**Key words:** electrodynamic method, dielectric characteristics, horn antenna, Vivaldi antenna, planar patch antenna

#### References

1. Wild C.P., Wiederpass E., Stewart B.W. "World Cancer Report: Cancer Research for Cancer Prevention", World Health Organization, 2020, 612 p.

2. Berumen A.V., Moyao G.J., Rodriguez N.M., Ilbawi A.M., Migliore A., Shulman L.N. "Defining priority medical devices for cancer management: a WHO initiative", *The Lancet Oncology*, 2018, vol. 19, iss. 12, pp. e709-e719.

3. Cheng Y., Fu M. "Dielectric properties for non-invasive detection of normal, benign, and malignant breast tissues using microwave theories", *Thorac Cancer*, 2018, vol. 9, no. 4, pp. 459-465.
4. Fornes-Leal A., Garcia-Pardo C., Frasson M., Pons Beltrán V., Cardona N. "Dielectric characterization of healthy and malignant colon tissues in the 0.5-18 GHz frequency band", *Phys Med Biol*, 2016, vol. 61, no. 20, pp. 7334-7346.
5. Gamal W., Pinto R., Tanori M., Casciati A., Mancuso M., Persano L., Viola G., Saada S., Bessette B., Lalloue F., Pothier A., Palego C., Merla C. "Permittivity measurements of brain cancer cell towards the electric characterisation of single Cancer Stem Cells", *1st EMF-Med World Conference on Biomedical Applications of Electromagnetic Fields*, 2018, Split, Croatia, 2 p.
6. Salvador S.M., Vecchi G., Pagana Guido, Cacciatore C., Maggiora Riccardo, Attardo E.A. "A comparison between two algorithms for microwave breast cancer detection", *Union Radio-Scientifique Internationale, URSI*, Paper ID: KBEP8, 2021, 4 p.
7. Zhang H., El-Rayis A.O., Haridas N., Noordin N.H., Erdogan A.T., Arslan T. "A smart antenna array for brain cancer detection", *2011 Loughborough Antennas & Propagation Conference*, 2011, pp. 1-4.
8. Zhang H., Flynn B., Erdogan A.T., Arslan T. "Microwave imaging for brain tumour detection using an UWB Vivaldi Antenna array", *2012 Loughborough Antennas & Propagation Conference (LAPC)*, 2012, pp. 1-4.
9. Dewiani A., Amir E., Palantei E., Areni I.S., Achmad A. "Movement effect on electrical properties of UWB microwave antenna during breast tumor diagnostic scanning", *2015 IEEE Asia Pacific Conference on Wireless and Mobile (APWiMob)*, 2015, pp. 188-191.

Submitted 02.07.2024; revised 16.12.2024

#### Information about the authors

**Evgeniy A. Ishchenko** – Postgraduate Student, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: kursk1998@yandex.ru, ORCID: 0000-0002-5270-0792

**Aleksandr I. Sukachev** – Assistant Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya, Voronezh 394006, Russia), tel. +7 (473)243-77-29, e-mail: mag.dip@yandex.ru

**Roman V. Kuzmenko** – Dr. Sc. (Physics and Mathematics), Associate Professor, Professor of the Department of Electronic Devices and Systems, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia) e-mail: roman\_kuzmenko@inbox.ru

**Evgeniya D. Egorova** – Student, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: evgenia\_egorova23@mail.ru, ORCID: 0009-0005-1983-3103



**СОСТОЯНИЕ СОВРЕМЕННОГО УРОВНЯ РАЗВИТИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ И ОБОРУДОВАНИЯ КУЗНЕЧНО-ШТАМПОВОЧНОГО ПРОИЗВОДСТВА****С.Л. Новокщенов<sup>1,2</sup>, В.В. Куц<sup>1</sup>, Е.В. Смоленцев<sup>2</sup>****<sup>1</sup>Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Россия****<sup>2</sup>Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия**

**Аннотация:** в современных условиях, наряду с предприятиями замкнутого производственного цикла, возникают малые предприятия, выпускающие продукцию кузнечно-штамповочного производства. Как правило, на таких предприятиях имеется определенная номенклатура кузнечно-штамповочных машин. В зависимости от масштаба предприятия они могут оснащаться кривошипными горячештамповочными прессами (КГШП) или участком для штамповки деталей методами холодной объемной штамповки (ХОШ) и участком механической обработки. В настоящее время вновь возникает необходимость повышения производительности производства для обеспечения крупносерийного выпуска продукции различного назначения. Основной же проблемой кузнечно-штамповочных производств в составе малых предприятий является низкоэффективное применение имеющегося разнопланового основного технологического оборудования. Одним из путей повышения эффективности использования основного технологического оборудования является возможность реализации технологических процессов ХОШ на КГШП, т.е. на машинах, которые изначально не были предназначены для этого. Иными словами, если по каким-то причинам возникает простой КГШП, то его можно переналадить для выпуска поковок/деталей, изготавливаемых методами ХОШ, в частности, прямым и обратным выдавливанием. С теоретической точки зрения возможность этого также подтверждается характером теоретических графиков изменения технологического нагружения пресса применительно к операциям объемной штамповки: горячая штамповка, горячее выдавливание, холодное выдавливание и холодная калибровка-чеканка. Значительно сократить время проектирования и повысить эффективность принятия решений позволяет специализированное программное обеспечение: система компьютерной поддержки принятия инженерных решений (СКППИР) Mech-press. Разработанный авторами статьи программный комплекс имеет модульную структуру и предназначен для решения задач проектирования и выполнения поверочных расчетов сборочных единиц механических прессов различного технологического назначения

**Ключевые слова:** диаграмма Исикавы, ХОШ, ГОШ, КГШП, поковка, деталь, выдавливание, СКППИР Mech-press

**Введение**

Основной задачей настоящей работы является поиск и анализ критериев технологичности выпускаемых поковок/деталей с учетом особенностей работы основного разнопланового технологического оборудования кузнечно-штамповочного производства (рис. 1 и 2) с целью сокращения сроков проектирования, производственных простоев оборудования, а также повышения коэффициента его загрузки для обеспечения выпуска поковок/деталей заданными темпами.

Актуальность темы подтверждается растущими потребностями в продукции кузнечно-штамповочного производства различных отраслей промышленности.

Анализ литературы позволил выявить 8 основных групп критериев, по которым можно сформулировать задание на исследование и выполнить обоснование научной новизны.

**Формирование задач исследования на основе обзора и анализа литературы**

Для обоснования целей и задач работы построим диаграмму Исикавы (рис. 1), по результатам анализа которой определим весовые значения определяющих факторов и их значимость при формулировке целей и задач работы (рис. 2).

В работе [1] утверждается, что сегодня особенное значение приобретают вопросы повышения качества продукции кузнечно-штамповочного производства.

Наиболее ответственные детали, особенно требующие стабильных механических характеристик прочности и пластичности, изготавливают из кованных, холодноштампованных и горячештамповочных поковок. В настоящее время получают всё большее развитие так называемые процессы NNS (Near Net Shape), максимально приближающие форму и размерыковки к окончательным [1].

Однако следует учитывать, что внедрение на малых предприятиях новых методов изго-

товления поковок весьма затруднительно, вследствие чего возникает необходимость в расширении технологических возможностей основного технологического оборудования с адаптацией его под реализацию разноплановых технологических процессов, в частности, процессов холодной объемной штамповки (ХОШ).

Традиционными для малых предприятий методами изготовления поковок, является горячая объемная штамповка (ГОШ), а характерной особенностью таких предприятий является установившаяся практика поставки поковок малыми партиями just-in-time.

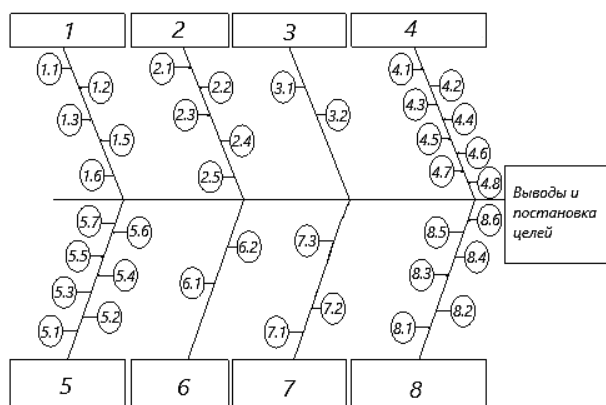


Рис. 1. Диаграмма Исикавы: поиск научной новизны и формулировка темы и задач исследования

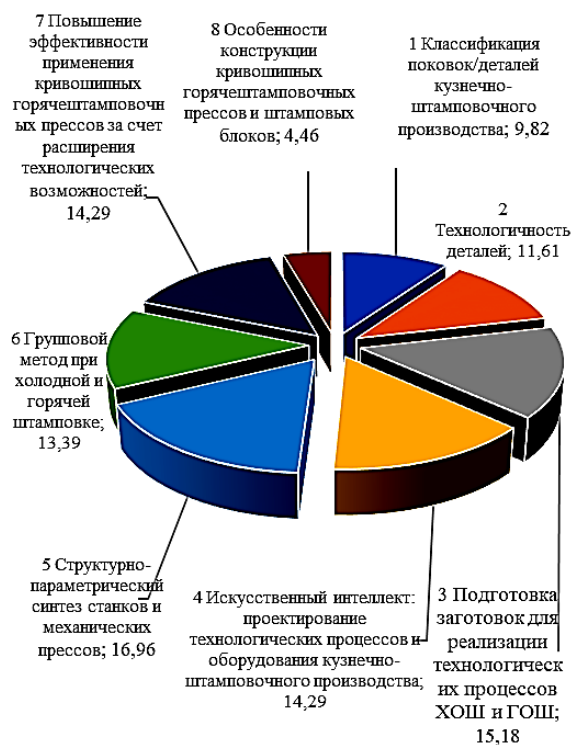


Рис. 2. Влияние критериев на формулировку целей и задач работы

## 1. Классификация поковок/деталей кузнечно-штамповочного производства

При производстве широкой номенклатуры поковок наиболее важными вопросами является их классификация, которая позволит рационально выбрать оборудование для штамповки. За рубежом широко распространена система классификации поковок, получаемых объемной штамповкой по К. Шпису. По этой классификации каждой детали присваивают основной трехзначный код. Его первая цифра обозначает подразделение деталей на три группы: компактные, дискообразные и вытянутые. Две другие цифры кода указывают на наличие различных дополнительных элементов детали. Для вытянутых деталей к основному коду добавляют четвертую цифру — номер диапазона изменения отношения ее длины к ширине. В. Хох (ФРГ) кроме трехзначного кода формы поковки, предложенного К. Шписом, применяет для характеристики степени сложности формы поковки дополнительные показатели: массу и мелкие элементы, отношение высоты к площади ее поверхности и форму элементов, получаемых выдавливанием.

Сравнительно простая непрерывная количественная оценка сложности формы поковки — по относительным размерам отдельных труднозаполняемых частей штампа, например, по отношению высоты к ширине ребра или бобышки (В.Б. Дядюк, Й. Касуга и др. (Япония); А.М. Сабров и др. (Англия) или по отношению длины к ширине поковки (А. Шаума и др., Франция). Однако такой способ количественной оценки является весьма приблизительным. Ю.Ф. Филимонов и Л.А. Позняк в качестве определяющего признака выбрали конфигурацию детали, при этом способ выдавливания становится вторичным признаком. В настоящей классификации выделяется шесть основных признаков, учитывающих схему обработки:

- 1 — стрежни с головкой;
- 2 — трубки с фланцами;
- 3 — шлицевые валы и зубчатые колеса;
- 4 — стаканы;
- 5 — втулки с внутренней перемычкой;
- 6 — детали, представляющие комбинацию

деталей первых пяти групп на основе сочетания элементов, из которых они строятся.

Каждая группа деталей разделяется при этом на две подгруппы:

- 1) детали осесимметричной формы;
- 2) детали многогранной и зубчатой формы.

О. Кинцле, К. Ланге и др. (ФРГ), М. Гаухерон (Франция) степень сложности поковки определяют по отношению объема описанного параллелепипеда  $V_0$  к объему поковки  $V_{II}$ .

Как известно, для создания условий, обеспечивающих внедрение прогрессивной технологии и уменьшения себестоимости работ, к настоящему времени уже известны и постоянно разрабатываются различные классификации деталей, изготавливаемые методами ХОШ. Поковки по форме классифицируют уже давно. По некоторым классификаторам (по А.В. Ребельскому, К.С. Гинзбургу и М.Н. Дину, М.Э. Гуревичу, О. Крузе (ГДР), С. Монгештерну (ФРГ), Е. Моргенроту (ФРГ), В.А. Найту (Англия), Ф.В. Тулянкину и др., Х. Халлеру (ФРГ), В. Хоху (ФРГ), А. Шамуа (Франция), К. Шпису (ФРГ)) определяют количество металла и число ручьев штампа, выбирают заготовки и т.д.

В статье [3] упоминается, что американская классификация представляет собой достаточно непривычную систему для отечественного читателя. Она выглядит как строгая структура взаимосвязанных понятий. Кроме того, некоторые термины, если их переводить исходя из содержания, могут даже запутать специалистов.

В российских учебниках и справочных материалах обычно представлены одни и те же ключевые основные кузнечные процессы. В то время как в американских изданиях часто можно найти информацию о новых методах обработки металлов давлением (ОМД), охватывающих несколько десятилетий.

Авторы статьи [4] предлагают созданную систему конструктивно-технологической классификации типовых форм осесимметричных деталей, подлежащих штамповке, которая представляет собой важнейший этап в оптимизации производственных процессов. Данная классификация не только способствует упрощению формирования технологических кодов, но и обеспечивает возможность группировки деталей по одинаковым технологиям обработки, что непосредственно влияет на эффективность производственного цикла.

Классификация играет ключевую роль при типизации процессов холодной объемной штамповки. Она позволяет более рационально организовать поточные линии, что в свою очередь ведет к повышению производительности и снижению издержек. Стандартизация технологического оборудования, оснастки и инструментов является важным аспектом, который способствует унификации и оптимизации работы оборудования на всех этапах производства. Кроме того, использование электронных вычислительных

машин (ЭВМ) в технологической подготовке производства открывает новые горизонты для автоматизации процессов, улучшая качество и скорость обработки информации. Все эти факторы в совокупности подтверждают актуальность и необходимость разработки такой классификации, как основы для успешного функционирования современного производства в условиях жесткой конкуренции.

В работе [5] выполнен системный анализ заготовительной базы машиностроения, который свидетельствует как о преобладании затратных технологий, так и о существенном отставании в использовании передовых материалов в конструкциях машин. Обращается внимание на необходимость внедрения новых технологических процессов штамповки деталей из вторичных алюминиевых сплавов методами изотермической штамповки, штамповки кристаллизующегося металла и методом «Thixoforming». Особо отмечено, что имеющееся в отечественном машиностроении мощное кузнечно-прессовое оборудование, предназначенное для штамповки и прессования алюминиевых сплавов, загружено пока только на 22 %.

Таким образом, к определяющим факторам 1 группы можно отнести:

- 1.1 — Определяющий признак классификации деталей;
- 1.2 — Определение степени сложности поковки;
- 1.3 — Иностранные термины;
- 1.4 — Конструктивно-технологическая классификация поковок;
- 1.5 — Системный анализ заготовительной базы машиностроения.

## 2. Технологичность деталей

Авторами статьи [6] отмечается, что успешное внедрение процессов холодной объемной штамповки в значительной степени зависит от технологичности деталей, штампуемости материала, маршрута формоизменения по переходам, объема выпуска поковок, типа и параметров оборудования и оснастки.

В работе [7] отмечается, что экономическая эффективность ХОШ обусловлена высоким коэффициентом использования материалов (90-95 %), значительным упрочнением материала штампуемых поковок, а также уменьшением в 3...5 раз и более трудоемкости по сравнению с операциями механической обработки. В условиях многовариантности выбрать наибо-

лее эффективное технологическое решение можно по критерию точности поковок.

Авторами работы [8] утверждается, что точность размеров отдельных конструктивных элементов поковок, изготавливаемых методами ХОШ на кривошипных прессах, определяется их расположением относительно разъема штампов. В настоящее время известен способ повышения точности высотных размеров поковок до 9...11 квалитетов, а точность высотных размеров на 4...6 квалитетов грубее, при этом ещё возникает необходимость применения механической обработки, что существенно снижает экономическую эффективность технологического процесса изготовления поковки методами ХОШ. При этом стремятся к повышению жёсткости базовых деталей механического пресса, прежде всего за счёт выбора оптимальной структуры главного исполнительного механизма и уменьшению конструктивной высоты рабочих деталей штампа. Также при проектировании поковок следует учитывать, что рекомендуемые при холодном выдавливании отклонения размеров от номинала для наружного диаметра деталей может составлять  $\pm 0,075$  до  $\pm 0,25$  мм, а по толщине от  $\pm 0,2$  до  $\pm 0,4$  мм.

В статье [9] авторами утверждается, что в процессе анализа методов принятия решений особое внимание уделяется различным классификациям, которые помогают систематизировать и структурировать подступы к решению задач. Каждый подход к классификации основан на ряде признаков и параметров, что позволяет исследовать структуру и особенности каждого элемента в соответствии с его характеристиками.

Примеры таких классификаций включают иерархические модели, где решения ранжируются по уровням, или многокритериальные подходы, в рамках которых оценки проводятся по нескольким значимым критериям.

Сравнительный анализ методов принятия решений выявляет сильные и слабые стороны различных подходов, что, в свою очередь, способствует более обоснованному выбору оптимального метода для реализации конкретных конструкторско-технологических работ. Тем не менее, несмотря на важность данного аспекта, в научно-методической литературе остаётся недостаточное количество исследований, направленных на оценку и сопоставление существующих методов, что подчеркивает необходимость дальнейших исследований в данной области. Эти исследования могут существенно

повысить технический уровень решений в современных условиях.

Профессор К. Кондо (Япония) в статье [10] утверждает, что одной из важных областей исследований и усовершенствований в Японии является точная штамповка. В статье рассмотрены фундаментальные концепции повышения точности поковок, изготавливаемых холодной объемной штамповкой, а также приведены конкретные примеры реализации этих концепций. Рабочее давление в холодной объемной штамповке настолько высоко, что требуемое для достижения необходимой точности поковок нагружение деформируемого материала не может быть осуществлено в пределах допускаемых напряжений для материала штампа. Поэтому снижение необходимого давления является наиболее важной проблемой повышения точности поковок.

Особо отмечается, что во избежание резкого повышения сопротивления деформированию необходимо предусмотреть компенсатор для выхода избыточного материала после того, как будет полностью оформлен требуемый контур поковки. Приведённые примеры показывают, что главным условием для реализации процессов точной штамповки является не допущение полностью закрытого состояния штампа, для чего необходимо предусматривать специально подготовленную полость истечения материала, расположенную в той части контура поковки, которую легко удалить последующей финишной обработкой.

Таким образом, к определяющим факторам 2-ой группы можно отнести:

- 2.1 — Определение степени технологичности поковок/детали;
- 2.2 — Жесткость базовых деталей механических прессов;
- 2.3 — Определение факторов эффективности технологических процессов ХОШ;
- 2.4 — Повышение точности поковок/деталей, изготавливаемых методами ХОШ;
- 2.5 — Элементы системы принятия конструкторско-технологических решений.

### **3. Подготовка заготовок для реализации технологических процессов ХОШ и ГОШ**

В работе [11] авторов А.Т. Крука, А.Ю. Бойко, Э.Х. Милушева и С.Л. Новокщенова исследуются технологии резки заготовок от прутка с использованием механизма упругой реакции. Авторы предлагают конструкцию ножниц с кривошипно-шатунным механизмом, что



повышает их жесткость и эффективность. В исследовании рассматриваются возможности этого метода резки, а также относительное смещение ножей, которое определяется поперечным зазором между прутком и внутренней поверхностью ножей, а также необходимой глубиной внедрения для отделения заготовки. Подчеркивается, что геометрическая точность заготовок зависит от радиального зазора, который, в свою очередь, способствует увеличению «непроизводительных» деформаций. Авторы утверждают, что система резки с упругой реакцией станины требует сокращения относительных движений ножей.

В работе [12] исследуются потенциальные разработки нестандартного оборудования для резки проката на заготовки в машиностроении. Установлены значительные недостатки традиционного метода, включая слабую стойкость инструмента и деформацию формы заготовки.

