

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

# **ВЕСТНИК**

**Воронежского государственного  
технического университета**

**Том 20 № 1 2024 г.**

**Основан в апреле 2000 г.**

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

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

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

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

Журнал выходит четыре раза в год

#### **РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:**

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

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

**Ответственный секретарь С.А. Малюкова** – Воронеж

#### **ЧЛЕНЫ РЕДАКЦИОННОЙ КОЛЛЕГИИ:**

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

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

**Адрес редакции:** 394026, Воронежская обл., г. Воронеж, Московский пр-т, д. 14, к. 211

**Телефон:** +7 (473) 278-38-89

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

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

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

© ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», 2024

12+

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

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

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

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

The journal is published four times a year

#### **EDITORIAL BOARD:**

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

**Executive secretary S.A. Malyukova** – Voronezh

#### **MEMBERS OF EDITORIAL BOARD:**

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

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

**Address:** 394026, Voronezh Oblast, Voronezh, Moskovskiy prospekt, 14, office 211

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

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

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

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

© Voronezh State Technical University, 2024

12+

## СОДЕРЖАНИЕ

### Информатика, вычислительная техника и управление

Разработка компонента по анализу пересечения моделей деталей в сборочных узлах средствами геометрических ядер <b>А.Н. Юров</b> .....	7
Алгоритм скалярной декомпозиции окрестностной структуры <b>Р.В. Попов</b> .....	14
Система сбора данных <b>Г.В. Петрухнова, И.Р. Болдырев, М.О. Горина, Д.А. Груздев</b> .....	20
Программно-аппаратный комплекс для создания трехмерной модели помещения и объектов <b>Д.В. Журавлёв, Н.А. Летов</b> .....	25
Разработка алгоритмов для эффективного распределения ресурсов в облачной среде <b>С.А. Олейникова, Н.С. Капустин, Н.Э. Евсюков</b> .....	33
Интеллектуализация принятия решений в системе управления технологическим процессом производства асфальтобетонной смеси <b>И.Н. Волков, В.Л. Бурковский, В.П. Шелякин</b> .....	39

### Радиотехника и связь

Разработка РС-генератора для отечественного технологического процесса <b>А.В. Белявцев, А.В. Русанов, Т.С. Шайкина</b> .....	45
Влияние геометрии антенной решетки на передачу данных в массивных сетях ММО <b>О.Н. Чирков, Ю.М. Пшеницина</b> .....	51
Минимизация конструктивных параметров частично печатных логопериодических вибраторных антенн для системы локального подавления сигналов управления беспилотных летательных аппаратов 800 МГц – 900 МГц <b>А.А. Моисеенко, А.Ю. Чернышев</b> .....	57
Коррекция фазовых искажений в периодической антенне вытекающей волны с нерегулярной распределительно-излучающей системой <b>Д.Ю. Крюков, А.В. Останков</b> .....	61
Мемристоры. Следующая ступень в развитии радиотехники <b>Д.А. Шершов, С.М. Фёдоров, А.В. Володько, И.А. Зеленин</b> .....	69
Улучшение производительности исправления ошибок в блочных низкоплотностных кодах с использованием компонентов кода <b>М.В. Хорошайлова, И.В. Свиридова, Д.В. Лялин</b> .....	84
Аппаратная реализация комплексированного алгоритма идентификации радиосигналов по форме спектра <b>А.Г. Студеникин, В.А. Козьмин, А.Б. Токарев</b> .....	92
Технические характеристики и параметры направляющей линии передачи в подземном квазиоднородном сооружении <b>Д.В. Федосов, А.В. Колесников, А.В. Николаев</b> .....	106

Многолучевая антенна на основе сферического рефлектора и системы облучателей в виде симметричных вибраторов с директорами

**Е.А. Ищенко, Ю.Г. Пастернак, В.А. Пендюрин, Д.К. Проскурин, С.М. Фёдоров..... 112**

#### **Машиностроение и машиноведение**

Повышение качества слоистых панелей канала воздухозаборника самолёта

**В.И. Максименков, М.В. Молод, В.В. Вялых, Ю.В. Молод..... 116**

## CONTENTS

### Informatics, computer engineering and control

Development of a component for analyzing the intersection of part models in assemblies by means of geometric kernels <b>A.N. Yurov</b> .....	7
Algorithm of scalar decomposition of a neighborhood structure <b>R.V. Popov</b> .....	14
Data collection system <b>G.V. Petrukhnova, I.R. Boldyrev, M.O. Gorina, D.A. Gruzdev</b> .....	20
Hardware and software complex for creating a three-dimensional models of premises and objects <b>D.V. Zhuravlev, N.A. Letov</b> .....	25
Development of algorithms for efficient resource allocation in a cloud environment <b>S.A. Oleinikova, N.S. Kapustin, N.E. Evsyukov</b> .....	33
Intelligentization of decision making in the system management of the technological process of asphalt concrete mixture production <b>I.N. Volkov, V.L. Burkovsky, V.P. Shelyakin</b> .....	39

### Radio engineering and communication

RC oscillator for a domestic technological process <b>A.V. Belyavtcev, A.V. Rusanov, T.S. Shaikina</b> .....	45
The effect of antenna array geometry on data transmission in massive MIMO <b>O.N. Chirkov, Yu.M. Pshenitsina</b> .....	51
Minimization of design parameters of partially printed logoperiodic vibratory antennas for the system of local suppression of control signals of unmanned aerial vehicles 800 MHz – 900 MHz <b>A.A. Moiseenko, A.Yu. Chernyshev</b> .....	57
Correction of phase distortions in a periodic leaky-wave antenna with an irregular distribution-radiating system <b>D.Yu. Kryukov, A.V. Ostankov</b> .....	61
Memristors. The next step in the development of radio engineering <b>D.A. Shershov, S.M. Fedorov, A.V. Volod'ko, I.A. Zelenin</b> .....	69
Performance improvement error correction in block low-density codes using codec components <b>M.V. Horoshailova, I.V. Sviridova, D.V. Lyalin</b> .....	84
Hardware implementation of an integrated algorithm for identifying radio signals by spectrum shape <b>A.G. Studenikin, V.A. Koz'min, A.B. Tokarev</b> .....	92
Technical characteristics and parameters of a transmission line in an underground quasi-one-dimensional structure <b>D.V. Fedosov, A.V. Kolesnikov, A.V. Nikolaev</b> .....	106

Multibeam antenna based on a spherical reflector and a system of feeders in the form of symmetrical vibrators with directors

**E.A. Ishchenko, Yu.G. Pasternak, V.A. Penduyrin, D.K. Proskurin, S.M. Fedorov..... 112**

**Mechanical engineering and science of machines**

Improving the quality of layered panels of the aircraft air intake channel

**V.I. Maksimenkov, M.V. Molod, V.V. Vyalykh, Yu.V. Molod..... 116**

## *Информатика, вычислительная техника и управление*

DOI 10.36622/1729-6501.2024.20.1.001

УДК 544.42

### **РАЗРАБОТКА КОМПОНЕНТА ПО АНАЛИЗУ ПЕРЕСЕЧЕНИЯ МОДЕЛЕЙ ДЕТАЛЕЙ В СБОРОЧНЫХ УЗЛАХ СРЕДСТВАМИ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ЯДЕР**

**А.Н. Юров**

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

**Аннотация:** при проектировании изделий могут быть допущены ошибки, связанные с внесением ограничений между деталями в общей компоновке сборочного узла. Ошибки компоновки приводят к взаимному пересечению деталей в цифровом формате и могут быть не замечены в инженерной системе проектирования, однако в производственном процессе такие ошибки недопустимы. Были рассмотрены методики по анализу пересечений моделей в сборочных узлах функциональными возможностями геометрического ядра Open CASCADE. Разработка связана с использованием экспортных форматов и получением в них состава структуры цифровых моделей тех деталей в сборочных единицах, которые имеют взаимные пересечения по геометрии расположения указанных деталей в сборке. В проектировании программного обеспечения используются технологии, обеспечивающие работу с обменными форматами данных, решения, позволяющие получить геометрию модели и техническую информацию из файлов. Предложен алгоритм по нахождению пересечений деталей в сборках, рассмотрены классы геометрического ядра, которые необходимы для реализации модуля по анализу сборки и выявления пересечений, представлены результаты работы с импортируемыми сборками с оценкой времени производительности при использовании многоядерных архитектур современных вычислительных систем. Создан автономный модуль по работе с экспортными форматами, визуализацией данных, отображению структуры моделей в составе сборочного узла с подсветкой тех моделей, которые имеют взаимные пересечения топологических элементов. Разработка подготовлена для использования в операционной системе Linux на базе 64-х разрядной архитектуры

**Ключевые слова:** экспортные форматы данных, инженерные данные, цифровые макеты изделий, геометрическое ядро Open CASCADE, операционные системы с открытым исходным кодом, анализ моделей в составе сборочного узла

#### **Введение**

В процессе проектирования сборочных цифровых двойников могут быть допущены ошибки, связанные с переопределениями ограничений (когда связи между компонентами в сборке нарушают работу других ограничений) между деталями при общей компоновке изделия [1]. Ошибки компоновки приводят к взаимному пересечению деталей в цифровом формате и на экране вычислительной системы могут быть не замечены, однако в производственном процессе недопустимы.

В работе предлагаются пути по созданию программного модуля анализа [2, 3, 4], который построен на алгоритме проверки взаимных пересечений деталей в составе сборочной единицы с использованием функциональных возможностей геометрического ядра OpenCascade для операционных систем Linux [5, 6, 7].

#### **Требования для разработки**

При разработке модуля анализа пересечения моделей в сборочном узле требуется реше-

ние следующих задач:

- обеспечить визуализацию всех элементов сборочной модели, топологическая геометрия каждого из которых должна быть получена при чтении данных из экспортного обменного формата данных [8, 9, 10, 11];

- отображение всех элементов сборки в виде списка с возможностью выбора каждого из них [12];

- обязательным условием является обеспечение полной ассоциативной связи между отображаемыми компонентами (детальями) сборки и их названиями в составе изделия;

- выделение заданным цветом тех моделей в составе сборочного узла, части которых пересекаются с элементами других деталей;

- в списке пересекающиеся детали отмечены соответствующим информационным рисунком.

Согласно перечисленным задачам, которые необходимы в реализации проекта, предлагается следующая схема построения приложения (рис. 1).

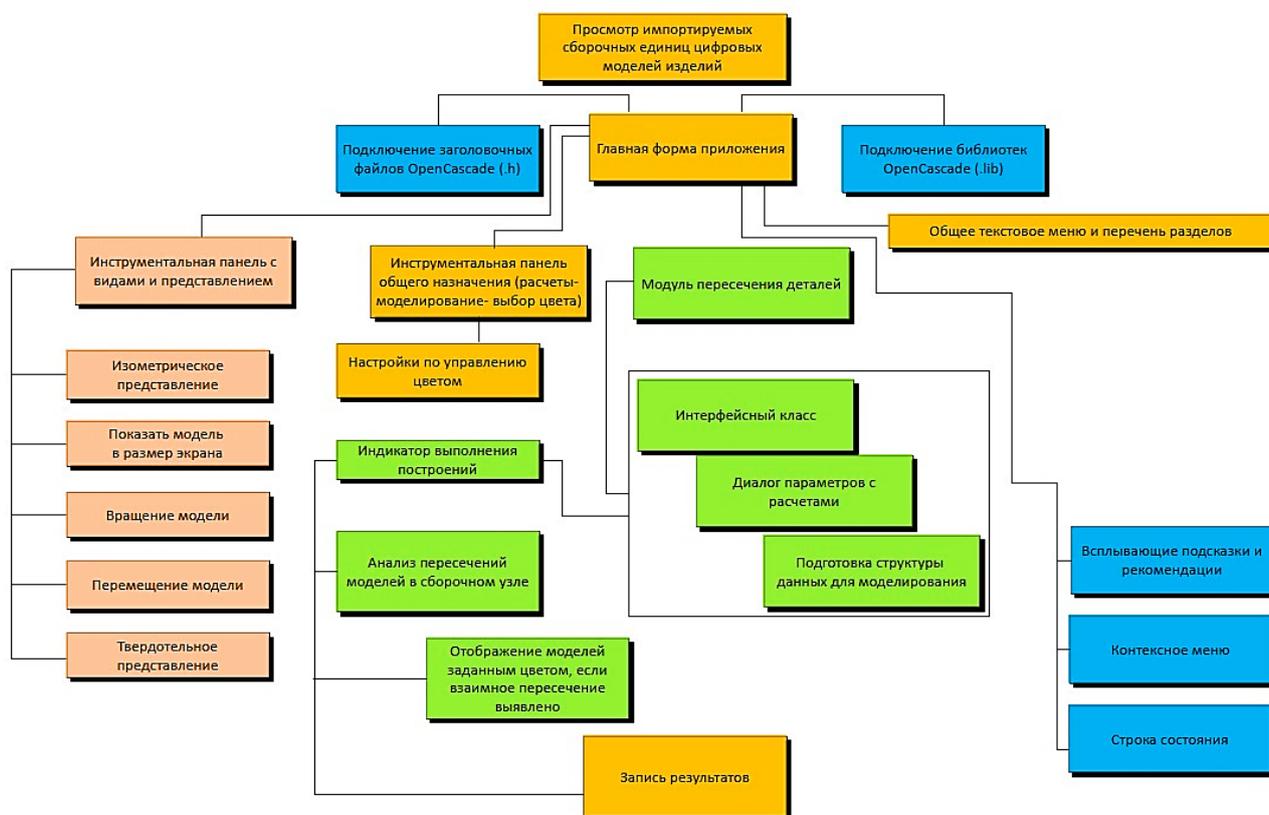


Рис. 1. Схема представления приложения с модулем анализа пересечения моделей в сборочных узлах

Алгоритм для проверки деталей на взаимное пересечение фрагментов указанных деталей может быть выполнен следующим образом:

- производится объявление множества с именем `dataPart` для хранения пересекающихся моделей деталей в составе сборочного узла;

- во внешнем цикле выполняется итерация по каждой модели посредством счетчика `numberPart`. Индексация начинается с 0 и продолжается до конечного числа объектов в сборочном узле;

- внутри внешнего цикла объявляется переменная `comparePart`, в которой хранится индекс некоторой модели, сравниваемой с текущей моделью в сборке;

- во внутреннем цикле выполняется итерация по каждой модели в сборке с использованием переменной `current`. При этом используется функция `qAsConst`, обеспечивающая обработку данных сборки как константных и доступных только для чтения;

- внутри внутреннего цикла производится сравнение текущей модели с моделью по заданному индексу `numberPart`. Если они отличаются, то производится переход к проверке пересечения;

- следом вызывается функция

`getIntersectionOnAsm` с текущей деталью и деталью с индексом `numberPart` в качестве аргументов. Эта функция проверяет, есть ли пересечение между двумя моделями, и возвращает булево значение, указывающее на результат. При этом, если флаг `Intersection` равен 1, то это означает, что между двумя частями есть пересечение. В этом случае две модели (`numberPart` и `comparePart`) помещаются в множество `dataPart`.

- после завершения внутреннего цикла необходимо увеличить счетчик `comparePart`, чтобы перейти к следующей инструкции для сравнения;

- внешний цикл продолжается до тех пор, пока все модели не будут проверены друг с другом.

В конечном итоге набор `dataPart` будет заполнен моделями пересекающихся деталей. Алгоритм в виде графической блок-схемы представлен на рис. 2. Для упрощения при создании блок-схемы некоторые имена переменных были изменены.



### Реализация проекта

При создании модуля анализа пересечения деталей в сборочном узле были использованы следующие классы геометрического ядра Open Cascade:

**TopoDS\_Shape**: класс в библиотеке OpenCASCADE, который представляет геометрическую фигуру. Он может быть использован для создания, модификации и анализа геометрии. Диаграмма наследования для класса **TopoDS\_Shape** показана на рис. 3.

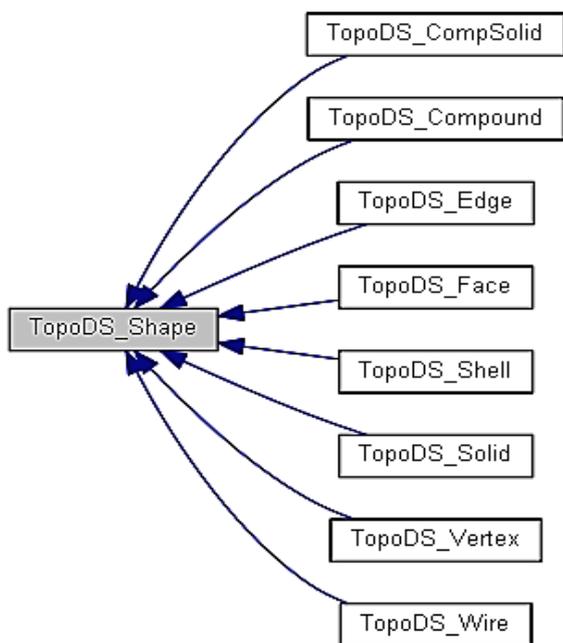


Рис. 3. Диаграмма наследования для класса **TopoDS\_Shape**

**BRepAlgoAPI\_Common**: класс, который предоставляет функциональность для выполнения операции пересечения между двумя геометрическими фигурами. Диаграмма наследования для класса **BRepAlgoAPI\_Common** показана на рис. 4.

**BOPAlgo\_Options**: класс, который предоставляет опции для выполнения операций булевой алгебры над геометрическими фигурами.

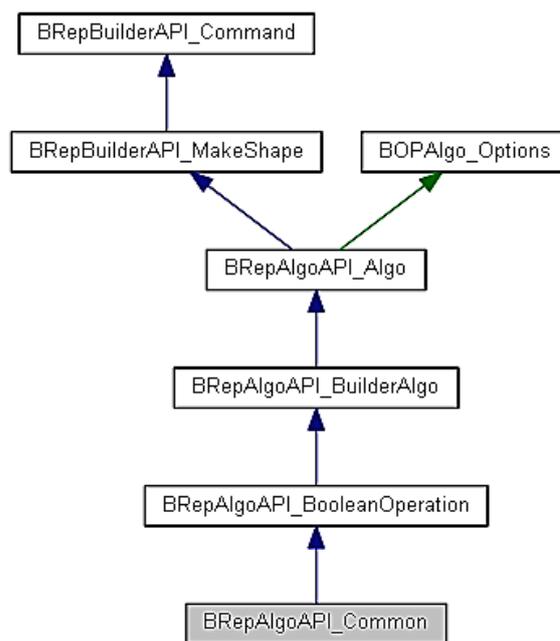


Рис. 4. Диаграмма наследования для класса **BRepAlgoAPI\_Common**

**BRepGProp**: класс, который предоставляет функциональность для вычисления свойств геометрических фигур, таких как объем, площадь и т.д. Диаграмма наследования для класса **BRepGProp** показана на рис. 5.

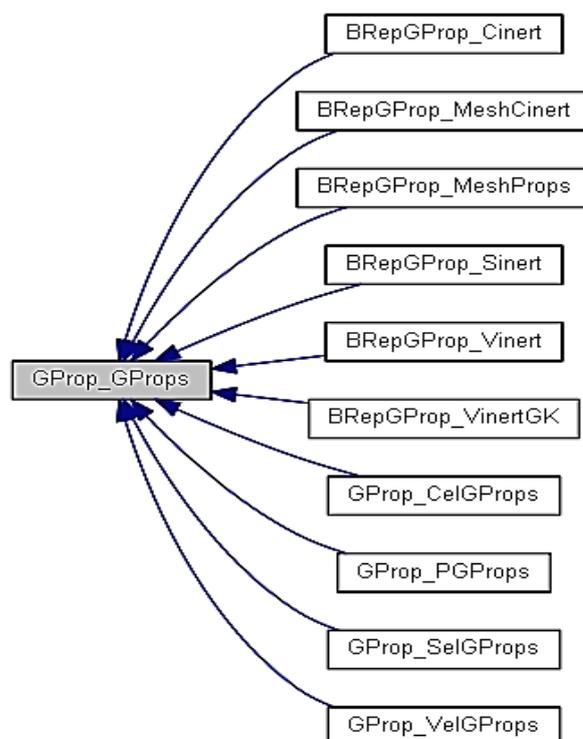


Рис. 5. Диаграмма наследования для класса **BRepGProp**

В программной реализации проверить пересечение двух геометрических объектов можно следующим образом:

1. Подготовить класс, который используется для измерения времени выполнения операций: `TimeElapsed`.

2. Создать некоторый абстрактный базовый тип `TopoDS_Shape`, который будет содержать результат пересечения двух геометрических форм.

3. Создать объект `BRepAlgoAPI_Common`, в котором надо выполнить операцию пересечения между двумя геометрическими формами одной модели с другой.

4. Использовать метод `SetParallelMode` с параметром `Standard_True` класса `BOPAlgo_Options`, который установит режим параллельного выполнения операции пересечения объектов.

5. Установить флаг для работы в параллельном режиме при выполнении операции пересечения:  
`mkCommon.SetRunParallel(Standard_True)`.

6. Выполнить операцию пересечения и сохранить результат в объект `result`: `result = mkCommon.Shape()`.

7. Создать объект `GProp_GProps`, который будет содержать свойства геометрической фигуры.

8. Вычислить свойства геометрической фигуры, включая объем, и сохранить их в объект `massProps`.

9. Получить значение объема из объекта `massProps`.

10. Оценить полученную величину. В случае успешного выполнения операции, величина объема будет представлена некоторым положительным значением. Получение некоторой величины объема означает, что есть общий фрагмент для двух выбранных форм объектов и контуры рассматриваемых моделей пересекаются.

На рис. 6 и 7 приведены результаты работы модуля, когда сборочный узел не содержит пересекающихся деталей в своем составе и когда в сборке есть пересечения (отмечены отдельным цветом).

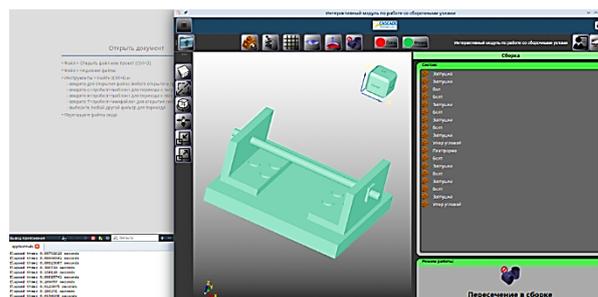


Рис. 6. Обработка сборки на предмет взаимного пересечения деталей в ней.  
Модели в сборочном узле не пересекаются

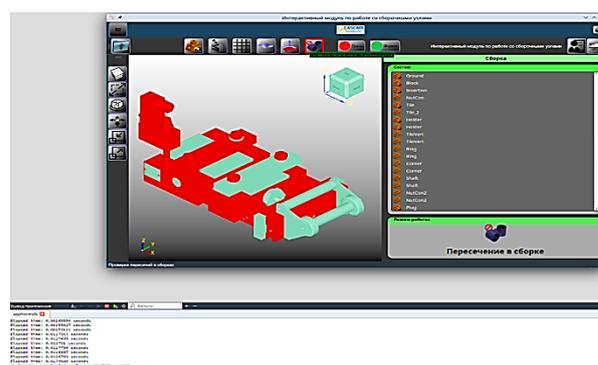


Рис. 7. Фрагменты моделей пересекаются и выделены отдельным цветом после завершения анализа в сборочном узле

В процессе работы модуля по анализу пересечений деталей в сборке ведется подсчет времени, которое требуется для перебора всех моделей в цифровом макете изделия. Показатели производительности по времени зависят от вычислительных способностей современных процессоров. Информация о производительности выводится в отдельное отладочное окно среды разработки (рис. 6 и 7).

## Заключение

Рассмотрены методики по анализу пересечений моделей, входящих в состав сборочного узла, средствами геометрического ядра Open CASCADE.

В проектировании программного обеспечения используются технологии, обеспечивающие работу с обменными форматами данных, решения, позволяющие получить геометрию модели и техническую информацию из файлов.

Предложен алгоритм по нахождению пересечений деталей в сборках, рассмотрены классы геометрического ядра, которые необходимы для реализации модуля по анализу сборки и выявления пересечений, представле-

ны результаты работы с импортируемыми сборками с оценкой времени производительности при использовании многоядерных архитектур современных вычислительных систем.

#### Литература

1. Юров А.Н. Управление инженерным контентом в составе цифровых макетов сборочных единиц // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2022. Т. 18. № 6. С. 57-61.
2. Лячек Ю.Т., Алькади Лайс Д.Г. Методы создания параметрических моделей геометрических объектов в современных САПР // Кибернетика и программирование. 2016. № 2. С. 42-51.
3. Лячек Ю.Т. Геометрическое моделирование. Параметризация и модификация 3D-моделей и чертежей в САПР. СПб.: СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2015. 160 с.
4. Юров А.Н., Анциферова В.И. Разработка автономных программных решений на основе геометрических ядер по созданию цифровых сборочных моделей станочных приспособлений // Моделирование систем и процессов. 2020. Т. 13. № 3. С. 86-93.
5. Похилько А.Ф., Цыганков Д.Э. Формализация процесса построения 3D-модели изделия на основе библиотек Open CASCADE // Системный анализ в проектировании и управлении: сборник научных трудов XIX Международной научно-практической конференции. 2015. С. 29-31.
6. Development of autonomous software solutions based on geometric cores to create digital assembly models of machine tools / A.N. Yurov, M.I. Chizhov, V.V. Vetokhin, V.V. Lavlinskiy // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Krasnoyarsk Science and Technology City Hall of the Russian Union of Scientific and Engineering Associations. 2020. pp. 52063.
7. Ахлестин А.И., Юров А.Н., Чижов М.И. Разработка масштабируемых кроссплатформенных приложений QML с интеграцией модуля геометрических построений Open Cascade // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2023. Т. 19. № 3. С. 13-16.
8. Об информационном обмене между САД-системами / Л.И. Райкин, И.Н. Мерзляков, А.Д. Филинских, А.А. Бойтяков // Информационные технологии в проектировании и производстве. 2015. № 3 (159). С. 65-72.
9. Кондратьев С.Е., Кожевников Н.О., Ульянин О.В. Автоматизация процессов управления конструктивной электронной структурой изделия // Вестник Брянского государственного технического университета. 2015. № 3. С. 143-146.
10. Кондаков А.И., Зайцев А.В. Параметризация процессов изготовления деталей машин // Главный механик. 2015. № 5-6. С. 31-35.
11. Козырев Д.Б., Абакумов Е.М. Типизация 3D-моделей деталей в соответствии с целями использования моделей // Информационные технологии и системы: труды IV Международной научной конференции. Челябинск: ЧелГУ, 2015. С. 155-157.
12. Visualization of metalworking processes in the development of simulation programs for equipment with numerical control / A.N. Yurov, M.I. Chizhov, A.V. Bredikhin, V.V. Lavlinskiy // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Krasnoyarsk Science and Technology City Hall of the Russian Union of Scientific and Engineering Associations. 2020. pp. 32092.

Поступила 30.10.2023; принята к публикации 12.02.2024

#### Информация об авторе

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

### DEVELOPMENT OF A COMPONENT FOR ANALYZING THE INTERSECTION OF PART MODELS IN ASSEMBLIES BY MEANS OF GEOMETRIC KERNELS

A.N. Yurov

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

**Abstract:** when designing products, errors may be made due to the introduction of restrictions between parts in the overall layout of the assembly unit. Layout errors lead to mutual intersection of parts in digital format and may not be noticed in the engineering design system, but such errors are unacceptable in the production process. Methods for analyzing the intersections of models in assemblies using the functionality of the Open CASCADE geometric kernel were considered. The development is associated with the use of export formats and obtaining in them the composition of the structure of digital models of those parts in assembly units that have mutual intersections in the geometry of the location of these parts in the assembly. In software design, technologies are used that provide work with exchange data formats, solutions that allow obtaining model geometry and technical information from files. An algorithm for finding the intersections of parts in assemblies is proposed, classes of the geometric kernel are considered that are necessary for the implementation of the module for analyzing the assembly and identifying intersections, the results of working with imported assemblies are presented with an assessment of the performance time when using multi-core architectures of modern computing systems An autonomous module has been created for working with export formats, data visualization, displaying the structure of models as part of an assembly unit with highlighting of those models that have mutual intersections of topological elements. The development is prepared for use in the Linux operating system based on 64-bit architecture

**Key words:** export data formats, engineering data, digital product layouts, Open CASCADE geometric kernel, open source operating systems, model analysis as part of an assembly unit

### References

1. Yurov A.N. "Engineering content management as part of digital layouts of assembly units", *The Bulletin of the Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2022. T. 18. № 6. С. 57-61.
2. Lyachek Yu.T., Alkadi Lais D.G. "Methods of creating parametric models of geometrical objects in modern CAD", *Cybernetics and Programming (Kibernetika i programmirovaniye)*, 2016, no. 2, pp. 42-51.
3. Lyachek Yu.T. "Geometric modeling. Parameterization and modification of 3D-models and drawings in CAD" ("Geometricheskoye modelirovaniye. Parametrizatsiya i modi-fikatsiya 3D-modeley i chertezhey v SAPR"), Saint Petersburg, SPbGETU "LETI", 2015, 160 p.
4. Yurov A.N., Antsiferova V.I. "Development of autonomous software solutions based on geometric kernels for creating digital assembly models of machine tool fixtures", *Modeling of systems and processes (Modelirovaniye sistem i protsessov)*, 2020, vol. 13, no. 3, pp. 86-93.
5. Pokhilko A.F., Tsygankov D.E. "Formalization of the process of 3D-model construction on the basis of Open CASCADE libraries", *System Analysis in Design and Management (Sistemnyy analiz v proyektirovanii i upravlenii)*, coll. of scientific papers of the XIX International Scientific and Practical Conference, 2015, pp. 29-31.
6. Yurov A.N., Chizhov M.I., Vetokhin V.V., Lavlinskiy V.V. "Development of autonomous software solutions based on geometric cores to create digital assembly models of machine tools", OP Conference Series *Materials Science and Engineering*, Krasnoyarsk Science and Technology City Hall of the Russian Union of Scientific and Engineering Associations, 2020, p. 52063.
7. Akhlestin A.I., Yurov, Chizhov M.I. "Development of scalable cross-platform QML applications with integration of the Open Cascade geometric module", *The Bulletin of the Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2023, vol. 19, no. 3, pp. 13-16.
8. Raikin L.I., Merzlyakov I.N., Filinskikh A.D., Boityakov A.A. "Information exchange between CAD-systems", *Information technologies in design and manufacturing (Informatsionnyye tekhnologii v proyektirovanii i proizvodstve)*, 2015, no. 3 (159), pp. 65-72.
9. Kondratyev S.E., Kozhevnikov N.O., Ulyanin O.V. "Automation of the control processes of the constructive electronic structure of the product", *The Bulletin of Bryansk State Technical University (Vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2015, no. 3, pp. 143-146.
10. Kondakov A.I., Zaitsev A.V. "Parameterization of the machine parts manufacturing processes", *Chief Mechanical Engineer (Glavnyy mekhanik)*, 2015, no. 5-6, pp. 31-35.
11. Kozyrev D.B., Abakumov E.M. "Typing of 3D models of parts according to the purposes of using models", *Information technologies and systems (Informatsionnyye tekhnologii i sistemy)*, proc. of the Fourth International Scientific Conference, Chelyabinsk State University, 2015, pp. 155-157.
12. Yurov A.N., Chizhov M.I., Bredikhin A.V., Lavlinsky V.V. "Visualization of metalworking processes in the development of simulation programs for equipment with numerical control", Yurov A.N., IOP Conference Series *Materials Science and Engineering*, Krasnoyarsk Science and Technology City Hall of the Russian Union of Scientific and Engineering Associations, 2020, p. 32092.