Процесс резки сопровождается смятием и образованием трещин на ножах, что подчеркивает необходимость устранения технологического зазора. В результатах обозначена возможность применения беззазорной резки, что снижает напряжения и способствует пластическому течению металла, обеспечивая высокое гидростатическое давление. Таким образом, заготовки получают с гладкими и перпендикулярными торцами.

Таким образом, к определяющим факторам 3-ей группы можно отнести:

3.1 — Анализ технологических способов отрезки заготовок от прутка;

3.2 — Разработка нестандартных способов и оборудования для резки проката на заготовки для штамповки поковок/деталей.

#### **4. Искусственный интеллект: проектирование технологических процессов и оборудования кузнечно-штамповочного производства**

Работа [13] авторов Е.Н. Ланского и Ф.И. Антонюка демонстрирует, как с помощью многофакторных экспериментов были разработаны статистические модели ошибок в толщине металла для полых стаканов, производимых методом обратного выдавливания на кривошипном прессе.

Дисперсионный анализ выявил, как изменения в условиях трения и колебания жесткости исходных заготовок влияют на точность толщины стаканов, зависящей от их геометрических характеристик и жесткости системы «пресс-штамп». Установлено, что жесткость

зависит от толщины дна: при увеличении толщины жесткость повышается.

Для алюминиевых стаканов с номинальной силой до 1000 кН отклонение толщины дна составляет 0.05 мм, что свидетельствует о высоких требованиях к точности процессов формовки.

Данная величина оказалась критически важной для обеспечения механической прочности и устойчивости к деформациям, особенно при воздействии внешних факторов. Анализ экспериментальных данных показал, что оптимизация параметров прессования способствует уменьшению вариаций в толщине дна, что, в свою очередь, это влияло на эксплуатационные характеристики готовой продукции.

Эффективная настройка системы «пресс-штамп» позволяет добиться необходимой жесткости конструкции без риска появления трещин или других дефектов в материале. Этот комплексный подход к управлению толщиной и жесткостью изделий из алюминия становится основой для повышения конкурентоспособности на рынке.

Совершенствование технологий и постоянный мониторинг параметров производства способствуют созданию более надежных и долговечных деталей типа «стакан», соответствующих высоким стандартам качества.

В работе [14] отмечается, что улучшение качества и сокращение сроков проектирования деталей требует создания системы технологических решений на основе искусственного интеллекта, с акцентом на модельные эксперименты и многокритериальную оптимизацию.

В статье [15] подчеркивается, что современные высокоточные производства не обходятся без систем автоматизированного проектирования (САПР) и компьютерного моделирования, что особенно важно для таких отраслей, как авиация, автомобилестроение и машиностроение. Эти технологии помогают связать инженерные расчеты с анализом конечных элементов.

В работе [16] утверждается, что автоматизация расчетов развивается параллельно с усовершенствованием вычислительной техники. Последние достижения в области вычислений делают ЭВМ незаменимыми для решения расчетных задач, и возникают новые информационные системы, созданные на базе знаний для проектирования штампов холодной листовой штамповки.

Статья [17] авторов Р.М. Сулейманова и С.И. Богохудова рассматривает уникальный алгоритм проектирования стальной штампованной поковки. Вводится порядок использо-



вания стандартов ГОСТ 7505-89 и предлагается отказаться от номографического метода в пользу вычисления полиномов, что ускоряет процесс проектирования и повышает надежность.

В статьях [18, 19, 20 и 21] авторами рассматриваются другие аспекты автоматизации и оптимизации процессов в машиностроении.

Таким образом, к определяющим факторам 4-ой группы можно отнести:

4.1 — Анализ факторов, определяющих погрешности толщины металла при реализации процессов ХОШ;

4.2 — Анализ способов повышения качества и уменьшения сроков проектирования и уменьшения сроков проектирования;

4.3 — Анализ влияния САПР эффективность производственных и технологических процессов;

4.4 — Возможности современных ЭВМ и реализация традиционных инженерных методик расчета;

4.5 — Анализ вопросов формирования алгоритмов принятия комплекса технологических решений;

4.6 — Предложение оригинального алгоритма на основе анализа основных этапов проектирования стальной поковки;

4.7 — Анализ научно-методологических основ применения математических методов и ЭВМ для исследования процессов штамповки;

4.8 — Разработка системы компьютерной поддержки принятия инженерных решений.

## **5. Структурно-параметрический синтез станков и механических прессов**

В исследовании [22] подчеркивается, что для обеспечения конкурентоспособности в современном машиностроении необходимо разрабатывать высокоэффективные металлорежущие станки темпами, которые невозможно достичь без автоматизации проектирования.

Значительная степень эффективности автоматизированного проектирования достигается при его непрерывности с ранних этапов, так как именно на данных стадиях, включая предпроектные исследования и технические предложения, формируется 80-85 % эксплуатационных затрат.

Внедрение параллельного проектирования, при котором одновременно разрабатываются основные элементы станка после его структурного оформления, значительно ускоряет выход инновационной продукции на рынок.

Основы проектирования схем металлорежущих станков опираются на структурно-параметрический синтез, также применимый к проектированию механических прессов.

В статье [23] автора В.В. Куца описывается метод преобразования модели формообразующей системы станка в динамическую модель с учетом колебаний его узлов, предназначенную для ранних стадий проектирования.

В работе [24] раскрывается концепция структурно-параметрического синтеза металлорежущих систем, что позволяет осуществлять системное обеспечение их точности.

В монографии [25], в статье [26] и монографии [27] рассмотрены систематизированные подходы к проектированию, включая графический синтез и поддержку параллельного проектирования.

В статье [28] акцентируется внимание на новом методе применения механизмов параллельной структуры в металлообрабатывающих станках, который сосредоточен на синтезе с учетом точности.

Авторы работы [29] исследуют структурный синтез кинематических цепей для создания различных механизмов, предлагая методику, основанную на обобщенной математической модели. Однако для проектирования механических прессов аналогичные методики еще не разработаны, что создает необходимость в их создании или адаптации.

Таким образом, к определяющим факторам 5-ой группы можно отнести:

5.1 — Анализ возможностей создания высокоэффективного основного технологического оборудования при минимальных сроках проектирования;

5.2 — Разработка методики преобразования модели формообразующей системы станка в эквивалентную динамическую модель;

5.3 — Анализ результатов теоретического обоснования эффективности применения методологии структурно-параметрического синтеза металлорежущих систем;

5.4 — Разработка концепции структурно-параметрического синтеза металлорежущих систем на основе принципов применения системного подхода;

5.5 — Анализ возможностей применения систематизированного подхода к решению основной задачи проектирования технологических систем — структурному синтезу;

5.6 — Разработка методологии структурно-параметрического синтеза металлорежущего

оборудования и применение новых механизмов в компоновке станка;

5.7 — Анализ возможностей применения структурного синтеза замкнутых кинематических цепей для создания на их основе разнообразных механизмов.

## **6. Групповой метод при холодной и горячей штамповке**

В исследовании [30] авторы отмечают, что в условиях мелкосерийного производства разрешение конфликта между небольшими партиями деталей и высокой производительностью кузнечно-штамповочного оборудования во многом зависит от применения группового метода обработки.

Этот метод подразумевает, что для групп деталей, сходных по определённым конструктивно-технологическим характеристикам, разрабатываются однотипные высокоэффективные технологии производства с использованием одинаковой или быстро переналаживаемой оснастки.

Чтобы повысить серийность выпускаемых заготовок и одновременно сократить количество диаметров применяемого пруткового материала, необходимо проводить их объединение по степени схожести диаметров.

Снижение разнообразия поковок при увеличении серийности производства за счёт унификации позволяет значительно уменьшить ассортимент применяемых материалов и сократить потребность в количестве штамповочного инструмента, что особенно актуально в мелкосерийном производстве.

Таким образом, к определяющим факторам 6-ой группы можно отнести:

6.1 — Поиск решения противоречия между малой партионностью изготавливаемых деталей и высокой производительностью применяемого кузнечно-штамповочного оборудования;

6.2 — Разработка метода групповой обработки, суть которого заключается в том, что для групп деталей устанавливаются методы изготовления с использованием одной и той же оснасткой.

## **7. Повышение эффективности применения кривошипных горячештамповочных прессов за счет расширения технологических возможностей**

В публикации [31] исследуются технологии горячей объемной штамповки изделий ве-

сом до 200 кг на комплексах с гидравлическими штампами, где осуществляется совершенствование процессов за счет увеличения числа переходов, объединяющих обрезку облоя и калибровку.

Модификации конструкции прессов позволяют увеличить штамповые пространства и обеспечивают безопасность при обработке внецентренных нагрузок с необходимой точностью на поковках.

Авторы работы [32] С.Л. Новокшенов, Э.Х. Милушев и О.В. Скрыгин акцентируют внимание на расширении технологических возможностей комплексов за счет их применения в рамках процессов горячего объемного штампования.

При этом важно учитывать, что максимальное усилие на операции будет значительно меньше номинальной силы пресса, а 80 % штампового пространства окажется неиспользованным, что ведет к неэффективному использованию и быстрому износу оборудования.

В исследовании [33] рассматривается стремительное развитие многопозиционной автоматизированной штамповки на кривошипных горячештамповочных машинах, что потребовало значительного расширения их функционала, в первую очередь увеличения штампового пространства по фронту пресса.

Это, в свою очередь, вызвало необходимость в пересмотре силовых характеристик прессов для обеспечения допустимых эксцентричных нагрузок.

Таким образом, к определяющим факторам 7-ой группы можно отнести:

7.1 — Анализ допускаемых эксцентричных нагрузок при многопозиционной, автоматизированной штамповке на КГШП, что потребовало значительного увеличения штампового пространства вдоль фронта пресса;

7.2 — Предложена методика обоснования реализации процессов ХОШ на КГШП. При этом показано, что максимальное усилие операции будет значительно ниже, чем номинальная сила пресса и 80 % штампового пространства не будет задействовано при реализации процессов ХОШ, что приводит к нерациональному износу оборудования;

7.3 — Анализ технологий ГОШ поковок массой до 200 кг, которые совершенствуют и развивают за счет увеличения числа переходов с совмещением обрезки облоя и калибровки.

## 8. Особенности конструкции кривошипных горячештамповочных прессов и штамповых блоков

А.В. Леванов и Д.И. Вичужанин в работе [34] предложили новую концепцию компенсации избыточного металла, касающуюся конструкции закрытых пресс-форм для объемной штамповки. С учетом растущей потребности в оптимизации производственных процессов и снижении затрат, самокомпенсирующиеся штамповочные блоки становятся важным элементом современного машиностроения. Их характерная особенность — способность автоматически регулировать излишки металла, что позволяет значительно повысить качество конечной продукции.

В результате работы этих прессов достигается минимизация отходов, а также улучшение точности формовки. Проектирование таких прессов основывается на принципах механики и автоматизации, где ключевую роль играют контактные элементы, взаимодействующие с обрабатываемым материалом.

Это обеспечивает не только высокую степень адаптивности к изменяющимся условиям работы, но и значительное сокращение времени наладки.

Область применения самокомпенсирующихся штамповочных блоков достаточно разнообразна: от авиастроения до автомобильной промышленности. Они применяются в производстве сложных деталей, где важны точность и повторяемость размеров.

Здесь также представлены расчеты технико-экономической эффективности, демонстрирующие, что внедрение таких прессов снижает производственные затраты и улучшает рентабельность проектов.

Таким образом, самокомпенсирующиеся прессы представляют собой революционный шаг в области металлообработки.

Показано, что применение таких форм снижает расход штампуемого материала и стали по сравнению с открытыми прессами. Эта экономия достигается благодаря более высокой прочности принятых форм, что предохраняет их от перегрузок при компенсации.

Исключение напусков на уклоны устраняет необходимость в labor-intensive механической обработке.

В работе [35] В.Ф. Федоркевич анализирует систему, оптимизирующую технологические параметры для кривошипных горячештамповочных прессов согласно типоразмеру. Он под-

черкивает важность улучшения характеристик прессов для достижения необходимой точности продукции и условий формообразования.

Статья [36] указывает на преобладание «легких» прессов силой менее 40 МН в горлышке парков, связанных с массовым производством автомобильных деталей.

Недостаточная долговечность клиновых ремней, как отмечают авторы [37], негативно влияет на производительность прессов, приводя к потенциальным отказывающим ситуациям.

Работа [38] автора Бяльского В.Б. описывает особенности кинематики кривошипно-коленных прессов с приведением теоретических зависимостей расчёта пути, скорости и ускорения ползуна от угла поворота эксцентрикового блока.

Таким образом, к определяющим факторам 8-ой группы можно отнести:

8.1 — Анализ возможностей совершенствования технологий горячей объемной штамповки поковок массой до 200 кг;

8.2 — Разработка методики расширения технологических возможностей КГШП за счет их применения для реализации процессов холодной объемной штамповки;

8.3 — Анализ возможностей создания КГШП с улучшенными энерго-силовыми параметрами;

8.4 — Анализ системы, устанавливающей оптимальный уровень технологических параметров КГШП применительно к каждому типоразмеру поковки;

8.5 — Анализ практики применения механических прессов, выявление недолговечных узлов, в частности, клиноременной передачи;

8.6 — Рассмотрение влияния скольжения клиноременной передачи на параметры маховика механического прессы.

### Классификация поковок/деталей

По результатам исследования методами горячего и холодного выдавливания получают поковки /детали следующих типов (рис. 3). Для дальнейшего группирования вошедших в определенный класс деталей, достаточно использовать информативный набор, включающий в себя четыре основных признака:

1)  $\bar{X}_2 = D$  диаметр или  $\bar{X}_2 = A$  линейный размер, мм;

2)  $\bar{X}_3 = L$  - наибольшая длина или  $\bar{X}_3 = B$  - ширина детали, мм;

- 3)  $\bar{X}_4 = F_{\text{ДЕТ}}$  - площадь поверхности заготовки, мм<sup>2</sup>;
- 4)  $\bar{X}_6 = F_{\text{заг}}$  - площадь поверхности детали, мм<sup>2</sup>;
- 5)  $\bar{X}_7 = V_{\text{Д}}$  - объем детали, мм<sup>3</sup>.



Рис. 3. Система классификации поковок/деталей

Коэффициент технологичности определяется отношением площадей поверхности окончательной детали к площади поверхности заготовки:

$$K_{\text{ТЕХ}} = \frac{\bar{X}_6}{\bar{X}_4} \quad (1)$$

Предлагаемая система принятия конструкторско-технологических решений (рис. 4) при

проектировании технологических процессов ОМД и выборе основного технологического оборудования должна включать в себя следующие этапы:

1. Разработку системы синтеза технологических процессов ОМД с применением аппарата теории графов;
2. Разработку системы синтеза главных исполнительных механизмов механических прессов с применением аппарата теории графов и обоснованием возможности реализации процессов ХОШ на разноточном технологическом оборудовании;
3. Поиск критериев повышения производительности механических прессов;
4. Разработку системы поддержки принятия инженерных решений (программа для ЭВМ (рис. 5)), целью внедрения которой является сокращение сроков подготовки конструкторско-технологической документации при производстве новых механических прессов, оснащённых средствами автоматизации и отвечающих всем современным требованиям.

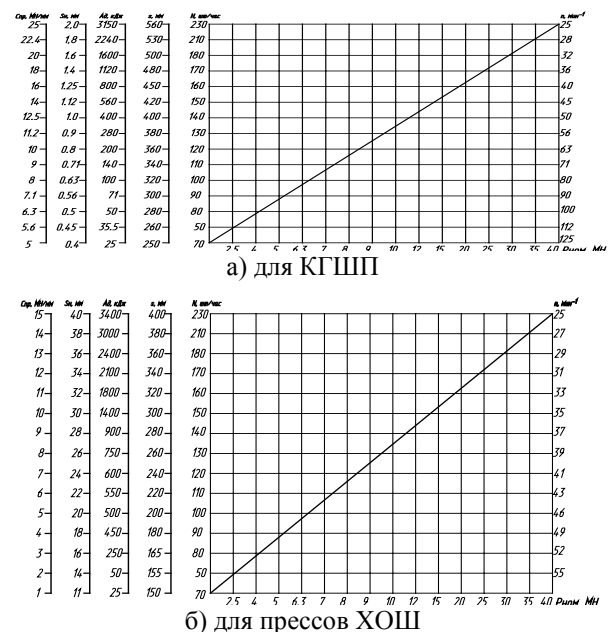


Рис. 4. Система технологических параметров механических прессов для принятия решений

Обеспечить принятие оптимального технологического решения при реализации процессов ОМД позволяет учет следующего ряда технологических параметров:

- $P$  — потребное технологическое усилие, МН;
- $n_1$  — число формообразующих переходов;
- $\delta_H$  — точность высотных размеров в пределах заданных припусков;

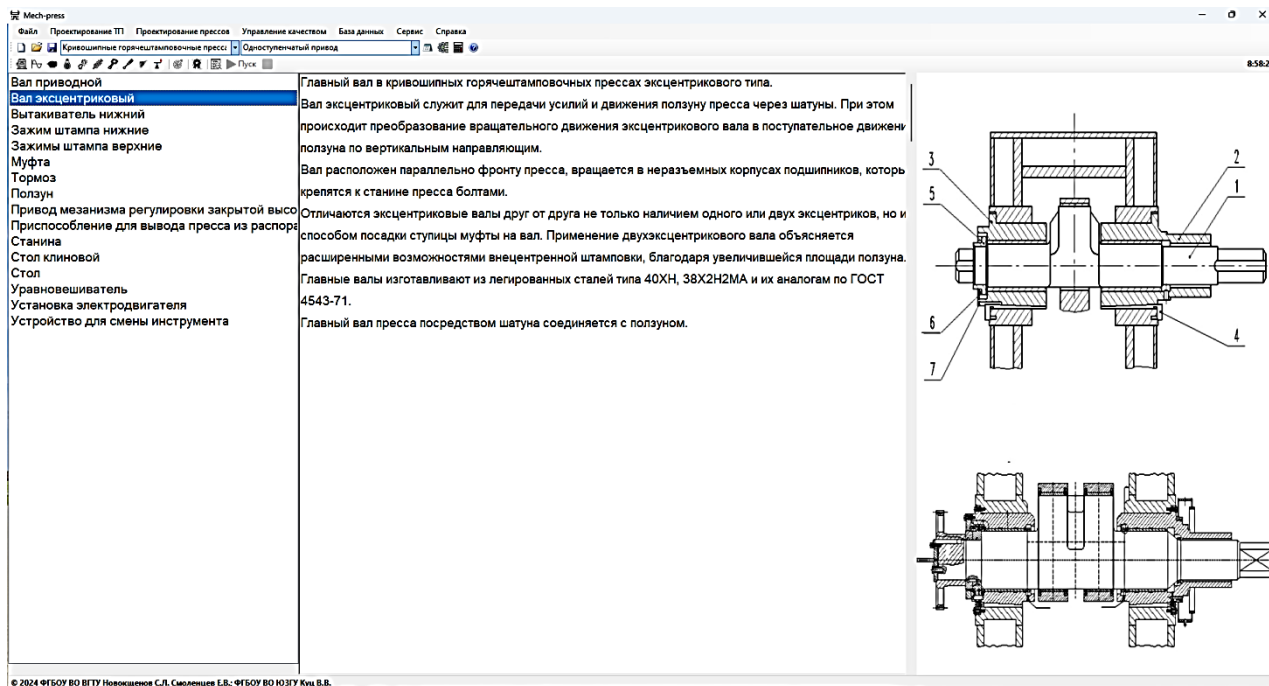


$\bar{X}_H$  и  $\bar{X}_B$  — признаки образующей наружной и внутренней поверхности детали соответственно.

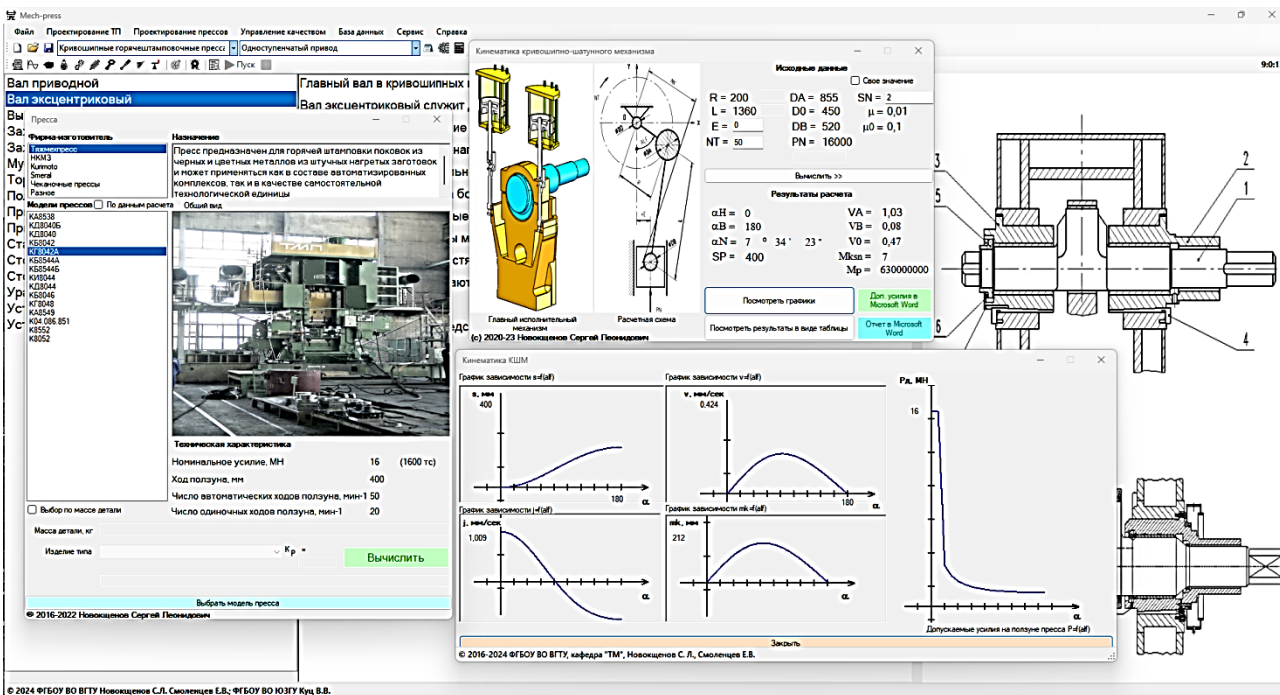
Принять оптимальное технологическое решение при проектировании технологических процессов ХОШ и ГОШ позволяет следующая

многокритериальная модель задачи принятия решений, представленная в обобщённом виде:

$$\left. \begin{aligned} A &= \bar{T}(P, n_1, \delta H, \bar{X}_H, \bar{X}_B) \rightarrow \max \\ A &= \xi(P, N, S_H, v_{\Pi}, C) \end{aligned} \right\}. \quad (2)$$



а) информационно-техническое сопровождение



б) модули принятия решений на этапе проектирования

Рис. 5. СКППИР Mech-press



## Заключение

Поставленные цели достигнуты, показано, что современный уровень развития проектирования механических прессов кузнечно-штамповочного производства (рис. 2) обладает рядом особенностей:

1. При создании новых машин кузнечно-штамповочного производства отсутствуют аналогии, цикл проектирования является полным;
2. Для процессов холодной объемной штамповки отсутствует четкая классификация поковок/деталей;
3. Отсутствие методики принятия технологических решений при разработке нового оборудования;
4. Необходимость совместного проектирования механического пресса, инструментальных вставок и штамповочных блоков;
5. Отсутствие применяемых на ранних этапах проектирования адекватных методов и методик, позволяющих выявлять и преобразовывать структурные и кинематические связи главных исполнительных механизмов, что может привести к невозможности обеспечения определяемой реализуемым технологическим процессом штамповки точности;
6. Отсутствует методика обоснования возможности применения КГШП для реализации процессов ХОШ.

Очевидными направлениями развития направления исследований становятся:

1. Анализ современного уровня развития технологических процессов и оборудования ОМД;
2. Уточнение принципа классификации поковок/деталей, изготавливаемых методами ОМД с целью уменьшения величин допусков и припусков, назначаемых на механическую обработку при проектировании поковки.

## Литература

1. Филимонов Ю.Ф., Позняк Л.А. Штамповка пресованием: учебное пособие. Москва, Машиностроение, 1964. 187 с.
2. Questions process simulation of metal forming / S.L. Novokshenov, S.N. Yatsenko, E.H. Milushev, P.B. Shibaev // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment, 2020. Bristol, England, 2020. P. 042089.
3. Шейман Е.Л. Современная классификация и тенденции развития ОМД в США // Кузнечно-штамповочное производство. 2007. № 4. С. 28-34.
4. Базык А.С., Головин В.А. О классификации деталей, получаемых холодной объемной штамповкой // Кузнечно-штамповочное производство. 1973. № 9. С. 4-9.
5. Артеc А.Э. Проблемы повышения качества структуры заготовительной базы машиностроения // Кузнечно-штамповочное производство. 2002. № 5. С. 36-39.
6. Антонюк Ф.И. Сравнительная оценка эффективности способов повышения точности холодной объемной штамповки на основе статистических методов анализа // Кузнечно-штамповочное производство. 2006. № 12. С. 19-23.
7. Сосенушкин Е.Н. Автоматическая классификация деталей машиностроения, изготовляемых холодной и полугорячей объемной штамповкой // Заготовительные производства в машиностроении. 2006. № 5. С. 20-27.
8. Обзор методов принятия решений при разработке сложных технических систем / С.С. Семёнов, А.В. Полтавский, В.В. Маклаков, А.В. Крянев // Надёжность. 2014. № 3(50). С. 72-84.
9. Ланской Е.Н., Артеc А.Э. Вопросы точности при холодном выдавливании // Кузнечно-штамповочное производство. 1980. № 9. С. 12-14.
10. Кондо К. Повышение точности поковок, изготавливаемых холодной объемной штамповкой // Кузнечно-штамповочное производство. 2000. № 5. С. 28-32.
11. Ножницы для отрезки заготовок упругой реакцией станины / А.Т. Крук, А.Ю. Бойко, Э.Х. Милушев, С.Л. Новокшенов // Заготовительные производства в машиностроении. 2021. № 8. С. 380-383.
12. Перспектива резки сортового проката на механических прессах в заготовительном производстве / С.М. Вайцехович, Д.В. Панов, Г.Г. Кривенко, Л.М. Овечкин // Заготовительные производства в машиностроении. 2016. № 8. С. 19-25.
13. Ланской Е.Н., Антонюк Ф.И. Анализ точности холодного выдавливания полых поковок статистическими методами // Кузнечно-штамповочное производство. 2001. № 5. С. 14-20.
14. Соломонов К.Н. Автоматизированное проектирование инструмента и технологий объемной штамповки // Кузнечно-штамповочное производство. 2003. № 8. С. 42-48.
15. Ковалёв В.Г., Рыбаков А.В. Автоматизация проектирования технологических процессов листовой штамповки. Часть 1. Основы создания САПР // Заготовительные производства в машиностроении. 2007. № 4. С. 30-34.
16. Ковалёв В.Г., Рыбаков А.В. Автоматизация проектирования технологических процессов листовой штамповки. Часть 2. Основы создания САПР. Продолжение // Заготовительные производства в машиностроении. 2007. № 6. С. 26-32.
17. Сулейманов Р.М., Богохулов С.И. Автоматизация проектирования стальной штампованной поковки в автоматизированном машиностроении // Заготовительные производства в машиностроении. 2007. № 4. С. 20-29.
18. Новокшенов С.Л., Милушев Э.Х., Сухоруков В.Н. Система поддержки принятия инженерных решений // Современные технологии производства в машиностроении: межвузовский сб. науч. тр. Воронеж, 2024. С. 35-41.
19. Автоматизация проектирования кривошипных горячештамповочных прессов с использованием специализированного программного обеспечения AMech-press / С.Л. Новокшенов, Э.Х. Милушев, С.Н. Яценко, А.Ю. Бойко // Заготовительные производства в машиностроении. 2024. № 10. С. 458-465.
20. Тетерин Г.П., Полухин П.И. Основы оптимизации и автоматизации проектирования технологических процессов горячей объемной штамповки. М.: Машиностроение. 1979. 240 с.
21. Автоматизация проектирования технологических процессов в машиностроении: учебное пособие / В.С. Корсаков [и др.]. М.: Машиностроение. 1985. 304 с.

22. Сосенушкин Е.Н. Поддержка принятия технических решений при групповом методе штамповки поковок // Кузнечно-штамповочное производство. 2005. № 9. С. 10-16.
23. Куц В.В. Формирование пространства проектных параметров металлорежущих станков на ранних стадиях проектирования с учетом колебания звеньев формообразующей системы на упругих опорах // Известия Юго-Западного государственного университета. Курск: ЮЗГУ. 2013. № 1 (34). С. 60-66.
24. Ивахненко А.Г., Куц В.В. Концепция структурно-параметрического синтеза металлорежущих систем с заданными параметрами точности обработки // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2011. № 4-2(288). С. 106-113.
25. Ивахненко А.Г., Куц В.В. Структурно-параметрический синтез технологических систем: монография. Курск: Юго-Западный государственный университет, 2010. 153 с.
26. Оценка эффективности методологии структурно-параметрического синтеза металлорежущих систем / А.Г. Ивахненко, В.В. Куц, О.Ю. Еренков, Е.О. Ивахненко, А.В. Олейник // СТИН. № 5. 2017. С. 10-14.
27. Методология структурно-параметрического синтеза металлорежущих систем / А.Г. Ивахненко [и др.]. Комсомольск-на-Амуре: Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет, 2015. 282 с.
28. Куц В.В. О структурно-параметрическом синтезе металлорежущих станков с параллельной кинематикой // Современные инновации в науке и технике: сб. науч. тр. 7-й Всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участием. Курск. 2017. С. 130-134.
29. Пожбелко В.И., Куц Е.Н. Структурный синтез семейства плоских восьмизвенных кинематических цепей рычажных механизмов с многократными шарнирами и наиболее сложными трехшарным звеном // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2020. № 1. С. 21-31.
30. Ланской Е.Н., Сосенушкин Е.Н. Унификация заготовок при холодной и полугорячей объемной штамповке // Кузнечно-штамповочное производство. 1989. № 11. С. 17-19.
31. Федоркевич В.Ф., Крук А.Т. Кривошипные горячештамповочные прессы универсального технологического назначения // Кузнечно-штамповочное производство. 2000. № 10. С. 27-30.
32. Новокшенов С.Л., Милушев Э.Х., Скрыгин О.В. Повышение эффективности применения механических пресов на основе расширения технологических возможностей // Современные технологии производства в машиностроении: межвузовский сб. науч. тр. Воронеж, 2024. С. 47-52.
33. Месяц В.Г., Горожанкин В.Н., Тынянов В.Н. Уточнённый метод определения границ допустимого эксцентричного нагружения кривошипных горячештамповочных пресов // Кузнечно-штамповочное производство. 1989. № 11. С. 8-10.
34. Леванов А.Н. Вичужанин Д.И. Самокомпенсирующиеся штампы для закрытой объемной штамповки // Заготовительные производства в машиностроении. 2007. № 11. С. 24-27.
35. Федоркевич В.Ф. Система технологических параметров для кривошипных пресов // Кузнечно-штамповочное производство. 2003. № 10. С. 14-15.
36. Явтушенко А.В. Повышение надежности клиноременных передач механических пресов // Восточно-европейский журнал передовых технологий. 2013. № 7. С. 59-62.
37. Явтушенко А.В., Мовшович И.Я. Влияние скольжения клиноременной передачи на параметры маховика механического прессы // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка металлов давлением. 2014. № 4. С. 32-36.
38. Бяльский В.Б. Кинематика кривошипно-коленчатых пресов // Кузнечно-штамповочное производство. 1973. № 6. С. 31-36.

Поступила 16.12.2024; принята к публикации 20.02.2025

#### Информация об авторах

**Новокшенов Сергей Леонидович** – аспирант кафедры машиностроительных технологий и оборудования, Юго-Западный государственный университет (305040, Россия, г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94); старший преподаватель кафедры технологии машиностроения, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: novoks179@yandex.ru, ORCID: 0000-0001-5807-2144

**Куц Вадим Васильевич** – д-р техн. наук, профессор, Юго-Западный государственный университет (305040, Россия, г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94), e-mail: kuc-vadim@yandex.ru, ORCID: 0000-0002-3244-1359

**Смоленцев Евгений Владиславович** – д-р техн. наук, профессор кафедры технологии машиностроения, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: smolentsev.rabota@gmail.com, ORCID: 0000-0002-8747-588X

### CURRENT STATE OF DEVELOPMENT OF TECHNOLOGICAL PROCESSES AND EQUIPMENT FOR FORGING AND STAMPING PRODUCTION

S.L. Novokshchenov<sup>1,2</sup>, V.V. Kutz<sup>1</sup>, E.V. Smolentsev<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Southwest State University, Kursk, Russia

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

**Abstract:** in modern conditions, along with enterprises of a closed production cycle, small enterprises are emerging that produce products of forging and stamping production. As a rule, such enterprises have a certain range of forging and stamping machines. Depending on the scale of the enterprise, they can be equipped with crank hot stamping presses (CHSP) or a section for stamping parts using cold volumetric stamping (CVS) methods and a machining section. Currently, there is a renewed need to increase production productivity to ensure large-scale production of products for various purposes. The main problem

of forging and stamping industries as part of small enterprises is the low-efficiency use of existing diverse basic technological equipment. One of the ways to increase the efficiency of using the main technological equipment is the possibility of implementing the technological processes of CVS on CHSP, i.e. on machines that were not originally designed for this. In other words, if for some reason there is a simple CHSP, then it can be reconfigured to produce forgings / parts made by CVS methods, in particular, direct and reverse extrusion. From a theoretical point of view, the possibility of this is also confirmed by the nature of the theoretical graphs of changes in the technological loading of the press in relation to volumetric stamping operations: hot stamping, hot extrusion, cold extrusion and cold calibration-stamping. Specialized software allows to significantly reduce the design time and increase the efficiency of decision-making: the Mech-press computer support system for engineering decision-making (CSSED). The software package developed by the authors of the article has a modular structure and is designed to solve the problems of designing and performing verification calculations of assembly units of mechanical presses for various technological purposes

**Key words:** Ishikawa diagram, cold forging, hot forging, crank hot forging press, forging, detail, extrusion, CSSED Mech-press

## References

1. Filimonov Yu.F., Poznyak L.A. "Press stamping: a tutorial", Moscow, Mashinostroenie, 1964, 187 p.
2. Novokshchenov S.L., Yatsenko S.N., Milushev E.H., Shibaev P.B. "Questions process simulation of metal FORMING", *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Series 4 2020 International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment*, ICMTMTE 2020, Bristol, England, 2020, p. 042089
3. Sheiman E.L. "Modern classification and development trends of metalworking in the USA", *Forging and stamping production*, 2007, no. 4, pp. 28-34.
4. Bazyk A.S., Golovin V.A. "On the classification of parts obtained by cold volume stamping", *Forging and stamping production*, 1973, no. 9, pp. 4-9.
5. Artes A.E. "Problems of improving the quality of the structure of the procurement base of mechanical engineering", *Forging and stamping production*, 2002, no. 5, pp. 36-39.
6. Antonyuk F.I. "Comparative evaluation of the effectiveness of methods for increasing the accuracy of cold volume stamping based on statistical methods of analysis", *Forging and stamping production*, 2006, no. 12, pp. 19-23.
7. Sosnushkin E.N. "Automatic classification of mechanical engineering parts manufactured by cold and semi-hot volume stamping", *Blanking production in mechanical engineering*, 2006, no. 5, pp. 20-27.
8. Semenov S.S., Poltavsky A.V., Maklakov V.V., Kryanev A.V. "Review of decision-making methods in the development of complex technical systems", *Reliability*, 2014, no. 3(50), pp. 72-84.
9. Lansky E.N., Artes A.E. "Accuracy issues in cold extrusion", *Forging and stamping production*, 1980, no. 9, pp. 12-14.
10. Kondo K. "Improving the accuracy of forgings produced by cold die forging", *Forging and stamping production*, 2000, no. 5, pp. 28-32.
11. Kruk A.T., Boyko A.Yu., Milushev E.H., Novokshchenov S.L. "Scissors for cutting blanks by elastic reaction of the bed", *Procurement production in mechanical engineering*, 2021, no.8, pp. 380-383.
12. Vaitsekhovich S.M., Panov D.V., Krivenko G.G., Ovechkin L.M. "The prospect of cutting long products on mechanical presses in procurement production", *Procurement in mechanical engineering*, 2016, no.8, pp. 19-25.
13. Lansky E.N., Antonyuk F.I. "Analysis of the accuracy of cold extrusion of hollow forgings by statistical methods", *Forging and stamping production*, 2001, no. 5, pp. 14-20.
14. Solomonov K.N. "Computer-aided design of tools and technologies for volumetric stamping", *Forging and stamping production*, 2003, no. 8, pp. 42-48.
15. Kovalev V.G. Rybakov A.V. "Automation of the design of technological processes of sheet stamping. Part 1. Fundamentals of CAD creation", *Procurement production in mechanical engineering*, 2007, no.4, pp. 30-34.
16. Kovalev V.G. Rybakov A.V. "Automation of the design of technological processes of sheet stamping. Part 2. Basics of CAD creation. Continued", *Procurement production in mechanical engineering*, 2007, no. 6, pp. 26-32.
17. Suleymanov R.M., Bogokhudov S.I. "Automation of the design of stamped steel forgings in automated mechanical engineering // Procurement production in mechanical engineering", 2007, no. 4, pp. 20-29.
18. Novokshchenov S.L., Milushev E.H., Sukhorukov V.N. "Engineering decision support system", *Modern production technologies in mechanical engineering. Interuniversity collection of scientific papers*, Voronezh, 2024, pp. 35-41.
19. Novokshchenov S.L., Milushev E.H., Yatsenko S.N., Boyko A.Yu. "Automation of design of crank hot stamping presses using specialized software AMesh-press", *Procurement production in mechanical engineering*, 2024, no. 10, pp. 458-465.
20. Teterin G.P., Polukhin P.I. "Fundamentals of optimization and automation of design of technological processes of hot volumetric stamping", Moscow, Mashinostroenie, 1979, 24 p.
21. Korsakov V.S. et al. "Automation of the design of technological processes in mechanical engineering: a textbook", Moscow, Mechanical Engineering, 1985, 304 p.
22. Sosnushkin E.N. "Support for technical decision-making in the group method of forging forgings", *Forging and stamping production*, 2005, no. 9, pp. 10-16.
23. Kutz V.V. "Formation of the space of design parameters of metal-cutting machines at the early stages of design, taking into account the fluctuations of the links of the forming system on elastic supports", *News of the Southwestern State University, Kursk*, Southwestern State University, 2013, no. 1 (34), pp. 60-66.
24. Ivakhnenko A.G., Kutz V.V. "The concept of structural-parametric synthesis of metal-cutting systems with specified processing accuracy parameters", *Fundamental and applied problems of engineering and technology*, Orel, 2011, no. 4-2(288), pp. 106-113.
25. Ivakhnenko A.G., Kutz V.V. "Structural and parametric synthesis of technological systems: monograph", Southwestern State University, Kursk, 2010, 153 p.

26. Ivakhnenko A.G. et al. "Evaluation of the effectiveness of the methodology of structural-parametric synthesis of metal-cutting systems", *STIN*, no. 5, 2017, pp. 10-14.
27. Ivakhnenko A.G. et al. "Methodology of structural-parametric synthesis of metal-cutting systems", Komsomolsk-on-Amur State Technical University, Komsomolsk-on-Amur, 2015, 282 p.
28. Kutz V.V. "On the structural-parametric synthesis of metal-cutting machines with parallel kinematics", *Modern innovations in science and technology. Collection of scientific papers of the 7th All-Russian Scientific and Technical Conference with international participation*, Kursk, 2017, pp. 130-134.
29. Pozhbelko V.I., Kutz E.N. "Structural synthesis of a family of flat eight-branched kinematic chains of lever mechanisms with multiple hinges and the most complex three-ball link", *News of higher educational institutions. Mechanical engineering*, 2020, no.1, pp. 21-31.
30. Lanskoj E.N., Sosenushkin E.N. "Unification of blanks in cold and semi-hot volumetric stamping", *Forging and stamping production*, 1989, no. 11, pp. 17-19.
31. Fedorkevich V.F., Kruk A.T. "Crank hot-stamping presses of universal technological purpose", *Forging and stamping production*, 2000, no. 10, pp. 27-30.
32. Novokshchenov S.L., Milushev E.H., Skrygin O.V. "Improving the efficiency of using mechanical presses based on expanding technological capabilities", *Modern production technologies in mechanical engineering. Interuniversity collection of scientific papers*, Voronezh, 2024, pp. 47-52.
33. Month V.G., Gorozhankin V.N., Tynyanov V.N. "A refined method for determining the limits of permissible eccentric loading of crank hot-stamping presses", *Forging and stamping production*, 1989, no. 11, pp. 8-10.
34. Levanov A.N., Vichuzhanin D.I. "Self-compensating stamps for closed volumetric stamping", *Procurement production in mechanical engineering*, 2007, no. 11, pp. 24-27.
35. Fedorkevich V.F. "System of technological parameters for crank presses", *Forging and stamping production*, 2003, no. 10, pp. 14-15.
36. Yavtushenko A.V. "Improving the reliability of V-belt gears of mechanical presses", *East European Journal of Advanced Technologies*, 2013. no.7, pp. 59-62.
37. Yavtushenko A.V., Movshovich I.Ya. "The effect of sliding a V-belt transmission on the parameters of the flywheel of a mechanical press", *Forging and stamping production. Metal processing by pressure*, 2014. no.4, pp. 32-36.
38. Byalsky V.B. "Kinematics of crank-knee presses", *Forging and stamping production*, 1973, no. 6, pp. 31-36.