Submitted 30.10.2023; revised 12.02.2024

### Information about the authors

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

## АЛГОРИТМ СКАЛЯРНОЙ ДЕКОМПОЗИЦИИ ОКРЕСТНОСТНОЙ СТРУКТУРЫ

Р.В. Попов

Липецкий государственный технический университет, г. Липецк, Россия

**Аннотация:** построение окрестностной модели производственного процесса начинается с формализации технологической схемы в виде окрестностной структуры – орграфа с наборами переменных в вершинах. Окрестностная структура определяет для каждой вершины переменные, входящие в уравнения для этой вершины, и позволяет вычислить, по крайней мере, в случае полиномиальных моделей, количество коэффициентов, для которых потребуется параметрическая идентификация. Как правило, это количество желательно минимизировать. Дополнительная или новая информация о моделируемом процессе в некоторых случаях позволяет уменьшить количество коэффициентов после структурных преобразований окрестностной модели. Например, для слабо связанных двойных систем (два процесса на одной окрестностной структуре) ранее был предложен алгоритм декомпозиции и агрегирования окрестностной структуры, в результате которого количество коэффициентов может быть значительно уменьшено. Этот алгоритм был реализован для оптимизации системы вентиляции и фильтрации воздуха в цехе обжига клинкера цементного производства. Предлагается альтернативный алгоритм, который может применяться в случае любого количества (двух или более) процессов на одной окрестностной структуре. Предлагаемая схема структурного преобразования окрестностной модели названа в работе алгоритмом скалярной декомпозиции окрестностной структуры. Алгоритм описан геометрически, как преобразование орграфа, и алгебраически, как преобразование матрицы смежности орграфа. Алгоритм скалярной декомпозиции позволяет сократить количество использованных коэффициентов в модели, что может упростить ее анализ и повысить эффективность

**Ключевые слова:** окрестностная структура, скалярная декластеризация, скалярная декомпозиция

## Введение

Технологическая схема распределенного и многостадийного производственного процесса является основой для построения математической модели. Удобным средством формализации технологических схем с последующим построением моделей являются окрестностные структуры и окрестностные системы (см. [1,2]). Окрестностный подход предполагает три этапа построения математической модели – структурная идентификация (идентификация *окрестностной структуры*), выбор типов уравнения (линейные, билинейные и т.д.) и параметрическая идентификация. Термин «параметрическая идентификация» является общепринятым (см., например, [3]), термин «структурная идентификация» используется в разных работах в разном смысле, например, в [4] структурной идентификацией называется определение ненулевых коэффициентов полиномиальной модели.

Окрестностная структура – это орграф, оснащенный наборами переменных (скалярными, векторными, матричными и т.д.) в каждой из вершин. В окрестностных структурах выделяют три типа вершин: входы  $U$ , узлы  $X$  и выходы  $Y$ . Входы связаны с другими верши-

нами только выходящими дугами, узлы – как входящими, так и выходящими, выходы – только входящими. Узлы, как правило, кроме входящих и выходящих дуг имеют петли.

Вершины орграфа соответствуют «физическим» узлам моделируемого производства или процесса при выбранной степени детализации технологической схемы. В окрестностной структуре физическому узлу технологической схемы может соответствовать узел, вход или выход орграфа. Наборы переменных в вершинах орграфа характеризуют состояния физических узлов. Дуги орграфа соответствуют технологическим связям между физическими узлами.

Предполагается, что каждый узел или вход передает по каждой из выходящих дуг весь набор переменных своего состояния. Окрестностная система моделирует производственный процесс и состоит из уравнений для состояний узлов и выходов орграфа. В зависимости от решаемой задачи можно рассматривать динамические или статические модели. В статическом случае модель описывает номинальные (технологически заданные) режимы функционирования производства, и переменная времени не участвует в уравнениях.

Окрестностная структура задает максимально возможный по количеству входящих переменных *формальный* вид уравнений

окрестностной системы. А именно, в уравнении (любого типа) для данного узла могут участвовать только переменные вершин, предшествующих этому узлу, в том числе переменные самого узла, если узел имеет петлю. Выбор конкретных типов уравнений для каждого из узлов (линейных или более сложных) делается исследователем.

Объем экспериментальной информации, необходимой для параметрической идентификации окрестностной системы зависит от количества коэффициентов (параметров) модели. Если процесс получения экспериментальной информации является затратным, то желательно уменьшить количество коэффициентов. В полиномиальных моделях нелинейным слагаемым в уравнениях соответствуют искусственные предикторы, и потому на объем экспериментальной информации влияет только линейная часть модели, вид которой полностью определяется окрестностной структурой.

Учет дополнительной информации о моделируемом процессе, не отраженной в уже построенной окрестностной модели, может приводить к структурным преобразованиям орграфа и, соответственно, к изменению количества коэффициентов.

В работе [5,6] был описан алгоритм декомпозиции окрестностной структуры двойной системы с последующим её агрегированием, позволяющий уменьшить количество необходимых коэффициентов модели. Двойная система описывает два взаимосвязанных процесса (две подсистемы) на одной окрестностной структуре, например, в работе [5] это были процессы кондиционирования и фильтрации воздуха в цехе обжига клинкера цементного производства. Обобщение алгоритма на случай более чем двух подсистем в работе [3] не рассматривалось.

В данной работе предлагается альтернативный алгоритм структурного преобразования окрестностной модели, позволяющий рассматривать случай любого количества подсистем, реализованных на одной окрестностной структуре. Предлагаемый алгоритм не является обобщением алгоритма из [5] на случай более чем двух подсистем и, например, уже для двух подсистем отличается от алгоритма из [5].

### Алгоритм скалярной декомпозиции окрестностной структуры

Вершинам орграфа окрестностной структуры соответствуют наборы переменных. В общем случае каждая из этих переменных может быть скалярной, векторной, матричной и т.п., но в предлагаемом алгоритме все переменные рассматриваются, независимо от их внутренней структуры, как «обобщенно-скалярные» или «неделимые». Например, одной из переменных состояния узла может быть матричная переменная и при этом она считается обобщенно-скалярной. Далее термин «скалярная переменная» всегда понимается как «обобщенно-скалярная». Алгоритм скалярной декомпозиции окрестностной структуры содержит два этапа: скалярная декластеризация и редукция связей (дуг) в скалярной декластеризации.

1. *Скалярная декластеризация.* Каждая вершина исходного орграфа заменяется новыми вершинами, количество которых равно числу скалярных переменных, связанных с данной вершиной. При этом все дуги, входящие и выходящие из данной вершины, дублируются для каждой новой вершины. Для каждой вершины, являющейся узлом с петлей, все новые вершины снабжаются петлями и соединяются дугами до образования полного орграфа на этих вершинах – см. рис. 1, 2.

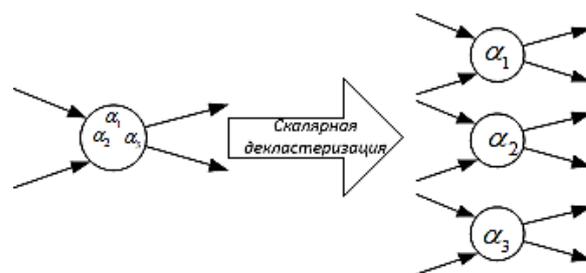


Рис. 1. Декластеризации вершины без петли

В результате мы получаем оргграф скалярной декластеризации окрестностной структуры, в котором с каждой новой вершиной связана только одна обобщенно-скалярная переменная. Оргграф скалярной декластеризации сложнее исходного орграфа, но при этом соответствующая линейная окрестностная система совпадает с исходной системой.

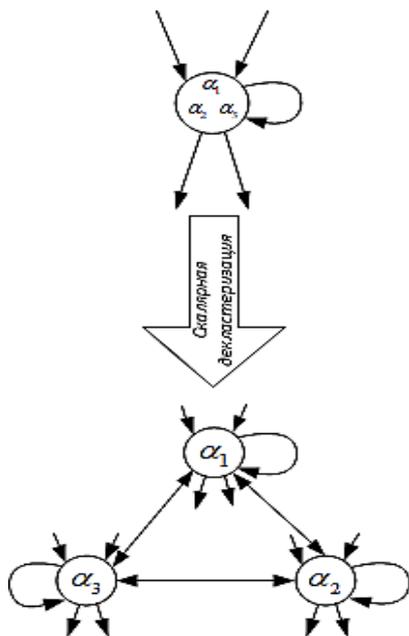


Рис. 2. Декластеризации вершины с петлей

*Замечание.* В работе [7] термин «декластеризация окрестностной структуры» используется в другом смысле, а именно для описания преобразования реляционных окрестностных моделей (с уравнениями для связей, см. [1], [2], [8]) в вершинные (с уравнениями для вершин). В данной работе рассматриваются только вершинные модели, и применяемая декластеризация, чтобы отличить ее от [7], называется *скалярной декластеризацией*.

2. *Редукция связей в декластеризованном орграфе.* На этом этапе предполагается использование дополнительной информации, не содержащейся в исходной окрестностной структуре. А именно, предполагается, что для каждой упорядоченной пары переменных известно, влияет или нет первая переменная на вторую. В соответствии с этим каждая из дуг орграфа скалярной декластеризации либо сохраняется, либо удаляется. Полученная в итоге окрестностная структура называется *скалярной декомпозицией* исходной окрестностной структуры. После редукции количество коэффициентов линейной окрестностной системы может или уменьшиться, или остаться прежним.

#### Алгоритм скалярной декомпозиции для матрицы смежности окрестностной структуры

Матрица смежности  $A$  орграфа состоит из нулей и единиц, при этом  $a_{ij} = 1$ , если есть дуга  $i \rightarrow j$ . Диагональный элемент  $a_{ii} = 1$ , ес-

ли вершина  $i$  имеет петлю. Алгоритм скалярной декомпозиции для матрицы смежности окрестностной структуры состоит в следующем:

1. *Скалярная декластеризация.* Матрица смежности  $A$  орграфа окрестностной структуры преобразуется следующим образом. Каждый элемент  $a_{ij}$  заменяется блоком из единиц, если  $a_{ij} = 1$ , и блоком из нулей, если  $a_{ij} = 0$ . Блок из нулей или единиц имеет размерность  $n \times m$ , где  $n$  – число переменных в  $i$ -ой вершине, а  $m$  – число переменных в  $j$ -ой вершине. Таким образом, получается матрица скалярной декластеризации  $A_D$ , которая представляет каждую вершину в виде блока из единиц или из нулей в зависимости от наличия связи между вершинами. Матрица декластеризации позволяет более детально представить зависимости между переменными в окрестностной структуре. Порядок матрицы  $A_D$  равен  $N \times N$ , где  $N$  – количество всех скалярных переменных модели.

2. *Редукция декластеризованной матрицы смежности.* Дополнительная информация о зависимости переменных кодируется в виде *матрицы виртуальных связей* – матрицы  $V$  порядка  $N \times N$ , в которой  $v_{ij} = 1$  если можно предполагать, что  $i$ -тая скалярная переменная влияет на  $j$ -тую. Редукция декластеризованной матрицы смежности состоит в переходе от матрицы  $A_D$  к матрице  $V \circ A_D$ , « $\circ$ » – произведение Адамара (поэлементное произведение матриц). В предельном случае, когда все формальные зависимости, определяемые исходной окрестностной структурой, являются реальными (то есть ни одну нельзя удалить) матрица  $V \circ A_D$  совпадает с  $A_D$ .

#### Применение алгоритма скалярной декомпозиции окрестностной структуры

Рассмотрим применение алгоритма скалярной декомпозиции окрестностной структуры к модели вентиляции и фильтрации цеха цементного производства, описанной в работе [5].

Исходная окрестностная структура системы вентиляции и фильтрации и соответствующая матрица смежности представлены на рис. 3.

Структура содержит четыре входа *External1(E1)*, *External2(E2)*, *Regulator1(R1)*, *Regulator2(R2)* и три узла *Conditioning (C)*, *Plant (P)*, *Filtration(F)*. Все три узла имеют петли, которые для упрощения рисунков не изображены.

Подробное описание технологического смысла перечисленных узлов и входов вместе с соответствующими им переменными имеется в работе [5]. Ниже дается только краткая расшифровка обозначений.

Вход *External1* содержит следующие переменные:  $D_e$  – концентрация пыли в приточном воздухе,  $T_e$  – температура приточного воздуха.

Вход *External2* содержит следующие переменные:  $N^t$  – интенсивность тепловыделения,  $N^d$  – интенсивность пылеобразования.

Вход *Regulator1* содержит переменную  $R$  – коэффициент рециркуляции.

Вход *Regulator2* содержит управляемую переменную  $V_f$  – объем приточного воздуха в единицу времени.

Узел *Conditioning* содержит следующие переменные:  $D_c$  – максимально допустимая

концентрация пыли после фильтрации,  $T_c$  – температура воздуха после терморегуляции,  $E_c^d$  – расход энергии в единицу времени на фильтрацию,  $E_c^t$  – расход энергии в единицу времени на кондиционирование воздуха.

Узел *Plant* содержит следующие переменные:  $T_p$  – установившаяся температура в цехе,  $D_p$  – установившаяся концентрация пыли в цехе.

Узел *Filtration* содержит следующие переменные:  $D_f$  – концентрация пыли после фильтрации,  $T_f$  – температура воздуха после фильтрации,  $E_f$  – расход энергии в единицу времени на вытяжку и фильтрацию.

Линейная окрестностная модель, соответствующая данной окрестностной структуре, содержит 71 коэффициент.

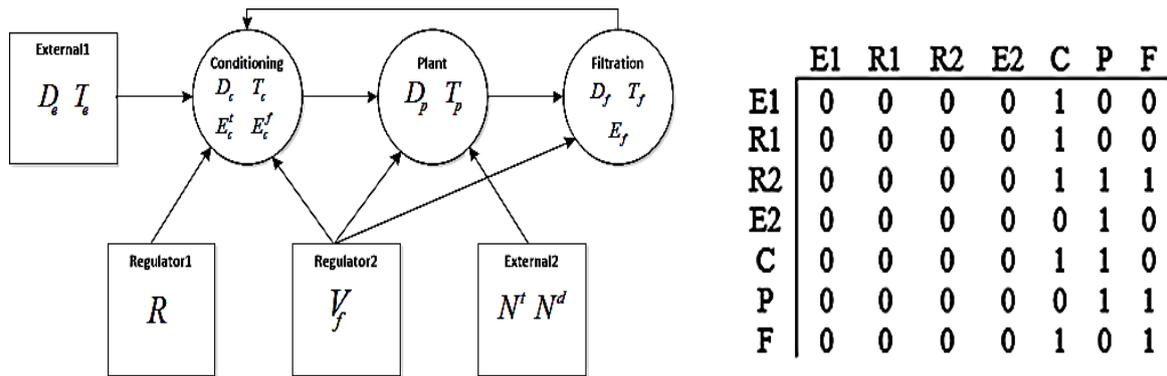


Рис. 3. Окрестностная структура системы вентиляции и фильтрации и соответствующая матрица смежности

Первый шаг алгоритма скалярной декомпозиции (скалярная декластеризация): каждая вершина исходного орграфа расщепляется на несколько новых вершин (по количеству переменных в вершине) и соответствующие дуги дублируются для каждой новой вершины. Орграф скалярной декластеризации окрестностной структуры схематически, с использованием блоков и блочных дуг (для упрощения),

изображен на рис. 4. Числа на блочных дугах указывают количество обычных дуг, кодируемых блочной дугой. Кроме того, предполагается, что узлы в каждом из блоков имеют дуги внутри блоков (для упрощения рисунка они не изображены) и образуют вместе с этими дугами полный орграф.

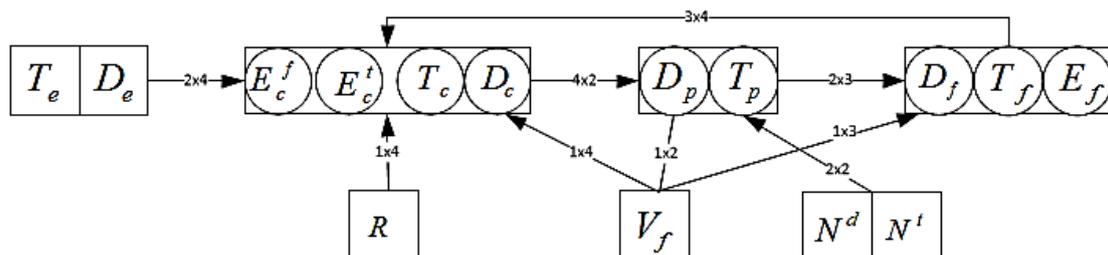


Рис. 4. Орграф скалярной декластеризации окрестностной структуры

Далее для орграфа скалярной декластеризации применяем редукцию связей, удаляя дуги между теми вершинами, в которых переменные не зависят друг от друга физически, поскольку относятся к разным подсистемам. В результате получаем орграф скалярной декомпозиции окрестностной структуры, изображенный на рис. 5.

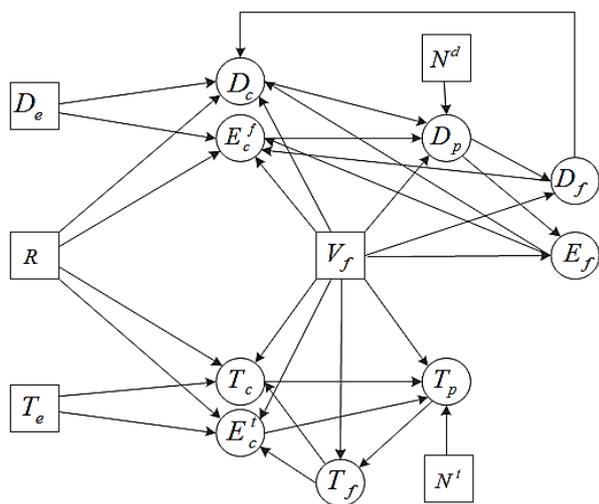


Рис. 5. Упрощенный граф окрестностной структуры

На основе преобразованной окрестностной структуры можно записать новую окрестностную систему, которая содержит только необходимые коэффициенты модели:

$$\begin{cases} D_c = \alpha_1 D_e + \alpha_2 R + \alpha_3 V_f + \alpha_4 D_f + \alpha_5 E_f \\ E_c^f = \alpha_6 D_e + \alpha_7 R + \alpha_8 V_f + \alpha_9 D_f + \alpha_{10} E_f \\ T_c = \alpha_{11} T_e + \alpha_{12} R + \alpha_{13} V_f + \alpha_{14} T_f \\ E_c^t = \alpha_{15} T_e + \alpha_{16} R + \alpha_{17} V_f + \alpha_{18} T_f \\ D_p = \alpha_{19} D_c + \alpha_{20} E_c^f + \alpha_{21} V_f + \alpha_{22} N^d \\ T_p = \alpha_{23} T_c + \alpha_{24} E_c^t + \alpha_{25} V_f + \alpha_{26} N^t \\ D_f = \alpha_{27} D_p + \alpha_{28} V_f \\ T_f = \alpha_{29} T_p + \alpha_{30} V_f \\ E_f = \alpha_{31} D_p + \alpha_{32} V_f \end{cases}$$

Количество коэффициентов в получившейся линейной окрестностной системе равно 32, как и в работе [5].

## Заключение

Описан алгоритм структурного преобразования окрестностной модели, позволяющий уменьшить количество коэффициентов, для которых требуется параметрическая идентификация. Тем самым уменьшается объем необходимой для идентификации модели экспериментальной информации (количество кортежей состояния окрестностной модели). Алгоритм содержит два этапа: на первом используется только информация, отраженная в окрестностной структуре модели, на втором этапе требуется дополнительная информация в виде матрицы виртуальных (возможных) связей между переменными модели. Алгоритм решает ту же задачу, что и алгоритм декомпозиции-агрегирования двойных слабосвязанных окрестностных систем из работы [5], но при этом не является формальным обобщением алгоритма из [5] на случай более чем двух подсистем и использует другой подход, в котором количество подсистем не имеет значения. В качестве примера применения рассмотрена модель вентиляции-фильтрации из [5], при этом полученное редуцированное количество коэффициентов совпало с оценкой из [5].

## Литература

1. Мишачев Н.М., Шмырин А.М. Окрестностные структуры и метаструктурная идентификация // Таврический вестник информатики и математики. 2017. Т. 37. № 4. С. 87-95.
2. Мишачев Н.М., Шмырин А.М. Метаструктурная идентификация: монография. Воронеж: Ритм, 2019, 189 с.
3. Льюнг Л. Идентификация систем. Теория для пользователя. М.: Наука, 1991, 432 с.
4. Карабутов Н.Н. Структурная идентификация систем: анализ динамических структур. М.: МГИУ, 2008. 160 с.
5. Семина В.В. Идентификация слабосвязанных окрестностных систем // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2019. Т. 15. № 2. С. 69-76.
6. Семина В.В. Декомпозиция и агрегирование слабосвязанных окрестностных систем // Системы автоматизации в образовании, науке и производстве AS'2022: труды Всероссийской научно-практической конференции. Новокузнецк: Сибирский государственный индустриальный университет, 2022. С. 372-377.
7. Мишачев Н.М., Шмырин А.М. Декластеризация окрестностных структур // Вестник Тамбовского университета. Серия: Естественные и технические науки. 2018. Т. 23. № 124. С. 648-654.
8. Канюгина А.С. О задаче управления температурным режимом стадии диффузии производства сахара // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2019. Т. 15. № 2. С. 51-63.

Информация об авторах

**Попов Роман Валерьевич** – аспирант кафедры высшей математики, Липецкий государственный технический университет (398055, Россия, г. Липецк, ул. Московская, д.30), e-mail: roman291196@mail.ru

**ALGORITHM OF SCALAR DECOMPOSITION OF A NEIGHBORHOOD STRUCTURE**

**R.V. Popov**

**Lipetsk State Technical University, Lipetsk, Russia**

**Abstract:** the construction of a neighborhood model of the production process begins with the formalization of the technological scheme in the form of a neighborhood structure – a digraph with sets of variables at the vertices. The neighborhood structure defines for each vertex the variables included in the equations for this vertex and allows calculating, at least in the case of polynomial models, the number of coefficients for which parametric identification is required. As a rule, it is desirable to minimize this amount. Additional or new information about the modeled process in some cases makes it possible to reduce the number of coefficients after structural transformations of the neighborhood model. For example, for weakly coupled binary systems (two processes on the same neighborhood structure), an algorithm for decomposition and aggregation of the neighborhood structure was previously proposed, as a result of which the number of coefficients can be significantly reduced. This algorithm was implemented to optimize the ventilation system and air filtration in the clinker firing shop of cement production. This paper proposes an alternative algorithm that can be used in the case of any number (two or more) processes on one neighborhood structure. The proposed scheme of structural transformation of the neighborhood model is called in the work the algorithm of scalar decomposition of the neighborhood structure. The algorithm is described geometrically as a digraph transformation and algebraically as a transformation of the adjacency matrix of a digraph. The scalar decomposition algorithm of the neighborhood structure makes it possible to reduce the number of coefficients used in the model, which can simplify its analysis and increase efficiency

**Key words:** neighborhood structure, scalar decasterization, scalar decomposition

**References**

1. Mishachev N.M., Shmyrin A.M. “Neighborhood structures and metastructural identification”, *Tauride Bulletin of Computer Science and Mathematics (Tavricheskij vestnik informatiki i matematiki)*, 2017, vol. 37, no. 4, pp. 87-95.
2. Mishachev N.M., Shmyrin A.M. “Metastructural identification” (“Metastrukturnaya identifikatsiya”), Voronezh, Ritm, 2019, 189 p.
3. Leung L. “Identification of systems. Theory for the user” (“Identifikatsiya sistem. Teoriya dlya polzovatelya”), Moscow, Nauka, 1991, 432 p
4. Karabutov N. N. “Structural identification of systems: Analysis of dynamic structures” (“Strukturnaya identifikatsiya sistem: analiz dinamicheskikh struktur”), Moscow, MGIU, 2008, 160 p.
5. Semina V.V. “Identification of loosely coupled neighborhood systems”, *The Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2019, vol.15, no. 2, pp. 69-76.
6. Semina V.V. “Decomposition and aggregation of loosely coupled neighborhood systems”, *Automation systems in education, science and production AS'2022 (Sistemy avtomatizatsii v obrazovanii, nauke i proizvodstve AS'2022)*, Proc. of the All-Russian Scientific and Practical Conference, Novokuznetsk, Siberian State Industrial University, 2022, pp. 372-377.
7. Mishachev N.M., Shmyrin A.M. “Declusterization of neighborhood structures”, *The Bulletin of Tambov University. Series Natural and Technical Sciences (Vestnik Tambovskogo universiteta. Seriya Yestestvennyye i tekhnicheskiye nauki)*, 2018, vol. 23, no. 124, pp. 648-654.
8. Kanyugina A.S. “On the problem of controlling the temperature regime of the diffusion stage of sugar production”, *The Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2019, vol. 15, no. 2, pp. 51-63.

Submitted 20.10.2023; revised 12.02.2024

**Information about the authors**

**Roman V. Popov** – Postgraduate Student, the Department of Higher Mathematics, Lipetsk State Technical University (30 Moskovskaya str., Lipetsk 398055, Russia), e-mail: roman291196@mail.ru

## СИСТЕМА СБОРА ДАННЫХ

Г.В. Петрухнова, И.Р. Болдырев, М.О. Горина, Д.А. Груздев

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

**Аннотация:** показана актуальность автоматизации системы сбора данных (ССД) и разработки систем данного направления. Представлена архитектура ССД. Проведена формализация основных процессов, поддерживаемых данной системой. ССД состоит из функционально законченных модулей, которые поддерживают выполнение функций в контексте основного назначения системы. Приведена структурная схема ССД. Система может использоваться автономно или быть узлом распределенной ССД. Имеется возможность контролировать в ручном режиме электрические параметры контуров связи. Структура ССД представлена модулем питания, модулем генерации произвольных сигналов, модулем индикации, модулем непосредственного сбора данных. Назначение и основные функции этих структурных единиц представлены в статье. Использование датчиков для снятия измерений с объектов подчинено особенностям выполняемой задачи. Могут быть использованы различные серии аналоговых и цифровых датчиков. Система имеет 8 дифференциальных/16 несимметричных входов и разрешение 16-битного аналого-цифрового преобразователя. На основе ССД может быть разработана система управления объектом, и в этом случае ССД будет использоваться как одноканальная система для увеличения скорости снятия измерений. На персональном компьютере (ПК) находятся средства извлечения, преобразования и хранения данных, а также выполняется обработка запросов клиентов на доступ и получение оперативной информации. Средства администрирования и управления ССД позволяют осуществлять распределение прав пользователей и осуществляют это с использованием механизма ролей. Алгоритмы ССД обеспечивают сохранение меток времени для всех поступающих данных измерения. Представленная ССД позволяет автоматизировать различные процессы контроля состояния различного оборудования и производственных процессов

**Ключевые слова:** сбор данных, ССД, интерфейс, устройство, аналоговый сигнал, цифровой сигнал, АЦП, ЦАП, сервер, ethernet

### Введение

В мире постоянно многое меняется, в том числе и ключевые ресурсы общества. Сейчас этим главным и широко востребованным ресурсом стала информация. Она играет важнейшую роль практически во всех аспектах человеческой жизни: используется для общения, обучения, принятия решений, управления технологическими процессами, контроля состояния объектов различной природы и прочего. Без информации достаточно сложно представить современный мир таким, какой он есть, поскольку она является основой для всех процессов и явлений, которые происходили и происходят в различных сферах жизни нашего общества. Каждый человек ежедневно в определенные моменты времени пользуется информацией и совершенно не задумывается, откуда она берется.

Под информационными операциями традиционно понимают информационные целенаправленные действия человека [1]. В настоящее время актуальной является задача выстраивания процесса получения информации без участия человека. Полезность автоматизации сбора данных максимальна, а приоритет оче-

виден по сравнению с традиционными ранее встречающимися операциями по получению информации. Автоматизация сбора данных актуальна для различных задач: тестового контроля работы конечных автоматов [2], управления робототехническими системами [3], контроля технических средств [4-11], исследований космоса [5], диагностики окружающей среды [5], химической защиты человека и биосферы [5] и многих других.

Автоматизированные системы сбора данных в сфере промышленности позволяют организовать непрерывное получение точной информации о состоянии различного оборудования и производственных процессов в целом, экономить ресурсы, предупреждать возникновение аварийных ситуаций, исключить ошибки человеческого фактора в сборе, анализе и интерпретации данных. Многие специалисты, в том числе, программисты и учёные, пытаются найти, спроектировать и реализовать идеальную систему сбора данных – простую, высокочувствительную, точную, такую, которая могла бы обрабатывать большие массивы информации. Согласно постановлениям правительства Российской Федерации разработка систем автоматизации, анализ данных являются приоритетными направлениями фундаментальных и поисковых научных исследований на 2021-

2030 годы [5]. ССД является важным инструментом в самых различных сферах деятельности человека [6–12], что подтверждает актуальность поднятой в статье темы.

Следует отметить, что именно представляет собой система сбора данных (ССД). В широком смысле, это комплекс оборудования и программного обеспечения, который служит для сбора информации из различных источников для дальнейшего анализа, обработки и, в определенных случаях, хранения. ССД позволяет собирать данные в разных режимах, например, в реальном, ускоренном времени и т.д., а также контролировать сам процесс или даже вносить в него некоторые изменения [8].

Функционирование рассматриваемой ССД описывается в более ранних работах [4], [13]. В статье [13] представлена структура многофункциональной системы сбора данных, приводятся основные характеристики ее модулей. Показано, что представленная ССД, с одной стороны, может быть одним из узлов распределенной системы сбора данных, с другой стороны, использоваться автономно, а также позволяет контролировать в ручном режиме электрические параметры контуров связи.

В статье [4] с позиций метрологии рассматриваются основные разновидности информационных операций, и показано, как осуществляется их реализация в ССД. Большое внимание уделяется информационным операциям «контроль» и «контрольное испытание».

Главная цель данной работы – уточнение архитектуры ССД и ее основных характеристик. Если в предыдущих статьях рассматривались только аппаратные средства системы, то в данной работе приводятся основные функции и особенности ее программного обеспечения.

### Постановка задачи

Реализация функций системы сбора данных сводится к выполнению ряда технологических операций в рамках соответствующих технологических процедур. Формализуем этот процесс.

В общем случае модель технологического объекта можно представить как кортеж, указанный ниже [12]:

$$D = \langle T, X, Y, Z, F, L \rangle,$$

где  $T$  – множество моментов времени, в которые наблюдается объект;  $X, Y$  – множества входных и выходных сигналов соответственно;

$Z$  – множество состояний объекта;  $F$  – оператор переходов, отражающий механизм изменения состояния объекта как реакцию объекта на внутренние и внешние возмущения;  $L$  – оператор выходов, описывающий механизм формирования выходного сигнала под воздействием внутренних и внешних возмущений.

Операторы  $F$  и  $L$  задают собой отображения (1) и (2) [12]:

$$F: T \times X \times X \times Z \rightarrow Z, \quad (1)$$

$$L: T \times X \times X \times Z \rightarrow Y. \quad (2)$$

Следующим этапом моделирования функций системы сбора данных являются постановка и решение задачи классификации, т.е. соотнесения наблюдаемого состояния технического объекта к одному из заданных классов его состояний [12]. В общем виде суть решения этой задачи заключается в отыскании отображения  $\eta$  [12], представляемого как:

$$\eta: Y \rightarrow E, \quad (3)$$

где  $E$  есть множество классов состояний объекта. Процесс функционирования ССД можно в общем виде представить как объединение отображений (2) и (3) [12]:

$$T \times X \times X \times Z \rightarrow Y \rightarrow E. \quad (4)$$

Цель данной статьи состоит в представлении технических средств, позволяющих формировать множества  $X$  и  $Y$ . Множества  $Z, E$ , отображения  $F, L, \eta$ , в рассматриваемой задаче, как правило, задаются техническим заданием на выполнение технологической процедуры.

### Структура системы сбора данных

Система состоит из различных модулей, позволяющих производить анализ состояния технических объектов и их работоспособности. Основные модули:

- модуль питания,
- модуль генерации произвольных сигналов,
- модуль индикации,
- модуль непосредственного сбора данных.

Структурная схема системы представлена на рис. 1. В данной системе модуль питания предназначен для обеспечения питания всех основных подсистем ССД. Поскольку рассматриваемая система предоставляет возможность внесения изменений в структуру (модификация

или замена её подсистем на другие типы), то модуль питания дает возможность использования основных напряжений, 3.3 V, 5.0 V, 12.0 V и двух каналов регулируемого напряжения в диапазоне 1.2 – 15 V.

Также система имеет в своем составе блок интерфейсов для подключения к исследуемым объектам, который связан с двумя основными компонентами системы – генератором произвольных сигналов и блоком системы сбора данных.

Блок непосредственного сбора данных благодаря ресурсам интерфейсного модуля имеет доступ к исследуемому объекту. Данный блок получает информацию в виде аналоговых сигналов, после чего преобразует ее и передает пакеты оцифрованных данных на персональный компьютер (ПК) или сервер посредством Ethernet для последующей обработки и отображения. Система сбора данных обладает двумя аналого-цифровыми преобразователями (АЦП), которые в свою очередь через мультиплексор подсоединены к интерфейсу аппаратного подключения.