Submitted 16.12.2024; revised 20.02.2025

#### Information about the authors

**Sergey L. Novokshchenov** – Postgraduate Student, Department of Mechanical Engineering Technologies and Equipment, Southwestern State University, Kursk, Russia (94 50 let Oktyabrya str., Kursk 305040, Russia), Senior Lecturer, Department of Mechanical Engineering Technology, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: novoksl79@yandex.ru, ORCID: 0000-0001-5807-2144

**Vadim V. Kutz** – Dr. Sc. (Technical), Professor, Southwestern State University, Kursk, Russia (94 50 let Oktyabrya str., Kursk 305040, Russia), e-mail: kuc-vadim@yandex.ru, ORCID: 0000-002-3244-1359

**Evgeny V. Smolentsev** – Dr. Sc. (Technical), Professor, Department of Mechanical Engineering Technologies, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: smolentsev.rabota@gmail.com, ORCID: 0000-0002-8747-588X



**ОЦЕНКА ПРОГРЕВА ЛИСТОВОЙ МЕТАЛЛОЗАГОТОВКИ ПРИ «ХОЛОДНОМ»  
ФОРМОВАНИИ В ПРОИЗВОДСТВЕ ТРУБ БОЛЬШОГО ДИАМЕТРА****А.В. Ряжских<sup>1</sup>, В.Ф. Селиванов<sup>1</sup>, А.А. Хвостов<sup>1</sup>, Р.Е. Орлов<sup>2</sup>, А.Д. Слободин<sup>1</sup>****<sup>1</sup>Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия****<sup>2</sup>АО «Лискимонтажконструкция», г. Лиски, Россия**

**Аннотация:** проанализирован температурный отклик в зоне холодного формования листовой заготовки от действия пуансона трубоформующего пресса. Оценен тепловой эффект в зависимости от скорости деформации в рамках линейной теории упругости. Использован классический подход к моделированию термомеханической обстановки вблизи пуансона и интегрально во всем объеме листовой заготовки. Сделаны дополнения уравнений упругопластической деформации в сопряженном варианте модифицированным уравнением теплопроводности. Предложен для инженерных оценок упрощенный подход, заключающийся в замене источникового слагаемого в уравнении для деформации на источник теплоты с мощностью, которая локализована в области контакта пуансона. В этом случае отпадает необходимость идентификации коэффициента преобразования мощности трубоформовочного пресса в тепловую, который неочевидным образом зависит от кристаллической решетки листовой заготовки, ее химического состава и скрытной дефектности структуры. Формулировка математической модели в формате 3D формализована уравнением переноса теплоты по механизму теплопроводности с нелинейным источниковым слагаемым с заданием свободно-конвективного теплообмена на поверхностях без кромок. Нелинейная начально-краевая задача в безразмерной форме записи редуцирована процедурой координатного осреднения до задачи Коши для среднеобъемной безразмерной температуры в зависимости от относительного времени. Получено аналитическое решение, параметрами которого являются числа Био, безразмерная мощность теплового источника, а также геометрические размеры листовой заготовки. Вычислительный эксперимент проведен для исходных данных, характерных участку холодного формования предприятия АО «Лискимонтажконструкция». Результаты вычислительного эксперимента по кинетике изменения безразмерной температуры за цикл деформирования с учетом тепловых потерь в окружающее пространство листовой заготовки после операции формования составили порядка 10 °С, что подтвердилось натурными экспериментами с использованием мобильного тепловизора

**Ключевые слова:** температурное поле, теплопроводность, упруго-пластическая деформация, холодная «формовка»

**Введение**

«Холодная» формовка (сворачивание) плоской заготовки в цилиндрическую является реперной операцией в технологии сварных труб большого диаметра, которая, как правило, осуществляется при обычной температуре пошаговым способом гибки от подогнутых кромок к середине по всей длине листа с получением профиля в виде незамкнутой окружности [1]. Число проходов до середины листовой заготовки составляет 17 для трубы диаметром 1420 мм.

Повышение температуры в зоне деформирования от действия пуансона трубоформующего пресса – общеизвестное явление, которое определяется множеством сопряженных факторов [2], среди которых тип кристаллической решетки, химический состав, дефектность структуры, скорость деформации, температура и др. Тепловой эффект может достигать значительных величин, но анализ температурного состояния, как правило, проводится по темпе-

ратурным полям в зоне локальной деформации без учета габаритных размеров листовой заготовки и функционала прессового оборудования [3]. Однако в [4] показано, что при высокоскоростной деформации необходимо учитывать полную топологию листовой заготовки. Приводятся функциональные зависимости температуры в зоне деформирования в области пластической деформации и скорости ее изменения и отмечается возможное повышение температуры за одно формование порядка 20 °С.

В этой связи необходимо выяснить: способно ли свободноконвективное воздушное охлаждение на производственной площадке компенсировать нагрев листовой заготовки в технологическом цикле «холодного» формования [5]. Пластическая деформация является в термодинамическом смысле необратимым процессом, при котором часть затраченной энергии трубоформовочным прессом рассеивается в виде тепла, а часть аккумулируется дефектной структурой [6]. Классический подход к моделированию такой термомеханической задачи основан на дополнении уравнений упруго-



пластической деформации в сопряженном варианте уравнением теплопроводности [7]

$$a\nabla^2 t - \frac{\partial t}{\partial \tau} = -\frac{\beta \bar{\bar{\sigma}} \cdot \bar{\bar{\varepsilon}}^p}{\rho c_p} + \frac{\lambda}{\rho c_p} \frac{E}{(1-2\nu)} t_c \text{tr}(\bar{\bar{\varepsilon}}^e), \quad (1)$$

где  $a$  – коэффициент температуропроводности материала листовой заготовки;

$\rho$  – плотность;

$c_p$  – теплоемкость;

$\bar{\bar{\sigma}}$  – тензор напряжений;

$\bar{\bar{\varepsilon}}^p$  – тензор скорости пластической деформации;

$\lambda$  – теплопроводность;

$E$  – модуль Юнга;

$\nu$  – коэффициент Пуассона;

$\bar{\bar{\varepsilon}}^e$  – тензор скорости упругой деформации;

$t_c$  – температура окружающей среды;

$\text{tr}$  – след тензора;

$\tau$  – время;

$\beta = \rho c_p (\partial t / \partial \tau) / (\partial W^p / \partial \tau)$  – коэффициент

преобразования мощности трубоформочного прессы  $W^p$  в тепловую.

Несмотря на общий вид уравнения (1), воспользоваться им сложно из-за проблемы определения коэффициента  $\beta$ . Калориметрический метод в данном случае имеет невысокую точность т.е. основывается на предположении о квазистатичности деформации, поэтому его точность невелика. Более того, оказывается, что  $\beta$  зависит и от деформации, поэтому в [8] введены интегральная и дифференциальная его форма, но экспериментальный способ пока остается наиболее достоверным.

Одним из подходов упрощения синтеза оценки термического состояния листовой заготовки при его формировании может быть рассмотрение тепловой не сопряженной подзадачи, связанной с механической подзадачей через источник теплоты объемной мощностью  $q$ , локализованный в области контакта пуансона. Это означает, что правая часть уравнения (1) является только функцией  $q$ .

### Постановка задачи

В соответствии с расчетной схемой (рис. 1), на которой показана декартова система координат в формате 3D, введена структура правой части уравнения в виде:

$$f(x, \tau) = q [1(x - x_1) - 1(x - x_2)] \times [1(\tau) - 1(\tau - \tau_0)], \quad (2)$$

где  $q = \text{const}$ ;

$x_{1,2}$  – координаты ширины области соприкосновения пуансона и листовой заготовки;

$\tau_0$  – время деформации;

$1(\dots)$  – функция Хэвисайда.

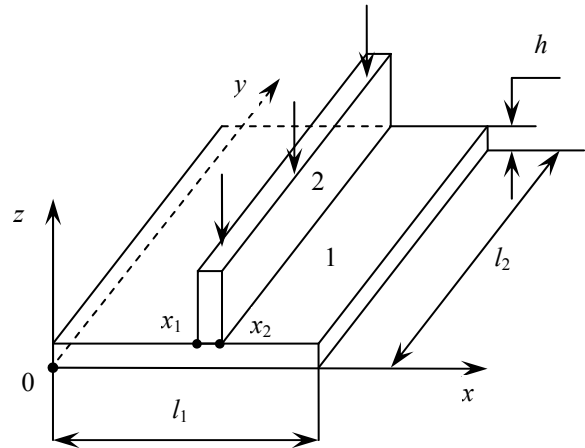


Рис. 1. Расчетная схема:  
1 – листовая заготовка; 2 – пуансон

Ввиду того, что  $h \ll L_{1,2}$ , то теплообменом через кромку листовой заготовки можно пренебречь, тогда математическая модель температурного поля в системе пуансон – листовая заготовка может быть представлена следующей начально-краевой задачей:

$$\rho c_p \frac{\partial t}{\partial \tau} = \lambda \left( \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right) + f(x, \tau); \quad (3)$$

$$t(x, y, z, 0) = t_h; \quad (4)$$

$$\frac{\partial t(0, y, z, \tau)}{\partial x} = \frac{\partial t(l_1, y, z, \tau)}{\partial x} = 0; \quad (5)$$

$$\frac{\partial t(x, 0, z, \tau)}{\partial y} = \frac{\partial t(x, l_2, z, \tau)}{\partial y} = 0; \quad (6)$$

$$\lambda \frac{\partial t(x, y, 0, \tau)}{\partial z} = \alpha [t(x, y, 0, \tau) - t_c]; \quad (7)$$

$$-\lambda \frac{\partial t(x, y, h, \tau)}{\partial z} = \alpha [t(x, y, h, \tau) - t_c]; \quad (8)$$

где  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи;

$t_h$  – начальная температура листовой заготовки.

Система (2) – (8) в безразмерной форме записи такова:

$$\frac{\partial T}{\partial \theta} = \frac{\partial^2 T}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial Y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial Z^2} + Q[1(X - X_1) - 1(X - X_2)] \times \\ \times [1(\theta) - 1(\theta - \theta_0)]; \quad (9)$$

$$T(X, Y, Z, 0) = 1; \quad (10)$$

$$\frac{\partial T(0, Y, Z, \theta)}{\partial X} = \frac{\partial T(L_1, Y, Z, \theta)}{\partial X} = 0; \quad (11)$$

$$\frac{\partial T(X, 0, Z, \theta)}{\partial Y} = \frac{\partial T(X, L_2, Z, \theta)}{\partial Y} = 0; \quad (12)$$

$$\frac{\partial T(X, Y, 0, \theta)}{\partial Z} = Bi \cdot T(X, Y, 0, \theta); \quad (13)$$

$$\frac{\partial T(X, Y, 1, \theta)}{\partial Z} = -Bi \cdot T(X, Y, 1, \theta), \quad (14)$$

где  $X = x/h$ ;  $Y = y/h$ ;  $Z = z/h$ ;  $X_{1,2} = x_{1,2}/h$ ;  $\theta = a\tau/h^2$ ;  $\theta_0 = a\tau_0/h^2$ ;  $a = \lambda/(\rho c_p)$ ;  $Bi = \alpha h/\lambda$ ;  $Q = qh^2/[\lambda(t_h - t_c)]$ .

#### Линеаризация уравнений модели

Сначала выполнена процедура координатного осреднения по  $X$  задачи (9) – (14) путем умножения (9) на  $dX/L_1$  и интегрирования его от 0 до  $L_1$

$$\frac{1}{L_1} \int_0^{L_1} \frac{\partial T}{\partial \theta} dX = \frac{1}{L_1} \left( \int_0^{L_1} \frac{\partial^2 T}{\partial X^2} dX + \int_0^{L_1} \frac{\partial^2 T}{\partial Y^2} dX + \int_0^{L_1} \frac{\partial^2 T}{\partial Z^2} dX \right) + \frac{Q}{L_1} \int_0^{L_1} [1(X - X_1) - 1(X - X_2)] dX \times \\ \times [1(\theta) - 1(\theta - \theta_0)]. \quad (15)$$

Если ввести среднюю по координате  $X$  безразмерную температуру

$$\bar{T}(Y, Z, \theta) = \frac{1}{L_1} \int_0^{L_1} T(X, Y, Z, \theta) dX$$

и иметь в виду, что

$$\int_0^{L_1} [1(X - X_1) - 1(X - X_2)] dX = X_2 - X_1 = \Delta X,$$

то (15) примет вид

$$\frac{\partial \bar{T}}{\partial \theta} = \frac{1}{L_1} \left[ \frac{\partial \bar{T}(L_1, Y, Z, \theta)}{\partial X} - \frac{\partial \bar{T}(0, Y, Z, \theta)}{\partial X} \right] + \frac{\partial^2 \bar{T}}{\partial Y^2} + \frac{\partial^2 \bar{T}}{\partial Z^2} + \frac{Q}{L_1} \Delta X [1(\theta) - 1(\theta - \theta_0)], \quad (16)$$

но согласно (15)

$$\frac{\partial \bar{T}(L_1, Y, Z, \theta)}{\partial X} - \frac{\partial \bar{T}(0, Y, Z, \theta)}{\partial X} = 0,$$

поэтому (16) упростится

$$\frac{\partial \bar{T}}{\partial \theta} = \frac{\partial^2 \bar{T}}{\partial Y^2} + \frac{\partial^2 \bar{T}}{\partial Z^2} + \frac{Q}{L_1} \Delta X [1(\theta) - 1(\theta - \theta_0)]. \quad (17)$$

Аналогичная процедура по безразмерной координате  $Y$  в (17) приводит к уравнению

$$\frac{\partial \bar{\bar{T}}}{\partial \theta} = \frac{\partial^2 \bar{\bar{T}}}{\partial Z^2} + \frac{Q}{L_1 L_2} \Delta X [1(\theta) - 1(\theta - \theta_0)], \quad (18)$$

где

$$\bar{\bar{T}}(Z, \theta) = \frac{1}{L_2} \int_0^{L_2} \bar{T}(Y, Z, \theta) dY.$$

И, наконец, осреднение (18) по безразмерной координате  $Z$  дает следующий результат

$$\frac{d\bar{\bar{T}}}{d\theta} = -2Bi \cdot \bar{\bar{T}} + \frac{Q}{L_1 L_2} \Delta X [1(\theta) - 1(\theta - \theta_0)] \quad (19)$$

с начальным условием

$$\bar{\bar{T}}(0) = 1. \quad (20)$$

Решение задачи Коши (19), (20):  
при  $\theta \leq \theta_0$

$$\bar{\bar{T}}(\theta) = \exp(-2Bi \cdot \theta) \left\{ 1 + \frac{Q \Delta X}{2Bi L_1 L_2} \times \right. \\ \left. \times [\exp(2Bi \cdot \theta) - 1] \right\}; \quad (21)$$

при  $\theta > \theta_0$

$$\bar{\bar{T}}(\theta) = \exp(-2Bi \cdot \theta) \left\{ 1 + \frac{Q \Delta X}{2Bi L_1 L_2} \times \right.$$

$$\times [\exp(2Bi \cdot \theta_0) - 1] \}. \quad (22)$$

### Анализ

Исходные данные для расчетов: геометрия листовой заготовки  $l_1 = 4.5 \text{ м}$ ,  $l_2 = 12 \text{ м}$ ,  $h = 0.047 \text{ м}$  [9]; площадь поверхности листа составляет с обеих сторон  $2l_1 \cdot l_2 = 108 \text{ м}^2$ ; площадь кромок  $2(l_1 + l_2)h = 1.551 \text{ м}^2$ , т.е. существенно меньше, поэтому в модели предположение о незначительности теплообмена от кромок справедливо. Теплофизические свойства материала листовой заготовки таковы [10]:  $\lambda = 74 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$ ;  $\rho = 7850 \text{ кг/м}^3$ ;  $c_p = 4620 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)}$ . Коэффициент теплоотдачи рассчитан согласно [11] по формуле

$$\alpha = 1.3\Phi \left( \frac{\Delta t}{\sqrt{l_1 l_2}} \right)^{1/4},$$

где  $\Phi = 1.38$  для воздуха. Удельная поверхность воздействия пуансона на единицу длины листовой заготовки при деформировании  $\Delta x = 0.05 \text{ м}$ . Время деформирования  $\tau_0 = 60 \text{ с}$ , время цикла деформирования составляет  $\tau_c = 180 \text{ с}$ . Модуль Юнга для сталей составляет  $E = 2 \cdot 10^{11} \text{ Па}$ , причем относительное изменение характерного размера при формировании составляет  $\epsilon \sim 0.01$ , поэтому затраты на упругое деформирование равны  $U = E\epsilon^2/2 = 10^9 \text{ Дж}$ . Т.к.  $\beta \sim 0.01$ , то энергия на тепловыделение будет  $\Omega = \beta U = 10^7 \text{ Дж}$ , при этом температура возрастает на  $\Omega/(c_p \rho h \Delta x l_2) = 9.8^\circ \text{C}$ , а в пересчете на весь лист  $0.11^\circ \text{C}$ . Отсюда методом пассивной стратегией найдено  $q = 1.5 \cdot 10^9 \text{ Вт/м}^3$ . Расчет по (22) кинетики изменения безразмерной температуры за цикл деформирования приведен на рис. 2, если число циклов 34, то температура листовой заготовки возрастет практически на  $\approx 4^\circ \text{C}$ , причем локальный перегрев в зоне деформирования пуансоном значительно выше, т.е. порядка  $10^\circ \text{C}$ , что подтверждается измерением с помощью тепловизора Cemdt-9887.

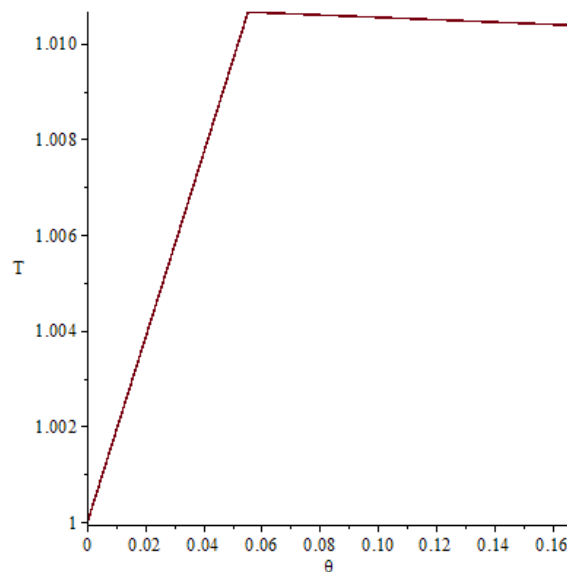


Рис. 2. Нагрев листа заготовки за цикл «холодного» деформирования

### Заключение

Показана возможность упрощения сопряженной термомеханической задачи, учитывающей упруго-пластические деформации через оценку теплового поля листовой заготовки при его формировании с помощью механизма теплопроводности с объемной мощностью в области контакта Пуансона.

Сформулированная 3D краевая задача с учетом свободно-конвективного теплообмена редукцией сведена в конечном итоге к математической модели с сосредоточенными параметрами в зависимости от текущего времени. Это позволило получить аналитические оценки термодинамических параметров процессов формирования в общем виде.