Генератор произвольных сигналов предназначен, в первую очередь, для контроля подключенных к системе объектов. В данном модуле присутствуют два канала, которые гене-

рируют сигналы с помощью цифро-аналогового преобразователя (ЦАП). Сигнал для формирования может поступать как из блока системы сбора данных, так и из управляющего узла (ПК или сервера) через модуль цифрового взаимодействия.

Модуль индикации предназначен для отображения технических параметров и состояния системы и подключенного объекта. Благодаря модулю индикации реализуется возможность контроля подключения щупов к исследуемому устройству и состояния связи с управляющим узлом.

Использование датчиков для снятия измерений с объектов подчинено особенностям выполняемой задачи. Могут быть использованы различные серии аналоговых и цифровых датчиков. Система имеет 8 дифференциальных/16 несимметричных входов и разрешение 16-битного АЦП. Частота дискретизации – до 1 msp/s, распределяемая между каналами. Аналоговые выходы имеют разрешение 16 бит и скоростью до 1 msp.

На основе ССД может быть разработана система управления объектом. В этом случае ССД будет использоваться как одноканальная система для увеличения скорости снятия измерений.

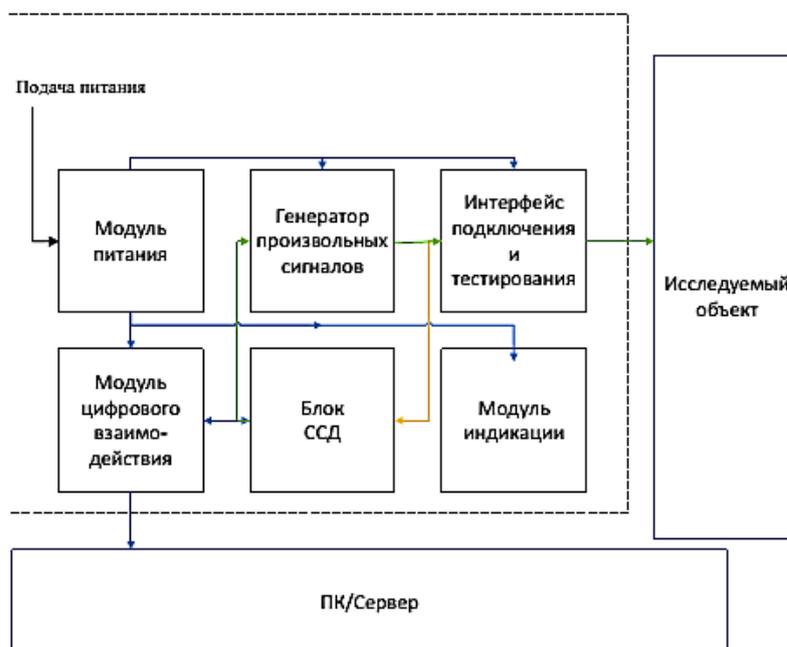


Рис. 1. Структурная схема системы

На ПК находятся средства извлечения, преобразования и хранения данных. Также выполняется обработка запросов клиентов на доступ и получение оперативной информации.

Средства администрирования и управления ССД позволяют управлять распределением прав пользователей и осуществляют это с использованием механизма ролей. Система

обеспечивает метки времени для всех поступающих в систему данных измерения. Подсистема ручного управления информацией позволяет осуществлять ручной ввод значений необходимых параметров и корректировать отчетную документацию с учетом времени, данных специалиста, работавшего с отчетом, а также объема измененной информации.

### Заключение

Показана актуальность автоматизации сбора данных и разработки систем данного направления.

Подчеркнуто, что в настоящее время и в ближайшем будущем сбор и анализ данных останутся актуальной темой, как для рядовых пользователей, так и для большого числа специалистов [6–11], а стремительное развитие технологий позволит совершенствовать ССД, расширять сферы их применения, увеличивать скорость и объем перерабатываемой информации.

Отмечено, что представленная в статье система может использоваться как автономно, так и быть узлом распределенной ССД, и что имеется возможность контролировать в ручном режиме электрические параметры контуров связи.

Проведена формализация основных процессов, которые реализуются в ССД. Подчеркнуто, что на основе ССД может быть разработана система управления объектом. В этом случае ССД будет использоваться как одноканальная система для увеличения скорости снятия измерений. В статье также представлены основные сведения о программном обеспечении системы.

### Литература

1. Бондаревский А.С. Информационные операции. Свойства. Применяемость свойств // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2017. № 10. С. 14-24.

2. Петрухнова Г.В., Усачев М.Г., Попова Е.В. Тестовый контроль конечных автоматов // Вестник Воронежского государственного университета. 2023. Т. 19. № 6. С. 47-51.

3. Петрухнова Г.В., Трубецкой В.А., Точилин А.С. Проектирование систем управления робототехническими системами посредством САД-системы // Вестник Воронежского государственного университета. 2023. Т. 19. № 4. С. 25-31.

4. Петрухнова Г.В., Болдырев И.Р., Усачев М.Г. Структура многофункциональной системы сбора данных для контроля состояния технических средств // Вестник Воронежского государственного университета. 2022. Т. 18. № 6. С. 39-45.

5. Программа фундаментальных научных исследований в Российской Федерации на долгосрочный период (2021-2030 годы). URL: <https://docs.cntd.ru/document/573319222>

6. Data Acquisition system for the focal-plane detector of the mass separator masha / A.S. Novoselov, A.M. Rodin, S. Motycaq, A.V. Podshibyakin, L. Krupa, A.V. Belozarov, V.Yu. Vedeneyev, A.V. Gulyaev, A.V. Gulyaeva, J. Kliman, V.S. Salamatin, S.V. Stepantsov, E.V. Chernysheva, S.A. Yukhimchuk, A.B. Komarov, D. Kamas // Письма в журнал Физика элементарных частиц и атомного ядра. 2016. Т. 13. № 5 (203). С. 934-938.

7. Патент на изобретение RU 2484586 С1. Система связи для сбора данных в системе связи: заявка № 2012104747/07 от 10.02.2012; опубл. 10.06.2017 / М.С. Чухаленко, В.Я. Архипкин.

8. Афанасьева И.В. Система управления и сбора данных для высокоскоростных широкоформатных ПЗС-систем // Астрофизический бюллетень. 2016. Т. 70. № 2. С. 244-250.

9. Freyman V., Posyagin A. The soft decoding of control systems elements test diagnostics results // Proceedings of 2017 XX IEEE international conference on soft computing and measurements (SCM). 2017. PP. 329–332. DOI: 10.1109/SCM.2017.7970576

10. Яблоков А.Е., Федоренко Б.Н., Латышев М.А. Технический мониторинг, диагностика и защита оборудования // Комбикорма. 2018. № 6. С. 32–34.

11. Современное состояние процессов автоматизации измерения и контроля / Р.Т. Шабданбаева, Ж.Ж. Жанысбекова, Ж.Н. Исабеков, А.В. Шумаков // Вестник Казахской академии транспорта и коммуникаций имени М. Тынышпаева. 2017. Вып. 103. № 4. С. 257-264.

12. Байкин В.А., Стецюк А.Н. Формализация технологических процедур контроля жизненного цикла сложной инженерно-технической системы // Программные системы и вычислительные методы. 2016. №1(10). С. 52-58. DOI: 10.7256/2305-6061.2015.1.14407.

13. Петрухнова Г.В., Болдырев И.Р. Многофункциональная система сбора данных для контроля состояния технических средств // Вестник Воронежского государственного университета. 2021. Т. 17. № 6. С.56-61.

Поступила 08.11.2023; принята к публикации 29.02.2024

### Информация об авторах

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

**Болдырев Илья Романович** – студент бакалавриата, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: [iliya.boldyreff@yandex.ru](mailto:iliya.boldyreff@yandex.ru)

**Горина Марина Олеговна** – студент бакалавриата, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: [gorinamarincka@yandex.ru](mailto:gorinamarincka@yandex.ru)

**Груздев Дмитрий Александрович** – студент бакалавриата, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: [pwgda30a@gmail.com](mailto:pwgda30a@gmail.com)

## DATA COLLECTION SYSTEM

G.V. Petrukhnova, I.R. Boldyrev, M.O. Gorina, D.A. Gruzdev

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

**Abstract:** the relevance of automation of data collection (DCS) and the development of systems in this area is shown. The architecture of the DCS is presented. The formalization of the main processes supported by this system has been carried out. The DCS consists of functionally complete modules that support the execution of functions in the context of the main purpose of the system. A block diagram of the DCS is given. The system can be used autonomously or be a node of a distributed DCS. It is possible to manually control the electrical parameters of the communication circuits. The structure of the DCS is represented by a power supply module, a module for generating arbitrary signals, an indication module, and a module for direct data collection. The purpose and main functions of these structural units are presented in the article. The use of sensors to take measurements from objects is subject to the specifics of the task being performed. Various series of analog and digital sensors can be used. The system has 8 differential/16 unbalanced inputs and a 16-bit ADC resolution. An object management system can be developed on the basis of the DCS, and in this case the DCS will be used as a single-channel system to increase the speed of taking measurements. On a personal computer (PC) there are means of extracting, converting and storing data, as well as processing customer requests for access and obtaining operational information. The means of administration and management of the DCS allow for the distribution of user rights and do this using the role mechanism. DCS algorithms ensure the preservation of timestamps for all incoming measurement data. The presented DCS makes it possible to automate various processes of monitoring the condition of various equipment and production processes

**Key words:** data acquisition, DCS, interface, device, analog signal, digital signal, ADC, DAC, server, Ethernet

## References

1. Bondarevsky A.S. "Information operations. Properties. Applicability of properties", *International Journal of Applied and Fundamental Research (Mezhdunarodnyy zhurnal prikladnykh i fundamentalnykh issledovaniy)*, 2017, no. 10, pp. 14-24.
2. Petrukhnova G.V., Usachev M.G., Popova E.V. "Test control of finite state machines", *The Bulletin of Voronezh State University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta)*, 2023, vol. 19, no. 6, pp. 47-51.
3. Petrukhnova G.V., Trubetskoy V.A., Tochilin A.S. "Design of control systems for robotic systems using a CAD system" *The Bulletin of Voronezh State University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta)*, 2023, vol. 19, no. 4, pp. 25-31.
4. Petrukhnova G.V., Boldyrev I.R., Usachev M.G. "Structure of a multifunctional data collection system for monitoring the condition of technical equipment", *The Bulletin of Voronezh State University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta)*, 2022, vol. 18, no. 6, pp.39-45.
5. "The Program of fundamental scientific research in the Russian Federation for the long term (2021-2030), available at: <https://docs.cntd.ru/document/573319222>
6. Novoselov A.S., Rodin A.M., Motycak S., Podshibyakin A.V., Krupa L., Belozherov A.V., Vedeneyev V.Yu., Gulyaev A.V., Gulyaeva A.V., Kliman J., Salamatin V.S., Stepantsov S.V., Chernysheva E.V., Yukhimchuk S.A., Komarov A.B., Kamas D. "Data Acquisition system for the focal-plane detector of the mass separator Masha", *Letters to the journal Physics of Elementary Particles and the Atomic Nucleus*, 2016, vol. 13, no. 5 (203), pp. 934-938.
7. Chukhalenko M.S., Arkhipkin V.Ya. "Communication system for collecting data in the communication system" ("Sistema svyazi dlya sbora dannykh v sisteme svyazi"), Patent of RF RU 2484586 C1. application no. 2012104747/07 dated 02/10/2012, publ. 06.10.2017.
8. Afanasyeva I.V. "Control and data acquisition system for high-speed wide-format CCD systems", *The Astrophysical Bulletin (Astrofizicheskii byulleten)*, 2016, vol. 70, no. 2, pp. 244-250.
9. Freyman V., Posyagin A. "The soft decoding of control systems elements test diagnostics results", *Proc. of 2017 XX IEEE international conference on soft computing and measurements (SCM)*, 2017, pp. 329-332, DOI: 10.1109/SCM.2017.7970576
10. Yablokov A.E., Fedorenko B.N., Latyshev M.A. "Technical monitoring, diagnostics and equipment protection", *Compound feed (Kombikorma)*, 2018, no. 6, pp. 32-34.
11. Shabdambaeva R.T., Zhanysbekova Zh.Zh., Isabekov Zh.N., Shumakov A.V. "Current state of the processes of automation of measurement and control", *The Bulletin of the Kazakh Academy of Transport and Communications (Vestnik Kazakhskoy akademii transporta i kommunikatsiy)*, 2017, vol. 103, no. 4, pp. 257-264.
12. Baykin V.A., Stetsyuk A.N. "Formalization of technological procedures for monitoring the life cycle of a complex engineering and technical system", *Software systems and computing methods (Programmnyye sistemy i vychislitel'nyye metody)*, 2016, no. 1 (10), pp. 52-58, DOI: 10.7256/2305-6061.2015.1.14407.
13. Petrukhnova G.V., Boldyrev I.R. "Multifunctional data collection system for monitoring the condition of technical equipment", *The Bulletin of the Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2021, vol. 17, no. 6, pp. 56-61.

Submitted 08.11.2023; revised 29.02.2024

## Information on the authors

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

**Ilya R. Boldyrev** – Undergraduate Student, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Ocyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: iliya.boldyreff@yandex.ru

**Marina O. Gorina** – Undergraduate Student, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Ocyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: gorinamarincka@yandex.ru

**Dmitry A. Gruzdev** – Undergraduate Student, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Ocyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: pwgda30a@gmail.com

## ПРОГРАММНО-АППАРАТНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ СОЗДАНИЯ ТРЕХМЕРНОЙ МОДЕЛИ ПОМЕЩЕНИЯ И ОБЪЕКТОВ

Д.В. Журавлёв, Н.А. Летов

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

**Аннотация:** в контексте современных требований для цифровой визуализации и моделирования появляется необходимость в доступных и эффективных средствах оцифровки пространства и объектов. Данная разработка программно-аппаратного комплекса призвана предложить бюджетное решение для создания трехмерных моделей помещений и объектов, что может стать альтернативой дорогостоящим технологиям. В условиях, где трехмерная графика играет ключевую роль в различных отраслях (включая кино, игровую индустрию, технические разработки и военную технику), создание доступных и в то же время мощных средств становится все более актуальным. Проведен анализ современных технологий и компонентов, что выявило потенциал разработанного устройства в снижении затрат на трехмерное моделирование. Конструктивное исполнение устройства подчеркивает его удобство использования и мобильность. Универсальность и потенциал конкурентоспособности на рынке технологий трехмерного моделирования делают его перспективным инструментом в индустрии визуализации и проектирования. Таким образом, исследование является важным шагом в разработке более доступных и эффективных решений для оцифровки трехмерных объектов, что способствует развитию и улучшению визуальных технологий в нашем современном информационном обществе

**Ключевые слова:** программно-аппаратный комплекс, трехмерное моделирование, трехмерный сканер, лидар, лазерное сканирование

### Введение

Рынок труда заполнен спросом на профессионалов, работающих в направлении трехмерной графики. Актуальны такие специалисты, как левел-дизайнеры и 3D-художники, которые разрабатывают окружение в компьютерных играх и рисуют графику для фильмов, а также архитекторы, которые вместо чертежей на бумагах моделируют здания в специализированных программах [1]. Также востребованы дизайнеры, которые выполняют свои работы в цифровом пространстве, и конструкторы, создающие необходимые детали различной сложности для печати на 3D-принтерах и т.д.

Кроме того, для культурных мероприятий и комплексов растет популярность использования трехмерной графики: например, различные отели для удобства своих клиентов создают виртуальные туры курортов; музеи, в свою очередь, проводят выставки, которые можно посетить дистанционно благодаря этой технологии.

Вместе с тем термин «метавселенные», подразумевающий виртуальные пространства, в которых люди получают возможность взаимодействия с аватарами других людей и цифровым окружением, звучит в анонсах крупнейших IT-компаний.

Ввиду этого появляется вопрос, как упростить оцифровку пространства, помещений,

различных предметов и объектов, попутно избегая больших финансовых затрат на привлечение профессионалов, и как сэкономить время, чтобы исключить моделирование в специализированных программах с нуля.

### Описание объекта исследования

В связи с вышеизложенным, объектом исследования данной работы выбран программно-аппаратный комплекс (ПАК) для создания трехмерной модели помещения и объектов. Его задачей является создание облака точек, наиболее соответствующего реальным размерам и формам заданного окружающего пространства и объектов. Формат облака точек должен быть совместим с преимущественно распространенными профессиональными системами автоматизированного проектирования (САПР) и художественными программами.

На данный момент для решения заданной задачи применяются две технологии сканирования. Первая из них организована по принципу фотограмметрии с применением оптико-электронных, цифровых и фотографических съемочных систем и структурированным источником света. Данный принцип основан на регистрации светового потока, отраженного от объекта.

Вторая — связана с использованием технологии лидар и основана на вычислении расстояния, которое рассчитывается замером времени

от выпущенного из источника оптического излучения света до его попадания на фотоприемник после отражения от заданного объекта.

При обзоре рынка 3D-сканеров можно обратить внимание на то, что большую долю занимают сканеры, работающие по принципу фотограмметрии, в то время как устройства с лидаром используются в основном для зондирования атмосферы, геодезии, картографии и т.п.

Большинство фотограмметрических сканеров можно разделить на два типа — ручные и с поворотной платформой, на которой располагается сканируемый объект, однако они оба не удовлетворяют поставленной задаче, поскольку не приспособлены для сканирования окружения, а рассчитаны оцифровывать только отдельно взятые объекты [2]. Также для корректной работы сканеров с фотограмметрическим принципом необходимы определенные условия освещения и опорные визуальные метки, что может вызвать затруднения. Тем более фотограмметрические сканеры сильно уступают лазерным аналогам в точности замеров. Поэтому для исследования выбраны сканеры, работа которых основывается на лидаре.

Прибор представляет собой активный лазерный дальномер оптического диапазона. Принцип его действия аналогичен радару и сонару, но работает с использованием световых волн. Неотъемлемыми компонентами прибора являются лазер и фотоприемник, необходимые для вычисления расстояния [3].

Вычисление расстояния происходит за счет измерения времени, за которое выпущенный свет возвращается на фотозлемент после отражения от целевого объекта, при этом скорость распространения сигнала в среде считается известной.

Суть работы лазерного сканера заключается во вращении встроенного дальномера по двум перпендикулярным осям вокруг себя [4, 5].

На рис. 1 представлен принцип работы трехмерного лазерного сканера.

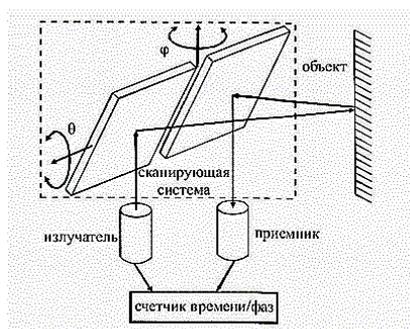


Рис. 1. Принцип работы трехмерного лазерного сканера [5]

Помимо измерения расстояния до каждой точки, рассчитывается значение угла отклонения лазера по обеим осям относительно начала координат — центра сканера. После чего на основе данных о каждой точке выборки, которые содержат расстояние и угол, формируется облако точек. Одновременно с вычислением расстояния лазером, сканеры, оснащенные фотокамерами, собирают данные цвета фиксируемых точек. Благодаря такой функции есть возможность раскрасить облако точек в соответствии с настоящим цветом окружения.

### Техническое решение

Техническое решение заключается в разработке программно-аппаратного комплекса для создания трехмерной модели помещения и объектов. ПАК должен состоять из аппаратного блока, предназначенного для сбора данных, и клиента для персонального компьютера (ПК) или мобильного клиента, через которые происходит взаимодействие с пользователем.

ПАК должен обеспечивать сбор, обработку и передачу данных. Для решения этой задачи в составе ПАК необходимо выделить следующие функциональные подсистемы:

- подсистема сбора и анализа данных;
- подсистема трансляции данных.

Состав системы:

- аппаратный блок сканирования;
- клиентское программное обеспечение.

Для исполнения аппаратного блока сканирования были выбраны следующие элементы:

- лазерный сканер RPLIDAR A2M8 [6];
- отладочная плата NUCLEO-H7A3ZI-Q на основе микроконтроллера STM32H7A3 [7, 8];
- шаговый электродвигатель NEMA 17 HS4401 [9];
- драйвер шагового двигателя DRV8825 [10];
- WiFi модуль ESP-01 на основе чипа ESP8266 [11];
- Grove - 6-Axis Accelerometer & Gyroscope на базе чипа LSM6DS3 [12].

Для питания компонентов аппарата выбрана аккумуляторная батарея General Security с выходным напряжением 12 вольт и емкостью 2.6 ампера часов. Для изменения напряжения на 9 и 3.3 вольта применены два понижающих DC-DC преобразователя LM2596S.

Структурная схема ПАК представлена на рис. 2.

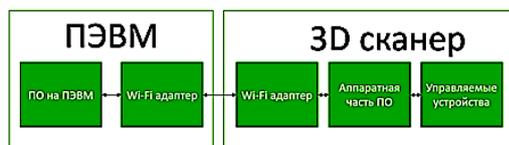


Рис. 2. Структурная схема ПАК

Функциональная схема ПАК представлена на рис. 3.

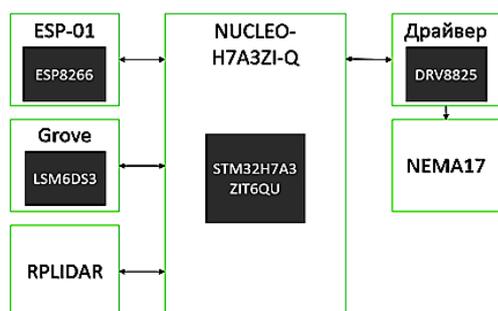


Рис. 3. Функциональная схема ПАК

Функциональная схема состоит из трех микросхем, LIDAR сенсора и шагового двигателя. Связь между микросхемами и LIDAR сенсором организована с помощью универсального асинхронного приёмопередатчика (Universal Asynchronous Receiver-Transmitter, UART). Микросхема ESP-01 является Wi-Fi модулем. Выполняет функции сообщения с ПК пользователя путем приема управляющих команд от клиента и передачи данных ему от аппаратной части, передает управляющие команды микроконтроллеру. Микроконтроллер NUCLEO-H7A3ZI-Q выполняет задачи управления элементами аппаратного комплекса, приема управляющих сигналов от ESP-01, приема данных от LIDAR сенсора, обработки данных. Микросхема DRV8825 является драйвером шагового двигателя. Принимает управляющие сигналы от NUCLEO-H7A3ZI-Q. Выполняет функции управления шаговым двигателем, подачи питания на шаговый двигатель. Шаговый двигатель NEMO17 управляется драйвером DRV8825. Служит для вращения поворотной платформы вокруг своей оси. LIDAR сенсор принимает управляющие сигналы от микроконтроллера. Выполняет функцию измерения дальности для объектов, определяет угол своего положения, передает облако точек в микроконтроллер.

### Конструктивное исполнение устройства

Конструктивно основой устройства является поворотная платформа, которая состоит из двух круглых пластин, между которыми распо-

ложены ролики. Для вращения используется шаговый двигатель, основание которого прикреплено к верхней платформе, а вал — к нижней. Шлейф двигателя выведен через отверстие в верхней панели платформы, чтобы не создавать помех роликам.

LIDAR сенсор прикреплен на один из крепежных уголков, установленных на верхней панели, таким образом, чтобы лазер и фотодетектор находились на оси вращения поворотной платформы.

Вся электроника (плата управления, Wi-Fi модуль, драйвер двигателя и элементы питания) располагается на верхней панели поворотной платформы (рис. 4).

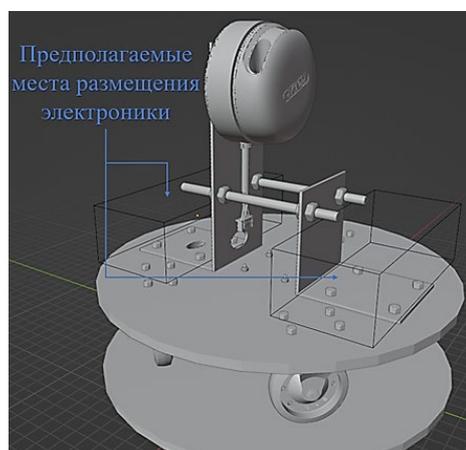


Рис. 4. Окончательная 3D-модель 3D-сканера

Акселерометр располагается ровно по центру поворотной платформы, под сканером, таким образом, чтобы датчик находился на оси вращения вала шагового двигателя.

### Алгоритм работы

Алгоритм работы устройства отталкивается от минимизации действий со стороны конечного пользователя. При включении переключателя на корпусе устройства питание подается на все элементы аппарата. Wi-Fi модуль переходит в режим точки доступа и ожидает подключения ноутбука (ПЭВМ) пользователя для дальнейшей передачи данных. После установки соединения между устройствами возможно произвести сканирование. Для этого необходимо нажать соответствующую кнопку на корпусе прибора. После задержки, примененной в целях безопасности, достаточной для того, чтобы пользователь отстранился от устройства, на драйвер мотора поступает сигнал, и конструкция начинает вращение, в то же время сигнал поступает на RPLIDAR, приводя его в движение. После не-

большой задержки, необходимой для стабилизации скорости вращения устройства, начинается считывание и запись данных с датчика и гироскопа. Сканирование заканчивается в момент, когда по данным гироскопа устройство сделает полный оборот. Следом идет передача данных на устройство пользователя для дальнейшего преобразования в облако точек.

В итоге взаимодействие пользователя с устройством сводится к его включению и нажатию одной кнопки.

Программную часть управления аппаратом для 3D-сканирования можно условно разделить на две части. Первая часть — это написание прошивки для микроконтроллера и загрузка прошивки в микроконтроллер. Вторая часть — это создание прикладного программного обеспечения (ПО) обработки полученных данных на ПЭВМ. Рассмотрим каждую из частей по отдельности.

Для того, чтобы написать прошивку микроконтроллера STM32 H7A3ZIT6-Q и прошить плату, нам потребуется дополнительное программное обеспечение.

Создание встраиваемого программного обеспечения является очень трудоёмким и сложным процессом для разработчиков устройств на базе современных микроконтроллеров. Для упрощения процедуры создания эффективно работающего кода были созданы специальные программные инструменты.

Одним из таких инструментов является STM32CubeMX. Это графический инструмент, который позволяет очень легко настраивать микроконтроллеры STM32 и генерировать соответствующий код инициализации C посредством пошагового процесса.

Шаг первый заключается в выборе микроконтроллера или макетной платы STMicroelectronics STM32, соответствующего необходимому набору периферии. Затем пользователь должен настроить микросхему с помощью редактора распиновки, помощника по настройке таймеров, калькулятора энергопотребления и служебной программы, выполняющей настройку периферийных устройств MCU (GPIO, USART) и стеки промежуточного программного обеспечения (USB, TCP / IP).

Настройка контактов происходит с помощью щелчка левой кнопкой мыши и выборе необходимой функции. Щелкнув правой кнопкой мыши на контакте, можно присвоить ему имя (рис. 5).

Когда все входы, выходы и периферия настроены, код готов к генерации. Для управления созданным проектом на вкладке

Toolchain/IDE выберем один из нескольких поддерживаемых инструментов разработки, а именно STM32CubeIDE и сгенерируем код (рис. 6).



Рис. 5. Окно назначения контактов

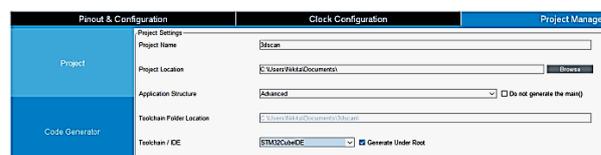


Рис. 6. Окно Project Manager

После успешной генерации кода в появившемся окне необходимо нажать «Open Project», после откроется предустановленная программа STM32CubeIDE со сгенерированным кодом для дальнейшей разработки прошивки микроконтроллера.

STM32CubeIDE — это продвинутая платформа для разработки на языках C и C++. Она является частью экосистемы STM32Cube и универсальна для операционных систем Windows, Linux и MacOS.

При написании кода программы будем использовать библиотеку HAL. Эта библиотека разработана компанией ST специально для создания приложений на STM32. Использование этой библиотеки позволяет писать код без использования регистров. HAL позволяет работать только с теми объектами, которые необходимы и понятны.

Управление двигателем происходит через драйвер, который подключен к контактам PE4 и PE3 платы STM. Эти контакты заранее сконфигурированы, как GPIO, надо только задать условия их активации и параметры. Так как для задачи управление скоростью не востребовано, для двигателя задана оптимальная постоянная скорость таким образом, чтобы исключить дрейф нуля акселерометра, а снимаемое облако точек имело достаточную плотность данных. Вращение двигатель начинает при нажатии пользователем кнопки, которая подключена на контакт PA0, а остановка происходит при достижении значений гироскопа 360 или -360 градусов.

Управление RPLIDAR происходит через контакт PA7, сконфигурированный, как GPIO, а обмен информацией — через UART интерфейс на контактах PC6, PC7.

Работа сканера сконфигурирована таким образом, чтобы он вращался с такой постоянной скоростью, которая задает итоговому облаку точек оптимальную плотность данных. Вращение начинается при нажатии пользователем кнопки, подключенной на контакт PA0 платы STM, а остановка происходит при достижении оборота гироскопа 360 или -360 градусов вокруг своей оси.

Плата Grove - 6-Axis Accelerometer & Gyroscope подключена контактам PA8 и PC9 платы STM. С устройства собираются данные об угле поворота вокруг своей оси для передачи их на ЭВМ с целью последующего формирования облака точек, так же данные необходимы для управления устройством — остановки, при достижении оборота на 360 или -360 градусов.

Как только необходимый код готов, можно прошивать отладочную плату с микроконтроллером и проверять его работоспособность и правильность.

Так как на плате STM32 H7A3ZIT6-Q есть встроенный программатор SP-Link достаточно подключить плату к ПЭВМ с помощью USB-кабеля (рис. 7) [8].



Рис. 7. STM32 H7A3ZIT6-Q, подключенная к ПК посредством USB

После того, как плата успешно прошита, можно приступать к проверке работоспособности устройства и дальнейшей отладке. На рис. 8 представлен процесс проверки данных, получаемых с гироскопа при вращении устройства вокруг своей оси.



Рис. 8. Процесс проверки работоспособности кода

Данные, которые можно получить с устройства, представлены на рис. 9 и 10.

receive	
CLEAR	Reset Counter
255	
257	
260	
262	
265	
267	
269	
272	
275	
277	
279	
282	
284	
287	
289	
291	
294	
296	
299	
301	
304	
306	
308	
311	
313	

Рис. 9. Данные, полученные от гироскопа в процессе работы устройства

theta: 332.56	Dist: 01908.00	Q: 47
theta: 333.11	Dist: 01898.00	Q: 47
theta: 333.67	Dist: 01894.00	Q: 47
theta: 334.29	Dist: 01872.00	Q: 47
theta: 334.84	Dist: 01856.00	Q: 47
theta: 335.42	Dist: 00000.00	Q: 0
theta: 335.98	Dist: 00000.00	Q: 0
theta: 336.53	Dist: 01852.00	Q: 47
theta: 337.10	Dist: 00000.00	Q: 0
theta: 337.66	Dist: 00000.00	Q: 0
theta: 338.26	Dist: 01710.00	Q: 47
theta: 338.76	Dist: 01776.00	Q: 47
theta: 339.31	Dist: 01804.00	Q: 47
theta: 339.87	Dist: 01828.00	Q: 47
theta: 340.43	Dist: 01822.00	Q: 47
theta: 341.00	Dist: 01818.00	Q: 47
theta: 341.56	Dist: 01812.00	Q: 47
theta: 342.11	Dist: 01808.00	Q: 47
theta: 342.67	Dist: 01800.00	Q: 47
theta: 343.23	Dist: 01794.00	Q: 47
theta: 343.80	Dist: 01790.00	Q: 47
theta: 344.34	Dist: 01786.00	Q: 47
theta: 344.90	Dist: 01780.00	Q: 47
theta: 345.47	Dist: 01776.00	Q: 47
theta: 346.03	Dist: 01772.00	Q: 47
theta: 346.57	Dist: 01770.00	Q: 47
theta: 347.14	Dist: 01768.00	Q: 47
theta: 347.70	Dist: 01764.00	Q: 47
theta: 348.26	Dist: 01764.00	Q: 47
theta: 348.83	Dist: 01762.00	Q: 47
theta: 349.37	Dist: 01758.00	Q: 47

Рис. 10. Данные, полученные с лидара в процессе работы устройства (угол, расстояние, качество)

Таким образом, мы имеем значения двух углов по разным осям и расстояние от сканера до препятствия.

В неподвижном положении был замечен дрейф нуля по горизонтальной оси, но при практическом использовании устройства он не будет иметь значения, так как в неподвижном положении данные не снимаются.

Прикладное программное обеспечение служит для того, чтобы преобразовывать полученные от устройства данные в файл, формат которого поддерживается основным множеством программ САПР, такими, как Autodesk AutoCAD, Blender, Autodesk 3ds Max и т.п.

Форматы файлов для 3D-моделей представляют собой файлы, которые служат для хранения, записи и чтения 3D-моделей с помощью специализированного программного обес-

печения для 3D-обработки. Информация в таких файлах хранится в текстовом или двоичном формате. Она может представлять собой описание вершин, граней, плоскостей, форм, их координаты, цвет, текстуру, а также информацию, связанную со сценой вокруг объекта, например, направление источников света.

Помимо собственных форматов файлов, разработанных производителями САПР, существуют стандарты форматов, которые возможно конвертировать для использования на разных программных платформах. Такие типы файлов относятся к так называемым «открытым» или «нейтральным» форматам файлов. Таким образом, они решают проблему ограниченного взаимодействия между разными платформами.

Из множества файлов нейтрального типа самыми популярными являются форматы .stl и .obj.

.stl файл представляет поверхность 3D-модели в виде сетки треугольных полигонов. Каждая вершина описывается набором координат из трех точек по трем осям. Каждая группа из трех точек образует треугольный полигон, из которых строится полноценная трехмерная модель.

Синтаксис текстового формата файла имеет следующий вид:

- 1 строка — solid «имя файла»;
- 2 строка — компонент, отвечающий за ориентацию нормалей;
- 3 строка — начало описания полигона — «outer loop»;
- Последующие строки — произвольное число треугольников, описываемых следующим образом:  $vertex v_{nx} v_{ny} v_{nz}$ , где  $v$  — число с плавающей точкой;
- описание полигона заканчивается двумя строчками:
  - а) endloop;
  - б) endfacet.
- Файл заканчивается строкой «endsoil «имя файла»».

Текстовый файл в формате .stl можно открыть в программах, поддерживающих данный формат.

Можно сделать вывод, что данный тип файла не подходит для выполнения поставленной задачи, так как не способен записывать отдельно взятые точки, а только целые фасеты, а нам необходимо создание облака точек.

В отличие от .stl файл формата .obj имеет точную сетку для описания объектов, что дает возможность сформировать описание объекта не только треугольниками, но и с использованием различных многоугольников, так как при наличии точной сетки поверхность модели определяется сплайнами. Для этого типа форм

полигоны обозначаются вершинами, из которых уже интерпретируются гладкие сплайны.

Синтаксис текстового формата файла имеет следующий вид:

- 1 строка — # «имя файла»;
- Последующие строки — описание 3D-модели — строки, начинающиеся с литеры  $v$  это координаты для вершин,  $f$  — для плоскостей.

Строки, начинающиеся с #, являются комментариями, они не обрабатываются и никак не влияют на результат.

Например, чтобы построить куб, потребуется обозначить 8 вершин и 8 граней. Грани строятся с помощью перечисления вершин, соединение которых дает грань. Номер вершины соответствует её порядковому номеру в листинге файла. Таким образом, текстовый файл для куба будет иметь следующий вид, который показан на рис. 11.

```
#cube
v 0 0 0
v 1 0 0
v 1 1 0
v 0 1 0
v 0 0 1
v 1 0 1
v 1 1 1
v 0 1 1
f 1 2 3 4
f 5 6 7 8
f 5 6 2 1
f 8 7 3 4
f 2 6 7 3
f 1 5 8 4
```

Рис. 11. Листинг .obj файла для куба

Сохранив текстовый файл в формате .obj, его можно открыть в программах, поддерживающих данный формат.

Из вышеизложенного можно сделать вывод, что данный формат файла подходит для поставленной задачи, с его помощью возможно создать облако точек и в последующем открыть его в САПР программах.

В качестве языка программирования для разработки прикладной программы выбран Python, так как он имеет множество наработок и обучающей информации в открытом доступе.

Задачей программы является получение данных от устройства и преобразование их в файл в определенном синтаксической формате и последующим его сохранение в формате .obj на ПЭВМ пользователя.

Преобразование данных заключается в нахождении трех координат каждой точки облака в пространстве из формата данных «угол X, угол Y, расстояние» путем математических вычислений, и записи этой строки в соответствии с синтаксисом формата .obj файла, например, для строки данных «0,2901 theta: 33.73 Dist: 00580.00», полученных с устройства, будет соответствовать строка «v 482,36 322,06 2,94».

## Обзор рабочего макета

На рис. 12 и 13 представлен рабочий макет устройства.

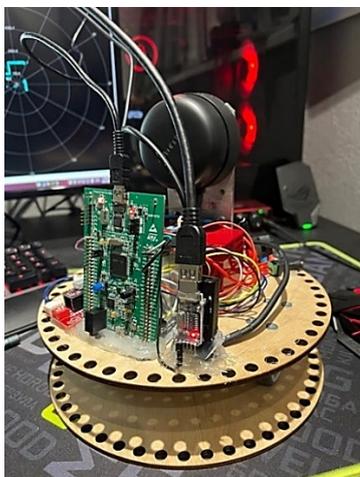


Рис. 12. Макет устройства

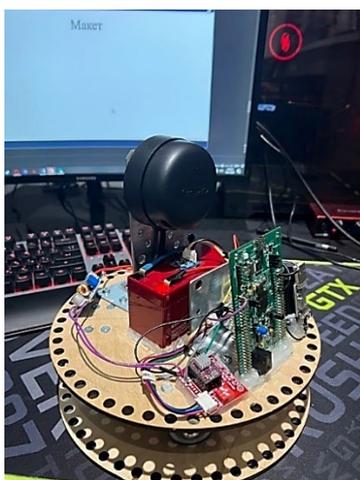


Рис. 13. Макет устройства

Выведен переключатель подачи питания и разъем зарядки аккумулятора, электронные компоненты укомплектованы таким образом, чтобы не препятствовать лазеру сканера.

В результате тестового сканирования был получен срез облака точек в файле формате .obj и открыт в программе Blender для ознакомления (рис. 14). Представленное облако содержит около восьми тысяч точек.

Максимальная дальность сканирования устройства 12 м. Минимальная — 0.2 м. Этого достаточно для произведения сканирования квартир, офисов, небольших торговых точек всего лишь за одно включение устройства. Емкости аккумулятора хватает на два часа непрерывной работы устройства от одного заряда. Погрешность сканирования составляет 1 % от расстояния до целевого объекта.

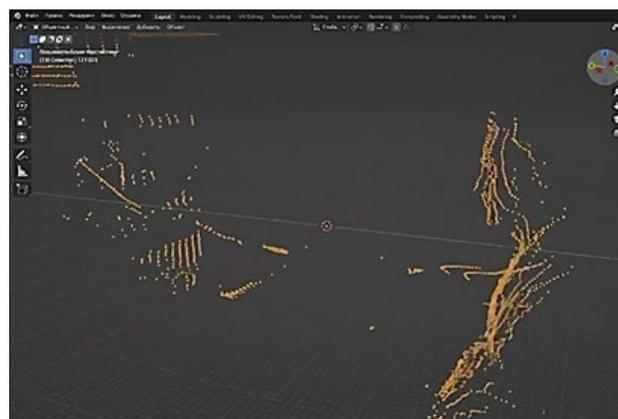


Рис. 14. Результат сканирования устройством (человек – справа, монитор – слева, устройство сканирования располагалось на рабочем столе на уровне плеч сидящего человека)

## Заключение

В ходе данной работы выполнен разбор принципа работы лидара и лазерных сканеров.

Произведен выбор компонентной базы для создания аппаратного блока более дешевого альтернативного ПАК.

Разработано конструктивное исполнение аппаратного блока ПАК.

Описан алгоритм работы устройства.

Описан способ подключения компонентов.

Анализированы различные форматы файлов для записи, хранения и чтения трехмерных моделей. Определен наиболее подходящий формат для использования.

Написана прошивка микроконтроллеров для выполнения устройством поставленных задач.

Сконструирован рабочий макет устройства, произведена проверка работоспособности, с проведение сканирования пространства.

## Литература

1. Буравлева А.Ф., Клипина Н.А., Крутилова М.О. Внедрение BIM-технологий в процесс проектирования и строительства объектов недвижимости // Вестник научных конференций. 2016. № 10-3(14). С. 36-39.
2. Краснопецев Б.В. Фотограмметрия. М : УПП «Репрография» МИИГАиК, 2008. 160 с.
3. Звелто О. Принципы лазеров. Л : Лань, 2008. 724 с.
4. Лазерные приборы и методы измерения дальности: учебное пособие по курсам «Проектирование лазерных оптико-электронных преобразователей» и «Оптико-электронные приборы» / В.Е. Карасик, В.Б. Бокшанский, Д.А. Бондаренко, М.В. Вязовых. М : МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2012. 96 с.
5. Наземное лазерное сканирование. СИБНИИ-ГИМ. URL: <https://sibniigim.ru/news/nazemnoe-lazernoe-skanirovanie/>.

6. RPLIDAR A2 Low Cost 360 Degree Laser Range Scanner Development Kit User Manual / Shanghai Slamtec.Co., Ltd. China, 2021. 20 c.

7. STMicroelectronics NUCLEO-XXXXZX NUCLEO-XXXXZX-P NUCLEO-XXXXZX-Q Data brief / STMicroelectronics. USA, 2021. 9 c.

8. STMicroelectronics UM2408 User manual / STMicroelectronics. USA, 2021. 56 c.

9. Schneider Electric Quick Reference NEMA size 17 1.8° 2-phase stepper motor / Schneider Electric. USA, 2020. 2 c.

10. Texas Instruments User's Manual Stellaris® Stepper Motor Reference Design Kit / Texas Instruments. USA, 2009. 45c.

11. Espressif Systems ESP8266 Technical Reference / Espressif Systems. China, 2020. 177 c.

12. STMicroelectronics LSM6DSL Datasheet-production data / STMicroelectronics. USA, 2015. 114 c.

Поступила 07.12.2023; принята к публикации 28.02.2024

#### Информация об авторах

**Журавлёв Дмитрий Владимирович** – канд. техн. наук, доцент, заведующий кафедрой радиоэлектронных устройств и систем, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, д. 84), тел. +7(473)207-22-20 (доб. 6090), e-mail: ddom1@yandex.ru

**Летов Никита Андреевич** – аспирант кафедры радиоэлектронных устройств и систем, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: nikitaletov@mail.ru

## HARDWARE AND SOFTWARE COMPLEX FOR CREATING A THREE-DIMENSIONAL MODELS OF PREMISES AND OBJECTS

**D.V. Zhuravlev, N.A. Letov**

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

**Abstract:** in the ever-evolving landscape of visual technologies, the demand for accessible and cost-effective tools for digitizing three-dimensional spaces and objects has become increasingly apparent. This study introduces a development that aims to serve as an affordable solution, offering an alternative to the more expensive technologies prevalent in the industry. The primary objective of this work is to devise a hardware and software solution that democratizes the creation of 3D models, making it more accessible to a wider audience. The device's design prioritizes user convenience and portability, positioning it as an appealing option for a diverse user base engaged in three-dimensional modeling. This adaptability makes the envisaged complex suitable for applications across various sectors, including design, construction, research, and education. In essence, this work represents a significant stride towards creating more accessible and efficient solutions for the digitization of three dimensional objects. It contributes to the advancement and refinement of visual technologies in our contemporary information society

**Key words:** hardware and software complex, three-dimensional modeling, three-dimensional scanner, lidar, STM programming

#### References

1. Buravleva A.F., Klipina N.A., Krutilova M.O. "Introduction of BIM technologies into the process of design and construction of real estate objects", *The Bulletin of Scientific Conferences (Vestnik nauchnykh konferentsiy)*, 2016, no. 10-3 (14), pp. 36-39.

2. Krasnopen'tsev B.V. "Photogrammetry" ("Fotogrammetriya"), Moscow, Reprografiya, 2008, 160 p.

3. Zvelto O. "Principles of lasers" ("Printsiipy lazerov"), Leningrad, Lan, 2008, 724 p.

4. Karasik V.E., Bokshansky V.B., Bondarenko D.A., Vyazov M.V. "Laser devices and methods of range measurement: textbook for the courses "Design of laser optical-electronic converters" and "Optical-electronic devices" ("Lazernyye pribory i metody izmereniya dal'nosti: uchebnoye posobiye po kursam "Proyektirovaniye lazernykh optiko-elektronnykh preobrazovateley" i "Optiko-elektronnyye pribory")", Moscow, MSTU n. a. N.E. Bauman, 2012, 96 p.

5. "Terrestrial laser scanning. SIBNIGIM", [Electronic resource], available at: <https://sibniigim.ru/news/nazemnoe-lazernoe-skanirovanie/>.

6. "RPLIDAR A2 Low Cost 360 Degree Laser Range Scanner Development Kit User Manual", Shanghai Slamtec. Co. Ltd, China, 2021, 20 p.

7. "STMicroelectronics NUCLEO XXXXZX NUCLEO XXXXZX P NUCLEO XXXXZX Q Data brief", STMicroelectronics, USA, 2021, 9 p.

8. "STMicroelectronics UM2408 User manual", STMicroelectronics. USA, 2021, 56 p.

9. "Schneider Electric Quick Reference NEMA size 17 1.8° 2-phase stepper motor", Schneider Electric, USA, 2020, 2 p.

10. "Texas Instruments User's Manual Stellaris® Stepper Motor Reference Design Kit", Texas Instruments, USA, 2009, 45 p.

11. "Espressif Systems ESP8266 Technical Reference", Espressif Systems, China, 2020, 177 p.

12. "STMicroelectronics LSM6DSL Datasheet-production data", STMicroelectronics, USA, 2015, 114 p.

Submitted 07.12.2023; revised 28.02.2024

#### Information about the authors

**Dmitry V. Zhuravlev** – Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Head of the Department of Radioelectronic Devices and Systems, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Ocyabrya str., Voronezh 394006, Russia), tel.: +7(473)207-22-20 (ext. 6090), e-mail: ddom1@yandex.ru

**Nikita A. Letov** – Postgraduate Student, the Department of Radioelectronic Devices and Systems, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Ocyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: nikitaletov@mail.ru

## РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМОВ ДЛЯ ЭФФЕКТИВНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ РЕСУРСОВ В ОБЛАЧНОЙ СРЕДЕ

С.А. Олейникова, Н.С. Капустин, Н.Э. Евсюков

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

**Аннотация:** в настоящее время все больше компаний используют разнообразные платформы виртуализации, расположенные в облачной среде. В связи с этим возникает задача эффективного распределения ресурсов в облаке. В частности, актуальной является задача распределения виртуальных машин по серверам и их возможной миграции. При выборе критерия оптимальности и учета всех ограничений данную задачу можно сформулировать как задачу дискретной оптимизации. Анализ возможных методов ее решения продемонстрировал целесообразность использования для ее решения эвристических подходов и генетических алгоритмов. В связи с этим возникает необходимость разработки соответствующих эвристик и конкретизации каждого этапа генетического алгоритма с учетом сформулированной целевой функции и ограничений. Среди полученных результатов, отличающихся научной новизной, следует выделить математическую модель, учитывающую ресурсные ограничения серверов и обеспечивающую возможность распределения виртуальных машин с точки зрения критерия равномерной загрузки по всем видам ресурсов. Кроме того, разработаны операции формирования популяции, скрещивания и мутации генетического алгоритма, предназначенного для решения поставленной оптимизационной задачи. В качестве результата, отличающегося практической значимостью, следует выделить программу, реализованную на базе алгоритма и предназначенную для автоматического определения наилучшего хоста для каждой виртуальной машины

**Ключевые слова:** математическая модель, ресурсные ограничения, критерий равномерной загрузки, генетический алгоритм

### Введение

В современных условиях большинство предприятий и организаций используют технологии виртуализации для работы со своим программным обеспечением. Поскольку на один физический сервер можно поместить несколько виртуальных машин, данный подход обладает целым рядом преимуществ, основными из которых являются: существенная экономия средств на приобретение множества хостовых машин, экономия электроэнергии, упрощение процесса разработки программного обеспечения и т.д. При этом каждая виртуальная машина независима и изолирована от других, что обеспечивает безопасность и стабильность функционирования. Кроме того, при необходимости на физический сервер можно добавить одну или несколько виртуальных машин, изменить их параметры, что обеспечивает удобство масштабирования всей системы.

Виртуализация позволяет эффективно использовать аппаратные ресурсы физических серверов. Однако, в связи с этим, возникает задача размещения виртуальных машин. Данную задачу можно отнести к задачам дискретной оптимизации. В зависимости от выбора целевой функции и ограничений, возможны ее разные ее решения.

К наиболее распространенным критериям следует отнести стоимостной, а также критерий эффективного распределения ресурсов. Разные вариации исследуемой задачи приведены, в частности, в [1, 2, 5, 6, 7]. Из множества возможных критериев выбран критерий равномерной загрузки всех хостов по всем видам ресурсов.

В данной работе сформулирована многокритериальная задача оптимизации распределения виртуальных машин по серверам с точки зрения данного критерия. Предложен подход к ее решению, основанный на генетических алгоритмах. В результате разработан программный продукт, автоматизирующий процесс решения поставленной оптимизационной задачи с помощью предложенного алгоритма.

Полученные результаты могут быть полезны любым предприятиям и организациям, использующим технологии виртуализации.

### Постановка задачи и ее математическая модель

Исследуемую задачу можно сформулировать следующим образом.

Пусть имеется  $M$  виртуальных машин, которые необходимо разместить на  $N$  серверов. Каждый сервер характеризуется некоторым объемом разных ресурсов, необходимых для успешной работы виртуальной машины

(например, оперативная память, объем дискового пространства и т.д.). Пусть актуальными для лица, принимающего решение, является  $K$  видов ресурсов. Опишем объем ресурсов на каждом сервере  $i, i=1, \dots, N$  с помощью вектора  $R_i = r_{i1}, r_{i2}, \dots, r_{ik}$ . Будем считать известными ресурсные требования каждой виртуальной машины  $j, j=1, \dots, M$  для своего развертывания. Пусть они описываются с помощью вектора  $VM_j = vm_{j1}, vm_{j2}, \dots, vm_{jk}$ . Необходимо обеспечить оптимальное размещение виртуальных машин по серверам с точки зрения некоторого критерия, в качестве которого рассмотрим достижение равномерной загрузки на серверах по всем видам ресурсов.

Введем в рассмотрение булеву матрицу  $x_{ij}$ , каждый элемент которой равен 1, если на физическом сервере  $i$  будет размещена виртуальная машина  $j$ , и 0 в противном случае. Это будет матрица, которую необходимо будет найти. Специфика матрицы  $x$  говорит о том, что полученная задача относится к классу задач дискретной оптимизации [3, 4].

Ресурсные ограничения в данном случае будут иметь следующий вид:

$$\sum_{i=1}^N x_{ij} \cdot vm_{jl} \leq r_{il}, \quad (1)$$

где  $i = 1, \dots, N; l = 1, \dots, K; j = 1, \dots, M$ .

Укажем, что каждая виртуальная машина может быть размещена лишь на одном сервере:

$$\sum_{i=1}^N x_{ij} = 1, \quad (2)$$

где  $i = 1, \dots, N; j = 1, \dots, M$ .

В качестве критерия рассмотрим равномерную загрузку серверов. Для этого определим среднюю загрузку по каждому виду ресурса. Она будет определяться следующим образом:

$$\overline{vm}_l = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M x_{ij} \cdot vm_{jl}, \quad (3)$$

где  $i = 1, \dots, N; l = 1, \dots, K; j = 1, \dots, M$ .

Далее оценим дисперсию для каждого вида ресурсов. Она определяется как мера рассеяния возможных значений (в данном случае, фактических объемов ресурсов вида  $l, l=1, \dots, K$ ) от среднего показателя, определяемого формулой (3), и рассчитывается по формуле

$$D_l = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left( \sum_{j=1}^M x_{ij} \cdot vm_{jl} - \overline{vm}_l \right)^2, \quad (4)$$

где  $i = 1, \dots, N; l = 1, \dots, K; j = 1, \dots, M$ .

Потребуем в качестве критерия минимизации оценки дисперсии по каждому виду ресурсов:

$$\begin{cases} D_1 \rightarrow \min; \\ D_2 \rightarrow \min; \\ \dots \\ D_K \rightarrow \min. \end{cases} \quad (5)$$

Таким образом, с математической точки зрения критерии (5) требуют решить задачу размещения машин таким образом, чтобы объем каждого из  $K$  ресурсов, используемых всеми виртуальными машинами, установленными на каждом из серверов, в минимальной степени отклонялся бы от среднего значения, рассчитанного по формуле (3).

Многокритериальная оптимизационная задача – такая задача, целью которой является поиск вектора целевых переменных, которые доставляют оптимум сразу нескольким критериям оптимизации. Очевидно, что наличие аргументов, которые одновременно являются точками минимума для каждого из целевых функций, составляющих многокритериальную задачу, на практике крайне редко. В связи с этим используются методы, позволяющие найти наилучшее компромиссное решение. В частности, к ним можно отнести метод линейной свертки.

### Подход к решению задачи

Как было отмечено ранее, с учетом специфики критерия (5), получили многокритериальную задачу с ресурсными ограничениями. Анализ методов сведения задачи к однокритериальной позволил сделать выбор на методе линейной свертки. Этот метод наилучшим образом позволяет не только перейти к единому критерию, но и, при необходимости, учесть важность каждого из них с помощью соответствующих коэффициентов  $\alpha_l$ , удовлетворяющих условиям:

$$\begin{cases} \sum_{l=1}^K \alpha_l = 1; \\ 0 \leq \alpha_l \leq 1, \end{cases} \quad (6)$$

где  $K$  – количество ресурсов.

Тогда целевую функцию можно описать следующим образом:

$$F(D) = \sum_{l=1}^K \alpha_l \cdot D_l \rightarrow \min. \quad (7)$$

Поскольку варианты решений представляют собой конечное множество, задачу можно отнести к дискретной оптимизации. Анализ возможных методов ее решения позволил остановиться на использовании генетических алгоритмов. Такой выбор целесообразен в силу наилучшего соотношения сложности задачи и степени близости полученного решения к оптимальному значению. В частности, в данном случае ресурсные и другие ограничения могут потребовать дополнительной вычислительной сложности из-за возможного увеличения числа перебираемых значений.

Генетический алгоритм состоит из итеративного выполнения следующих этапов [8, 9]:

- формирование начальной популяции особей (хромосом);
- выбор родителей и скрещивание хромосом для получения нового поколения;
- мутация хромосом;
- отбор особей, которые будут представлять новое поколение.

Рассмотрим каждый из этапов более подробно.

В качестве хромосомы возьмем бинарную матрицу размерности  $M \times N$ , где  $M$  – количество виртуальных машин, а  $N$  – число физических серверов. Элемент  $x_{ij}$  матрицы равен 1, если виртуальная машина  $j$  будет размещена на сервере  $i$ , и 0 в противном случае. Специфика матрицы  $x$  будет заключаться в том, что в каждой ее строке будет присутствовать лишь одна 1, поскольку виртуальную машину можно разместить лишь на какой-то один физический хост. Математически это можно описать следующим образом:

$$\sum_{i=1}^N x_{ij}=1, j=1, \dots, M. \quad (8)$$

Такая хромосома, например, может иметь следующий вид (табл. 1).

Таблица 1

Пример хромосомы

	Сервер1	Сервер2	Сервер3	Сервер4
В.м.1	0	0	0	1
В.м.2	0	0	1	0
В.м.3	0	1	0	0
В.м.4	1	0	0	0
В.м.5	0	1	0	0

Формирование начальной популяции – это многократное случайное генерирование матрицы с учетом ограничений (1) и (8). При этом для каждой хромосомы необходимо оценить значение фитнес-функции с целью определения

наилучшей особи. Фитнес-функция будет определяться формулой (7).

Операция скрещивания будет включать в себя следующие этапы.

1. Выбор каким-либо образом особей-родителей  $i_1$  и  $i_2$  для формирования потомка.

2. Разделение каждой из матриц родителей пополам: первые  $M/2$  строк матрицы потомка скопировать от соответствующей матрицы родителя  $i_1$ , вторые – от родителя  $i_2$ . После этого необходимо убедиться, что ресурсные ограничения (1) имеют место. Если это так, то полученный потомок помещается в массив, который хранит новую популяцию, в противном случае – отбрасывается. Заданные действия выполняются в цикле, пока не будет создано заданное число потомков.

Операция мутации выполняется для внесения небольших изменений в хромосому потомка. Для этого осуществляется перебор элементов в массиве потомков, в результате чего с некоторой вероятностью выбирается элемент (хромосома) для мутации. Сам процесс мутации будет заключаться в смене двух случайно выбранных строк данной хромосомы местами. После выполнения данной операции необходимо убедиться в выполнении ресурсных ограничений над новым претендентом в массив потомков: если ограничения (1) выполнены, то процесс мутации считается успешным.

Далее массив потомков сокращается до нужного размера путем отбрасывания наихудших с точки зрения фитнес-функции элементов. В результате получается следующее поколение.

### Программная реализация приложения

Разработанный выше алгоритм был положен в основу программного средства, предназначенного для автоматизации решения поставленной задачи. В качестве среды разработки выбран Visual Studio [10]. Данная среда предоставляет множество функций, которые упрощают написание кода и его отладку, содержат множество компонентов для создания пользовательского интерфейса и поддерживает работу с такими языками, как C#, JavaScript, Python и др. Для реализации данного приложения использовался JavaScript. Разработанное приложение позволяет определять наилучшие сервера для каждой из виртуальных машин с точки зрения введенных характеристик. Окно для ввода представлено на рис. 1.

№ Сервера	Ресурс 1	Ресурс 2
1	5	7
2	8	6

Ресурс 1	Ресурс 2
1	1

№ VM	Ресурс 1	Ресурс 2
1	2	2
2	4	1
3	3	4

Рис. 1. Ввод данных

После стадии ввода генетический алгоритм предлагает наилучшие с точки зрения эффективного распределения всех ресурсов.

В частности, для значений, введенных на рис. 1, получены результаты распределения, которые представлены на рис. 2.

Сервер	VM 1	VM 2	VM 3
1	0	0	1
2	1	1	0

Рис. 2. Результаты распределения виртуальных машин по серверам

Таким образом, разработано приложение, позволяющее автоматизировать процесс распределения виртуальных машин по серверам. Экспериментальное исследование показали эффективность его работы.

### Заключение

Целью данной работы являлась разработка алгоритма решения оптимизационной задачи распределения виртуальных машин по серверам

и его программная реализация. Получены следующие результаты, отличающиеся новизной.

1. Предложены целевая функция и ограничения для задачи распределения виртуальных машин по серверам, учитывающие ресурсные ограничения и обеспечивающие возможность поиска оптимального распределения ресурсов.

2. Предложен алгоритм решения задачи, основанный на генетическом подходе: определена структура хромосомы, разработаны опе-

рации скрещивания, мутации и остальные этапы алгоритма.

3. Реализовано приложение, автоматизирующее работу разработанного алгоритма и обеспечивающее решение оптимизационной задачи распределения виртуальных машин по серверам.

#### Литература

1. Акиншин А.А. Оптимизация распределения и использования ресурсов локальной вычислительной сети ЦЭМИ РАН при применении средств виртуализации // Вестник ЦЭМИ РАН. 2018. Т. 1. Вып. 1. URL: <http://av.cemi.rssi.ru/av/r4lit54.pdf> (дата обращения 12.02.2024).

2. Бельский А.С. Исследование операций в транспортных системах: идеи и схемы методов оптимизации планирования. М.: Мир, 1992. 582 с.

3. Вагнер Г. Основы исследования операций. Пер. с англ. М.: Мир, 1972. Т. 1. 36 с.

4. Васильев Ф.П. Методы оптимизации. М.: МЦНМО, 2011. Кн. 1. 620 с.

5. Подвальный С.Л., Васильев Е.М. Матричная репликация в NP-полных задачах комбинаторной оптимизации // Вестник Воронежского государственного технического университета. Т. 18. № 4. 2022. С. 7-14.

6. Прилуцкий М.Х., Кривошеев О.В. Распределение производственных ресурсов в задачах объемного планирования в условиях неполноты данных // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2022. № 2. С. 36-43.

7. Федотов Е.А., Федотова В.Н., Поляничка М.И. Анализ методов виртуализации, применяемых в инфраструктуре предприятия // Вестник магистратуры. 2015. № 11 (50). Т. 1. С. 57-59.

8. Вирсанакски Э. Генетические алгоритмы на Python; пер. с англ. А.А. Слинкина. М.: ДМК Пресс, 2020. 286 с.

9. Гладков Л.А., Курейчик В.В., Курейчик В.М. Генетические алгоритмы. М.: Физматлит, 2010. 317 с.

10. Visual Studio Code URL: <https://visualstudio.microsoft.com/ru> (дата обращения 18.05.2022).

Поступила 25.01.2024; принята к публикации 12.03.2024

#### Информация об авторах

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

**Капустин Никита Сергеевич** – магистрант, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: [keajaiban@mail.ru](mailto:keajaiban@mail.ru)

**Евсюков Николай Эдуардович** – магистрант, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: [patch.17@yandex.ru](mailto:patch.17@yandex.ru)

## DEVELOPMENT OF ALGORITHMS FOR EFFICIENT RESOURCE ALLOCATION IN A CLOUD ENVIRONMENT

S.A. Oleinikova, N.S. Kapustin, N.E. Evsyukov

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

**Abstract:** currently, more and more companies are using a variety of virtualization platforms located in a cloud environment. In this regard, the task of efficient resource allocation in the cloud arises. In particular, the task of distributing virtual machines across servers and their possible migration is urgent. When choosing the criterion of optimality and taking into account all constraints, this problem can be formulated as a discrete optimization problem. An analysis of possible methods for solving it has demonstrated the expediency of using heuristic approaches and genetic algorithms to solve it. In this regard, there is a need to develop appropriate heuristics and specify each stage of the genetic algorithm, taking into account the formulated objective function and constraints. Among the results obtained, which are characterized by scientific novelty, it is necessary to highlight a mathematical model that takes into account the resource limitations of servers and provides the possibility of distributing virtual machines in terms of the criterion of uniform loading across all types of resources. In addition, the operations of population formation, crossing and mutation of a genetic algorithm designed to solve the set optimization problem have been developed. As a result, characterized by practical significance, it is necessary to highlight a program implemented on the basis of an algorithm and designed to automatically determine the best host for each virtual machine

**Key words:** mathematical model, resource constraints, uniform loading criterion, genetic algorithm

#### References

1. Akinshin A.A. "Optimisation of distribution and use of resources of local computer network of CEMI RAS at application of means of virtualization", *The Bulletin of CEMI RAS (Vestnik CEMI RAN)*, 2018, vol. 1, iss. 1, available at: <http://av.cemi.rssi.ru/av/r4lit54.pdf> (accessed 12.02.2024).

2. Belenkiy A.S. "Operations Research in Transport Systems: Ideas and Schemes of Planning Optimisation Methods" ("Issledovaniye operatsiy v transportnyh sistemah: idei i shemy metodov optimizatsii planirovaniya"), Moscow, Mir, 1992, 582 p.

3. Wagner G. “Fundamentals of Operations Research” (“Osnovy issledovaniya operatsiy”), vol. 1, transl. from Eng., Moscow, Mir, 1972, 336 p.
4. Vasiliev F.P. “Optimization Methods. Book 1” (“Metody optimizatsii. Kniga 1”), Moscow, MCNMO, 2011, 620 p.
5. Podvalny S.L., Vasiljev E.M. “Matrix replication in np-complete problems of combinatorial optimization”, *The Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tehnikeskogo universiteta)*, 2018, vol. 18, no. 4, pp. 7-14.
6. Prilutsky M.Kh., Krivosheev O.V. “Distribution of production resources in volumetric planning problems under conditions of incomplete data” *Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev (Trudy NGTU im. R.E. Alekseeva)*, 2022, no. 2, pp. 36-43, DOI: 10.46960/1816-210X\_2022\_2\_36
7. Fedotov E. A., Fedotova V.N., Polyanichka M.I. “Analysis of virtualization methods used in the enterprise infrastructure”, *The Bulletin of Magistracy (Vestnik magistratury)*, 2015, no. 11 (50), vol.1, pp. 57-59.
8. Virsanakski E. “Genetic Algorithms in Python” (“Geneticheskie algoritmy na Python”), trans. from Eng. by A.A. Slinkin, Moscow, DMK Press, 2020, 286 p.
9. Gladkov L.A., Kureichik V.V., Kureichik V.M. “Genetic algorithms” (“Geneticheskie algoritmy”), Moscow, Fizmatlit, 2010, 317 p.
10. “Visual Studio Code”, available at: <https://visualstudio.microsoft.com/ru/> (accessed 18.05.2022).