Конкретный вычислительный эксперимент, базирующийся на исходных данных, соответствующих производственным условиям, показал, что среднеинтегральное прогревание листовой заготовки при холодном формировании на 10С возможно (подтверждено натурными экспериментальными измерениями с помощью тепловизора).

### Литература

1. Романцев Б.А., Гончарук А.В., Вавилкин Н.М., Самусев С.В. Трубное производство. М.: Изд. дом МИ-СиС. 2011. 970 с.
2. Влияние скорости деформации на тепловыделение при квазистатическом растяжении металлов. Эксперимент / Б.А. Зимин, В.Е. Свентицкая, И.В. Смирнов, Ю.В. Судьенков // Физика твердого тела. 2018. Т. 60. №4. С. 754-759.

3. Журавлев Г.М., Той Д.Т. Расчет температурного поля в зоне пластической деформации // Изв. ТулГУ. Технические науки. 2012. № 2. С.221-227.

4. A thermodynamic internal variable model for the partition of plastic work into heat and stored energy in metals / P. Rosakis, A.J. Rosakis, G. Ravichandran, J. Hodowany // J. of the Mechan. and Physics of Solids. 2000. V.48. pp. 581-607.

5. Машины и агрегаты для производства стальных труб / Ю.Ф. Шевакин [и др.]. М.: Интернет Инжиниринг. 2007. 388 с.

6. Rittel D. Transient temperature measurement using embedded thermocouples // Exp. Mech. 1998. V. 38. pp. 73-78.

7. Mason J.J., Rosakis A.J., Ravichandran G. On the strain and strain rate dependence of the fraction of plastic

work converted to heat: an experimental study using high speed infrared detectors and the Kolsky bor // Mechanics of Materials. 1994. V.17. pp. 135-145.

8. Two-stage heat dissipation in plastic deformation of metals under ultra-high strain rate deformation / J. Sun [et al.] // Materials & Design. 2024. V. 246. Pp. 113314.

9. Технология трубного производства / В.Н. Данченко [и др.]. М.: Интернет Инжиниринг. 2002. 638 с.

10. Лариков Л.Н., Юрченко Ю.Ф. Структура и свойства металлов и сплавов. Тепловые свойства металлов и сплавов. Киев: Наукова думка. 1985. 437 с.

11. Овчинников С.В. Конвективный теплообмен. Методики инженерного расчета коэффициента конвективной теплоотдачи. Саратов: СГУ. 2015. 48 с.

Поступила 26.11.2024; принята к публикации 17.02.2025

### Информация об авторах

**Ряжских 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: ryazhskikhav@bk.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9823-3165>

**Селиванов Владимир Федорович** – д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой технологии сварочного производства и диагностики, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: vf\_selivanov@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6041-6484>

**Хвостов Анатолий Анатольевич** – д-р техн. наук, профессор, 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>

**Орлов Роман Евгеньевич** – главный инженер, АО «Лискимонтажконструкция» (397907, Россия, г. Лиски, ул. Монтажные, 1), e-mail: vf\_selivanov@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1464-6799>

**Слободин Александр Дмитриевич** – аспирант кафедры технологии сварочного производства и диагностики, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: tspd.kaf@cchgeu.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-6105-6470>

## EVALUATION OF HEATING OF SHEET METAL WORKPIECE DURING «COLD» MOLDING IN THE PRODUCTION OF LARGE-DIAMETER PIPES

A.V. Ryazhskikh<sup>1</sup>, V.F. Selivanov<sup>1</sup>, A.A. Khvostov<sup>1</sup>, R.E. Orlov<sup>2</sup>, A.D. Slobodin<sup>1</sup>

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

<sup>2</sup>JSC «Liskimontazhkonstruction», Liski, Russia

**Abstract:** the temperature response in the cold forming zone of a sheet blank from the action of the punch of a tube-forming press is analyzed. The thermal effect is estimated depending on the strain rate within the framework of the linear theory of elasticity. The classical approach to modeling the thermomechanical environment near the punch and integrally throughout the volume of the sheet blank is used. Supplements are made to the equations of elastic-plastic deformation in the conjugate version with a modified heat conductivity equation. It is proposed to use a simplified approach for engineering assessments, consisting in replacing the source term in the equation for deformation with a heat source with a power that is localized in the contact area of the punch. In this case, there is no need to identify the coefficient of conversion of the power of the pipe-forming press into heat, which does not obviously depend on the crystal lattice of the sheet blank, its chemical composition and latent defects of the structure. The formulation of the mathematical model in 3-D format is formalized by the heat transfer equation according to the heat conduction mechanism with a nonlinear source term with the assignment of free-convective heat exchange on surfaces without edges. The nonlinear initial-boundary value problem in dimensionless form of recording is reduced by the procedure of coordinate averaging to the Cauchy problem for the average volumetric dimensionless temperature depending on the relative time. An analytical solution is obtained whose parameters are the Biot numbers, the dimensionless power of the heat source, and the geometric dimensions of the sheet blank. The computational experiment was carried out for the initial data characteristic of the cold forming section of the enterprise JSC "Liskimontazhkonstruction". The results of the computational experiment on the kinetics of the change in the dimensionless temperature during the deformation cycle taking into account the heat losses into the surrounding space of the sheet blank after the forming operation were about 10°C, which was confirmed by full-scale experiments using a mobile thermal imager

**Key words:** temperature field, thermal conductivity, elastic-plastic deformation, "cold" forming

### References

1. Romantsev B.A., Goncharuk A.V., Vavilkin N.M., Samusev S.V. "Pipe production", Moscow, MISiS, 2011, 970 p.
2. Zimin B.A., Sventitskaya V.E., Smirnov I.V., Sudienkov Yu.V. "The influence of strain rate on heat generation during quasi-static tension of metals. Experiment", *Solid State Physics*, 2018, vol. 60, no. 4, pp. 754-759.
3. Zhuravlev G.M., Toy D.T. "Calculation of the temperature field in the zone of plastic deformation", *News of Tula State University. Technical science*, 2012, no. 2, pp.221-227.
4. Rosakis P., Rosakis A.J., Ravichandran G., Hodowany J. "A thermodynamic internal variable model for the partition of plastic work into heat and stored energy in metals", *J. of the Mechan. and Physics of Solids*, 2000, vol. 48, pp. 581-607.
5. Shevakin Yu.F. et al. "Machines and units for the production of steel pipes", Moscow, Internet Engineering, 2007, 388 p.
6. Rittel, D. "Transient temperature measurement using embedded thermocouples", *Exp. Mech.*, 1998, vol.38, pp. 73-78.
7. Mason J.J. Rosakis A.J., Ravichandran G., Mason J.J. "On the strain and strain rate dependence of the fraction of plastic work converted to heat: an experimental study using high speed infrared detectors and the Kolsky bor", *Mechanics of Materials*, 1994, vol.17, pp. 135-145.
8. Sun, J., Chen K., Lan R., Du X., Kang D., Dai J. "Two-stage heat dissipation in plastic deformation of metals under ultra-high strain rate deformation", *Materials & Design*, 2024, vol. 246, p. 113314.
9. Danchenko V.N. et al. "Pipe production technology", Moscow, Internet Engineering, 2002, 638 p.
10. Larikov L.N., Yurchenko Yu.F. "Structure and properties of metals and alloys. Thermal properties of metals and alloys", Kyiv, Naukova Dumka, 1985, 437 p.
11. Ovchinnikov S.V. "Convective heat transfer. Engineering calculation methods of the convective heat transfer coefficient", Saratov, SSU, 2015, 48 p.

Submitted 26.11.2025; revised 17.02.2025

### Information about the authors

**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>.

**Vladimir F. Selivanov** – Dr. Sc. (Technical), Professor, Head of the Department of Welding Production Technology and Diagnostics, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: vf\_selivanov@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6041-6484>

**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>.

**Roman E. Orlov** – Chief Engineer, JSC «Liskimontazhconstruction» (1 Montazhnikov str., Liski 397907, Russia), e-mail: vf\_selivanov@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1464-6799>

**Alexander D. Slobodin** – Postgraduate Student, Department of Welding Production Technology and Diagnostics, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-6105-6470>



## АНАЛИЗ ОСОБЕННОСТЕЙ ФОРМИРОВАНИЯ ЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ В МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

А.В. Норман, А.П. Суворов, Ю.С. Золототрубова, Э.И. Воробьев

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

**Аннотация:** представлен анализ особенностей формирования различных видов функциональных покрытий, применяемых в машиностроительном производстве для получения требуемых эксплуатационных свойств деталей. Подробно рассмотрены различные методы формирования функциональных защитных покрытий на поверхности деталей машиностроения. Установлено, что наиболее перспективным способом формирования покрытий при изготовлении комбинированного электрода-инструмента (ЭИ) для электрических методов обработки является метод гальванопластики, который позволяет сформировать металлические покрытия. Такие покрытия представляют собой распределение тонкого беспористого слоя одного материала по поверхности другого, что обеспечивает защиту металлической основы инструмента от воздействия окружающей агрессивной технологической среды. Рассмотрена возможность формирования токопроводящего покрытия на поверхности электрода-инструмента, выполненного из токонепроводящего материала с помощью аддитивных технологий. Для получения на поверхности ЭИ износостойкого токопроводящего слоя требуемой толщины (до 40 мкм), гарантировано обеспечивающего протекание электрических процессов в межэлектродном зазоре при электрохимической обработке, предложен и подробно описан новый подход гальванического осаждения меди. Отличительной особенностью формирования такого покрытия на поверхности токонепроводящей основы является наличие промежуточного токопроводящего слоя, выполненного на базе графитового лака. Предлагаемый способ позволит существенно расширить технологические возможности электрических методов обработки в условиях единичного и экспериментального производства

**Ключевые слова:** защита деталей, покрытия, методы, процесс, свойства, стойкость, твердость, электрод-инструмент, гальваника

### Введение

В машиностроительном производстве активно применяются различные технологии, позволяющие сформировать покрытия, обеспечивающие получение требуемых эксплуатационных свойств рабочих поверхностей деталей [1]. При создании на поверхности изделия защитного слоя с особыми свойствами следует придерживаться таких требований, как защита поверхности от всевозможных воздействий, повышения эксплуатационных характеристик и т.д.

Основными аспектами, на которые необходимо обращать внимание при выборе покрытия, являются доступность технологии нанесения, возможность создания на поверхности однородной, плотной беспористой пленки, сохранение качественных характеристик слоя в процессе эксплуатации под воздействием определенных нагрузок и рабочих жидкостей.

В современном машиностроении вопросу технологической модификации поверхностного слоя уделяется большое внимание как отдельной особой области знаний о функциональных материалах.

Среди различных подходов, позволяющих сформировать на поверхности заготовки защитных покрытия, можно дифференцировать в зависимости от принципа их формирования, на два основных типа, а именно: покрытия, представляющие собой диффузионный слой, и покрытия, полученные как результат проникновения легирующих элементов, например, при химико-термической обработки, в поверхностные слои металла заготовки. Такие покрытия отличаются по своему химическому составу; покрытия, образованные путем нанесения на рабочую поверхность детали слоя, кардинально отличающегося по составу от основы, например, методом напыления, осаждения, наплавки или нанесением эмалей и лакокрасок.

В связи с этим создание составных защитных слоев посредством комбинации различных методов позволяет расширить технологические возможности производства.

### Материалы и методы

Применяемые в машиностроении защитные покрытия условно можно разделить на неорганические и органические, к которым можно отнести: лаки, краски, полиэтилен, резина,

пластмасса (АСТ-Т), стеклотекстолит, текстолит и т.п. (рис. 1).

В основе технологического процесса нанесения твёрдых однородных слоёв покрытия, толщиной не менее 75 мкм, сочетающих жидкий лак и высокодисперсный пигмент, на по-

верхность тонким слоем лежит метод распыления или окунания. Однако стоит отметить, что такая толщина покрытий не всегда гарантирует стабильность требуемых защитных свойств.

Капрон, полиэтилен, и другие пластмассы наносят в псевдокипящем слое.



Рис. 1. Способы нанесения покрытий

Кроме лакокрасочных материалов и смол, на поверхность металлов в качестве защитного слоя наносят пластмассу типа АСТ-Т, стиракрил, а также резину специального назначения, которая обладает высокой адгезией к металлам. Отличительной особенностью вышеуказанных покрытий являются высокие показатели упругости, гарантирующие их целостность с сохранением защитных свойств на поверхности даже при наличии существенного воздействия кон-

векционных потоков рабочей среды. Однако рабочая температура покрытий не должна превышать 325 – 330 К. Нарушение указанного температурного режима может привести к разрушению резины и негативно сказаться на состоянии поверхности металла. Так как резина отличается повышенной упругостью и обладает способностью деформироваться при прилагаемых к ней усилиях, то точное базирование резиновой детали невозможно.

Неорганические покрытия разделяются на стекловидные эмали и конверсионные покрытия, наносимые различными методами.

Такие покрытия являются наиболее распространёнными, поскольку обладают набором определенных свойств, что выигрышно отличает их от других покрытий.

Конверсионные покрытия, в свою очередь, делятся на [1], [2]:

- металлические покрытия [3];
- покрытия, наносимые химическим методом [4];
- покрытия, получаемые различными методами оксидирования [5].

Именно конверсионные покрытия нашли наиболее широкое применение в авиа- и машиностроении. С целью защиты металлической основы от воздействия окружающей технологической среды, как правило, агрессивной, часто используют неметаллические покрытия, а именно оксидные пленки, получаемые химическим или электрохимическим методом (рис. 1) [2]. Так же немаловажную роль в обеспечении защиты металлических изделий играют химические покрытия. Такие покрытия получают способом химического оксидирования или химическим осаждением металлических слоев.

Процесс химического оксидирования металла, например, алюминия, протекает в слабощелочном растворе, содержащем хроматы. А также обработка может выполняться в растворе, с добавлением ортофосфорной кислоты и соединения фтора. В процессе данной обработки образуются пленки низкой прочности, толщина которых не превышает 2-3 мкм. Такие покрытия характеризуются низкой стойкостью к воздействию горячей воды и воздуха.

Кислотные растворы позволяют получить пленки большей толщины, до 4-5 мкм, с более высокими показателями механической прочности и повышенными электроизоляционными свойствами.

Среди различных подходов нанесения металлических покрытий можно выделить следующие основные методы:

1. Диффузионный метод включает в себя следующие процессы: гальванический, термодиффузионный, плакирование (термомеханический метод), металлизация напылением, горячий метод (погружение в расплавленный металл).

2. Газотермический метод, заключающийся в модификации поверхностного слоя, происходящей в результате его насыщения жидким материалом диспергированным газовой струей.

Различают следующие способы напыления: плазменное, газопламенное, электродуговое, высокочастотное, а также напыление газотермических порошковых покрытий и упрочнение вакуумно-дуговым методом [6], в основе которых заключены различные способы нагрева и переноса частиц материала покрытия на поверхностный слой.

3. Методы сварки, применяемые для получения покрытия с износостойким слоем: наплавка под слоем флюса, вибродуговая наплавка, наплавка в среде газа, способ электроконтактной приварки металлического слоя, способ электрошлаковой наплавки [7].

4. Электроэрозионный метод [7], [8], [9], при котором металл, расплавленный под действием импульсов, происходящих в воздушной среде, частично диффундирует в поверхность заготовки, формируя прочно сцепленный с ней поверхностный слой, посредством переноса материала анода (инструмента) на катод (заготовку) преимущественно из тугоплавких материалов, обладающий комплексом ценных эксплуатационных свойств.

## Результаты исследований

При изготовлении комбинированного электрода-инструмента (ЭИ), применяемого при электрических методах обработки, авторами предлагается новый подход к формированию токопроводящего покрытия на поверхности электрода, созданного на основе аддитивных технологий [10], [11]. В качестве наиболее перспективного метода формирования такого покрытия был выбран метод гальванопластики [12], который предполагает распределение тонким слоем материала покрытия по поверхности заготовки.

Известны два способа получения таких покрытий:

1. Катодное напыление. Процесс напыления заключается в формировании на основной поверхности тонкого защитного слоя частиц, которые под действием электродуги отделяются от гальванизированного металла, образуя разряженный газ.

Недостатком процесса является нежелательное окисление поверхности, а также чрезмерное загрязнение готового изделия, происходящее в результате взаимодействия металла с газом.

2. Анодное нанесение. Суть метода заключается в создании защитного антикоррозионного покрытия в результате анодного окисления

металла под действием приложенного электрического тока. При этом на поверхности заготовки происходят химические реакции между материалами катода и анода, с непосредственным участием элементов рабочей жидкости, которые прямым образом влияют на качественные характеристики формируемого слоя.

В зависимости от выбранных сплавов и заданных технических характеристик изделия нанесение различных видов покрытий возможно следующими способами:

- хромирование или химическая металлизация: наиболее часто применяется для формирования антикоррозионных покрытий на стальных поверхностях. Хромированная деталь также проявляет высокую устойчивость к преждевременному износу и к влиянию агрессивных жидкостей и реагентов;

- меднение: процесс, протекающий в среде органических кислот и сложных комплексных электролитов. Данный способ основан на осаждении атомов меди в один или несколько слоёв на поверхности изделия с целью повышения её электропроводности, а также придания изделию эстетических и защитных свойств;

- цинкование: гальванический способ нанесения цинковых слоёв из растворов электролитов, основными компонентами которых являются соли цинка. Применение данного вида покрытий (преимущественно для чёрных металлов) позволяет достичь определённых антикоррозионных, защитно-декоративных и антифрикционных свойств;

- железнение: данный способ подразумевает покрытие молекулами железа поверхностей деталей, выполненных из более хрупкого или мягкого материала, с целью повышения эксплуатационных свойств, например, придание дополнительной прочности или твердости поверхностям, подверженным активному механическому износу или для обеспечения ее проводимости;

- никелирование [13]: процесс нанесения тонких слоев никеля на поверхности медных, алюминиевых или стальных изделий в сульфатных, хлоридных, сульфаминовых, борфторидных, щавелевокислых и других электроли-

тах. Такие покрытия применяют для защиты от негативного воздействия внешней среды, в том числе и технологической, а также в качестве декоративных и для формирования переходного слоя при хромировании;

- латунирование представляет собой гальванический процесс, в результате которого на поверхности стальных деталей формируется равномерный тонкий слой латуни, обеспечивающий устойчивость к коррозии и окислению, хорошие адгезионные свойства и электропроводность;

- родирование – процесс покрытия поверхности изделия родием, который обладает хорошей отражательной способностью, электропроводностью, жаростойкостью, износостойкостью и стойкостью к воздействию кислотно-щелочных сред и химикатов;

- серебрение: серебряное гальваническое покрытие способно придать изделию не только благородный вид, но и ряд ценных характеристик, таких как электропроводность, износостойкость, коррозионную стойкость и другие свойства, позволяющие применять данные покрытия в различных областях промышленности;

- золочение: помимо широкого применения данной технологии в ювелирной промышленности, где важную роль играет эстетический внешний вид, данный процесс является ключевым при изготовлении многих технических образцов (например, деталей электроприборов, электроники и т.д.), где изделию необходимо придать такие свойства, как износостойкость, твердость, прочность, пластичность, электропроводность и стойкость к коррозии;

- лужение: способ, позволяющий нанести на поверхности изделия оловянный слой, который отличается низкой химической активностью, хорошей адгезией, высокой термической стойкостью и пластичностью. Область применения данного процесса - это производство чипов, микросхем, радиоэлектроники, спецтехники, авиационной техники.

Для получения комбинированного электрода-инструмента был выбран способ меднения (рис. 2). Данный выбор обусловлен повышенной износостойкостью медных ЭИ.