Submitted 25.01.2024; revised 12.03.2024

#### Information about the authors

**Svetlana A. Oleinikova** – Dr. Sc. (Technical), Professor, Department of Automated and Computing Systems, 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>

**Nikita S. Kapustin** – Master's Student, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia) e-mail: [keajaiban@mail.ru](mailto:keajaiban@mail.ru)

**Nikolay E. Evsyukov** – Master's Student, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia) e-mail: [patch.17@yandex.ru](mailto:patch.17@yandex.ru)

## ИНТЕЛЛЕКТУАЛИЗАЦИЯ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ В СИСТЕМЕ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ ПРОЦЕССОМ ПРОИЗВОДСТВА АСФАЛЬТОБЕТОННОЙ СМЕСИ

И.Н. Волков, В.Л. Бурковский, В.П. Шелякин

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

**Аннотация:** автомобильные дороги – это важнейшая часть экономической составляющей страны. При этом их надежность и долговечность определяется качеством дорожного покрытия на основе асфальтобетонных смесей. Снижение затрат на производство асфальтобетонных смесей требует развития средств автоматизации, в том числе на базе интеллектуализации соответствующих процессов управления. При производстве асфальтобетонной смеси все процессы связаны между собой. Большое количество нерегулируемых источников внешних и внутренних возмущений в процессе управления данным технологическим процессом, высокая динамика изменения параметров управления существенно усложняют формализацию производства а/б смеси. В статье описаны основные производственные этапы технологического процесса, а также осуществлена их алгоритмизация. Кроме того, выделен основной этап, связанный с поддержанием температуры смеси при смешивании материалов с помощью газовой горелки, который описан в терминах нечеткой логики. Определена зависимость при определенном объеме подачи газа в м<sup>3</sup> и температуры, в результате сформированы функции принадлежности, а также матрицы переходов для разных вариантов управления. Данный материал может быть полезен разработчикам средств интеллектуализации управления технологическими процессами с неопределенными параметрами

**Ключевые слова:** формализация технологических процессов, интеллектуализация, нечеткая логика, функция принадлежности, газовая горелка, матрица переходов, асфальтобетонная смесь

### Введение

При производстве асфальтобетонных смесей требуется все время контролировать различные параметры, такие как: качество материалов для приготовления смеси, правильность их дозировки, время и температуру перемешивания материалов с битумом. Также контролируются такие параметры как: температура готовой смеси, определение пористости и водонасыщения. По внешним признакам оценивают: цвет, однородность, одинаковость распределения битума в смеси [1].

Все эти параметры необходимо учитывать при формировании структуры системы управления, базирующейся на приведенном ниже алгоритме [2]. Данная структура показана на рис. 1.



Рис. 1. Структурная схема алгоритма управления производством а/б смеси

### Формализация процессов управления

С точки зрения управления, управляемыми считаются все параметры технологического процесса производства а/б смеси, которые осуществляют его функционирование в заданных границах регулирования.

Одной из самой важной частью в приготовлении а/б смеси является перемешивание материалов с битумом при температуре 160-180°C. Несоблюдении данного температурного режима несет за собой отрицательные последствия, приводящие к разрушению дорожного покрытия в будущем.

Смесь, как правило, смешивается на асфальтобетонном заводе (АБЗ), а затем уже транспортируется в заданное место. Температура поддерживается с помощью горелки. Горелка — важнейший агрегат асфальтобетонного завода. Именно она высушивает зачастую переувлажненный песок и щебень и нагревает их до заданной температуры перед подачей на виброгрохот. Только горячие каменные материалы позволяют точно реализовать технологический цикл производства асфальта, используемого для устройства дорог высшей категории в соответствии с национальными и отраслевыми стандартами, строительными нормами и правилами. Сегодня каждую новую асфальтосмесительную установку оснащают газовой, жидкотопливной или комбинированной горелкой [3].

Важно рассмотреть данный процесс на основе нечеткой логики, которое базируется на понятии нечеткого множества, где значение принимается в интервале от  $[0,1]$ , а не только 0 или 1. На эту тему есть ряд исследований, например: применение нечеткой логики для оценки физического износа несущих конструкций зданий [4].

Созданная в работе модель позволяет вычислить показатель физического износа в зависимости от входных переменных, а также был получен диапазон в процентах повреждения несущих конструкций.

В другой работе с помощью нечеткой логики рассмотрена возможность использования функций принадлежности роли расчетного ядра программы для дефектоскопии [5]. С помощью нее определили остаточный ресурс зданий и сооружений.

Поэтому, для интеллектуализации процесса производства а/б смесей будем использовать данный метод.

Все параметры регулирования опишем в следующем виде:

1.  $(L1, \langle T1 \rangle, X)$ , состояние «норма» для параметра «температура смеси» считается идеальным, поэтому из этого состояния может быть два перехода:

«слишком низкая»  $\rightarrow$  «низкая»  $\rightarrow$  «средняя», при этом терм-множество  $\langle T1 \rangle = \{\langle \text{Увеличить} \rangle, \langle \text{Значительно увеличить} \rangle\}$ ;

2.  $(L2, \langle T2 \rangle, X)$ , где  $\langle T2 \rangle = \{\langle \text{Уменьшить} \rangle, \langle \text{Значительно уменьшить} \rangle\}$ ;

3.  $(L3, \langle T3 \rangle, X)$ , где  $\langle T3 \rangle = \{\langle \text{Не изменять} \rangle\}$ .

Температура асфальтобетонной (а/б) смеси регулируется за счет изменения подогрева горелки АБЗ. Будем использовать газовую горелку, так как в условиях города она самая удобная, потому что это проще с точки зрения подведения инженерных коммуникаций к местоположению комплекса. Горелка позволяет использовать при производстве смеси самый дешевый и экологичный вид топлива — природный газ.

Сохранение и поддержание температуры а/б смеси позволяет качественно развить процесс ее производства.

При контроле изменения температуры а/б смеси нужно вносить управляющие воздействия на весь процесс производства. Изменение объема подачи газа при приготовлении влияет на температуру всей смеси [6].

Объем газа определяется в кубических метрах. При увеличении этого параметра, температура смеси становится выше, а чем ниже уровень подачи газа, тем ниже температура а/б смеси.

В работе [7] создаются функции принадлежности методом попарных сравнений, а затем модель управления стохастическим процессом сушки барды на основе аппарата нечеткой логики. Рассматривается температура входящей барды и ее лингвистическая переменная.

В данной работе используется похожий принцип, но за основу берется температура асфальтобетонной смеси, которая должна удерживаться в постоянном диапазоне, при помощи газовой горелки. Так как температура принимает разное значение, то данный процесс очень важно рассмотреть с точки зрения нечеткой логики. Этот метод поможет интеллектуализировать систему управления производственными объектами с неопределенными параметрами.

Возьмем интервал температуры а/б смеси  $[T_{\min}, T_{\max}]$ , который нужно поддерживать и сохранить температуру только в этом диапазоне.

Возьмем шаг колебания объема подачи газа, который изменяет температуру всей смеси, за  $0,1 \text{ м}^3$ . Отличие этих температур примем как  $T_{\max}$  и  $T_{\min}$ . Действие, которое меняет объем подачи газа обозначим как  $Y_t$ .

Для показа количества воздействия газа и изменения температуры а/б смеси, используются лингвистические переменные:

1)  $\langle \langle \text{«Уменьшить } V_{\text{газа}} \text{»}, V_{\text{газ down}}, X_{\text{t down}} \rangle \rangle$ , где  $V_{\text{газ down}} = \{ \langle \text{«Уменьшить»}, \langle \text{«Значительно уменьшить»} \rangle \}$ ,  $X_{\text{t down}} = \{ -0,2, -0,4 \}$ ;

2)  $\langle \langle \text{«Увеличить } V_{\text{газа}} \text{»}, V_{\text{газ down}}, X_{\text{газ up}} \rangle \rangle$ , где  $V_{\text{газ up}} = \{ \langle \text{«Увеличить»}, \langle \text{«Значительно увеличить»} \rangle \}$ ,  $X_{\text{газ up}} = \{ 0,2, 0,4 \}$ ;

3)  $\langle \langle \text{«Не изменять } V_{\text{газа}} \text{»}, V_{\text{газ const}}, X_{\text{газ const}} \rangle \rangle$ ,  $V_{\text{газ const}} = \{ \langle \text{«не изменять»} \rangle \}$ ,  $X_{\text{газ const}} = \{ 0 \}$ .

Функция принадлежности «Уменьшить  $V_{\text{газа}}$ » изображена на рис. 2.

Функция принадлежности «Увеличить  $V_{\text{газа}}$ » изображена на рис. 3.

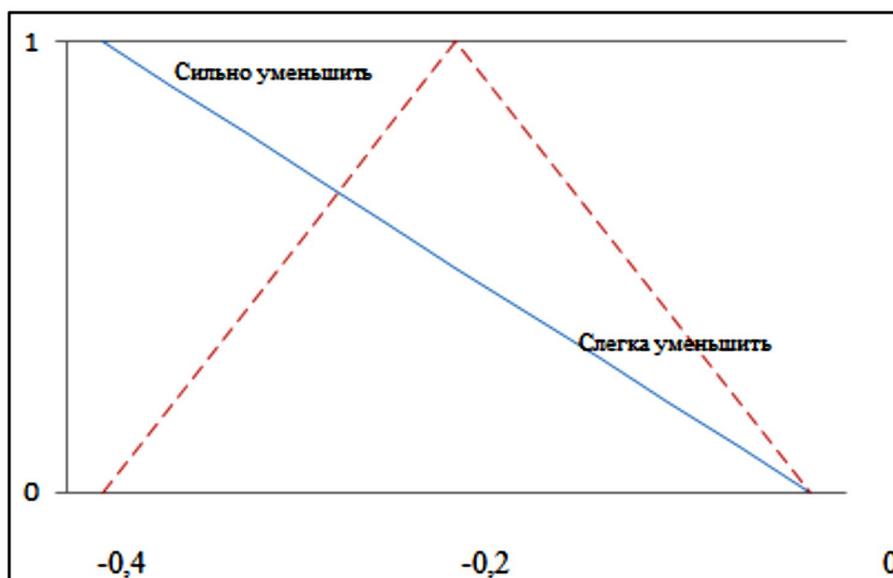


Рис. 2. Функции принадлежности «Уменьшить подачу газа»

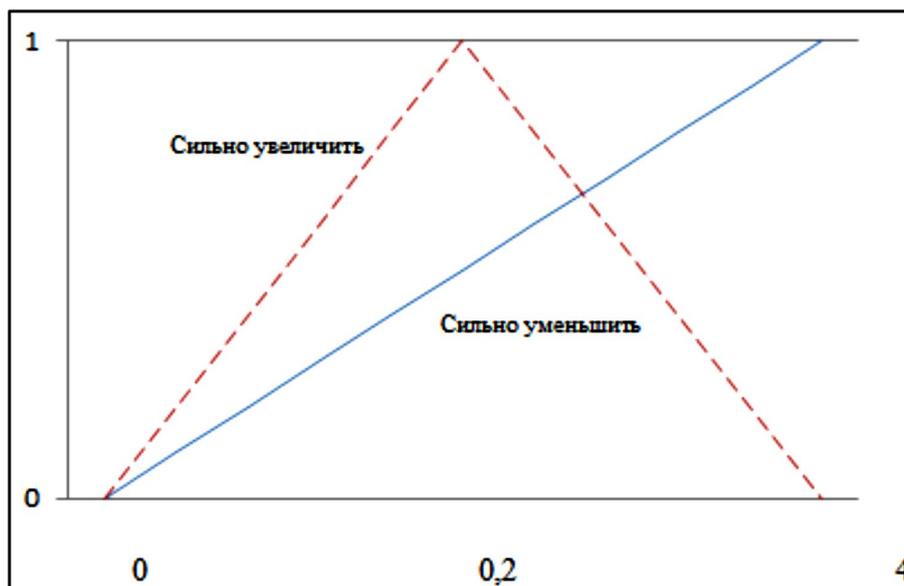


Рис. 3. Функции принадлежности «Увеличить подачу газа»

Сформируем матрицу переходов, для различных состояний температуры. Под дей-

ствием управления «Уменьшить  $V_{газа}$ » «Уменьшить» получаем рис. 4.

	«слишком низкая»	«низкая»	«в норме»	«высокая»	«слишком высокая»
«слишком низкая»	1	0	0	0	0
«низкая»	1	0,2	0	0	0
«в норме»	0,1	1	0,2	0	0
«высокая»	0	0,1	1	0,2	0
«слишком высокая»	0	0	0,1	1	0,2

Рис. 4. Матрица переходов под действием управления «Уменьшить  $V_{газа}$ »

Сформируем матрицу переходов для состояний температуры под действием управления «Уменьшить  $V_{газа}$ » «Значительно умень-

шить». Матрица переходов изображена на рис. 5.

	«слишком низкая»	«низкая»	«в норме»	«высокая»	«слишком высокая»
«слишком низкая»	1	0	0	0	0
«низкая»	1	0,1	0	0	0
«в норме»	1	0,3	0,1	0	0
«высокая»	0,3	1	0,3	0,1	0
«слишком высокая»	0	0,3	1	0,3	0,1

Рис. 5. Матрица переходов под действием управления «Уменьшить  $V_{газа}$ » «Значительно уменьшить»

Сформируем матрицу переходов для состояний температуры под действием управ-

ления «Увеличить  $V_{газа}$ » «Увеличить» Изобразим матрицу переходов на рис. 6.

	«слишком низкая»	«низкая»	«в норме»	«высокая»	«слишком высокая»
«слишком низкая»	0,2	1	0,1	0	0
«низкая»	0	0,2	1	0,1	0
«в норме»	0	0	0,2	1	0,1
«высокая»	0	0	0	0,2	1
«слишком высокая»	0	0	0	0	1

Рис. 6. Матрица переходов под действием управления «Увеличить  $V_{газа}$ »

Сформируем матрицу переходов для состояний температуры под действием управления «Увеличить  $V_{газа}$ » «Значительно уве-

личить» Изобразим матрицу переходов на рис. 7.

	«слишком низкая»	«низкая»	«в норме»	«высокая»	«слишком высокая»
«слишком низкая»	0,1	0,3	1	0,3	0
«низкая»	0	0,1	0,3	1	0,3
«в норме»	0	0	0,1	0,3	1
«высокая»	0	0	0	0,1	1
«слишком высокая»	0	0	0	0	1

Рис. 7. Матрица переходов под действием управления «Увеличить  $V_{\text{газа}}$ » «Значительно увеличить»

На итоговую температуру а/б смеси влияют и другие параметры, рассмотренные в технологическом процессе, но процесс подогрева является самым важным и основным.

### Заключение

Приведены формальные средства интеллектуализации процессов принятия решений в системе управления технологическим процессом производства асфальтобетонной смеси в терминах нечеткой логики. Приведено описание основных этапов технологического процесса, а также осуществлена их алгоритмизация. В качестве основного выбран процесс по изменению температуры во время смешивания различных материалов. Представлена формализация процесса и его регулирование в терминах нечеткой логики. Сформированы функции принадлежности, а также матрицы переходов под воздействием разных вариантов управления. Данный материал может быть использован в рамках интеллектуальных систем управления производственными объектами с неопределенными параметрами.

### Литература

1. Бурковский В.Л., Волков И.Н. Проблематика управления технологическими процессами в дорожном строительстве // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2023. Т. 19. № 2. С. 15-20.
2. Волков И.Н., Бурковский В.Л. Алгоритмизация управления технологическими процессами производства асфальтобетонных смесей // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2023. Т. 19. № 5. С. 16-22.
3. Горелка сушильного барабана на АБЗ: виды, принцип работы, развитие технологий. URL: <https://nflg.ru/stati/post/gorelka-sushilnogo-barabana-na-abz-vidy-princip-raboty-razvitiye-tehnologij>.
4. Тарарушкин Е.В. Применение нечеткой логики для оценки физического износа несущих конструкций зданий // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2016. Т. 1 № 10. С. 77-82.
5. Дроздов К.Д., Кашеварова Г.Г. Функция принадлежности в дефектоскопии // Современные технологии в строительстве. Теория и практика. 2021. Т. 1. С. 26-34.
6. Макаш И.С., Бурковский В.Л. Структура системы управления технологическим процессом сушки основного отхода производства в спиртовой отрасли // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2012. Т. 8. № 11. С. 152-154.
7. Макаш И.С. Интеллектуализация процесса управления потенциально опасным производством на основе гибридной модели прогноза динамики состояния (на примере сушки барды): дис. ... канд. техн. наук: 05.13.01. Воронеж, 2016. 155 с.

Поступила 15.01.2024; принята к публикации 29.02.2024

### Информация об авторах

**Волков Иван Николаевич** – аспирант кафедры электропривода, автоматике и управления в технических системах, Воронежский государственный технический университет (394006 Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), тел.+7 (908)141-26-12, e-mail: [ivan1900volkov@mail.ru](mailto:ivan1900volkov@mail.ru), ORCID <https://orcid.org/0000-0003-4196-5688>

**Бурковский Виктор Леонидович** – д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой электропривода, автоматике и управления в технических системах, Воронежский государственный технический университет (394006 Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), тел.+7 (473) 243-77-20, e-mail: [bvl@vorstu.ru](mailto:bvl@vorstu.ru)

**Шелякин Валерий Петрович** – канд. техн. наук, доцент, заведующий кафедрой электромеханических систем и электрооборудования, Воронежский государственный технический университет (394006 Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), тел +7 (473) 243-79-69, e-mail: [437712@mail.ru](mailto:437712@mail.ru)

## INTELLIGENTIZATION OF DECISION MAKING IN THE SYSTEM MANAGEMENT OF THE TECHNOLOGICAL PROCESS OF ASPHALT CONCRETE MIXTURE PRODUCTION

I.N. Volkov, V.L. Burkovsky, V.P. Shelyakin

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

**Abstract:** highways are an important part of the country's industrial infrastructure. Moreover, their reliability and durability are determined by the quality of the road surface based on asphalt concrete mixtures. Reducing the costs of producing asphalt concrete mixtures requires the development of automation tools, including those based on the intellectualization of relevant control processes. The technology for the production of asphalt concrete mixtures includes the following stages: preparatory, main and final, within each of which processes are carried out that are interconnected. A large number of uncontrolled sources of external and internal disturbances in the process of controlling the technological process for the production of asphalt concrete mixtures, the high dynamics of changes in control parameters, significantly complicate their formalization. The article describes the main production stages of the technological process, as well as their algorithmization. In addition, the main stage associated with maintaining the temperature of the mixture when mixing materials using a gas burner, which is described in terms of fuzzy logic, is highlighted. The dependence was determined for a certain volume of gas supply per m<sup>3</sup> and temperature, as a result, membership functions were formed, as well as transition matrices for different control options. This material may be useful to developers of tools for intellectualizing the control of technological processes with uncertain parameters

**Key words:** asphalt concrete mixture, algorithmization of technological processes, intellectualization, fuzzy logic, membership function, gas burner, transition matrix

### References

1. Burkovsky V.L., Volkov I.N. "Problems of managing technological processes in road construction", *The Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2023, vol. 19, no. 2, pp. 15-20.
2. Volkov I.N., Burkovsky V.L. "Algorithmization of control of technological processes in the production of asphalt concrete mixtures" *The Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2023, vol. 19, no. 5, pp. 16-22.
3. "Dryer drum burner at asphalt plant: types, principle of operation, technology development", available at: URL <https://nflg.ru/stati/post/gorelka-sushilnogo-barabana-na-abz-vidy-princip-raboty-razvitie-tehnologij/>
4. Tararushkin E.V. "Application of fuzzy logic to assess the physical wear and tear of non-essential building structures", *The Bulletin of Belgorod State Technological University (Vestnik Belgorodskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta)*, 2016, vol. 1, no. 10, pp. 77-82.
5. Drozdov K.D., Kashevarova G.G. "Membership function in flaw detection", *Modern technologies in construction. Theory and practice (Sovremennyye tekhnologii v stroitel'stve. Teoriya i praktika)*, 2021, vol. 1. pp. 26-34.
6. Makash I.S., Burkovsky V.L. "Structure of the control system for the technological process of drying the main production waste in the alcohol industry", *The Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2012, vol. 8, no. 11, pp. 152-154.
7. Makash I. S. "Intellectualization of the process of managing potentially hazardous production based on a hybrid model for forecasting the dynamics of the state (using the example of drying stillage)", Cand. dissertation (Technical), 05.13.01, Voronezh State Technical University, 2016, 155 p.

Submitted 15.01.2024; revised 29.02.2024

### Information about the authors

**Ivan N. Volkov** – Postgraduate Student, the Department of Electric Drive, Automation and Control in Technical Systems, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Ocyabrya str., Voronezh 394006, Russia), tel.: +7 (908) 141-26-12, e-mail: [ivan1900volkov@mail.ru](mailto:ivan1900volkov@mail.ru), ORCID <https://orcid.org/0000-0003-4196-5688>

**Viktor L. Burkovsky** – Dr. Sc. (Technical), Professor, Head of the Department of Electric Drive, Automation and Control in Technical Systems, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Ocyabrya str., Voronezh 394006, Russia), tel. +7 (473) 243-77-20, e-mail: [bvl@vorstu.ru](mailto:bvl@vorstu.ru)

**Valeriy P. Shelyakin** – Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Head of the Department of Electromechanical Systems and Power Supply, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Ocyabrya str., Voronezh 394006, Russia), tel.: +7 (473) 243-79-69, e-mail: [437712@mail.ru](mailto:437712@mail.ru)

## РАЗРАБОТКА RC-ГЕНЕРАТОРА ДЛЯ ОТЕЧЕСТВЕННОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА

А.В. Белявцев<sup>1</sup>, А.В. Русанов<sup>2</sup>, Т.С. Шайкина<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:** предложен сложно-функциональный (СФ/ИР) блок RC-генератора, построенный на МОП-транзисторах. Генератор является блоком тактирования для большого числа электронных устройств, не требовательных к стабильности частоты, но чувствительных к размеру. Данный блок предназначен для применения в составе интегральных схем стабилизаторов напряжения. Приведено описание электрической схемы генератора, его основные электрические характеристики и результаты моделирования (зависимости частоты генератора и его тока потребления от температуры и напряжения питания схемы, получены значения нестабильности частоты и зависимость частоты генератора от технологических отклонений, температуры и напряжения питания). Сделан вывод об относительной стабильности характеристик генератора при изменениях внешних параметров и технологических флуктуаций. Приведена топология разработанного СФ блока RC-генератора. Генератор разработан на базе отечественного технологического процесса с проектными нормами 180 нм. Разработка схемы и топологии проводилась в специализированной системе автоматизированного проектирования работ (САПР) интегральных схем. Для моделирования схемы использовались математические модели полупроводниковых приборов, предоставленные фабрикой изготовителем. Топология генератора прошла успешную верификацию на соблюдение проектных норм (Design rule check, DRC) и соответствия топологии исходной схеме (Layout vs. Schematic, LVS)

**Ключевые слова:** генератор, интегральная схема, микросхема, аналоговый ИР-блок

### Введение

Генераторы являются универсальными блоками, на основе которых можно построить множество различных электронных узлов. В настоящее время генераторы изготавливаются как в виде отдельных микросхем, так и в виде ИР-блоков в составе интегральных схем [1]. Данный блок предназначен для применения в составе интегральных схем стабилизаторов напряжения. Его отличительной особенностью является малая площадь на кристалле интегральной схемы при сравнительно небольшом отклонении частоты в диапазоне температур и напряжений.

### RC-генератор на МОП-транзисторах.

#### Описание работы и основные характеристики

Принципиальная электрическая схема генератора (рис. 1) состоит из схемы разрешения работы (блок 1), время задающей цепи (блок 2), схемы выбора частоты (блок 3) и выходного буфера (блок 4).

При подаче логической “1” на вход «en» генератор начинает свою работу, при этом частота генерации зависит от значения на входе «x2». В зависимости от уровня сигнала на входе «x2» частота генератора может принимать одно из значений: 1,2 МГц (при напряжении на входе равном нулю, далее «x2» = “0”) или 2,3 МГц (при напряжении на входе равном напряжению питания, далее «x2» = “1”). С помощью схемы выбора частоты (блок 3 рис. 1) меняется конфигурация схемы включения время задающей цепи (блок 2 рис. 1): в общую схему генератора добавляется или исключается один конденсатор, что оказывает влияние на время переключения задающего инвертора и на частоту переключения всего генератора в целом.

Выходной буфер (блок 4 рис. 1) представляет собой несколько последовательно соединенных цифровых инверторов и предназначен для согласования генератора с нагрузкой.

Основные электрические характеристики разработанной схемы приведены в табл. 1.

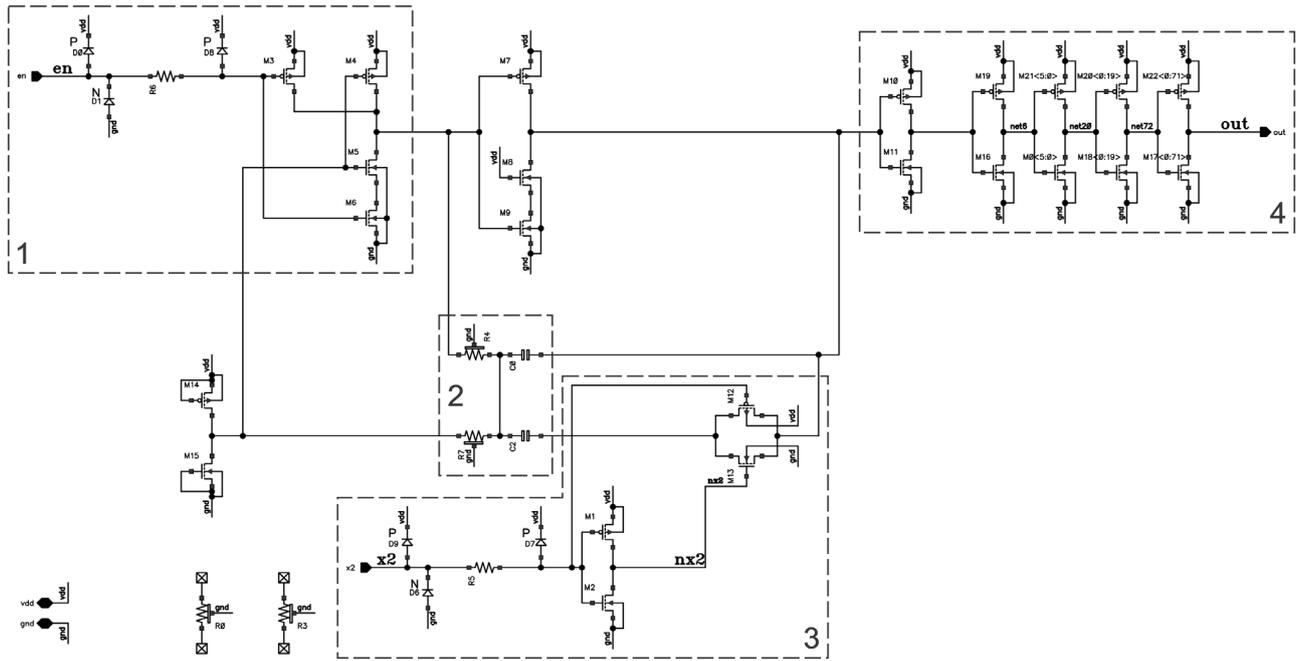


Рис. 1. Принципиальная схема генератора

Таблица 1

Основные электрические характеристики генератора

Параметр	Обозн.	Значение	Ед. изм.
Напряжение питания	V	1,8 – 3,3	V
Частота генерации	F	1,2 / 2,3	МГц
Нестабильность	$\Delta F$	$\pm 9$	%
Ток потребления		$< 100$	мкА
Рабочая температура	T	от -60 до +125	$^{\circ}\text{C}$

В процессе производства интегральных схем из-за несовершенства оборудования, недостаточной точности в повторяемости технологических операций, неточного совмещения масок, наличия внешних и внутренних электрических полей на пластине возникает разброс технологических параметров (как правило, кристаллы, расположенные в центре пластины, имеют параметры, наиболее приближенные к ожидаемым). При этом даже на одном кристалле абсолютно одинаковые элементы (неважно – резисторы, конденсаторы или транзисторы с одинаковыми физическими размерами), расположенные на небольшом расстоянии друг от друга, могут иметь незначительные расхождения в параметрах. Для снижения разброса параметров однотипных

рядом располагающихся элементов требуется их согласование (например, введение «dummy» элементов), поскольку такие отклонения в параметрах неизбежно сказываются на характеристиках итоговой схемы [2]. Ещё на этапе разработки схемотехнического решения следует проводить тестирования с учётом этих технологических отклонений. Современные средства разработки интегральных схем предоставляют возможность такого анализа [3].

Для исследования схемы было создано тестовое окружение (рис. 2). Оно включает в себя саму схему с ёмкостной нагрузкой и источником питания, а также источники питания, необходимые для задания входных воздействий на входах «en» и «x2».

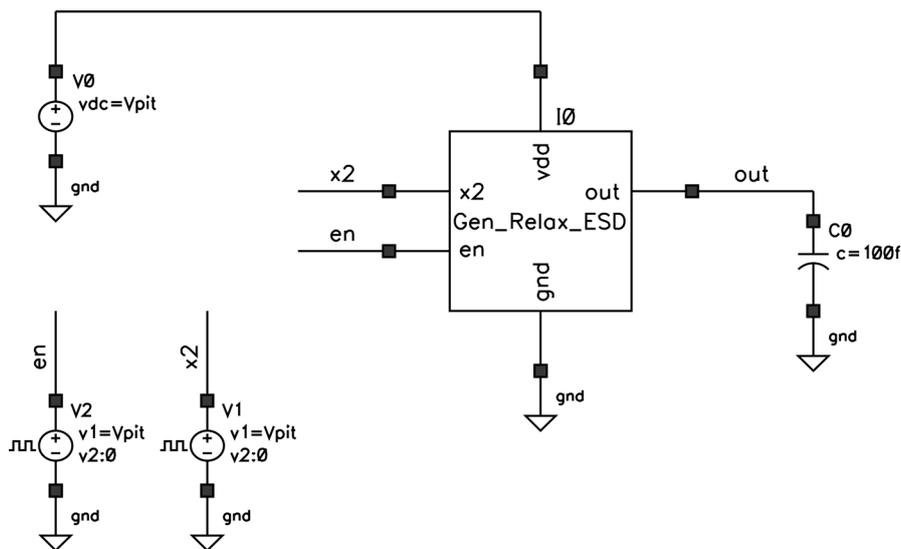


Рис. 2. Тестовое окружение

Результат моделирования схемы при воздействии на входы «en» «x2» и соответствующее

им изменение частоты при температуре 25 °С и питании 1,8 В представлены на рис. 3.

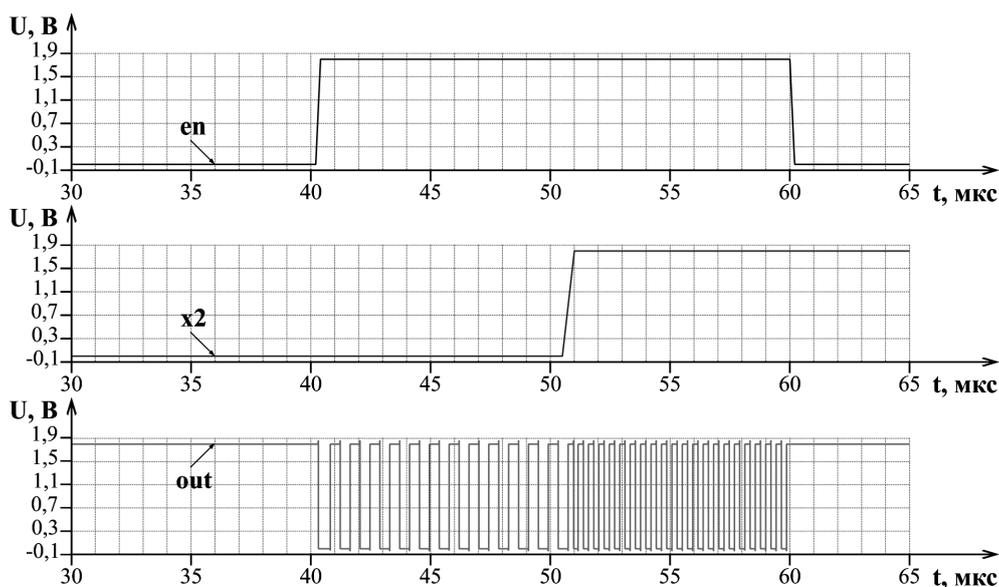


Рис. 3. Зависимость частоты генератора от состояния сигналов на входах «en» и «x2»

Зависимость частоты генератора по результатам моделирования схемы с учетом изменения температуры окружающей среды и напряжения питания отражена на рис. 4, 5.

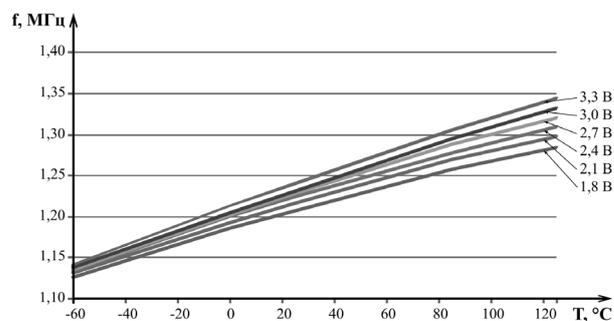


Рис. 4. Зависимость частоты генератора от температуры и напряжения питания при «x2» = «0»

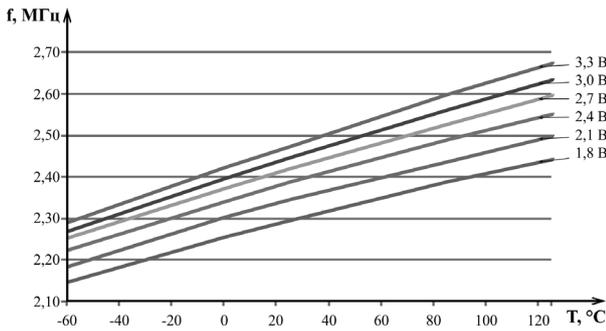


Рис. 5. Зависимость частоты генератора от температуры и напряжения питания при «x2» = «1»

В табл. 2 и 3 приведены значения отклонение частоты, выраженное в процентах к её величине при 25 °С для крайних значений температур при различных напряжениях питания, и отклонение в процентах частоты при «x2» = «1» от удвоенного значения частоты при «x2» = «0» при одних и тех же значениях температуры и питания.

По графикам на рис. 4, 5 и табл. 2 можно сделать вывод о практически линейной зависимости частоты от температуры и в меньшей степени от напряжения питания схемы.

Таблица 2

Отклонение частоты для крайних значений температур при различных напряжениях питания

V, В	-60		125	
	«x2» = «0»	«x2» = «1»	«x2» = «0»	«x2» = «1»
1,8	6,71	6,49	6,38	6,36
2,1	6,98	6,95	6,66	6,43
2,4	7,35	6,91	6,94	6,83
2,7	7,57	6,94	7,49	7,27
3,0	7,55	7,23	8,20	7,64
3,3	8,06	7,48	8,39	8,04

В схеме время задающей цепи используются две ёмкости с одинаковым номиналом, что даёт почти двукратное изменение частоты. Табл. 3 показывает, насколько отклоняется частота при подключении/отключении дополнительной ёмкости того же номинала от «идеальной» удвоенной частоты. Можно сделать вывод, что при использовании других схемотехнических решений (например, деление частоты с помощью триггера) ожидается повышение точности частоты, но в ущерб потреблению.

Таблица 3

Отклонение частоты при «x2» = «1» от удвоенного значения частоты при «x2» = «0»

T, °C \ V, В	-60	0	25	85	125
1,8	4,7	4,9	4,9	5,0	4,9
2,1	3,5	3,5	3,6	4,0	3,8
2,4	2,0	2,5	2,5	2,5	2,6
2,7	0,8	1,3	1,5	1,9	1,7
3,0	0,3	0,5	0,6	1,2	1,1
3,3	-0,4	0,0	0,2	0,5	0,6

На рис. 6, 7 показаны аппроксимированные графики усреднённого значения тока потребления схемы при «x2» равном логическому «0» и «1» соответственно.

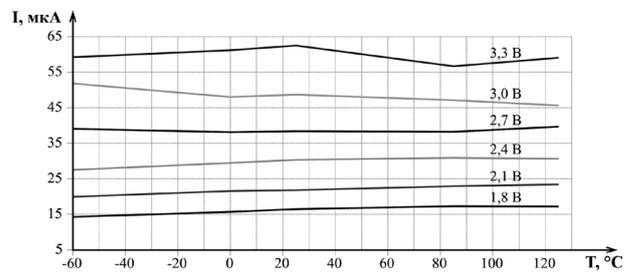


Рис. 6. Зависимость тока потребления от температуры и напряжения питания при напряжении на входе «x2» = «0»

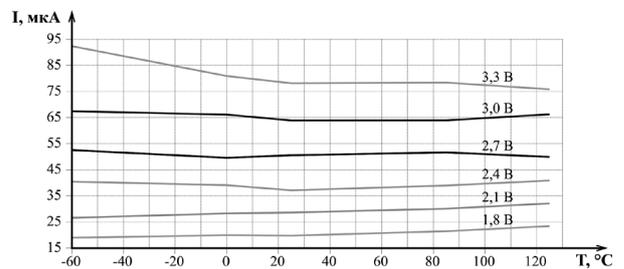


Рис. 7. Зависимость тока потребления от температуры и напряжения питания при напряжении на входе «x2» = «1»

По рис. 6, 7 можно отметить ожидаемое увеличение тока потребления с ростом напряжения питания и частоты. В диапазоне температур изменения незначительны.

На графиках рис. 8 представлены результаты моделирования частоты генератора в диапазоне температур и напряжений с «быстрыми» и «медленными» моделями используемых МОП-транзисторов. Характерная «ступенька» (переключение частоты с 1,2 МГц в 2,3 МГц), обусловлена подключением/отключением ёмкости в блоке выбора частоты.

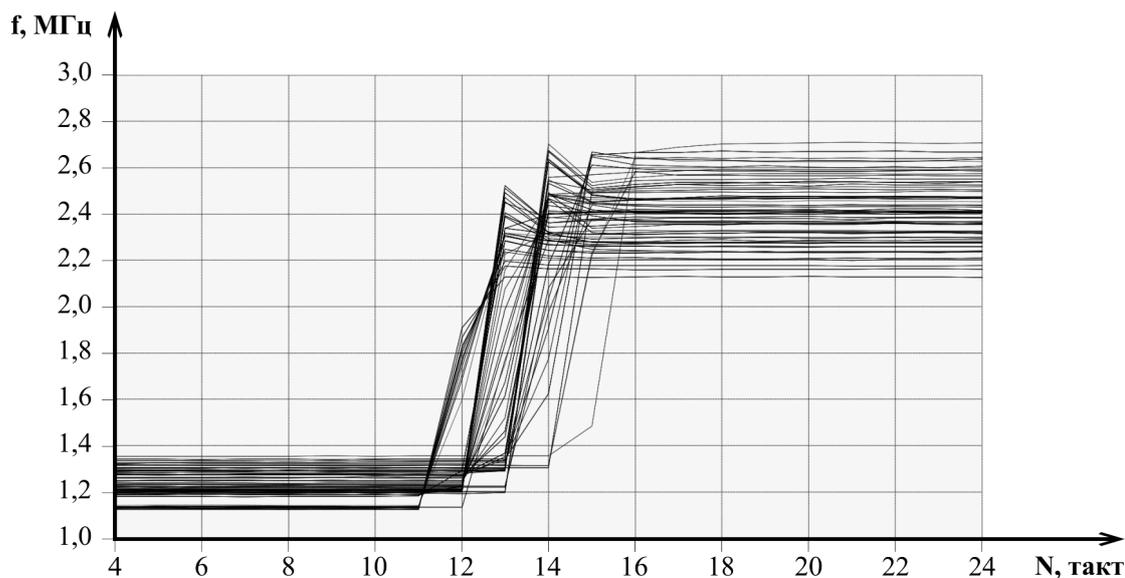


Рис. 8. Зависимость частоты генератора от технологических отклонений, температуры и напряжения питания

Из графиков на рис. 8 можно сделать вывод об относительной стабильности характеристик генератора при изменениях внешних параметров (напряжение питания и температура) и технологических флуктуаций МОП-транзисторов. Но учитывая большую нестабильность пассивных компонентов, схема требует использования подстроечных компонентов. Их введение в схему в значительной степени снизит зависимость от технологических отклонений на производстве [4].

### Топология интегральной схемы

При разработке интегральных микросхем критически важным является компактное расположение элементов на минимальной площади кристалла, так как от этого зависит не только цена кристалла, но и согласование элементов [2, 5].

На рис. 4 изображено расположение элементов, входящих в блок RC-генератора, и их соединения. Размеры топологии с ESD защитной структурой и выводами составила  $340 \times 291$  (мкм  $\times$  мкм). Непосредственно сам генератор без ESD защиты и выводов  $88 \times 35$  (мкм  $\times$  мкм).

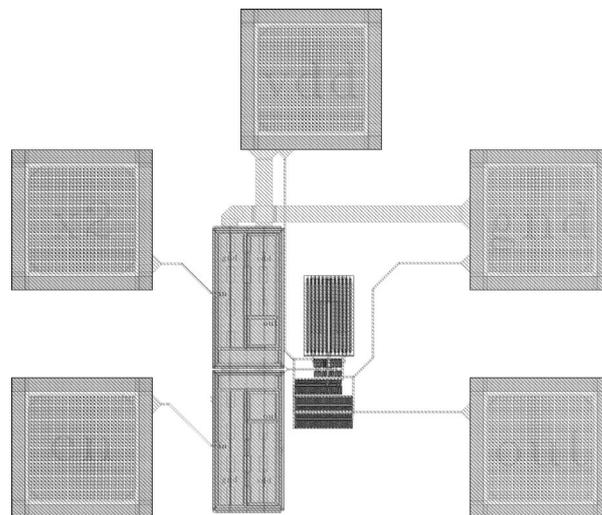


Рис. 9. Топология схемы генератора

### Заключение

В данной статье представлен IP-блок RC-генератора, разработанный для отечественного технологического процесса с проектными нормами 180 нм.

Микросхема выполнена по государственному заданию Минобрнауки в прикладной НИР «Разработка методики прототипирования электронной компонентной 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. Интегральная схема [Электронный ресурс]: Википедия. Свободная энциклопедия. URL: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Интегральная\\_схема](https://ru.wikipedia.org/wiki/Интегральная_схема) (дата обращения: 09.11.2023).
2. Рабаи Жан М. «Цифровые интегральные схемы, 2-е издание»: Пер. с англ. М.: ООО «И.Д. Вильямс», 2007. 912 с.

3. Cadence Analog Design Environment User Guide. Product Version 5.0, 2003, 480 p.
4. Коледов Л.А. «Технология и конструкции микросхем, микропроцессоров и микросборок»: Учебник для вузов. М.: Радио и связь, 1989. 400 с.
5. Эннс В.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.

Поступила 14.11.2023; принята к публикации 12.12.2023

**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, ассистент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: ralval@rambler.ru  
**Шайкина Татьяна Сергеевна** – студент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: tatiyana\_2003@mail.ru

**RC OSCILLATOR FOR A DOMESTIC TECHNOLOGICAL PROCESS**

**A.V. Belyavtcev<sup>1</sup>, A.V. Rusanov<sup>2</sup>, T.S. Shaikina<sup>2</sup>**

**<sup>1</sup>Research Institute of Electronic Technology, Voronezh, Russia**  
**<sup>2</sup>Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia**

**Abstract:** a functional block (IP) of RC oscillator is proposed. The oscillator is a clocking unit for a large number of electronic devices where frequency stability is not required, but small die size is important. This block is intended for use as part of integrated circuits of voltage regulators. The description of the electrical circuit of the oscillator with electrical specs as well as simulation results are presented. We obtained the following characteristics: oscillator frequency and current consumption plot versus temperature and supply voltage, frequency instability due to process, temperature and voltage variations. Then we have considered the relative stability of the oscillator characteristics under changes in external conditions and technological fluctuations. We present the RC oscillator IP block layout. The oscillator is designed in Russian 180 nm CMOS process. The circuit and layout design were carried out in a specialized IC design CAD system. The mathematical models of semiconductor devices provided by the manufacturer were used to simulate our circuit. The oscillator layout has been successfully verified for compliance with design rules (Design rule check, DRC) and comparing the layout with the schematic (Layout vs. Schematic, LVS)

**Key words:** oscillator, integrated circuit, microcircuit, analog IP block

**References**

1. “Integrated circuit”, Wikipedia. The Free Encyclopedia, available at: [https://en.wikipedia.org/wiki/Integrated\\_circuit](https://en.wikipedia.org/wiki/Integrated_circuit) (accessed 09.11.2023).
2. Rabaey Jan M. and oth “Digital integrated circuits” (“Tsifrovyye integral'nyye skhemy”), 2-nd edition, trans. from Eng., Moscow, I.D. Viliams, 2007, 912 p.
3. “Cadence Analog Design Environment User Guide”, Product Version 5.0, 2003, 480 p.
4. Koledov L.A. “Technology and designs of microcircuits, microprocessors and microassemblies” (“Tekhnologiya i konstruktssii mikroskhem, mikroprotssessorov i mikrosborok”), Textbook for universities, Moscow Radio i svyaz, 1989, 400 p.
5. Enns V.I. “Design of analog C-MOS microcircuits” (“Proyektirovaniye analogovykh K-MOP mikroskhem”), Developer's quick reference guide, ed. by V.I. Enns, Yu.M. Kobzev, 2-nd edition, Moscow, Goryachaya liniya – Telekom, 201, 454 p.

Submitted 14.11.2023; revised 12.12.2023

**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), assistant, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Ocyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: ralval@rambler.ru  
**Tatyana S. Shaikina** – Student, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Ocyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: tatiyana\_2003@mail.ru

## ВЛИЯНИЕ ГЕОМЕТРИИ АНТЕННОЙ РЕШЕТКИ НА ПЕРЕДАЧУ ДАННЫХ В МАССИВНЫХ СЕТЯХ МІМО

О.Н. Чирков, Ю.М. Пшеницина

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

**Аннотация:** исследуется влияние геометрии антенной решетки на производительность сетей массивных МІМО при передаче данных внутри помещений. Многопользовательские массивные системы пространственного кодирования сигнала с множественными входами и множественными выходами (системы из нескольких антенн МІМО) будут играть ключевую роль в будущих сетях беспроводной связи. Различие между каналами пространственного разнесения представляет собой ключевое преимущество технологии многоантенного кодирования, сильная зависимость между каналами имеет потенциал ограничить качество и эффективность передачи информации. Исследование направлено на изучение воздействия корреляции между каналами на прототипную модель МІМО сети с целью определения оптимальной геометрии антенной решетки, которая минимизирует взаимное влияние и корреляцию сигналов в каналах. В результате исследования был разработан эффективный высоконаправленный широкополосный одиночный антенный элемент, предназначенный для использования в антенных решетках и оборудовании для конечных пользователей. Предложенная модель антенной решетки протестирована в экспериментальной широкополосной модели для массивных МІМО в помещении. В канале проведен анализ следующих системных параметров: корреляция каналов, профили задержек и средняя мощность. Кроме того, на основе измеренных данных канала выполняются моделирование на системном уровне и расчеты пропускной способности сети с множественными входами и множественными выходами, а также оценка производительности разработанных прототипированных антенных решеток. Для сравнительного анализа разработана тестовая матрица. Результаты показывают, что измененная геометрия антенной решетки превосходит однородную антенную решетку с точки зрения взаимной связи и пропускной способности канала

**Ключевые слова:** антенная решетка, пропускная способность, модуляция, кодирование сигнала, МІМО

### Введение

Подключение множества антенн к базовым станциям значительно повышает пропускную способность сети за счет использования пространственного разделения частотных ресурсов для одновременного соединения с несколькими устройствами. Кроме того, передача данных одновременно через несколько антенн повышает энергоэффективность за счет использования более высокого коэффициента усиления антенны и фокусировки электромагнитной энергии на желаемом источнике питания.

В ряде работ были исследованы массовые каналы МІМО в условиях прямой видимости и вне прямой видимости, проведены оценки их производительности. Анализ профилей задержек мощности и характеристик корреляции каналов массивных сетей МІМО для передачи данных внутри помещения представлены в [1]. Однако в этом исследовании используются антенные решетки, построенные путем смещения одного антенного элемента по осям  $x$  и  $y$ , таким образом, не учитывается взаимная связь и искажение диаграммы направленности, вызванное расположенными поблизости антен-

ными элементами. Производительность широкополосных беспроводных сетей МІМО с массивами однородных линейных антенн и однородных цилиндрических антенн исследована в работе [2]. Анализ показал, что массив линейных антенн работает значительно лучше цилиндрических в условиях прямой видимости, поскольку он занимает гораздо большее пространство в горизонтальной плоскости. В исследовании [3] рассмотрено воздействие взаимосвязи и корреляции каналов на многоантенные системы МІМО с использованием математических моделей. Было выявлено, что оба эти фактора существенно уменьшают спектральную эффективность. С другой стороны, определенные антенные компоненты могут оказывать более заметное воздействие на общую производительность системы из-за различий в затухании сигналов, принимаемых этими элементами, а также из-за их местоположения в решетке.

В данной работе исследовано влияние геометрии антенной решетки для широкополосных сетей массивных МІМО для связи внутри помещений, проведена оценка производительности по корреляции каналов.

### Проектирование антенной решетки

В работе исследован массив ММО для базовых станций из 18 антенных элементов. Изменение взаимной связи и корреляции каналов в крупных антенных решетках относительно центрального антенного элемента будет минимальным из-за соотношения длины волны и расстояния между ними. Следовательно, для исследования взаимной связи и корреляции каналов и их влияния на производительность сети может быть достаточно использовать прототип относительно небольших антенных решеток (18 элементов).

На основе технологии подвесной пластинчатой антенны разработан одиночный антенный элемент, где между заземляющей плоскостью и активными антенными слоями

(см. рис. 1) имеется воздушный зазор. Предложенный метод размещения способствует улучшению эффективности излучения и увеличению полосы пропускания по сравнению с микрополосковыми антеннами. В качестве подложки для активного элемента используется плата Rogers. Плоскость заземления размещена на стандартной плате FR4. Размер активной накладки составляют  $17,4 \times 12,8$  мм. Порт прямой подачи (SMA) расположен на 3,52 мм ниже верхнего края активного элемента. Оптимальный воздушный зазор между заземляющим и активными антенными слоями составляет 5 мм. Размеры получены с помощью CST Microwave Studio, эффективность излучения одного элемента достигает 92 %.

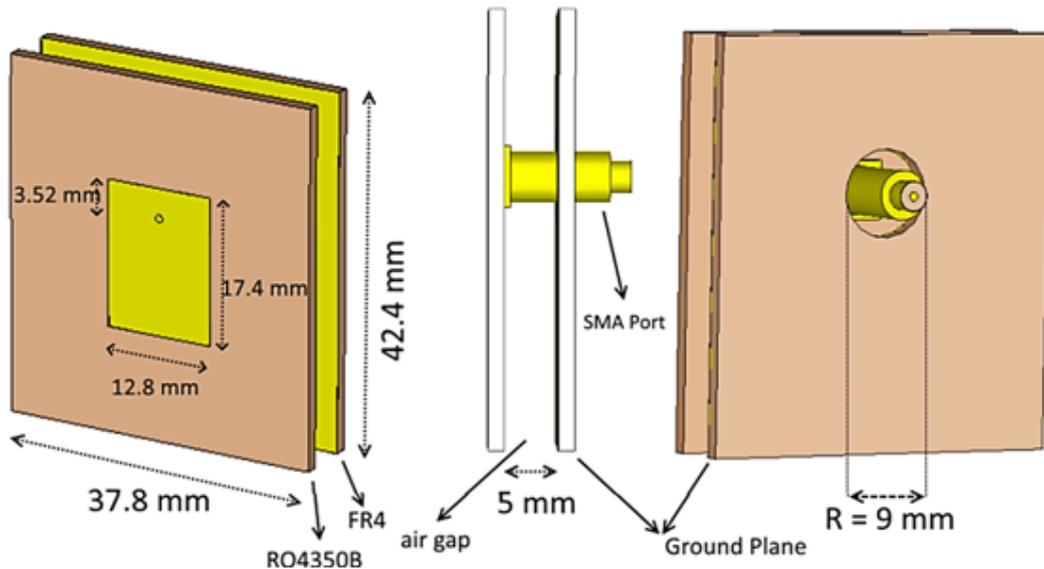


Рис. 1. Одиночный антенный элемент: (а) вид спереди, (б) сбоку и (в) сзади

Антенные решетки заполнены копиями описанного антенного элемента. Спроектированы антенные решетки с однородной прямоугольной структурой (ОПС) (рис. 2, а) и сдвинутой прямоугольной структурой (СПС) (рис. 2, б). Решетки имеют одинаковый физический размер. Количество антенных элементов составляет  $3 \times 6$ , а расстояние между двумя соседними элементами составляет 25 мм ( $\approx 0,36\lambda$ ) по горизонтальной оси и 32 мм ( $\approx 0,5\lambda$ ) по вертикальной оси. Каждый элемент антенной сетки будет иметь приблизительно одинаковое распределение электрического по-

ля и диаграмму направленности излучения. На рис. 2 представлены комбинированные диаграммы направленности для однородной прямоугольной сетки антенн, сдвинутой по оси  $y$  на частоте 4,4 ГГц. Фазовые значения элементов равны нулю. Диаграммы направленности рассмотренных антенных решеток ОПС и СПС идентичны по горизонтальной плоскости.

В вертикальной плоскости сдвинутая решетка имеет более широкую диаграмму направленности из-за смещенных элементов. СПС имеет меньший коэффициент усиления, чем ОПС, данные приведены на рис. 3.

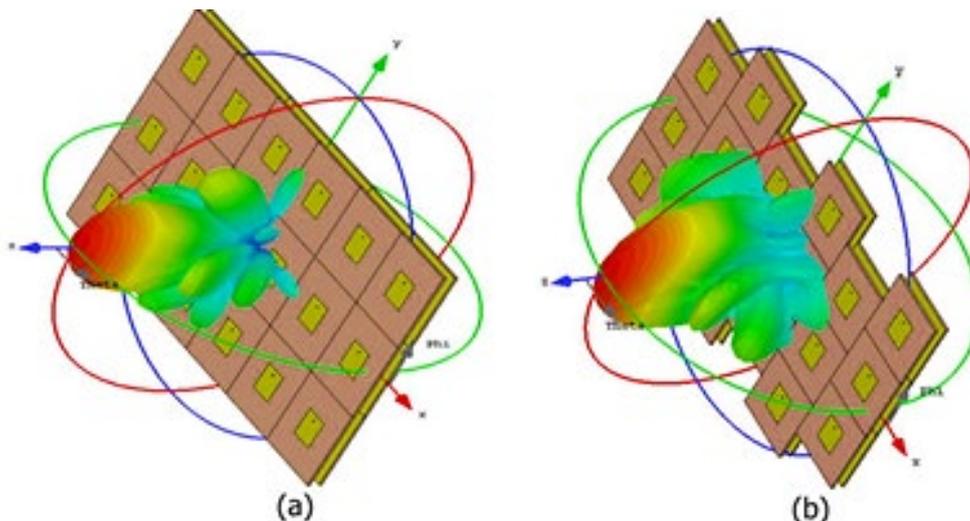


Рис. 2. Диаграммы направленности решеток: (а) ОПС, (б) СПС

Основной причиной, по которой СПС имеет более низкий коэффициент усиления, является его более широкая диаграмма направленности в вертикальной плоскости. В свою очередь более широкая диаграмма направленности вызвана смещением элементов по вертикали, что уменьшает количество мощности в поле зрения антенны.

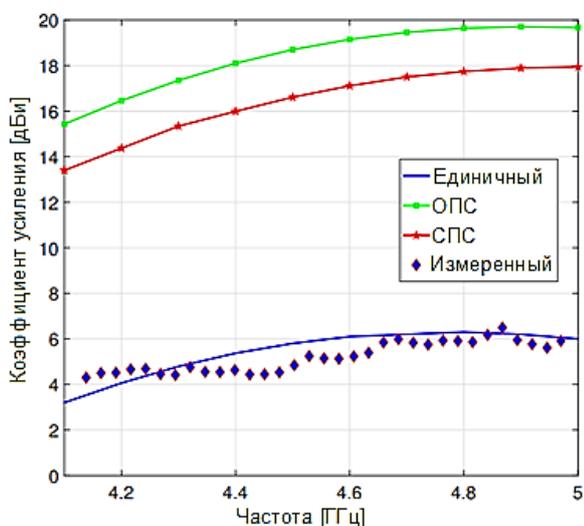


Рис. 3. Коэффициенты усиления одиночного элемента и антенных решеток ОПС и СПС

Взаимодействие между антенными элементами в решетке вызывает корреляцию между антенными каналами в результате электромагнитного воздействия. Этот эффект усиливается при приближении элементов друг к другу. Обычно корреляция более выражена в центральных элементах, так как они полностью окружены другими элементами. Влияние взаимных связей спроектированных антенных

решеток ОПС и СПС смоделировано в CST Microwave Studio.

### Моделирование

Моделирование проводилось с помощью микроволнового сетевого анализатора Keysight N5242A в безэховой камере. Для калибровки, измерения усиления и диаграммы направленности использовалась эталонная антенна Aaronia HyperLOG 3080 – логарифмическая периодическая антенна с почти постоянным усилением 5 дБи в диапазоне от 380 МГц до 8 ГГц.

Сетевой анализатор Keysight N5242A имеет 4 порта, которые поочередно подключались к выбранным 4 элементам решетки, на оставшиеся элементы антенны подключалась нагрузка 50 Ом. Таким образом, были измерены все возможные пары взаимных связей между всеми антенными портами для рассматриваемых моделей антенн ОПС и СПС. Результаты моделирования показывают, что взаимная связь в массиве со сдвинутой решеткой СПС ниже -20 дБ, в то время как в массиве ОПС она достигает -15 дБ, результаты отражены на рис. 4.

На иллюстрации изображены связи только между центральными элементами массивов из-за максимального числа взаимосвязанных элементов. Для удобства взаимодействие с другими элементами здесь не представлено, так как они обладают аналогичными или более низкими уровнями связи. Высокая взаимная связь также ухудшает пропускную способность в дополнении к искажению диаграммы направленности. Следовательно, можно ожидать, что геометрия СПС будет превосходить ОПС и по пропускной способности.

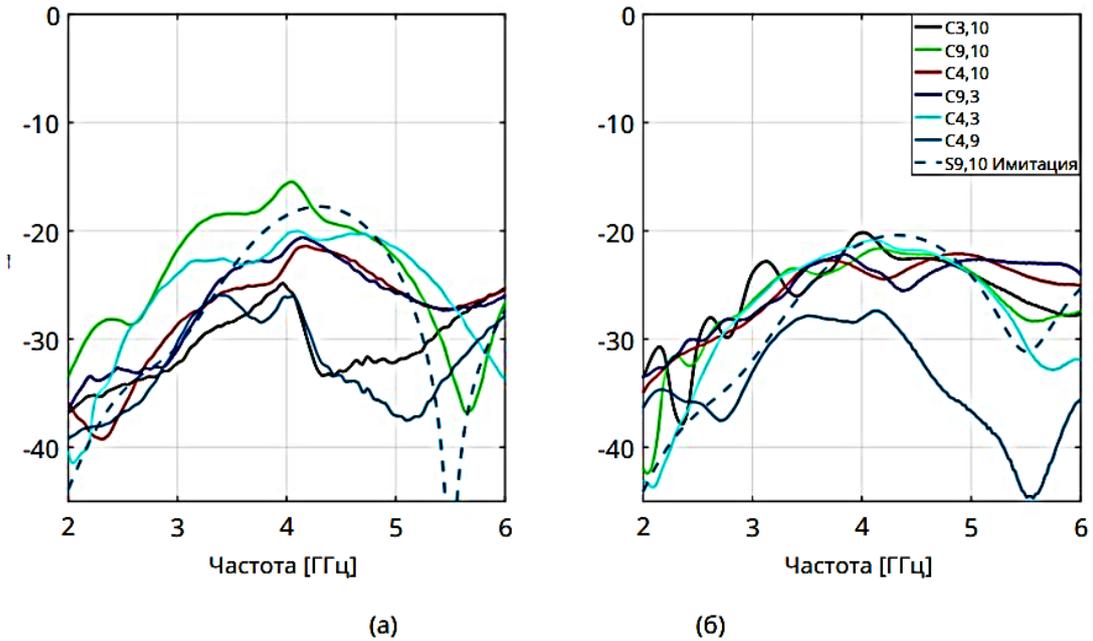


Рис. 4. Измеренные взаимные связи в (а) ОПС и (б) СПС

### Численный результат

В данном разделе проведено моделирование OFDM MIMO на системном уровне с использованием набора данных канала, полученных в ходе измерений. Для этого использовались данные измерений канала с шириной полосы 500 МГц в диапазоне от 4,1 ГГц до

4,6 ГГц, чтобы обеспечить почти постоянный коэффициент усиления антенны, избегая граничных частот полосы пропускания. Полоса пропускания была разделена на 5000 поднесущих для OFDM, что дало полосу пропускания 100 кГц для каждой из них. В табл. 1 приведены числовые параметры, использованные в процессе моделирования.

Таблица 1

Параметры системы массива MIMO

Параметры	Описание	Значение
M	Количество антенн	18
K	Антенные элементы	8
B	Общая полоса	15МГц
$\Delta f$	Полоса пропускания поднесущей OFDM	100кГц
N	Количество поднесущих OFDM	5000
$p_{max}$	Максимальная мощность передачи	30дБ
R	Коэффициент ослабления отражения	0,5
	Схема модуляции	128-QAM

Для получения благоприятных каналов Райсовский к-фактор выбирается равным 0,1, который обеспечивает богатое рассеяние за счет уменьшения мощности путей потерь. Количество путей равно  $L = 15$ . Суммарное максимальное усиление антенн передатчика и приемника вдоль каждого тракта 6 дБ. Передача сигнала OFDM включает в себя пилотную оценку [4, 5] нисходящую линию связи и восходящую линию связи в определенной последовательности. Во время пилотной оценки передатчики передают ортогональные пилотные

символы, в то время как базовые станции оценивает канал с помощью оценщика MMSE [6]. На рис. 5 показана минимальная квадратичная ошибка (MMSE) оценки канала при различных значениях сигнал/шум SNR, когда в базовых станциях используется ОПС или СПС и идеальный канал.

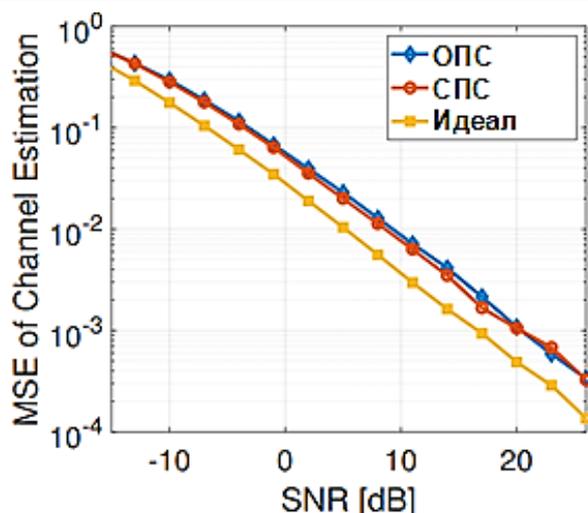


Рис. 5. Ошибки оценки огибающей сигнала с помощью оценщика MMSE

Средство оценки канала MMSE работает лучше при использовании СПС, поскольку оно имеет более низкую взаимную связь и корреляцию каналов [7] по сравнению с ОПС. Пропускная способность восходящей линии связи сети анализировалась с использованием модуляции 128-QAM.

Различия между пропускной способностью канала и результатами моделирования при более низких значениях SNR наблюдаются из-за использования схемы модуляции высокого порядка.