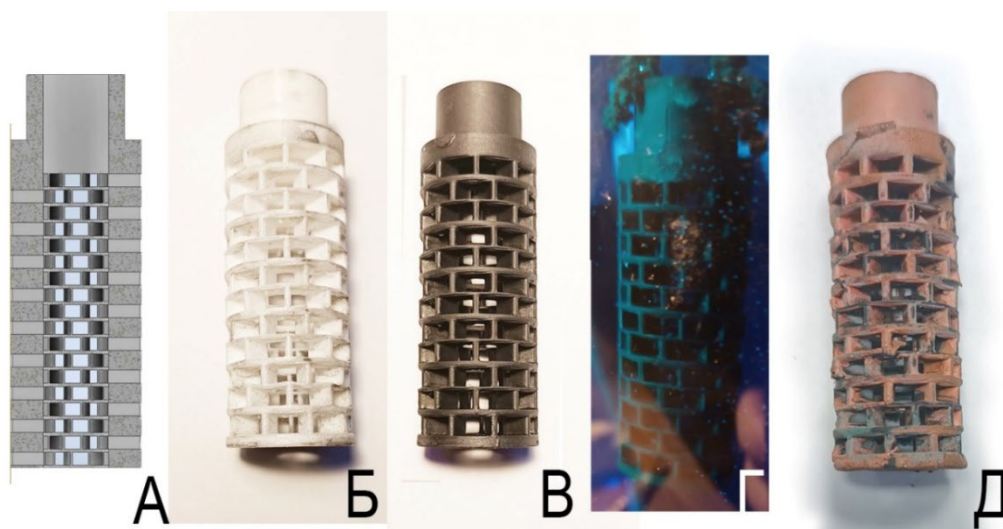


Рис. 2. Этапы создания комбинированного ЭИ:

А – этап создания цифрового прототипа ЭИ; Б – этап изготовления прототипа с помощью аддитивных технологий; В – этап формирования токопроводящего покрытия на поверхности ЭИ с помощью графитового лака; Г – осаждение меди в растворе электролита; Д – создание покрытие

Итак, толщина формируемого гальванического покрытия на поверхности ЭИ зависит от вида материала будущей заготовки и находится в пределах от 2,5 до 40 мкм.

Для нанесения гальванопокрытия на неметаллические поверхности [14] придерживаются следующей последовательности:

1. Создание основы (заготовки) ЭИ из токонепроводящего материала с применением аддитивных технологий [15], [16].

2. Формирование токопроводящего слоя из графита или меди, выполненного путем нанесения графитового лака на поверхность ЭИ или металлической стружкой смешанной с клеем марки БФ.

3. Заполнение гальванической ванны рабочей средой - электролитом, оптимальная концентрация и состав которого требуют не только предварительного расчета, но и проведения дополнительного анализа и корректировки непосредственно перед эксплуатацией.

4. Погружение предварительно подготовленной заготовки в раствор электролита.

5. Установление и подача требуемой плотности тока на положительные электроды, погруженные в электролит.

6. Повышение температуры раствора электролита в резервуаре до значения 24 - 26 °С.

Подключение к детали минусового контакта и медленное погружение образца в электролит с размещением его между двумя анодами.

Как показывает эксперимент, скорость и качество формируемого гальванического покрытия будут напрямую зависеть от плотности

тока. А при слишком малой плотности тока скорость образования гальванического покрытия будет отставать от скорости выделения контактовыделенной меди, что в последующем вызывает отслаивание покрытия. Графически зависимость скорости осаждения от потенциала электрода представлена на рис. 3.

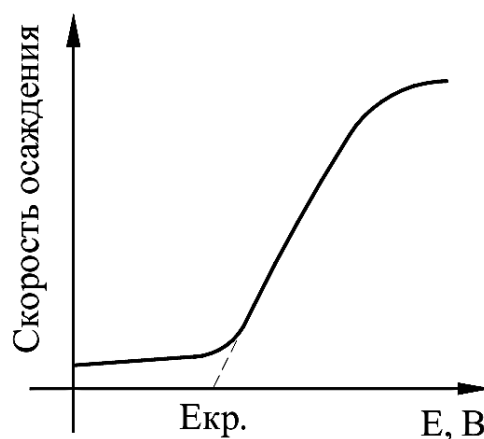


Рис. 3. Зависимость скорости осаждения от потенциала электрода

### Заключение

Использование технологии гальванического осаждения меди на поверхность токонепроводящей основы ЭИ позволяет получать токопроводящий слой требуемой толщины, гарантировано обеспечивающий протекание электрических процессов в межэлектродном зазоре. Это позволяет существенно расширить технологические возможности электрических мето-



дов обработки за счет создания токопроводящего покрытия на основе гальванизации комбинированных ЭИ в условиях единичного и экспериментального производства.

#### Литература

1. Семенова И.В. Коррозия и защита от коррозии. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006. 376 с.
2. Грибанов А.С., Перова А.В. Защита средств технологического оснащения от коррозии // Совершенствование производства поршневых двигателей для малой авиации: тр. отрасл. науч.-техн. конф. М.: Машиностроение, 2008. С. 97-104.
3. Повышение качества деталей из легкоплавких материалов путем нанесения покрытий из чугуна / А.В. Норман, В.П. Смоленцев, А.В. Норман, М.В. Кондратьев // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2023. Т. 19. № 3. С. 120-125.
4. Шалкаускас М.И., Вашкялис А. Химическая металлизация пластмасс. Л.: Химия, 1985. 144 с.
5. Смоленцев В.П., Перова А.В., Бондарь А.В. Применение алюминиевых сплавов с покрытием для изготовления технологической оснастки // Упрочняющие технологии и покрытия. 2007. № 9. С. 39-42.
6. Нанесение покрытий плазмой / В.В. Кудинов, П.Ю. Пекшев, В.Е. Белашенко [и др.]. АН СССР, ин-т металлургии им А.А. Байкова. М.: Наука, 1990. 406 с.
7. Клименко Ю.В. Электроконтактная наплавка. Под. ред. Э.С. Каракозова. М.: Металлургия, 1978. 127 с.
8. Электроискровое легирование деталей из алюминиевых сплавов / В.Е. Канарчук, А.Д. Чирринцев, В.И. Шевченко [и др.] // Технология и организация производства. 1990. № 2. С. 48-43.
9. Электрофизические и электрохимические методы обработки. В 2 т. Т.1. Обработка материалов с применением инструмента / Б.А. Артамонов, Ю.С. Волков, В.И. Дрожалова [и др.]; под ред. В.П. Смоленцева. М.: Высшая школа, 1983. 247 с.
10. Проблемы, возникающие в процессе литья по выплавляемым моделям с применением 3D печати методом FDM / О.А. Рябинина, Д.Ю. Левин, Д.А. Свиридов, А.Э. Алешина // Перспективы развития технологий обработки и оборудования в машиностроении. Сб. науч. ст. 2-й Всерос. науч.-техн. конф.. Воронеж: Воронежский государственный технический университет, 2024. С. 304-308.
11. Анализ проблем, возникающих при автоматизированном проектировании станочных приспособлений / О.А. Рябинина, А.И. Болдырев, А.А. Болдырев, Д.Ю. Левин // Вестник Тульского государственного университета. Автоматизация: проблемы, идеи, решения: сб. науч. тр. Национальной науч.-техн. конф. с междунар. уч.: АПИР-28, Тула, 13–15 ноября 2023 года. Тула: Тульский государственный университет, 2023. С. 176-180.
12. Сладков Г.А. Гальванопластика: справочное пособие. М.: Машиностроение, 2004. 400 с.
13. Перова А.В. Повышение защитных свойств деталей путем химического никелирования // Нетрадиционные методы обработки: межвуз. сб. науч. тр. М.: Машиностроение, 2009. Вып. 9. Ч. 2. С. 139-145.
14. Голован Э.Н., Золотова В.И., Романцова О.Н. Металлизация АБС-пластиков химико-гальваническим способом. М.: НИИТЭхим, 1978. 25 с.
15. Суворов А.П., Кузовкин А.В. Компьютерное моделирование конструкции и реализации комбинированного пористого электрода-инструмента с применением элементов генеративного дизайна // Автоматизация в промышленности. 2024. № 4. С. 59-61.
16. Суворов А.П., Золототрубова Ю.С., Алешина А.Э. Особенности проектирования электрод-инструмента в системе автоматизированного проектирования // Перспективы развития технологий обработки и оборудования в машиностроении. Сб. науч. ст. 2-й Всерос. науч.-техн. конф. Воронеж: Воронежский государственный технический университет, 2023. С. 369-371.

Поступила 02.12.2024; принята к публикации 20.02.2025

#### Информация об авторах

**Норман Анна Валерьевна** – канд. техн. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: annya\_p@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-2927-7099>

**Суворов Александр Петрович** – канд. техн. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: alex\_diz@inbox.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1482-3572>

**Золототрубова Юлия Сергеевна** – старший преподаватель, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: zolototrubova-y@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-7446-9713>

**Воробьев Эдуард Игоревич** – канд. техн. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: vorob.68@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6623-7260>

## ANALYSIS OF THE FEATURES OF THE FORMATION OF PROTECTIVE COATINGS IN MACHINE-BUILDING PRODUCTION

A.V. Norman, A.P. Suvorov, Yu.S. Zolototrubova, E.I. Vorobyov

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

**Abstract:** the analysis of the features of the formation of various types of functional coatings used in machine-building production to obtain the required performance properties of parts is presented. Various methods of forming functional protective coatings on the surface of mechanical engineering parts are considered in detail. It has been established that the most promising method of coating formation in the manufacture of a combined electrode-tool (EI) for electrical processing methods is the

electroplating method, which allows the formation of metal coatings. Such coatings represent the distribution of a thin, non-porous layer of one material over the surface of another, which protects the metal base of the tool from the effects of an aggressive technological environment. The possibility of forming a conductive coating on the surface of an electrode-tool made of a current-carrying material using additive technologies is considered. To obtain a wear-resistant conductive layer of the required thickness (up to 40 microns) on the surface of the EI, which guarantees the flow of electrical processes in the interelectrode gap during electrochemical treatment, a new approach to electroplating copper is proposed and described in detail. A distinctive feature of the formation of such a coating on the surface of the conductive base is the presence of an intermediate conductive layer made on the basis of graphite varnish. The proposed method will significantly expand the technological capabilities of electrical processing methods in single and experimental production

**Key words:** protection of parts, coatings, methods, process, properties, durability, hardness, electrode-tool, electroplating

## References

1. Semenova I.V. "Corrosion and corrosion protection", Moscow, FIZMATLIT, 2006, 376 p.
2. Gribanov A.S., Perova A.V. "Protection of technological equipment from corrosion", *Improving the production of piston engines for small aircraft: Tr.branch. scientific and technical Conf.*, Moscow, Mashinostroenie, 2008, pp. 97-104.
3. Norman A.V., Smolentsev V.P., Norman A.V., Kondratiev M.V. "Improving the quality of parts made of low-melting materials by coating cast iron", *The Bulletin of Voronezh State Technical University*, vol. 19, no. 3, 2023, pp. 120-125.
4. Shalkauskas M.I., Vashkialis A.I., "Chemical metallization of plastics", Leningrad, Khimiya, 1985, 144 p.
5. Smolentsev V.P., Perova A.V., Bondar A.V. "The use of coated aluminum alloys for the manufacture of technological equipment", *Hardening technologies and coatings*, 2007, no. 9, pp. 39-42.
6. Kudinov V.V., Pekshev P.Yu., Belashchenko V.E. et al. "Plasma coating", The USSR Academy of Sciences, Institute of Metallurgy n. a. A.A. Baykov, Moscow, Nauka, 1990, 406 p.
7. Klimenko Yu.V. "Electrocontact surfacing", ed. by E.S. Karakozov, Moscow, Metallurgiya, 1978, 127 p.
8. Kanarchuk V.E., Chirrinets A.D., "Electric spark alloying of aluminum alloy parts", *Technology and organization of production*, 1990, no. 2, pp. 48-43.
9. Artamonov B.A., Volkov Y.S., Drozhlova V.I. et. al. "Electrophysical and electrochemical processing methods", in 2 vols., vol.1. "Processing of materials using tools", ed. by Smolentseva V.P., Moscow, Higher School, 1983, 247 p.
10. Ryabinina O.A., Levin D.Yu., Sviridov D.A., Alyoshina A.E. "Problems arising in the process of casting on smelted models using 3D printing by the FDM method", / O.A. Ryabinina, *Prospects for the development of processing technologies and equipment in mechanical engineering. Collection of scientific articles of the 2nd All-Russian Scientific and Technical Conference*, Voronezh, 2024, pp. 304-308.
11. Ryabinina O.A., Boldyrev A.I., Boldyrev A.A., Levin D.Yu. "Analysis of problems arising in the automated design of machine tools", *The Bulletin of Tula State University. Automation: problems, ideas, solutions: collection of scientific papers of the National Scientific and Technical Academy. conferences with international participation: APIR-28*, Tula, November 13-15, 2023, Tula, Tula State University, 2023, pp. 176-180.
12. Sladkov G.A. "Electroplating: Reference manual", Moscow, Mechanical Engineering, 2004, 400 p.
13. Perova A.V. "Increasing the protective properties of parts by chemical nickel plating", *Non-traditional methods of processing: interuniversity collection of scientific tr.*, Moscow, Mashinostroenie, 2009, iss. 9, part 2, pp. 139 - 145.
14. Golovan E.N., Zolotova V.I., Romantsova O.N. "Metallization of ABS plastics by chemical galvanic method", Moscow, NIITEhim, 1978, 25 p.
15. Suvorov A.P., Kuzovkin A.V. "Computer modeling of the design and implementation of a combined porous electrode-tool using elements of generative design", *Automation in industry*, 2024, no. 4. pp. 59-61.
16. Suvorov A.P., Zolototrubova Y.S., Alyoshina A.E. "Features of designing an electrode tool in a computer-aided design system", *Prospects for the development of processing technologies and equipment in mechanical engineering: Collection of scientific articles of the All-Russian Scientific and Technical Conference*, Voronezh, April 13-14, 2023, Voronezh, Voronezh State Technical University, 2023, pp. 369-371.

Submitted 02.12.2024; revised 20.02.2025

## Information about the authors

**Anna V. Norman** – Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: annya\_p@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-2927-7099>  
**Alexander P. Suvorov** – Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: alex\_diz@inbox.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1482-3572>  
**Yulia S. Zolototrubova** – Senior Lecturer, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: zolototrubova-y@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-7446-9713>  
**Eduard I. Vorobyov** – Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: vorob.68@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6623-7260>

## АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ НА ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ ОБОРУДОВАНИЯ КУЗНЕЧНО-ШТАМПОВОЧНОГО ПРОИЗВОДСТВА

С.Л. Новокшенов<sup>1,2</sup>, В.В. Куц<sup>1</sup>, С.С. Юхневич<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Россия

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

**Аннотация:** ввиду того, что современное основное технологическое оборудование кузнечно-штамповочного производства изготавливалось с применением импортных комплектующих, в настоящее время многие предприятия столкнулись со значительным увеличением сроков изготовления, связанным с обходом действующих ограничений. Но есть еще резервы, которые позволят существенно сократить сроки разработки и изготовления механических прессов и повысить качество. Решается эта задача за счёт уточнения и дополнения методики проектирования, разработки специализированного программного обеспечения, которое позволит сократить время проектирования. Работа этой программы для электронно-вычислительной машины (ЭВМ) должна быть основана на широком применении баз данных, что позволит принимать конструкторско-технологические решения на любом этапе проектирования, основываясь на предыдущем опыте. Конечной целью проводимых работ является повышение качества продукции кузнечно-штамповочного производства, обеспечение которого достигается на основе единой системы с собственной структурой и функцией. Выполненные работы позволили выделить ряд конструктивных параметров механических прессов и определить их взаимосвязи с параметрами технологических процессов обработки металлов давлением (ОМД). На основе предлагаемого графа структуры механических прессов может быть синтезировано множество вариантов их компоновки. В основе алгоритмов лежат методики структурного синтеза базовых деталей и технологических процессов ОМД

**Ключевые слова:** ХОШ, ГОШ, КГШП, поковка, деталь, выдавливание, граф, синтез, СКППИР Mech-press

### Введение

В настоящее время в Российской Федерации практически все предприятия, выпускающие основное технологическое оборудование для цехов кузнечно-штамповочного производства, сталкиваются с проблемами значительного увеличения сроков изготовления продукции, которое определяется как внешними воздействиями, так и внутренними объективными причинами.

Однако и в этих условиях цели экономического роста могут быть достигнуты при использовании во всех сферах хозяйственной деятельности достижений научно-технического прогресса через совершенствование технического потенциала с помощью инновационных проектов. По результатам анализа процесса проектирования механических прессов кузнечно-штамповочного производства идея работы может быть сформулирована из следующих позиций:

1) при создании новых машин отсутствуют аналоги, цикл проектирования является полным;

2) для процессов холодной объемной штамповки отсутствует четкая классификация поковок/деталей;

3) отсутствие методики принятия технологических решений при разработке нового оборудования;

4) необходимость совместного проектирования механического пресса, инструментальных вставок и штамповочных блоков;

5) отсутствие применяемых на ранних этапах проектирования адекватных методов и методик, позволяющих выявлять и преобразовывать структурные и кинематические связи главных исполнительных механизмов, что может привести к невозможности обеспечения определяемой реализуемым технологическим процессом штамповки точности.

Современный подход к проектированию механических прессов основан на структурно-параметрическом синтезе, при котором его рассматривают как систему взаимосвязанных функциональных преобразований, на основе которой выполняется формирование технологического облика механического пресса и формирование системы обрабатываемых деталей: синтез структуры формообразующей системы механического пресса; синтез параметров и допусков формообразующей системы, в т. ч. механического пресса, приспособлений, инструментальных вставок штамповочного блока; синтез структуры основных узлов [1]. Технологический облик механического пресса можно

рассматривать как набор технических характеристик, описывающих его возможности при штамповке поковок деталей из заданных материалов и диапазона габаритных размеров.

Максимальное приближение формы, размеров и качества заготовок к соответствующим параметрам готовых деталей обеспечивается, прежде всего, конструктивными особенностями главных исполнительных механизмов механических прессов.

### 1. Структура параметров механических прессов

Современные механические presses, предназначенные для реализации технологических процессов холодной объемной штамповки (ХОШ) и горячей объемной штамповки (ГОШ), классифицируют главным образом по типу главного исполнительного механизма (ГИМ) следующим образом (рис. 1):

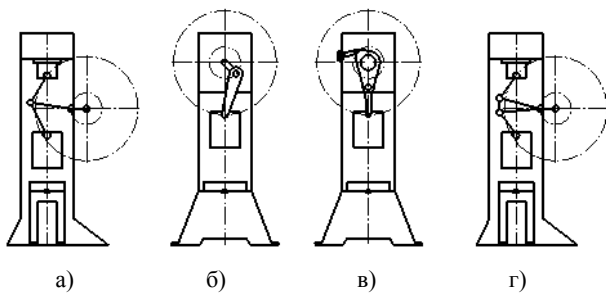


Рис. 1. Классификация механических прессов:  
а) пресс чеканочный кривошипно-коленный;  
б) пресс с кривошипно-шатунным механизмом;  
в) пресс с рычажным механизмом; г) пресс с модифицированным колено-рычажным механизмом

По назначению механические presses (рис. 1) классифицируют следующим образом:

1) Кривошипные горячештамповочные presses (КГШП), предназначенные для выполнения горячей штамповки поковок из черных и цветных металлов, могут применяться как в составе автоматизированных комплексов, так и в качестве самостоятельной технологической единицы, являются машинами, оснащенными сложными механизмами, и относятся к категории машин повышенной опасности. Поэтому к работе на них и для обслуживания допускается только специально подготовленный персонал.

2) Прессы чеканочные кривошипно-коленные предназначены для выполнения холодноштамповочных работ, требующих высоких давлений при малых рабочих ходах: неглубокое выдавливание, чеканка, калибровка, правка, объемная формовка и т.д. Могут использоваться

как самостоятельная технологическая единица, так и в составе автоматической линии;

3) Прессы с кривошипно-рычажным механизмом предназначены для штамповки деталей, при которой путь ползуна, где пресс развивает номинальное усилие, достаточно мал, и требуется большое усилие, как, например, калибровка, чеканка и др., требующие точности по толщине и форме. Могут использоваться как самостоятельная технологическая единица, так и в составе автоматической линии;

4) Прессы с модифицированным колено-рычажным механизмом предназначены для выполнения холодноштамповочных работ, требующих высоких давлений при больших рабочих ходах с малой постоянной скоростью ползуна, что обеспечивает изготовление точных по размерам и высокого качества деталей с минимальным объемом механической обработки в крупносерийном производстве. Минимальная скорость деформирования резко повышает срок службы вставок. Могут использоваться как самостоятельная технологическая единица, так и в составе автоматической линии.

Структуру параметров, определяющих работоспособность механических прессов, можно представить в виде схемы, показанной на рис. 2. Синтез структуры [5, 6, 7, 8, 9] основных узлов механических прессов основан на изучении взаимовлияния их параметров в соответствии со схемой (рис. 3).

При выполнении синтеза параметров основных узлов проектируемого механического пресса определяются их номинальные значения. Синтез допусков параметров основных узлов выполняется на основании заданных в техническом задании ограничений, допусков и отклонений параметров проектируемого пресса.