### Заключение

В работе представлена геометрия антенной решетки со сдвинутой прямоугольной структурой (СПС) для MIMO. Предложенная геометрия антенной решетки была сравнена с однородной прямоугольной конфигурацией по таким аспектам, как взаимная связь, корреляция каналов и пропускная способность сети. Исследование продемонстрировало, что даже при относительно небольшом размере антенной решетки ( $3 \times 6$ ) и при различных условиях канала MIMO может обеспечить высокую пропускную способность для нескольких пользователей. По результатам исследования было выяв-

лено, что предложенная схема превосходит однородную схему с прямоугольной геометрией. Она позволяет снизить взаимную связь между антенными элементами и уменьшить корреляцию между каналами, особенно в условиях распространения с потерями [8]. Мобильность пользователей в закрытых помещениях очень низкая, следовательно, внедрение точек доступа MIMO является очень многообещающим решением для внутренних сетей высокой плотности, например, в современных офисах общего пользования. Учитывая физический размер массивов  $3 \times 6$  (достаточно малы, чтобы поместиться в точку доступа системы Wi-Fi), приведенная схема может увеличить пропускную способность сети в офисе.

### Литература

1. Spatial variation analysis for measured indoor massive mimo channels / Q. Wang, B. Ai, D. W. Matolak, R. He, K. Guan, Z. Zhong, D. Li // *IEEE Access*. 2017. Vol. 5. PP. 20828–20840.
2. Massive MIMO performance evaluation based on measured propagation data / X. Gao, O. Edfors, F. Rusek, F. Tufvesson // *IEEE Trans. Wireless Communications*. 2015. Vol. 14. No. 7. PP. 3899–3911.
3. On the performance of spatially correlated large antenna arrays for millimeter-wave frequencies / C.T. Neil, A. Garcia-Rodriguez, P.J. Smith, P. A. Dmochowski, C. Masouros, M. Shafi // *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 2018. Vol. 66. No. 1. PP. 132–148.
4. 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.
5. Чирков О.Н. Эффективный алгоритм динамического распространения пилот-сигналов для оценки канала радиосвязи в многоантенных системах MIMO с ортогональным частотным уплотнением OFDM // *Радиотехника*. 2019. Т. 83. № 6 (8). С. 163-168.
6. Чирков О.Н., Ромашенко М.А., Чепелев М.Ю. Современные методы оценки канала радиосвязи в условиях многолучевости // *Вестник Воронежского государственного технического университета*. 2019. Т. 15. № 3. С. 68-73.
7. Чирков О.Н. Методы оценки канала связи с пространственной модуляцией на основе корреляции // *Вестник Воронежского государственного технического университета*. 2021. Т. 17. № 4. С. 106-110.
8. Чирков О.Н., Ромашенко М.А., Бобылкин И.С. Эффективный метод моделирования систем беспроводной связи // *Радиотехника*. 2023. Т. 87. № 8. С. 110-115.

Поступила 29.01.2024; принята к публикации 12.03.2024

### 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>  
**Пшеницина Юлия Михайловна** – студент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: julea2002@gmail.com

**THE EFFECT OF ANTENNA ARRAY GEOMETRY ON DATA TRANSMISSION  
IN MASSIVE MIMO****O.N. Chirkov, Yu.M. Pshenitsina****Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia**

**Abstract:** the article examines the effect of the antenna array geometry on the performance of massive MIMO networks for indoor data transmission. Multi-user massive spatial signal encoding systems with multiple inputs and multiple outputs (systems of multiple MIMO antennas) will play a key role in future wireless communication networks. While spatial channel separation is a fundamental advantage of this encoding method, high channel correlation can significantly limit its capabilities and data transmission quality. The paper examines the effect of channel correlation on a prototyped MIMO network model in order to determine the geometry of the antenna array, which reduces the interconnection and correlation of channels. A highly efficient directional broadband single antenna element has been developed for antenna arrays and user equipment. The developed lattice geometry has been tested in an experimental broadband model for massive indoor MIMO. The following system parameters were analyzed in the channel: channel correlation, delay profiles and average power. In addition, based on the measured channel data, system-level modeling and calculations of network bandwidth with multiple inputs and multiple outputs are performed, as well as performance evaluation of the developed prototyped antenna arrays. A test matrix has been developed for comparative analysis. The results show that the modified geometry of the antenna array is superior to a homogeneous antenna array in terms of interconnection and channel capacity

**Key words:** antenna array, bandwidth, modulation, signal encoding, matrix, MIMO

**References**

1. Wang Q., Ai B., Matolak D. W., He R., Guan K., Zhong Z., Li D. "Spatial variation analysis for measured indoor massive mimo channels," *IEEE Access*, 2017, vol. 5, pp. 20828–20840.
2. Gao X., Edfors O., Rusek F., Tufvesson F. "Massive MIMO performance evaluation based on measured propagation data", *IEEE Trans. Wireless Communications*, 2015, vol. 14, no. 7, pp. 3899–3911.
3. Neil C. T., Garcia-Rodriguez A., Smith P. J., Dmochowski P. A., Masouros C., Shafi M. "On the performance of spatially correlated large antenna arrays for millimeter-wave frequencies" , *IEEE Transactions on Antennas and Propagation (TAP)*, 2018, vol. 66, no. 1, pp. 132–148.
4. Chirkov O. N., Romashchenko M. A., Bobylkin I. S. et al. "Pilot evaluation of the radio communication channel in MIMO-OFDM systems", *Proceedings of the International symposium "Reliability and quality" ("Trudy mezhdunarodnogo simpoziuma «Nadezhnost i kachestvo»)* , 2019, vol. 2, pp. 87-90.
5. Chirkov O.N. "An effective algorithm for dynamic propagation of pilot signals for evaluating a radio communication channel in multi-antenna MIMO systems with orthogonal frequency seal OFDM" , *Radio Engineering (Radiotekhnika)*, 2019, vol. 83, no. 6 (8), pp. 163-168.
6. Chirkov O. N., Romashchenko M. A., Chepelev M. Yu. "Modern methods of evaluating a radio communication channel in multipath conditions" , *The Bulletin of Voronezh State University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta)*, 2019, vol. 15, no. 3, pp. 68-73.
7. Chirkov O. N. "Methods of estimating a communication channel with spatial modulation based on correlation" , *The Bulletin of Voronezh State University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta)* , 2021, vol. 17, no. 4, pp. 106-110.
8. Chirkov O. N., Romashchenko M. A., Bobylkin I. S. "An effective method for modeling wireless communication systems" / O. N. Chirkov, *Radio engineering (Radiotekhnika)*, 2023, vol. 87, no. 8, pp. 110-115.

Submitted 29.01.2024; revised 12.03.2024

**Information about the authors**

**Oleg N. Chirkov** – Senior Lecturer, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: chir\_oleg@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2250-2100>

**Yuli M. Pshenitsina** – student, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: julea2002@gmail.com

## МИНИМИЗАЦИЯ КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ЧАСТИЧНО ПЕЧАТНЫХ ЛОГОПЕРИОДИЧЕСКИХ ВИБРАТОРНЫХ АНТЕНН ДЛЯ СИСТЕМЫ ЛОКАЛЬНОГО ПОДАВЛЕНИЯ СИГНАЛОВ УПРАВЛЕНИЯ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ 800 МГц – 900 МГц

А.А. Моисеенко, А.Ю. Чернышев

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

**Аннотация:** рассматриваются результаты разработки логопериодической антенны ультравысоких частот (УВЧ) (UHF-диапазона). Был проведен краткий анализ литературы по данной теме, рассмотрены перспективные типы антенн, используемых в средствах противодействия беспилотным летательным средствам, поднят вопрос построения логопериодической антенны с кусочно-линейными вибраторами и минимизации её характеристик на частотах 800 МГц – 900 МГц. Приведен метод расчета основных элементов логопериодических антенн, выбраны вибраторы Г-образной формы для уменьшения геометрических размеров антенны, с целью оптимизации возбуждения антенны была использована печатная плата. Предоставлено моделирование полученной по результатам расчетов частично печатной логопериодической антенны с приведением графика характеристик коэффициента стоячей волны по напряжению на частотах 700 МГц – 1100 МГц, получены диаграммы направленности на частотах 800 МГц – 900 МГц в горизонтальной и вертикальной плоскости. На основании полученных данных собран экспериментальный прототип логопериодической антенны, реализованной на диэлектрической подложке с Г-образными вибраторами и исследованы его основные характеристики, приведен результат измерения коэффициента стоячей волны. Исследована проблема влияния точности изготовления антенны и разброс параметров диэлектрической подложки, на основе которой изготовлена антенна. Приведена конструкция антенны, в которой не требуется монтаж дополнительного питающего кабеля из-за применения диэлектрической подложки

**Ключевые слова:** логопериодическая антенна, диаграмма направленности, UHF-диапазон, моделирование, экспериментальное исследование

### Введение

В современном мире наметилась проблема осуществления противодействия беспилотным летательным аппаратам (БПЛА). Это связано с их массовым использованием для видео и фотосъемок военных и других объектов. В целях противодействия БПЛА используют различные специальные средства. Из-за простоты сборки и производства БПЛА оптимальным и экономически целесообразным методом нейтрализации являются различные специальные электронные комплексы, в состав которых входят широкополосные антенны. В данной работе рассматривается применение логопериодических антенн для оптимального применения в комплексах локального подавления сигналов БПЛА. Логарифмическая периодическая антенна (ЛПА) принадлежит подтипу широкополосных антенн, основной особенностью которых является работа в широкой области частот, при этом электрические свойства антенны не будут зависеть от рабочей полосы [1]. Данный тип антенн

лишен недостатков большинства широкополосных антенн, у которых с ростом частоты наблюдается сужение главного лепестка и увеличение количества боковых лепестков. Широкое распространение в современных радиосистемах из ЛПА получили логопериодические вибраторные антенны (ЛПВА). Основными преимуществами данной антенной системы выступают: простота расчета параметров конструкции и её наглядность. Благодаря развитию производства печатных плат, повторяемости их характеристик появилась возможность изготовить ЛПВА с применением плат для питания антенной системы [2], это стало толчком к тому, что повысилась скорость производства, удалось добиться уменьшения разброса характеристик и стоимости изготовления антенны. Повторяемость характеристик и низкие потери в питающем фидере достигаются оборудованием для производства печатных плат с высоким классом точности. Дополнительно удалось совместить излучающие элементы с питанием и устройствами согласования для заданной полосы частот, что значительно снижает стоимость производства. В ходе данной работы рассматривается экспериментально полученная ЛПВА с низким

показанием коэффициента стоячей волны (КСВ), что позволяет улучшить приемопередающие свойства антенны.

### Теоретическая часть

При расчете печатных логопериодических антенн параметры изменяются по логарифмическому закону [3]. К ним относятся размеры вибраторов и расстояние между ними. Так же при расчёте следует учитывать теорию Карреля. Данные, которые являются константами при расчете элементов антенны:  $\tau$ ,  $\alpha$ ,  $\varepsilon_r$ . Антенна рассчитывается для согласования с фидером с сопротивлением 50 Ом.

Приведем основные формулы для расчетов геометрических характеристик вибраторов антенны, для расчетов используется метод [1] с учетом сопротивления питания.

1. Для расчета относительной ширины рабочей полосы частот антенны  $B$  и ширина полосы работы активной зоны  $B_{акт.зоны}$  используются формулы (1) и (2):

$$B_{акт.зоны} = 1,1 + 7,7 \cdot (1 - \tau)^2 \cdot ctg \alpha, \quad (1)$$

$$B = F_{max} / F_{min}. \quad (2)$$

2. На основе полученных значений становится возможным расчет рабочей полосы частот  $B_s$  и нахождение необходимого числа вибраторов для оптимальной работы антенны

$$B_s = B_{акт.зоны} \cdot B, \quad (3)$$

$$N = 1 + (\log B_s / \log \tau^{-1}). \quad (4)$$

3. Для определения длины наибольшего вибратора  $L_n$  необходимо рассчитать длину волны, на которой будет работать антенная система (5)

$$\lambda_{max} = c / (2 \cdot F_{max} \cdot \sqrt{\varepsilon_r}). \quad (5)$$

4. Так как сопротивление питающей линии равно 50 Ом ширина самого длинного вибратора будет определяться по формуле (6)

$$Z_i = 120 \cdot (\ln(L_n / a) - 2,25), \quad (6)$$

где  $a$  – эквивалентный диаметр печатного диполя, связанный с шириной печатного диполя соотношением  $W_n = \pi \cdot a$ .

5. Расстояние между диполями для низких частот рассчитывается по формуле (7)

$$D_n = 4 \cdot \sigma \cdot L_n. \quad (7)$$

6. Для расчёта геометрических размеров вибраторов и расстояния между ними применяется соотношение (8)

$$\frac{L_n}{L_{n+1}} = \frac{W_n}{W_{n+1}} = \frac{D_n}{D_{n+1}} = \tau \quad (8)$$

Проведя расчеты при помощи формул, описанных выше, удалось рассчитать основные элементы печатной логопериодической вибраторной антенны с рабочей полосой частот 800 – 900 МГц, на основе полученных данных была построена модель антенны в программе моделирования CST.

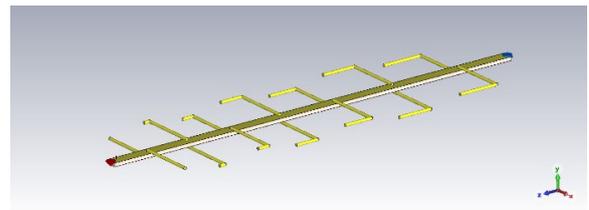


Рис. 1. Модель рассчитанной логопериодической вибраторной антенны в программе CST

На рис. 1 показана модель логопериодической вибраторной антенны, рассчитанной по формулам выше в среде математического моделирования. ЛПВА построена на текстолитовой основе. Антенна возбуждается посредством металлизированной дорожки на текстолитовой основе, т.е. микрополосковой линии. Ниже на рис. 2-3 приведены расчеты коэффициента стоячей волны по напряжению (КСВН) и S параметр данной антенны. На рис. 4-7 приведены графики диаграммы направленности модели ЛПВА. Среднее значение направленности составляет 10 дБи.

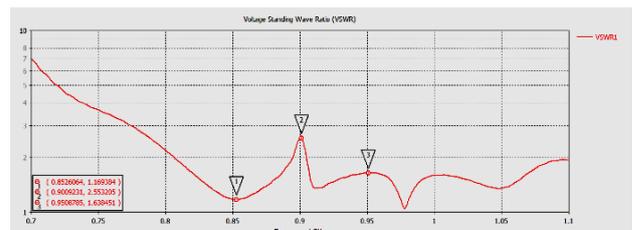


Рис. 2. КСВН антенны на частотах 700-1100 МГц

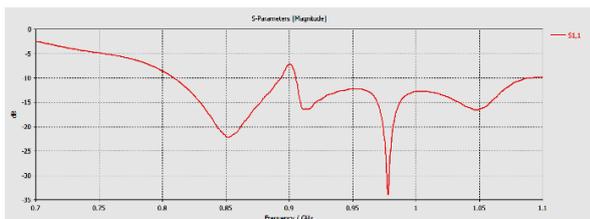


Рис. 3. Параметр S11 для модели антенны на рабочей полосе частот 700-1100 МГц

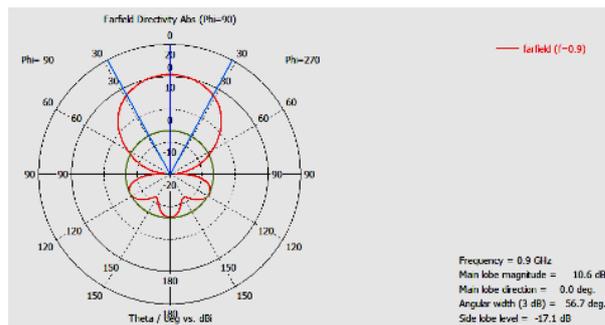


Рис. 7. Диаграмма направленности ЛПВА на частоте 900 МГц в горизонтальной плоскости

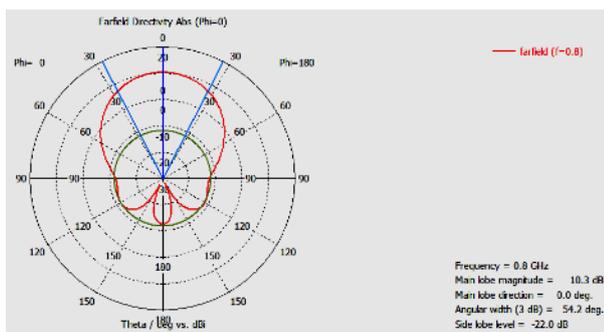


Рис. 4. Диаграмма направленности ЛПВА на частоте 800 МГц в вертикальной плоскости

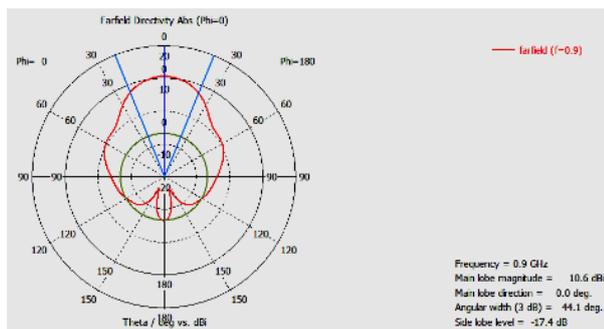


Рис. 5. Диаграмма направленности ЛПВА на частоте 900 МГц в вертикальной плоскости

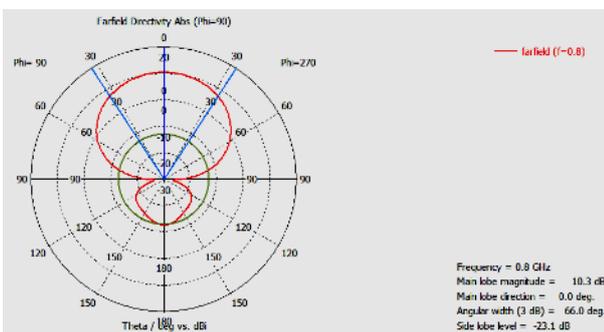


Рис. 6. Диаграмма направленности ЛПВА на частоте 800 МГц в горизонтальной плоскости

Полученные результаты удовлетворяют нашим требованиям, построим экспериментальную модель антенны, и измерим ее характеристики. Проведем анализ полученных данных.

### Экспериментальная часть

Для экспериментального исследования был собран образец ЛПВА по полученным выше расчетам. Экспериментальная модель антенны была выполнена на печатной основе с Г-образными вибраторами. На рис. 8 представлена фотография собранной антенны с применением технологии печатных плат.



Рис. 8. Полученная экспериментальная логопериодическая вибраторная антенна с Г-образными вибраторами



Рис. 9. Измерение S параметров экспериментальной антенны

Результат экспериментального исследования КСВ антенны приведены на рис. 9.

**Заключение**

Экспериментально полученные данные удовлетворяют нашим потребностям. По полученным данным видно низкое значение КСВ 1,68. Полученные значения показывают высокие характеристики антенн, изготовленных методом печатных плат. Таким образом, полученные характеристики антенны удовлетворяют заявленным требованиям.

Поступила 26.12.2023; принята к публикации 01.03.2024

**Информация об авторах**

**Моисеенко Алексей Алексеевич** – аспирант, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: amoisei@gmail.com, тел. +7(473)243-77-29

**Чернышев Антон Юрьевич** – аспирант, ассистент кафедры радиотехники, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: chernyshev.antog@yandex.ru, тел. +7(908)133-63-86

**MINIMIZATION OF DESIGN PARAMETERS OF PARTIALLY PRINTED LOGOPERIODIC VIBRATORY ANTENNAS FOR THE SYSTEM OF LOCAL SUPPRESSION OF CONTROL SIGNALS OF UNMANNED AERIAL VEHICLES 800 MHz – 900 MHz**

**A.A. Moiseenko, A.Yu. Chernyshev**

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

**Abstract:** the results of the development of a logoperiodic UHF antenna; UHF band are considered. A brief analysis of the literature on this topic was carried out, promising types of antennas used in countering unmanned aerial vehicles were considered, the issue of constructing a logoperiodic antenna with piecewise linear vibrators and minimizing its characteristics at frequencies 800 MHz-900 MHz was raised. A method for calculating the main elements of logoperiodic antennas is given, vibrators are L-shaped to reduce the geometric dimensions of the antenna, to optimize antenna power, it is carried out by means of a printed circuit board. A simulation of a partially printed logoperiodic antenna obtained from the results of calculations is provided with a graph of the characteristics of the standing wave voltage coefficient at frequencies 700 MHz-1100MHz, directional diagrams at frequencies 800 MHz-900 MHz in the horizontal and vertical planes are obtained. Based on the data obtained, an experimental prototype of a logoperiodic antenna implemented on a dielectric substrate with L-shaped vibrators was assembled and its main characteristics were investigated, the result of measuring the standing wave coefficient was given. The problem of the influence of the accuracy of antenna manufacturing and the spread of parameters of the dielectric substrate on which the antenna is made is investigated. The design of the antenna is shown, in which the installation of an additional supply cable is not required due to the use of a dielectric substrate

**Key words:** logoperiodic antenna, radiation pattern, UHF band, modeling, experimental research

**References**

1. Rothammel K., Kriske A. "Encyclopedia of antennas" ("Энциклопедия антенн"), trans. from German, Moscow, DMC Press, 2011, 812 p.
2. Somov A.M. "Microwave devices and small-sized antennas" ("Устройства СВЧ и малогабаритные антенны"), Moscow, Goryachaya liniya-Telekom, 2012, 440 p.
3. Petrov B.M., Kostromitin G.I., Goremykin E.S. "Logoperiodic vibrator antennas" ("Логопериодические вибраторные антенны"), Moscow, Goryachaya liniya-Telekom, 2011, 240 p.

Submitted 26.12.2023; revised 01.03.2024

**Information about the authors**

**Alexey A. Moiseenko** – Postgraduate Student, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Ocyabrya str., Voronezh 394006, Russia), tel.: +7(473)243-77-29, e-mail: amoisei@gmail.com

**Anton Yu. Chernyshev** – Postgraduate Student, Assistant of the Department of Radio Engineering, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Ocyabrya str., Voronezh 394006, Russia), tel.: +7(908)133-63-86, e-mail: chernyshev.antog@yandex.ru

## КОРРЕКЦИЯ ФАЗОВЫХ ИСКАЖЕНИЙ В ПЕРИОДИЧЕСКОЙ АНТЕННЕ ВЫТЕКАЮЩЕЙ ВОЛНЫ С НЕРЕГУЛЯРНОЙ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНО-ИЗЛУЧАЮЩЕЙ СИСТЕМОЙ

Д.Ю. Крюков, А.В. Останков

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

**Аннотация:** периодические антенны вытекающей волны обладают простой низкопрофильной конструкцией, значительным коэффициентом полезного действия и способностью формировать в пространстве узкий луч диаграммы направленности, что определяет высокую привлекательность и перспективность их использования в беспроводных сетях мобильной связи. Однако на практике не всегда удаётся обеспечить требуемое амплитудно-фазовое распределение поля в плоскости излучающего раскрыва антенн такого типа. В частности, квазилинейный характер фазового распределения приводит к увеличению максимального уровня боковых лепестков и деформации диаграммы направленности. В режиме наклонного излучения рассмотрена антенна вытекающей волны, представляющая собой открытую излучающую линию передачи и содержащая планарный диэлектрический волновод с нерегулярным профилем, экранированный металлической резонансной решёткой гребенчатого типа. Проведена оценка степени искажений фазового распределения в раскрыве антенны после оптимизации величины зазора между диэлектрическим волноводом и решёткой. Разработана и апробирована относительно простая методика уменьшения фазовых искажений в периодической антенне вытекающей волны за счёт вариации шага размещения неоднородностей в гребенчатой решётке. Установлено, что коррекция фазового распределения в соответствии с разработанной методикой позволяет снизить максимальный уровень боковых лепестков, исправить асимметрию диаграммы направленности, а также уменьшить вызванное искажениями отклонение максимума диаграммы направленности от исходного направления излучения. Приведены ключевые соотношения, положенные в основу разработанной методики

**Ключевые слова:** антенна вытекающей волны, периодическая решётка, фазовые искажения, диаграмма направленности, моделирование

### Введение

Известно [1-3], что особенности конструкции распределительно-излучающей системы апертурной антенны и погрешности при практической реализации элементов такой системы могут приводить к нарушению линейности фазового распределения в раскрыве, что сопровождается искажениями формы диаграммы направленности (ДН) и уменьшением коэффициента направленного действия. Так, полученные при оптимизации амплитудного распределения в раскрыве модификации профиля периодической антенны вытекающей волны за счёт значительной девиации глубины канавок решётки в её составе или продольного изменения величины зазора между решёткой и диэлектрическим волноводом (рис. 1) могут приводить к заметным фазовым искажениям в антенне. Следствием искажений являются деформация ДН, заключающаяся в расширении её главного лепестка и его отклонении от исходного направления, «заплывании» и увеличении уровня боковых лепестков (УБЛ). Такие нежелательные эффекты, как правило, наиболее выражены в случае относительно малых по длине излучающих раскрывов (до  $(10-20) \cdot \lambda_0$ , где  $\lambda_0$  – длина излучаемой волны). Однако анализ фазовых

искажений на этапе проектирования достаточно сложен и неоднозначен, так как на сегодняшний день достоверной модели для их точной оценки в периодических антеннах вытекающей волны не существует.

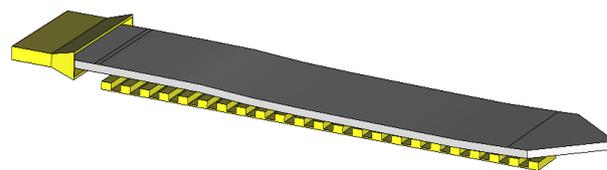


Рис. 1

Целью работы является создание и апробирование методики коррекции фазовых искажений в периодической антенне вытекающей волны с нерегулярной распределительно-излучающей системой за счёт изменения шага расположения канавок в гребенчатой решётке.

### Оценка фазовых искажений в антенне и постановка задачи их коррекции

В качестве исследуемого образца взята периодическая антенна вытекающей волны, реализованная на основе планарного диэлектрического волновода, нагруженного расположенной на некотором расстоянии от неё периодической гребенчатой решёткой [4-7]. Исходно регулярная распределительно-излучающая система мо-

дифицирована за счёт продольной вариации воздушного зазора между диэлектрическим волноводом и периодической решёткой в соответствии с методикой, описанной в работе [8]. Заметим, что нерегулярная оптимизированная геометрия распределительно-излучающей системы позволила уменьшить максимальный УБЛ диаграммы направленности, а также увеличить коэффициент направленного действия антенны.

Периодическая антенна вытекающей волны ориентирована на работу в диапазоне частот 9-10 ГГц и содержит эквидистантную гребенчатую решётку, включающую 22 канавки одинаковой ширины и глубины, накрытую плоским диэлектрическим волноводом. Материал волновода (полимер Pterepm 255) обладает относительной диэлектрической проницаемостью  $\epsilon_\tau = 2.55$ . Параметры раскрыва и его элементов (рис. 2) следующие: период ( $d$ ), длина ( $L_A$ ) и ширина гребенчатой решётки ( $W$ ) – 24, 540 и 53 мм соответственно; глубина ( $h$ ) и ширина канавок ( $a$ ) – 5 и 12 мм; толщина ( $\tau$ ) планарного диэлектрического волновода – 6 мм.

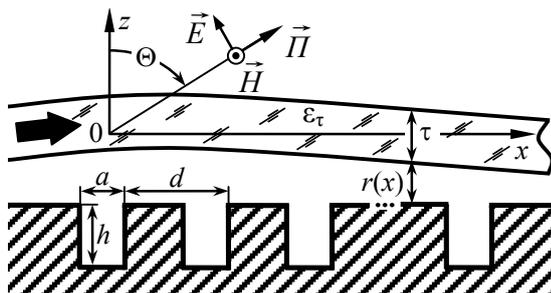


Рис. 2

Поскольку продольное изменение воздушного зазора между диэлектрическим волноводом и решёткой антенны вытекающей волны описывается относительно медленно изменяющейся функцией ( $r(x)$ , рис. 2), то амплитудно-фазовое распределение поля при возбуждении раскрыва поверхностной волной диэлектрического волновода можно представить как

$$v(x) = A(x) \cdot \exp[j(\psi(x) - \beta_0 \cdot x)], \quad (1)$$

где функции  $A(x)$  и  $\psi(x) - \beta_0 \cdot x$  соответствуют амплитудному и фазовому распределениям поля,  $\beta_0$  – постоянная распространения волны возбуждения.

Для подтверждения наличия фазовых искажений в антенне вытекающей волны следует измерить фазовое распределение поля в раскрыве, например, при работе антенны в режиме передачи. Сделать это можно, как минимум, тремя способами:

1) расчётным путём, используя, например, строгую модель дифракции заданной поверхностной волны планарного диэлектрического волновода на системе канавок в неограниченном проводящем экране [9-11];

2) в результате имитационного моделирования в электромагнитном симуляторе, например, основанном на методе конечного интегрирования Вейланда [12];

3) экспериментальным путём [13].

Поскольку существующие электродинамические модели не позволяют учитывать нерегулярность излучающего раскрыва антенны вытекающей волны, получим фазовое распределение на основе имитационного моделирования. На рис. 3 для рабочей частоты 9.5 ГГц показано найденное фазовое распределение в раскрыве антенны с указанными выше параметрами – в виде аргумента  $H_y$ -компоненты поля в области над диэлектрическим волноводом.

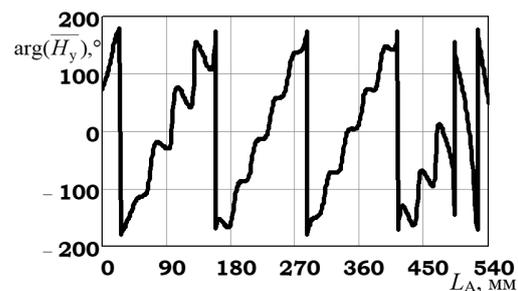


Рис. 3

Заметим, что характерной особенностью антенн вытекающей волны с позиции деформации ДН при наличии случайных возмущений является то, что в таких антеннах нерегулярность линии передачи, в том числе излучающих элементов даже на малом участке влияет на распределение поля на всём раскрыве антенны. Так, изменение фазовой скорости волны в линии на отдельном конечном участке приводит к расфазировке частей антенны, расположенных по разные стороны от этого участка.

Степень фазовых искажений предлагается оценивать по поведению пространственной скорости изменения аргумента (фазы) компоненты поля  $H_y$  (производной по координате  $x$ ). Такая зависимость получена на основе рис. 3 и представлена на рис. 4. В пределах раскрыва наблюдается участок с выраженным отклонением от постоянной распространения волны возбуждения  $\beta_0$ , определяющей угловое направление ( $103^\circ$ ) максимума ДН. Наибольшие фазовые искажения имеют место на периферийном участке: (492-540) мм. Среднеквадратичное

тическое отклонение производной на этом участке от величины  $\beta_0$ , выраженной в градусах на мм, составляет 13.4 °/мм или 0.56° на период.

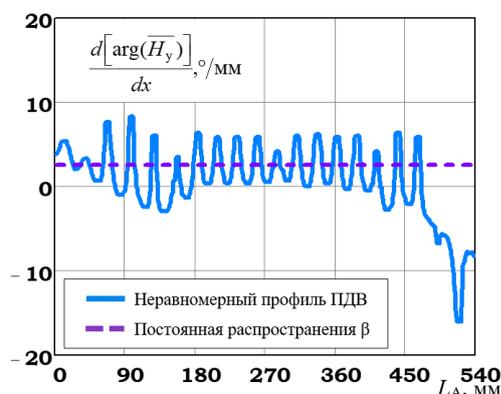


Рис. 4

В литературных источниках [1, 2] фазовые искажения (ошибки) принято делить на детерминированные и случайные. Закон распределения фазовой ошибки  $\psi(x)$  в случае детерминированных искажений может быть представлен в виде степенного ряда:

$$\psi(x) = \psi_1(x') + \psi_2(x')^2 + \dots + \psi_n(x')^n, \quad (2)$$

где  $x' = 2x / L_A$ ,  $\psi_n$  — фазовые искажения степени  $n$  на краю раскрыва. Для практических оценок влияния фазовых ошибок целесообразно ограничиться первыми тремя членами ряда (2). Поэтому детерминированные фазовые искажения подразделяют на линейные, квадратичные и кубические. Детерминированные фазовые искажения носят, как правило, локальный характер и связаны с отклонением параметров излучающего элемента (например, канавки) от средних значений.