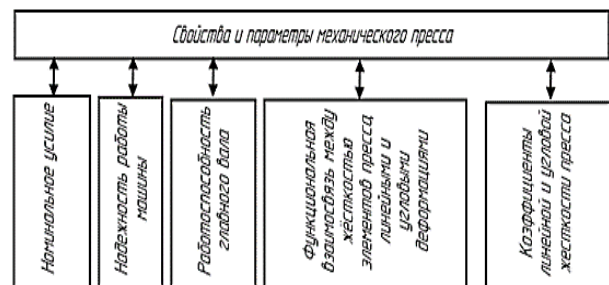


Рис. 2. Параметры, определяющие работоспособность механических прессов



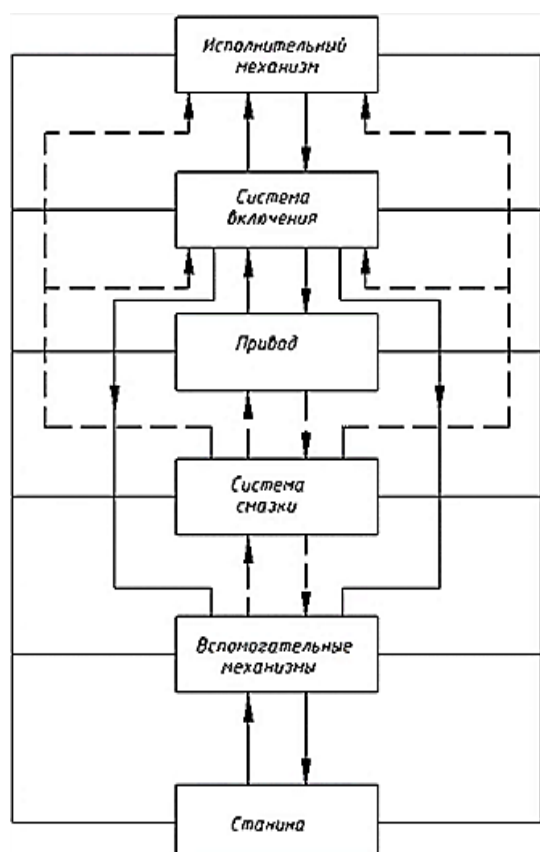


Рис. 3. Схема синтеза структуры базовых узлов механических прессов

При проектировании механических прессов в общем виде расчетное усилие может быть представлено следующей формулой:

$$P = F_0 \cdot \rho, \quad (1)$$

где  $F_0$  — площадь поверхности заготовки, мм<sup>2</sup>;  
 $\rho$  — давление, Н/мм<sup>2</sup>.

В настоящее время большинство данных расчетных значений потребного усилия  $P$  для широкого круга поковок приводят лишь в зависимости от свойств самого металла, не принимая во внимание изменения коэффициента трения во время совершения технологической операции и степени деформации.

Схема формирования точности штампуемых деталей и улучшения условий эксплуатации машин позволяет оценить исходные пара-

метры, варьируя которыми можно добиться достижения необходимых требований и обеспечению надежной работы прессов. При этом за критерий точности принимается допустимое смещение инструментов, не превышающее технологического зазора с учетом износа штампов.

Первая обобщенная функциональная связь — надежность работы машины имеет следующий вид

$$H = f\left(R, \Delta S_i, \delta_i, q_i, C_{il}, C_{iy}, P_i^\alpha, P_{л.п.}^\alpha, M_{л.п.}^\alpha, p\right), \quad (2)$$

где  $R$  — работоспособность главного вала, деталей привода (промежуточных валов, зубчатых передач и др.);

$\Delta S_i$  — упругая линейная деформация системы пресс-штамп на  $i$ -ой позиции;

$\delta_i$  — суммарное смещение инструмента;

$q_i$  — угол перекося инструмента;

$C_{il}, C_{iy}$  — коэффициенты жесткости элементов пресса (соответственно линейной и угловой);

$P_i^\alpha, P_{л.п.}^\alpha$  — соответственно усилия на позициях и нагрузки, действующие на шатуны в зависимости от угла поворота кривошипа;

$M_{л.п.}^\alpha$  — момент относительно середины ползуна с учетом распределения усилий вдоль фронта пресса и по ходу ползуна;

$p$  — удельные усилия (контактные напряжения) в направляющих.

Работоспособность главного вала и деталей привода в свою очередь может быть записана следующей функциональной связью:

$$R = f(\Delta S_i, \delta_i, P_i^\alpha, P_{л.п.}^\alpha, M_{л.п.}^\alpha). \quad (3)$$

Функциональная связь между жесткостью элементов пресса, линейными и угловыми деформациями имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} C_{il} &= f(\Delta S_i, P_i^\alpha, P_{л.п.}^\alpha); \\ C_{iy} &= f(\delta_i, q_i, P_i^\alpha, P_{л.п.}^\alpha, M_{л.п.}^\alpha). \end{aligned} \quad (4)$$

Коэффициенты линейной и угловой жесткости пресса функционально могут быть записаны с помощью следующего выражения

$$C_{il}, C_{iy} = f(k_{э ст}, k_{т.в.}, k_{пл}, h_1, h_2, P_{\alpha i}, P_{\alpha л.п.}, \Delta S_i, \delta_i, q_i, M_{\alpha л.п.}), \quad (5)$$

где  $k_{э ст}^3$  — размеры конструктивных элементов станины;

$k_{т.в.}$  — конструктивные размеры главного вала;

$k_{пл}$  — конструктивные размеры ползуна;

$k_{кпл}$  — конструктивные размеры деталей исполнительного механизма;

$h_1, h_2$  — длины соответственно нижнего и верхнего инструментов.



### 1.1. Взаимосвязь конструктивных параметров механических прессов

Для некоторых поковок или деталей появляется возможность их изготовления как на КГШП, так и на специализированных прессах для холодной объемной штамповки.

Следует также учитывать, что большинство поковок, штампуемых на КГШП, могут изготавливаться штамповкой как по одиночке, так и спарено с расположением валетом в гравиоре штампа.

Также характерной особенностью разработки технологических процессов ХОШ и ГОШ является многокритериальность, которая означает, что степень совершенства системы, качеств выполнения ею своих функций определяется от несколькими выходными характеристиками.

Таким образом, глобальная цель анализа и синтеза технологических процессов ОМД состоит в выборе и обеспечении таких условий функционирования технологических процессов (ТП), при которых в заданном интервале времени  $[0, T]$  они находятся в работоспособном состоянии.

Показателем достижения цели будет мера степени соответствия реального результата функционирования ТП требуемому.

Обеспечить принятие оптимального технологического решения при реализации процессов ОМД, позволяет учет следующего ряда технологических параметров [2, 3]:

$P$  — потребное технологическое усилие, МН;

$n_1$  — число формообразующих переходов;

$\delta_H$  — точность высотных размеров в пределах заданных припусков;

$\bar{X}_H$  и  $\bar{X}_B$  — признаки образующей наружной и внутренней поверхности детали соответственно.

Взаимосвязь конструктивных и технологических параметров технологических процессов ОМД с конструктивными параметрами механических прессов можно представить в графическом виде (рис. 4).

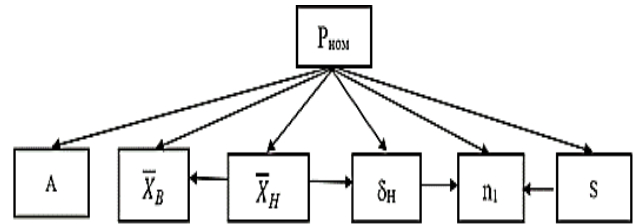


Рис. 4. Взаимосвязь технологических параметров с конструктивными параметрами механических прессов

Перечисленные технологические параметры являются определяющими аргументами функции технологической работы  $A$ , кДж, рассчитываемые по формуле

$$A = \bar{T}(P, n_1, \delta_H, \bar{X}_H, \bar{X}_B) \rightarrow \max \quad (6)$$

Число формообразующих переходов можно получить обратным отношением параметров, определяющих значение коэффициента технологичности,

$$n_1 = \frac{\bar{X}_4}{X_6} \quad (7)$$

Связать перечисленные технологические параметры с особенностями рассматриваемых исполнительных механизмов позволяет определение зависимости значений определяющих параметров исполнительных механизмов от величины работы  $A$ , кДж (критерий эффективности), развиваемой приводом пресса, посредством следующей функции

$$A = \xi(P, N, S_H, v_{П}, C) \quad (8)$$

где  $P$  — номинальное усилие, МН;

$C$  — жесткость пресса, МН/мм;

$N$  — производительность, шт/ч;

$S_H$  — номинальный недоход, мм;

$v_{П}$  — скорость ползуна при  $S_H$ , мм/с.

### 1.2. Алгоритм структурного синтеза механических прессов

Структуру механического пресса можно привести в следующем виде (рис. 5 и рис. 6).

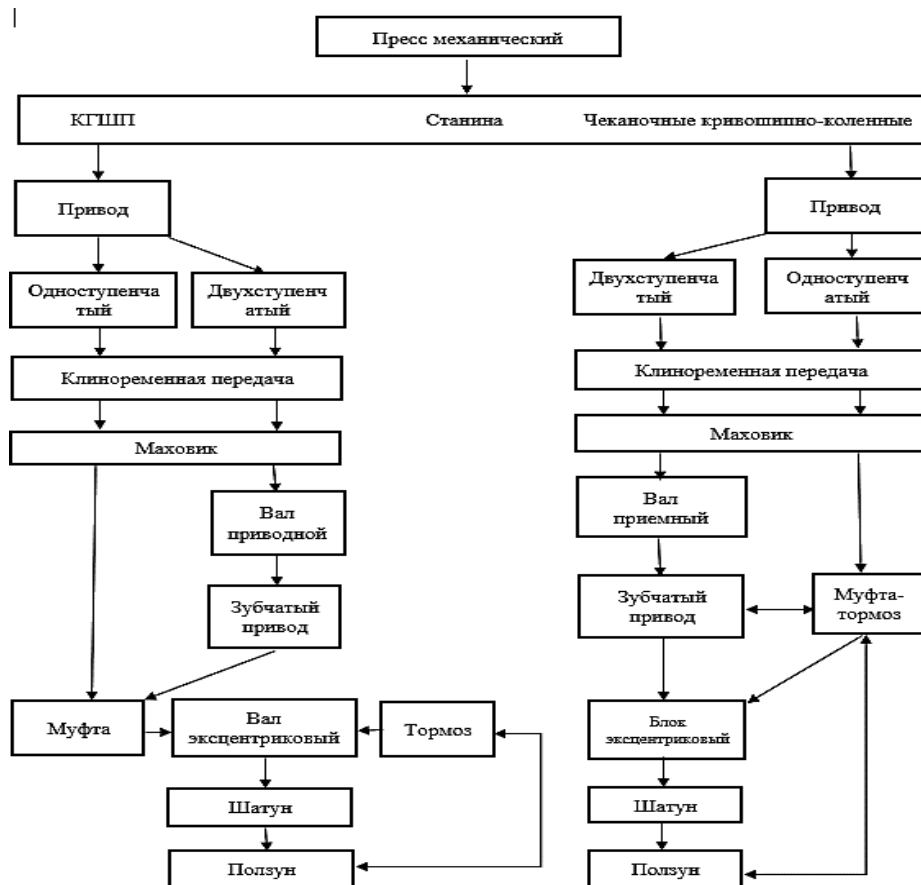


Рис. 5. Пример структуры КГШП и чеканочных кривошипно-коленных прессов

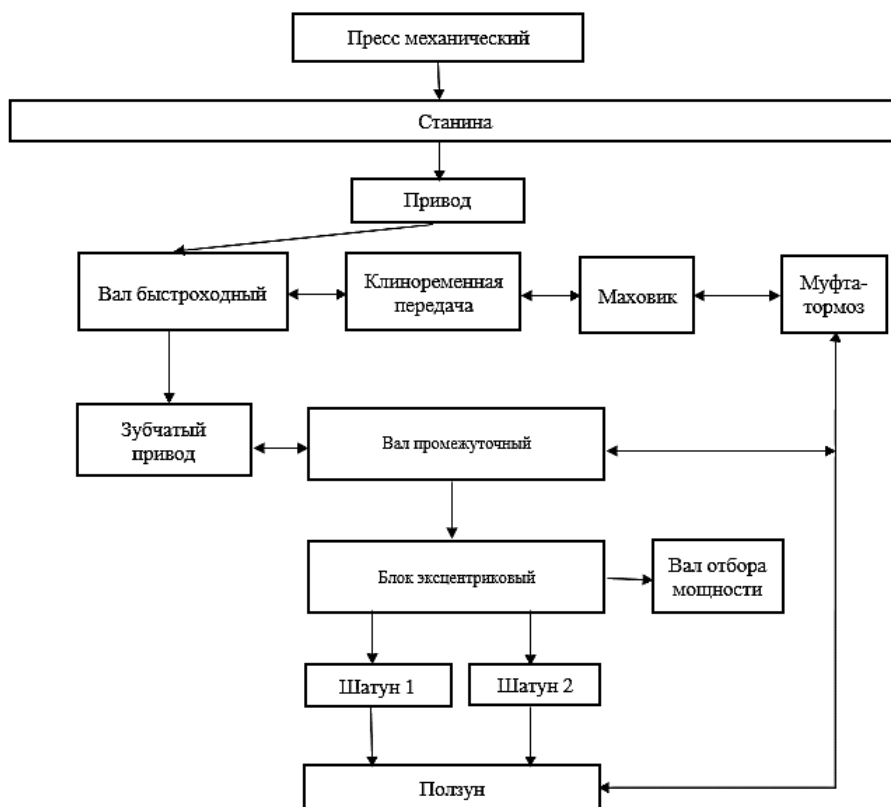


Рис. 6. Пример структуры прессов для холодного выдавливания

С целью повышения качества и сокращения сроков проектирования механических прессов объемной штамповки (ХОШ и ГОШ) разработана система принятия конструкторских решений, которая позволит выбрать оптимальную конструкцию исполнительного механизма и привода пресса при обеспечении максимальной производительности механического пресса.

Обобщенную структуру конструктивно-топологических параметров механических прессов для разнопланового оборудования можно представить в виде графа, показанного на рис. 7.

Структурный синтез включает в себя этапы: поиск предварительной структуры компоновки изделия; проведение анализа; выбор оптимальной структуры компоновки; проведение простого синтеза по алгоритму на рис. 8 [4].

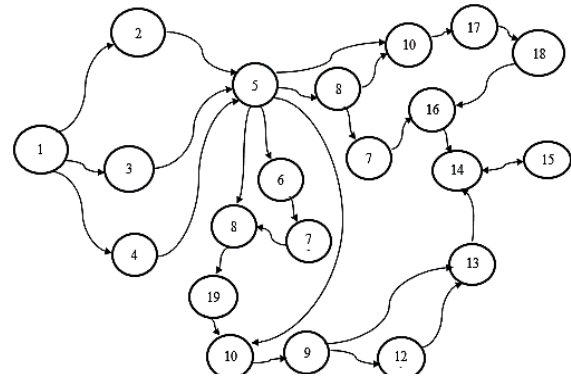


Рис. 7. Объединенный ориентированный граф функциональной структуры механических прессов:

- 1 – станина; 2 – привод одноступенчатый;
- 3 – привод двухступенчатый; 4 – привод трехступенчатый;
- 5 – клиноременная передача с электродвигателем;
- 6 – вал быстроходный; 7 – передача зубчатая;
- 8 – вал промежуточный; 9 – вал приемный; 10 – маховик;
- 11 – муфта-тормоз; 12 – передача зубчатая;
- 13 – блок эксцентриковый; 14 – шатун; 15 – ползун;
- 16 – вал эксцентриковый; 17 – муфта; 18 – тормоз;
- 19 – передача зубчатая

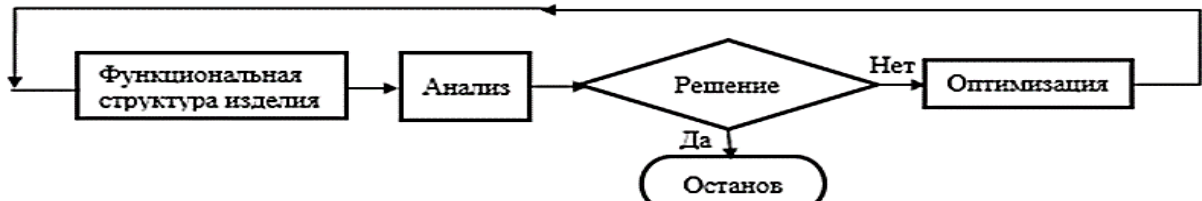


Рис. 8. Алгоритм структурного синтеза

## 2. Алгоритм структурного синтеза технологических процессов ОМД

К основным параметрам кривошипных машин относятся номинальное усилие, ход ползуна, соответствующий этому усилию (так называемый подход), а также полный ход ползуна, число ходов в минуту, размеры штампового пространства.

Эти параметры определяются характером технологического процесса, реализуемого на прессе. На прессах рассматриваемых типов выполняются технологические процессы, типовые графики нагрузки которых показаны на рис. 9.

Технологические требования для выполнения той или иной операции обуславливают тот или иной характер перемещения рабочего звена и тип применяемого передаточного механизма, с помощью которого обеспечивается заданный характер движения. Графики типовых нагрузок для операций, реализуемых на прессах рассматриваемых типов, показаны в относительных координатах.

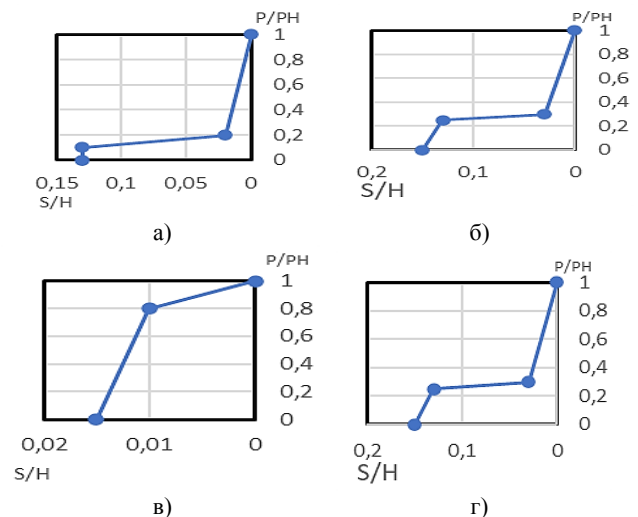


Рис. 9. Типовые графики нагрузок прессов для объемной штамповки: а) горячая штамповка; б) горячее выдавливание; в) холодное выдавливание; г) холодная калибровка-чеканка

Для получения графика нагружения необходимо данные значения по оси абсцисс умножить на величину полного хода ползуна пресса, мм, а по оси ординат на величину номинально

усилия, МН. По полученным графикам выполняют обоснование расширения технологических возможностей КГШП за счёт реализации на них технологических процессов холодной объёмной штамповки (ХОШ).

Важнейшей характеристикой, которую должен обеспечить главный исполнительный механизм механического прессы, при реализации технологического процесса является скорость перемещения ползуна, которая зависит от вида применяемого прессы:

1) чеканочные кривошипно-коленные прессы деформируют материалы со скоростью 0,1-0,15 м/с;

2) КГШП деформируют металлы и сплавы с начальной скоростью 0,4–0,5 м/с;

3) кривошипных рычажных прессы к началу деформации металла скорость инструмента обычно составляет 0,5–0,6 м/с;

4) для прессы, изготавливаемых детали выдавливанием, средняя скорость деформирования на механическом прессе определяется как скорость перемещения ползуна прессы к моменту начала деформации составляет 0,1 м/с и к концу хода может составлять 0,4 м/с.

С целью повышения качества и сокращения сроков проектирования технологических процессов объёмной штамповки (ХОШ и ГОШ) разработана система принятия технологических решений, которая позволит выбрать оптимальную конструкцию исполнительного механизма при обеспечении максимальной производительности механического прессы. Современные технологии штамповки многих поковок деталей характеризуются многовариантностью процессов. Обобщенную структуру технологических процессов штамповки на разноплановом оборудовании можно представить в виде графа, показанного на рис. 10.

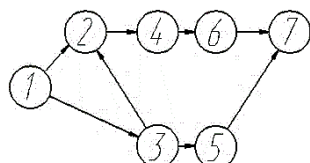


Рис. 10. Структурная схема техпроцесса штамповки поковок/деталей: 1 – отрезка мерных заготовок под горячую или холодную штамповку; 2 – нагрев заготовки; 3 – штамповка на прессе для ХОШ; 4 – штамповка на КГШП; 5 – нормализация поковок/деталей; 6 – нормализация поковок/деталей; 7 – механическая обработка

Блок-схема алгоритма принятия решений при разработке ТП ОМД показана на рис. 11.



Рис. 11. Блок-схема алгоритма проектирования ТП ОМД с применением современных ЭВМ

### 3. Система принятия технологических решений с обоснованием выбора производительности основного технологического оборудования

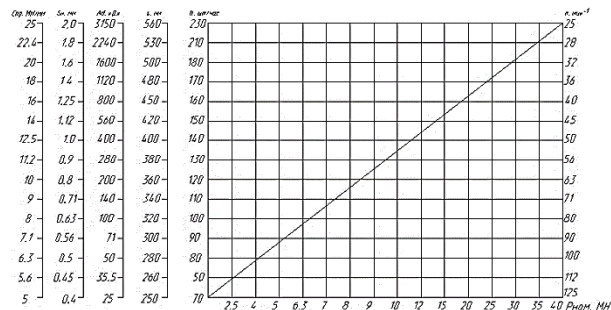
Выражение (8) можно рассматривать как математическую модель управляемого процесса (системы). Таким образом, принять оптимальное технологическое решение при проектировании технологических процессов ХОШ и ГОШ позволяет следующая многокритериальная модель задачи принятия решений, представленная в обобщенном виде:

$$\left. \begin{aligned} A &= \bar{T}(P, n_1, \delta H, \bar{X}_H, \bar{X}_B) \rightarrow \max \\ A &= \xi(P, N, S_H, v_P, C) \end{aligned} \right\}. \quad (9)$$

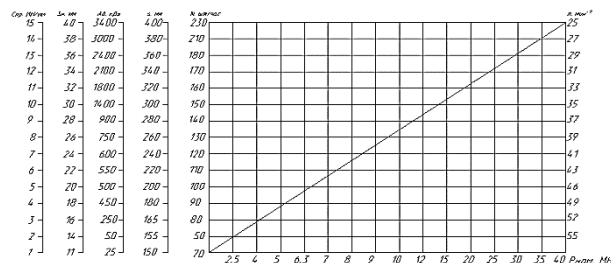
Решение этой системы уравнений основывается на системе технологических параметров для КГШП (рис. 12, а) [10] и прессы ХОШ (рис. 12, б).

Результатом анализа рассматриваемой системы является создание автоматической классификации поковок по структуре исполнительных механизмов механических прессы ГОШ и

ХОШ. Полученные расчетные данные были проверены при выполнении ряда экспериментов на основании математической модели процесса осадки крешеров.



а) для КГПП



б) для прессов ХОШ

Рис. 12. Система технологических параметров механических прессов для принятия решений

Завершающим этапом синтеза структуры технологического процесса ОМД является обоснование выбора той или иной схемы главного исполнительного механизма, которое может быть основано на сравнении графиков допускаемых усилий на ползуне механических прессов с различными исполнительными механизмами по расчётным или экспериментальным графикам изменения технологического усилия для той или иной технологической операции, построенные в единой системе координат.

Как известно, получение указанных графиков (рис. 13) основано на расчете кинетостатических характеристик главных исполнительных механизмов, после чего значение усилия на ползуне может быть вычислено следующим образом

$$P_{\dots} = \frac{M_{PR}}{m_K}, \quad (10)$$

где  $M_{PR}$ , кН — максимальный крутящий момент, определяемый при расчете кинетостатических параметров ГИМ.

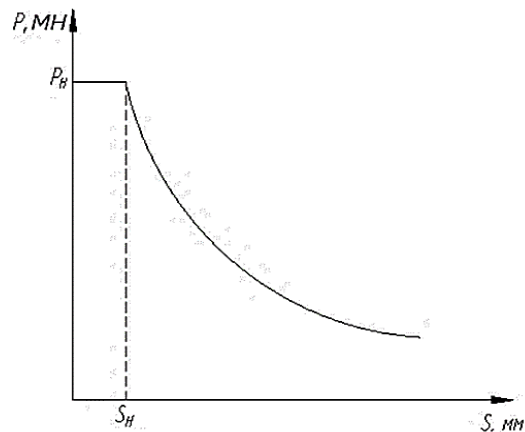


Рис. 13. График допускаемых усилий

На указанном графике  $P_H$ , МН — номинальное усилие пресса, а  $S_H$  — путь ползуна, на котором пресс развивает номинальное усилие, мм. На рис. 14 показаны графики допускаемых усилий для различных исполнительных механизмов, применяемых для реализации технологических процессов холодной объемной штамповки.

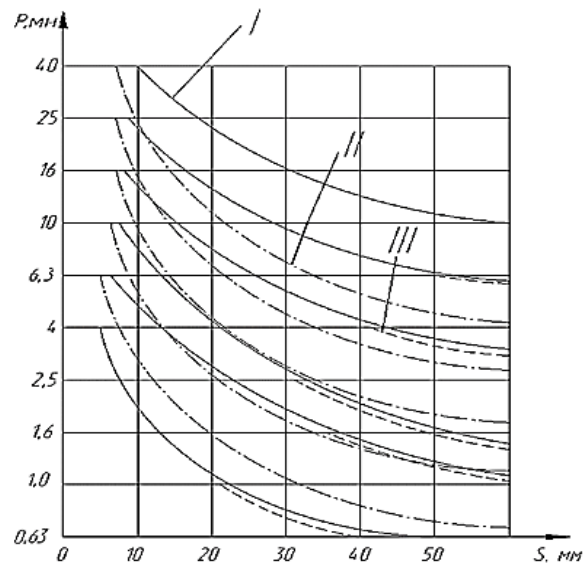


Рис. 14. График допускаемых усилий:

- I — на ползуне чеканочных прессов с кривошипно-коленным механизмом (сплошная линия);
- II — на ползуне прессов с модифицированным кривошипно-коленным механизмом (штрих-пунктирная линия);
- III — на ползуне прессов с кривошипно-шатунным механизмом (штриховая линия)

Теперь для выбора типа исполнительного механизма достаточно наложить график изменения технологического усилия для заданной технологической операции. Этот график может быть получен с применением специализированного программного обеспечения проектирования технологических процессов обработки металлов давлением (QForm, Simufact Forming, Deform-3D и т.д.) (рис. 15).



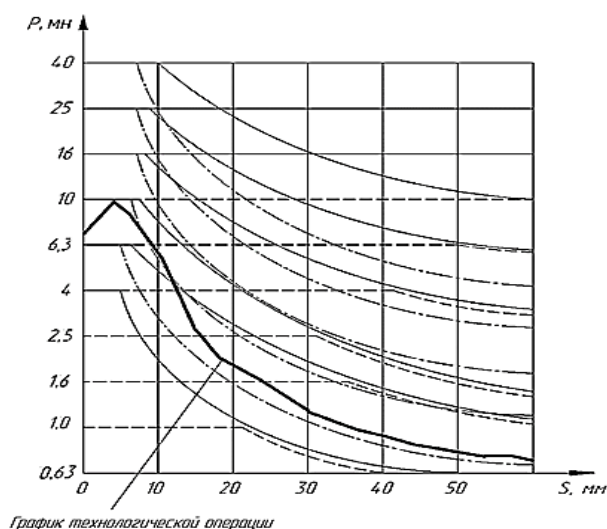


Рис. 15. Результат наложения расчетного графика технологического усилия на обобщенную диаграмму

В данном случае для рассматриваемой технологической операции наилучшим образом подходит модифицированный коленорычажный механизмы. Окончательный выбор типа механизма позволяют осуществить известные технологические требования, предъявляемые к скоростному режиму технологической операции.

Выбор типа исполнительного механизма по описанной методике выполняется в автоматизированном режиме с использованием разработанного специализированного пакета программ.

### Заключение

Поставленные цели исследования выполнены, результатами работы являются:

1. Определение ряда конструктивных параметров механических прессов и их взаимосвязи с параметрами технологических процессов обработки металлов давлением (ОМД).
2. На основе предлагаемого графа структуры механических прессов и алгоритма синтеза может быть синтезировано множество вариан-

тов их компоновки.

В основе алгоритмов синтеза структуры механических прессов и технологических процессов лежат методики структурного синтеза базовых деталей и технологических процессов ОМД.

### Литература

1. Прогрессивное машиностроительное оборудование: коллективная монография / А.В. Киричек [и др.]. Сер. «Машиностроение: технологии, оборудование, кадры» М.: Издательство: Издательский дом «Спектр», 2011. 249 с.
2. Федоркевич В.Ф. Система технологических параметров для кривошипных прессов // Кузнечно-штамповочное производство. 2003. № 10. С. 14-15.
3. Куц В.В. Формирование пространства проектных параметров металлорежущих станков на ранних стадиях проектирования с учетом колебания звеньев формообразующей системы на упругих опорах // Известия Юго-Западного государственного университета. 2013. № 1 (34). С. 60-66.
4. Никифоров А.Д., Бойцов В.В. Инженерные методы обеспечения качества в машиностроении: учебное пособие. М.: Издательство стандартов, 1987. 384 с.
5. Ивахненко А.Г., Куц В.В. Концепция структурно-параметрического синтеза металлорежущих систем с заданными параметрами точности обработки // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии, Орел. 2011. № 4-2(288). С. 106-113.
6. Ивахненко А.Г., Куц В.В. Структурно-параметрический синтез технологических систем: монография. Курск: Юго-Западный государственный университет, 2010. 153 с.
7. Оценка эффективности методологии структурно-параметрического синтеза металлорежущих систем / А.Г. Ивахненко, В.В. Куц, О.Ю. Еренков, Е.О. Ивахненко, А.В. Олейник // СТН. № 5. 2017. С. 10-14.
8. Методология структурно-параметрического синтеза металлорежущих систем / А.Г. Ивахненко, В.В. Куц, О.Ю. Еренков, А.В. Олейник, М.Ю. Сариллов. Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет, г. Комсомольск-на-Амуре. 2015. 282 с.
9. Куц В.В. О структурно-параметрическом синтезе металлорежущих станков с параллельной кинематикой // Современные инновации в науке и технике: сб. науч. тр. 7-й Всерос. науч.-техн. конф. с междунар. Участием. Курск, 2017. С. 130-134.
10. Сосенушкин Е.Н. Поддержка принятия технических решений при групповом методе штамповки поковок // Кузнечно-штамповочное производство. 2005. № 9. С. 10-16.

Поступила 16.12.2024; принята к публикации 20.02.2025

### Информация об авторах

**Новокщенов Сергей Леонидович** – аспирант кафедры машиностроительных технологий и оборудования, Юго-Западный государственный университет (305040, Россия, г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94); старший преподаватель кафедры технологии машиностроения, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: novoksl79@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5807-2144>

**Куц Вадим Васильевич** – д-р техн. наук, профессор, Юго-Западный государственный университет (305040, Россия, г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94), e-mail: kuc-vadim@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3244-1359>

**Юхневич Сергей Степанович** – канд. техн. наук, доцент, и.о. заведующего кафедрой технологии машиностроения, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: tm.kaf@cchgeu.ru ORCID: 0009-0001-7090-9602

# ANALYSIS OF THE INFLUENCE PARAMETERS OF VOLUMETRIC STAMPING TECHNOLOGICAL PROCESSES ON THE PRODUCTIVITY OF FORGING AND STAMPING PRODUCTION EQUIPMENT

S.L. Novokshchenov<sup>1,2</sup>, V.V. Kutz<sup>1</sup>, S.S. Yukhnevich<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Southwest State University, Kursk, Russia

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

**Abstract:** due to the fact that the modern basic technological equipment of forging and stamping production was manufactured using imported components, these enterprises are currently faced with a significant increase in production time associated with circumvention of existing restrictions. But there are still reserves that will significantly reduce the time required for the development and manufacture of mechanical presses and improve quality. This task is solved by clarifying and supplementing the design methodology, developing specialized software that will reduce the design time. The work of this computer program should be based on the widespread use of databases, which will allow making design and technological decisions at any stage of design based on previous experience. The ultimate goal of the work carried out is to improve the quality of forging and stamping products, which is achieved on the basis of a single system with its own structure and function. The work performed made it possible to identify a number of design parameters of mechanical presses and determine their relationship with the parameters of technological processes of metal processing by pressure (MPP). Based on the proposed graph of the structure of mechanical presses, many variants of their layout can be synthesized. A methodology is proposed to substantiate the implementation of the implementation of hot forging technological processes at the crank hot forging press in order to eliminate equipment downtime and increase the load factor. The algorithms are based on the methods of structural synthesis of basic parts and technological processes of cold forging

**Key words:** cold forging, hot forging, crank hot forging press, forging, detail, extrusion, graph, synthesis, CSSED Mech-press

## References

1. Kirichek A.V. et al. "Progressive machine-building equipment: collective monograph" Ser. "Mechanical engineering: technologies, equipment, personnel", Moscow, Spectrum", 2011, 249 p.
2. Fedorkevich V.F. "System of technological parameters for crank presses", *Forging and stamping production*, 2003, no. 10, pp. 14-15.
3. Kutz V.V. "Formation of the space of design parameters of metal-cutting machines at the early stages of design, taking into account the fluctuations of the links of the forming system on elastic supports", *News of Southwestern State University*, Kursk, Southwestern State University, 2013, no. (34), pp. 60-66.
4. Nikiforov A.D., Boytsov V.V. "Engineering methods of quality assurance in mechanical engineering: a textbook", Moscow Publishing House of Standards, 1987, 384 p.
5. Ivakhnenko A.G., Kutz V.V. "The concept of structural-parametric synthesis of metal-cutting systems with specified processing accuracy parameters", *Fundamental and applied problems of engineering and technology*, Orel, 2011, no. 4-2(288), pp. 106-113.
6. Ivakhnenko A.G., Kutz V.V. "Structural and parametric synthesis of technological systems: monograph", Kursk, Southwestern State University, 2010, 153 p.
7. Ivakhnenko A.G., Kutz V.V., Yerenkov O.Yu., Ivakhnenko E.O., Oleinik A.V. "Evaluation of the effectiveness of the methodology of structural-parametric synthesis of metal-cutting systems", *STIN*, Kursk, 2017, no.5, pp. 10-14.
8. Ivakhnenko A.G., Kutz V.V., Yerenkov O.Yu., Oleinik A.V., Sarilov M.Yu. "Methodology of structural-parametric synthesis of metal-cutting systems", Komsomolsk-on-Amur State Technical University, Komsomolsk-on-Amur, 2015, 282 p.
9. Kutz V.V. "On the structural-parametric synthesis of metal-cutting machines with parallel kinematics", *Modern innovations in science and technology. Collection of scientific papers of the 7th All-Russian Scientific and Technical Conference with international participation*, Kursk, 2017, pp. 130-134.
10. Sosenushkin E.N. "Support for technical decision-making in the group method of forging forgings", *Forging and stamping production*, 2005, no. 9, pp. 10-16.

Submitted 16.12.2024; revised 20.02.2025

## Information about the authors

**Sergey L. Novokshchenov** – Postgraduate Student, Department of Mechanical Engineering Technologies and Equipment, Southwestern State University, Kursk, Russia (94 50 let Oktyabrya str., Kursk 305040, Russia), Senior Lecturer, Department of Mechanical Engineering Technology, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: novoksl79@yandex.ru, ORCID: 0000-0001-5807-2144

**Vadim V. Kutz** – Dr. Sc. (Technical), Professor, Southwestern State University, (94 50 let Oktyabrya str., Kursk 305040, Russia), e-mail: kuc-vadim@yandex.ru, ORCID: 0000-0002-3244-1359

**Sergey S. Yuhnevich** – Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, I.D. Head of the Department of Mechanical Engineering Technologies, Voronezh State Technical University, (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394026, Russia), e-mail: tm.kaf@cchgeu.ru, ORCID: 0009-0001-7090-9602

### Правила для авторов

1. Принимаются к рассмотрению оригинальные научные статьи на русском языке общим объемом от 0,5 до 1 п. л. Материал статьи следует представить в электронном и печатном виде.

2. Текст статьи предоставляется в формате А 4. Поля страницы: верхнее – 2,5 см; нижнее – 2 см; правое – 2 см; левое – 2 см.

Шрифт текста – Times New Roman, межстрочный интервал 1,0. Размер шрифта основного текста 11. Аннотация, ключевые слова, благодарности, подрисуночные надписи, информация об авторах – 9 шрифт. Допускается в формулах, таблицах и рисунках уменьшить размер шрифта до 9.

3. Абзацный отступ – 0,8 см. Аннотация, ключевые слова и благодарности должны располагаться с дополнительным отступом 0,8 см от левого края.

4. На первой странице текста необходимо указать УДК (в левом верхнем углу листа от поля); название статьи (8-10 слов без каких-либо сокращений и аббревиатур, заглавными буквами), инициалы и фамилию автора(ов); полное наименование места работы автора(ов) с указанием города и страны; далее следуют аннотация, ключевые слова (от 5 до 10), а также благодарности (если есть).

5. Аннотация (реферат) к статье должна быть: информативной (не содержать общих слов); оригинальной; содержательной (отражать основное содержание статьи и результаты исследований); структурированной (следовать логике описания результатов в статье); компактной (укладываться в объем от 150 до 250 слов). Аннотация акцентирует научную новизну проведенных исследований и их результатов, отражает логику построения статьи (т.е. затрагивает основные этапы исследований). «Англоязычная» аннотация должна быть написана качественным английским языком.

6. Основной текст статьи должен быть структурирован по принципу выделения значимых его элементов (введение, постановка задачи, методы исследования, результаты, выводы или заключение и т.п.). Основной текст и литературу представляют на листе в две колонки шириной по 8 см каждая (межколоночное расстояние 1 см).

7. Таблицы располагаются по тексту. Над названием таблицы справа пишут «Таблица 1». Ссылка

на таблицу в тексте оформляется следующим образом: «табл. 1».

8. Оформление рисунков в формате BMP. Подрисуночные подписи не входят в состав рисунков, а располагаются отдельным текстом. Рекомендуемая ширина рисунков – не более ширины колонки. При необходимости допускается ширина рисунка равная двум колонкам. Буквы и цифры на рисунке должны быть разборчивы. Перед названием рисунка пишут «Рис. 1.». Ссылку на рисунок оформляют следующим образом: «рис. 1».

9. Формулы нумеруют в круглых скобках (2), подстрочные примечания – арабскими цифрами.

10. Используемые в работе термины, единицы измерения и условные обозначения должны быть общепринятыми. Все употребляемые авторами обозначения (за исключением общеизвестных констант типа  $e$ ,  $h$ ,  $c$  и т.п.) и аббревиатуры должны быть определены при их первом упоминании в тексте.

11. Все литературные ссылки в материале должны быть указаны в квадратных скобках – [1]. В тексте статьи должны присутствовать ссылки на все используемые литературные источники по мере их упоминания. Литература оформляется в соответствии с требованиями ГОСТ Р 7.0.5-2008 Библиографическая ссылка. Желательно, чтобы в литературе самоцитирование не превышало 30%.

12. После литературы необходимо расположить информацию о каждом авторе, включающую расшифровку имени и отчества, обозначение ученой степени, звания и должности, полное наименование места работы, полный адрес организации, контактные данные (e-mail, номер телефона), а также ссылку на профиль автора в ORCID.

13. Далее следует англоязычный информационный блок, где содержится перевод заглавия, ФИО авторов, полного наименования мест работы авторов, аннотации, ключевых слов, благодарностей, литературы и информации об авторах.

14. Вместе со статьей в редакцию предоставляют заполненный лицензионный договор на право использования научной статьи и разрешение на публикацию (письмо и экспертное заключение о возможности открытого опубликования), которое должно быть заверено печатью и подписью ответственного лица.

Материалы представляются по адресу:

394026, Воронежская обл., г. Воронеж, Московский пр-т, д. 14, к. 211.  
ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»,  
Редакция журнала «Вестник Воронежского государственного технического университета»  
Тел.: +7(473)278-38-89; e-mail: vestnik@vorstu.ru

Дата выхода в свет: 25.03.2025.  
Формат 60x84/8. Бумага писчая.  
Усл. печ. л. 19,9. Уч.-изд. л. 18,0.  
Тираж 25 экз. Заказ № 61  
Цена свободная

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»  
394006 Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84

Отпечатано: отдел оперативной полиграфии издательства ВГТУ  
394006 Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84