В периодических антеннах вытекающей волны наряду с локальными могут наблюдаться и нелокальные фазовые ошибки, обусловленные случайными осцилляциями постоянной распространения [14, 15]. Наиболее часто причиной нелокальных фазовых ошибок становится механическая деформация распределительно-излучающей системы антенны из-за теплового воздействия, аэродинамической неустойчивости вследствие ветровых нагрузок, из-за атмосферных осадков, ледовых или снежных нагрузок, механических вибраций.

Линейные фазовые искажения приводят к смещению максимума ДН относительно нормали к плоскости раскрыва. Квадратичные фазовые искажения не вызывают смещения ДН, однако, сопровождаются расширением главно-

го лепестка и «заплыванием» минимумов излучения [1,2]. Изменение формы ДН при квадратичных фазовых искажениях приводит к снижению коэффициента направленного действия и к уменьшению коэффициента использования поверхности антенны.

Поскольку в рассматриваемом образце антенны вытекающей волны с нерегулярной излучающей линией передачи реализовано спадающее к краям амплитудное распределение типа «косинус на пьедестале» [8] (рис. 5, в), то влияние кубических фазовых искажений на форму ДН ослабляется, так как снижается вклад в излучаемое поле наиболее расфазированных периферийных участков излучающего раскрыва антенны. Однако боковые лепестки ДН в направлении отклонения основного лепестка («назад») уменьшаются, а в противоположном направлении («вперёд») — напротив, возрастают, что можно наблюдать на рис. 5, а, б, на которых приведена ДН антенны, полученная методом имитационного моделирования.

В периодической антенне вытекающей волны с регулярной распределительно-излучающей системой (фиксированным в продольном направлении воздушным зазором) и убывающим амплитудным распределением в раскрыве кубические фазовые ошибки проявляются в отклонении и расширении основного лепестка ДН, а также в искажении его формы, которая становится асимметричной. Вместе с тем, спадающее по экспоненциальному или линейному закону амплитудное распределение не способствует достижению оптимального уровня бокового излучения.

Обнаруженные фазовые искажения в антенне могут быть уменьшены путем коррекции шага расположения неоднородностей (канавок), выполняемой на основе исходных данных в виде измеренного фазового распределения поля (рис. 3). Для этого предлагается воспользоваться следующей методикой.

### Сущность методики коррекции фазового распределения и её апробация

Направление максимального излучения периодической антенны вытекающей волны определяется выражением [16]:

$$\sin \Theta_m = \frac{\beta_0}{k_0} + n \cdot \frac{\lambda_0}{d}, \quad (3)$$

где  $n$  — порядок пространственной гармоники спектра рассеяния,  $k_0$  — волновое число свободного пространства.

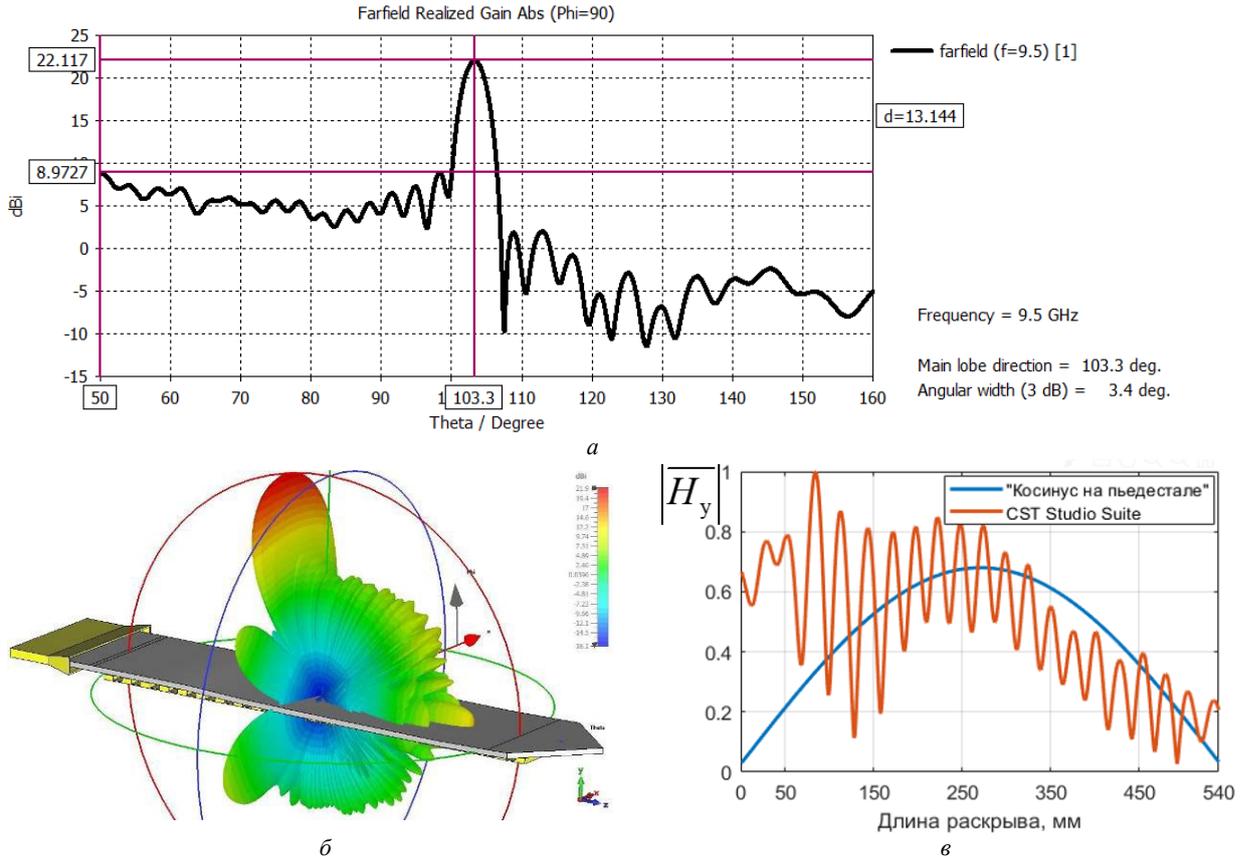


Рис. 5

При  $n = -1$  фазовая постоянная распространяющейся  $(-1)$ -й пространственной гармоники равна [6]

$$\beta_{-1} = \beta_0 - \frac{2\pi}{d}. \quad (4)$$

Полагая, что  $\beta_0$  имеет слабую зависимость от величины периода  $d$ , несложно из (3) получить значения шага  $d$  размещения канавок гребенчатой решётки –

$$d = \left( \frac{\beta_0}{2\pi} - \frac{\sin\Theta_m}{\lambda_0} \right)^{-1}, \quad (5)$$

обеспечивающие фазовую постоянную  $\beta_{-1}$ , равную  $2\pi \cdot \sin\Theta_m / \lambda_0$ . Величина  $\beta_0$  может быть найдена по рассчитанному сдвигу фазы  $H_y$ -компоненты поля за  $k$ -й период:

$$\Delta\phi_k = \arg(H_y(x_k+d)) - \arg(H_y(x_k)). \quad (6)$$

Умножив обе части уравнения (4) на период  $d$ , получим  $\beta_{-1} \cdot d = \beta_0 \cdot d - 2\pi = \Delta\phi_k$ , откуда следует, что

$$\beta_0 = \frac{\Delta\phi_k + 2\pi}{d}. \quad (7)$$

Подставив (7) в (5), получим новые значения шага расположения канавок гребенки:

$$d'_k = \left[ \frac{\Delta\phi_k + 2\pi}{2\pi d} - \frac{\sin\Theta_m}{\lambda_0} \right]^{-1}. \quad (8)$$

Применение предложенной методики коррекции фазового распределения целесообразно только после оптимизации амплитудного распределения в раскрытии, например, как в случае антенны с нерегулярной распределительно-излучающей системой (рис. 1), обеспечивающей амплитудное распределение типа «косинус на пьедестале» (рис. 5, в).

Анализ соотношения (8) показывает, что сдвиг фаз  $\Delta\phi_k$ , вызванный значительными по величине ошибками на текущем периоде расположения канавок, может приводить к чрезмерному отклонению скорректированных значений шага  $d'_k$  от допустимых значений [17, 18]. Это может вызвать расфазирование участков излучающего раскрытия и привести к возникновению новых фазовых искажений.

По результатам имитационного моделирования установлено, что для предотвращения негативных последствий фазовой коррекции (например, появления в ДН побочных максимумов) необходимо ограничить девиацию шага канавок величиной не более 5 % от рекомендуемого значения [17]:

$$d = \frac{\lambda_0}{\chi - \sin\Theta_m}, \quad (9)$$

где  $\chi$  – коэффициент замедления волны в планарном диэлектрическом волноводе, определяемый из соотношения  $\lambda_{\text{пдв}}/\lambda_0$ .

Скорректированные значения шага канавок  $d'_k$  могут быть обеспечены изменением ширины ламелей или канавок гребенчатой решётки. Так как ширина канавок уже выбрана равной  $a=12$  мм для обеспечения одномодового режима, то для коррекции фазового распределения целесообразно изменять значения ширины ламелей. На рис. 6 представлены скор-

ректированные значения шага канавок гребенчатой решётки, полученные в соответствии с соотношением (8) согласно изложенной выше методике (где  $N$  – номер канавки решётки).

Для наглядного представления интервал девиации шага канавок гребенчатой решётки ограничен двумя уровнями:  $\min(d')=23.86$  мм,  $\max(d')=24.61$  мм (рис. 6) – и составляет около 3 % от рекомендуемого значения 24.1 мм, рассчитанного по формуле (9) при условии, что коэффициент замедления  $\chi$  на рабочей частоте 9.5 ГГц для диэлектрического волновода толщиной 6 мм и  $\epsilon_\tau = 2.55$ , равен 0.88.

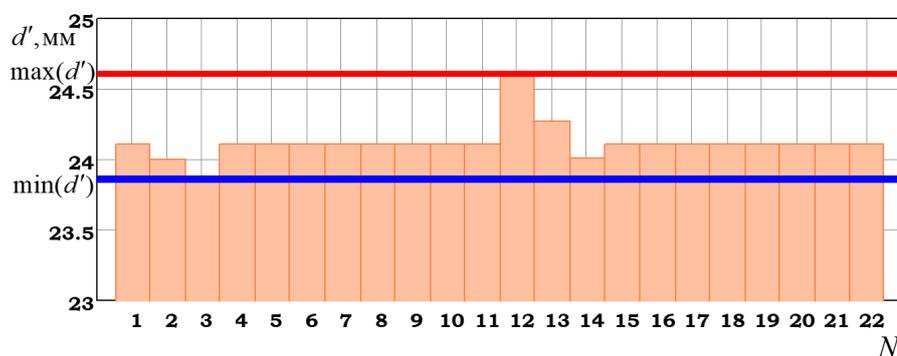


Рис. 6

Фазовое распределение в раскрыве антенны с нерегулярной распределительно-излучающей системой после коррекции фазовых искажений представлено на рис. 7.

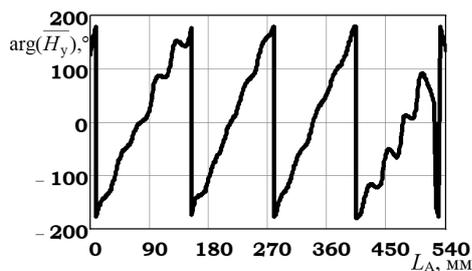


Рис. 7

Из сопоставления кривых на рис. 3 и 7 следует, что предлагаемая методика обеспечивает сглаживание фазового распределения на отдельных участках раскрыва за счёт снижения уровня осцилляций, характерных для фазовых искажений.

На рис. 8 представлена производная фазы  $H_y$ -компоненты поля по координате  $x$  до и после коррекции фазового распределения для частоты 9.5 ГГц. Производная фазы для антенны с неэквидистантной гребенчатой решёткой имеет меньшую амплитуду колебаний и на всей

протяжённости раскрыва осциллирует относительно постоянного значения  $\beta_0$ , соответствующего максимуму ДН в направлении  $103^\circ$ .

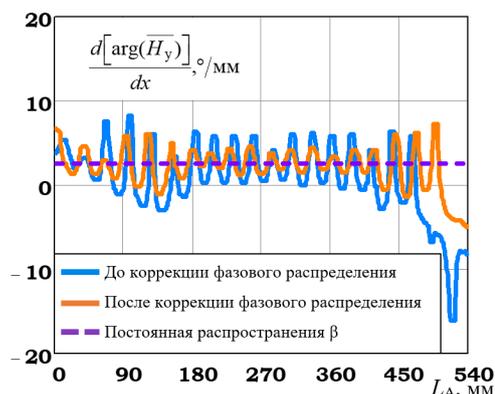


Рис. 8

На рис. 9, а представлены ДН периодической антенны вытекающей волны с нерегулярной распределительно-излучающей системой до и после изменения шага канавок для частоты 9.5 ГГц. Максимальный УБЛ составляет «минус» 15.4 дБ (меньше на 2.3 дБ), коэффициент усиления (в направлении максимального излучения  $\Theta_m = 103^\circ$ ) – 23 дБ. Ширина ДН в горизонтальной плоскости равна  $3.3^\circ$ .

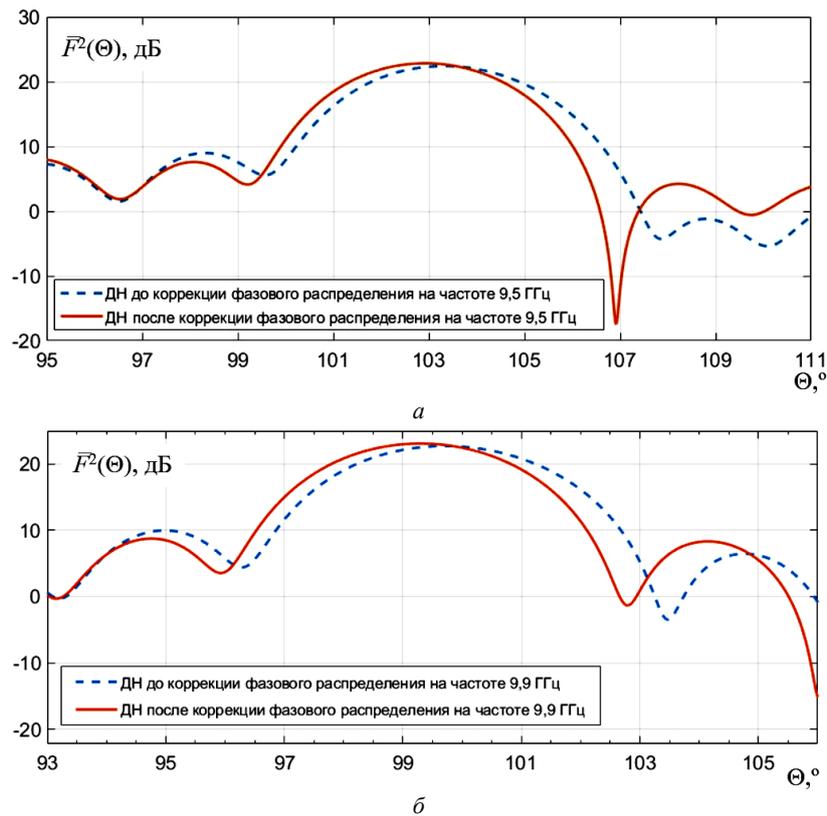


Рис. 9

У антенны вытекающей волны с коррекцией фазовых искажений на частоте 9.9 ГГц (рис. 9, б) максимальный УБЛ составляет «минус» 14.4 дБ, коэффициент усиления – 23.3 дБ. Ширина ДН в горизонтальной плоскости равна 3°, направление максимального излучения – 99.3°.

Из рис. 9 следует, что коррекция фазового распределения в раскрыве позволяет увеличить коэффициент усиления антенны вытекающей волны (на 0.9 и 0.8 дБ соответственно), уменьшить максимальный УБЛ (на 2.3 и 1.6 дБ соответственно). Достаточно умеренный полученный результат обусловлен, прежде всего, тем, что обнаруженные фазовые искажения являются не столь значительными, в частности, из-за выбранной формы амплитудного распределения поля в раскрыве. Следует заметить, что коррекция шага следования канавок решётки не оказывает сколь либо заметного влияния на амплитудное распределение, в отличие, например, от случая глубинного профилирования гребенчатой решётки [3,19-22].

Вместе с тем, форма ДН антенны после изменения шага канавок решётки становится более симметричной, боковые лепестки в окрестности главного лепестка имеют меньшее расхождение по уровню, чем у ДН до коррекции фазовых искажений (рис. 9). Главный лепесток

ДН после коррекции фазовых искажений, как и прогнозировалось, несколько сужается, а направление максимального излучения смещается к исходно выбранному направлению.

Важно заметить, что корректировать фазовое распределение в периодической антенне вытекающей волны следует только после оптимизации амплитудного распределения в раскрыве, так как в противном случае невозможно подлинно оценить степень влияния фазовых искажений на направленные свойства антенны.

### Заключение

Разработана методика коррекции фазовых искажений в периодической антенне вытекающей волны, учитывающая фактическое фазовое распределение в раскрыве и основанная на адаптивном к нему изменении шага следования неоднородностей периодической решётки распределительно-излучающей системы, исходно оптимизированной по критерию минимизации бокового излучения и(или) максимизации коэффициента направленного действия за счёт реализации подходящего амплитудного распределения в раскрыве.

**Литература**

1. Сазонов Д.М. Антенны и устройства СВЧ. М.: Высшая школа, 1988. 432 с.
2. Жук М.С., Молочков Ю.Б. Проектирование антенно-фидерных устройств. Л.: Энергия, 1966. 648 с.
3. Крюков Д.Ю., Останков А.В. Особенности учета конечных размеров диэлектрического волновода и условий его несовершенного возбуждения в электродинамической модели антенны дифракционного излучения // Сб. докл. 24-й Междунар. науч.-техн. конф. «Радиолокация, навигация, связь». Т. 4. Воронеж. 2018. С. 188-200.
4. Евдокимов А.П. Антенны дифракционного излучения // Физические основы приборостроения. 2013. Т. 2. № 1(6). С. 108-125.
5. Salman A.O. On the antenna efficiencies for the dielectric leaky-wave antennas with a sinusoidal metallic diffraction grating coupled from the broad and the narrow face of the dielectric // Microwave and Optical Technology Letters. 2011. Vol. 53. No 9. pp. 2030-2034.
6. Останков А.В., Антипов С.А., Калинин Ю.Е. Анализ и синтез раскрыва антенн дифракционного излучения, построенных на основе квазипериодических гребенчатых решеток. Воронеж: Воронежский государственный технический университет, 2016. 181 с.
7. Крюков Д.Ю., Останков А.В. Рефлективный анализ возможностей и основных конструктивно-технических характеристик антенн дифракционного излучения на основе периодических замедляющих структур // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2017. Т. 13. № 1. С. 95-103.
8. Улучшение показателей направленности антенны дифракционного излучения методом вариации профиля излучающего раскрыва / Д.Ю. Крюков, А.В. Останков, А.Ю. Чернышев, С.Ю. Дашян // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2022. Т. 18. № 1. С. 79-90.
9. Останков А.В. Анализ и оптимизация дифракционной антенны поверхностной волны // Антенны. 2010. № 9 (160). С. 44-53.
10. Стешенко С.А., Кириленко А.А. Строгая двумерная модель эффекта преобразования поверхностных волн в объемные // Радиофизика и электроника. 2005. Т. 10. № 1. С. 30-38.
11. Ostankov A.V., Antipov S.A., Razinkin K.A. Optimization of directional and energetic properties of diffraction antenna // Global Journal of Pure and Applied Mathematics. 2016. Vol. 12. No. 4. P. 3845-3864.
12. Weiland T.A. A discretization method for the solution of Maxwell's equations for six-component fields // Electronics and Communication. 1977. V. 31. No. 3. PP. 116-120.
13. Мительман Ю.Е., Шабунин С.Н., Князев Н.С. Измерение параметров антенн. Екатеринбург: Издательство Уральского университета, 2014. 58 с.
14. Таланов В.И., Шеронова Н.М. О влиянии случайных ошибок в распределении источников на диаграммы направленности антенн бегущей волны // Изв. вузов. Радиофизика. 1959. Т. 2. № 3. С. 424-430.
15. Шифрин Я.С. Вопросы статистической теории антенн. М.: Советское радио, 1970. 384 с.
16. Шестопалов В.П. Физические основы миллиметровой и субмиллиметровой техники. Т. 1. Открытые структуры. Киев: Наукова думка, 1985. 216 с.
17. Андренко С.Д., Девятков Н.Д., Шестопалов В.П. Антенные решетки миллиметрового диапазона волн // Докл. АН СССР. 1978. Т. 240. № 6. С. 1340-1343.
18. Плоскостная антенна дифракционного излучения радиолокационного комплекса миллиметрового диапазона / П.Н. Мележик, Ю.Б. Сидоренко, С.А. Провалов и др. // Изв. вузов. Радиоэлектроника. 2010. Т. 53. № 5. С. 12-21.
19. Подходы к вариации профиля излучающего раскрыва антенны вытекающей волны дифракционного типа для улучшения характеристик направленности / Д.Ю. Крюков, А.В. Останков, С.А. Антипов, К.А. Разинкин // Радиотехника. 2022. Т. 86. № 7. С. 25-32.
20. Калинин Ю.Е., Останков А.В. Расчет частотно-сканирующей антенны дифракционного излучения // Радиотехника. 2014. № 3. С. 83-87.
21. Стешенко С.А. Синтез антенны вытекающих волн по заданному распределению поля на апертуре // Радиофизика и радиоастрономия. 2013. Т. 18. № 4. С. 373-380.
22. Останков А.В. Оптимизация антенны дифракционного излучения, реализованной по интерферометрической схеме // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2010. Т. 6. № 11. С. 51-54.

Поступила 01.02.2024; принята к публикации 01.03.2024

**Информация об авторах**

**Крюков Дмитрий Юрьевич** – аспирант, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: kryukovdy@bk.ru

**Останков Александр Витальевич** – д-р техн. наук, доцент, заведующий кафедрой радиотехники, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: avostankov@mail.ru

**CORRECTION OF PHASE DISTORTIONS IN A PERIODIC LEAKY-WAVE ANTENNA WITH AN IRREGULAR DISTRIBUTION-RADIATING SYSTEM**

**D.Yu. Kryukov, A.V. Ostankov**

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

**Abstract:** periodic leaky-wave antennas have a simple low-profile design, a significant efficiency and the ability to form a narrow beam of a radiation pattern in space, which makes them highly attractive and promising for use in wireless mobile communication networks. However, in practice it is not always possible to ensure the required amplitude-phase distribution of the field in the plane of the radiating aperture of antennas of this type. In the oblique radiation mode, we consider a leaky-wave antenna, which is an open radiating transmission line and contains a planar dielectric waveguide with an uneven profile, shielded by a comb-type metal resonant grating. An assessment was made of the degree of distortion of the phase distribution in the antenna aperture after optimizing the size of the gap between the dielectric waveguide and the grating. A relatively sim-

ple technique has been developed and tested for reducing phase distortions in a periodic leaky-wave antenna by varying the spacing of inhomogeneities in a comb array. It has been established that correction of the phase distribution in accordance with the developed technique makes it possible to reduce the maximum level of side lobes, correct the asymmetry of the radiation pattern, and also reduce the deviation of the maximum of the radiation pattern from the original radiation direction caused by distortions. The basic mathematical formulas underlying the developed methodology are given

**Key words:** leaky-wave antenna, periodic array, phase distortion, radiation pattern, modeling

### References

1. Sazonov D.M. "Antennas and microwave devices" ("Antenny i ustrojstva SVCH"), Moscow, Vysshaya shkola, 1988, 432 p.
2. Zhuk M.S., Molochkov Yu.B. "Design of antenna-feeder devices" ("Proektirovanie antenno-fidernykh ustrojstv"), Leningrad, Energiya, 1966, 648 p.
3. Kryukov D.Yu., Ostankov A.V. "Peculiarities of taking into account the finite dimensions of a dielectric waveguide and the conditions of its imperfect excitation in the electrodynamic model of a diffraction radiation antenna", *Proc. of the 24 Int. Sci. and Tech. Conf.: Radio Location, Navigation, Communications (Radiolokatsiya, navigatsiya, svyaz)*, 2018, vol. 4, pp. 188-200.
4. Evdokimov A.P. "Diffraction radiation antennas", *Physical Bases of Instrumentation (Fizicheskiye osnovy priborostroyeniya)*, 2013, vol. 2, no. 1, pp. 108-124.
5. Salman A.O. "On the antenna efficiencies for the dielectric leaky-wave antennas with a sinusoidal metallic diffraction grating coupled from the broad and the narrow face of the dielectric", *Microwave and Optical Technology Letters*, 2011, vol. 53, no. 9, pp. 2030-2034.
6. Ostankov A.V., Antipov S.A., Kalinin Yu.E. "The analysis and synthesis of the aperture of diffraction radiation antennas based on quasiperiodic comb arrays" ("Analiz i sintez raskryva antenn difrakcionnogo izlucheniya, postroennykh na osnove kvaziperiodicheskikh grebenchatykh reshetok"), Voronezh State Technical University, 2016, 181 p.
7. Kryukov D.Yu., Ostankov A.V. "Reflexive analysis of opportunities and main constructive and technical characteristics of antennas of diffraction radiation on the basis of the periodic slowing down structures", *The Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2017, vol. 13, no. 1, pp. 95-103.
8. Kryukov D.Yu., Ostankov A.V., Chernyshev A.Yu., Dashyan S.Yu. "Improvement of directivity characteristics of diffraction radiation antenna by varying profile of radiating opening", *The Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2022, vol. 18, no. 1, pp. 79-90.
9. Ostankov A.V. "The analysis and optimization of a diffraction antenna of surface wave", *Antennas (Antenny)*, 2010, no. 9 (160), pp. 44-53.
10. Steshenko S.A., Kirilenko A.A. "The accurate two-dimensional model of the effect of the surface waves transformation into the spatial modes", *Radiophysics and Electronics (Radiofizika i elektronika)*, 2005, vol. 10, no. 1, pp. 30-38.
11. Ostankov A.V., Antipov S.A., Razinkin K.A. "Optimization of directional and energetic properties of diffraction antenna", *Global Journal of Pure and Applied Mathematics*, 2016, vol. 12, no. 4, pp. 3845-3864.
12. Weiland T.A. "A discretization method for the solution of Maxwell's equations for six-component fields", *Electronics and Communication*, 1977, vol. 31, no. 3, pp. 116-120.
13. Mitelman Yu.E., Shabunin S.N., Knyazev N.S. "Antenna measurements" ("Izmerenie parametrov antenn"). Ekaterinburg, Izdatelstvo Uralskogo universiteta, 2014, 58 p.
14. Talanov V.I., Sheronova N.M. "On the influence of random errors in the distribution of sources on the radiation patterns of traveling wave antennas", *News of Higher Universities. Radiofizika (Izvestiya vuzov. Radiofizika)*, 1959, vol. 2, no. 3, pp. 424-430.
15. Shifrin Ya.S. "Questions of statistical theory of antennas" ("Voprosy statisticheskoy teorii antenn"), Moscow, Sovetskoe radio, 1970, 384 p.
16. Shestopalov V.P. "Physical foundations of the millimeter and submillimeter waves technique. Vol. 1. Open structures" ("Fizicheskie osnovy millimetrovoy i submillimetrovoy tekhniki. Vol. 1. Otkrytye struktury"), Kiev, Naukova Dumka, 1985, 216 p.
17. Andrenko S.D., Devyatkov N.D., Shestopalov V.P. "Millimeter wave antenna arrays", *Reports of the USSR Academy of Sciences (Doklady AN SSSR)*, 1978, vol. 240, no 6, pp. 1340-1343.
18. Melezhih P.N., Sidorenko Y.B., Provalov S.A., Andrenko S.D., Shilo S.A. "Planar antenna with diffraction radiation for radar complex of millimeter band", *News of Universities. Radioelectronics (Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Radioelektronika)*, 2010, vol. 53, no. 5, pp. 12-21.
19. Kryukov D.Yu., Ostankov A.V., Antipov S.A., Razinkin K.A. "Approaches to varying the profile of the radiating aperture of a diffraction-type leaky-wave antenna to improve directivity characteristics", *Radioengineering (Radiotekhnika)*, 2022, vol. 86, no. 7, pp. 25-32.
20. Kalinin Yu.E., Ostankov A.V. "Calculation of the frequency-scanning antenna of diffraction radiation", *Radioengineering (Radiotekhnika)*, 2014, no. 3, pp. 83-87.
21. Steshenko S.A. "Synthesis of a leaky-wave antenna for a given field distribution at an aperture", *Radiophysics and Radioastronomy (Radiofizika i radioastronomiya)*, 2013, vol. 18, no. 4, pp. 373-380.
22. Ostankov A.V. "Optimization of the antenna of diffraction radiation realised on the interferometric scheme", *The Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2010, vol. 6, no. 11, pp. 51-54.

Submitted 01.02.2024; revised 01.03.2024

### Information about the authors

**Dmitry Yu. Kryukov** – Postgraduate Student, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: kryukovy@bk.ru  
**Aleksandr V. Ostankov** – Dr. Sc. (Technical), Associate Professor, Head of the Department of Radio Engineering, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: avostankov@mail.ru

## МЕМРИСТОРЫ. СЛЕДУЮЩАЯ СТУПЕНЬ В РАЗВИТИИ РАДИОТЕХНИКИ

Д.А. Шершов<sup>1</sup>, С.М. Фёдоров<sup>1,2</sup>, А.В. Володько<sup>1</sup>, И.А. Зеленин<sup>1</sup>

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

<sup>2</sup>Международный институт компьютерных технологий, г. Воронеж, Россия

**Аннотация:** обзор научных работ о мемристорах, об истории доказательства возможности существования и последующего создания этого «недостающего» электрического элемента, а также текущие перспективы по наладке производства и его коммерческой востребованности. Рассмотрены системы автоматизированного проектирования мемристоров с описанием процесса моделирования. Представлена техническая информация о структуре мемристора, его составляющих компонентах, принципиальная схема и макросхема, подробно описан процесс изготовления мемристора. Рассмотрены различные типы мемристоров, которые уже используются или могут использоваться в будущем, их достоинства и недостатки, а также возможности применения мемристоров в различных устройствах, таких как адаптивные антенны, фазированные антенные решетки, частотные фильтры ВЧ, СВЧ и УВЧ (высокие, сверхвысокие, ультравысокие частоты) диапазонов или ячейки памяти как обособленно, так и в комбинации с рядом других устройств и элементов, представлены потенциальные возможности применения мемристоров в области радиотехники и электроники. Предполагаемые данные такого пассивного электрического элемента, как мемристор, открывают большие перспективы его использования в приборах и аппаратуре двойного назначения. Несмотря на то, что в данный момент изготовление мемристора технологически сложный и финансово затратный процесс, его применение как в гражданском, так и военном сегменте является крайне перспективным

**Ключевые слова:** мемристор, адаптивная антенна, фазированная антенная решетка, PIN-диод, COMSOL

### Введение

Любой, кто когда-либо посещал лабораторные занятия по электронике, знаком с основными элементами пассивной электрической схемы: резистором, конденсатором и катушкой индуктивности. Однако в 1971 году Леон Чуа, основываясь на аргументах симметрии, пришел к выводу, что должен существовать четвертый фундаментальный элемент, который он назвал мемристором (рис. 1). Впервые экспериментально мемристоры были подтверждены лишь в 2008 году (рис. 2)[1, 5, 8, 13, 22, 23].

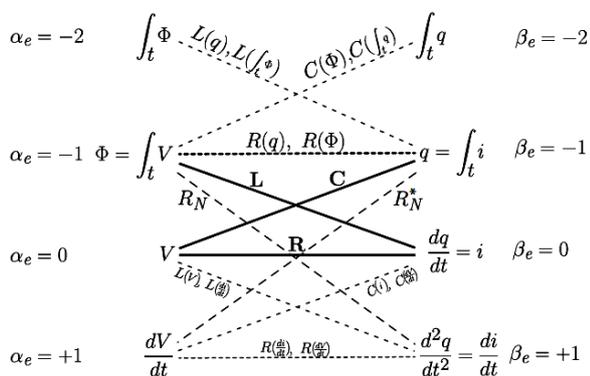


Рис. 1. Предполагаемое местоположение «потерянного» элемента

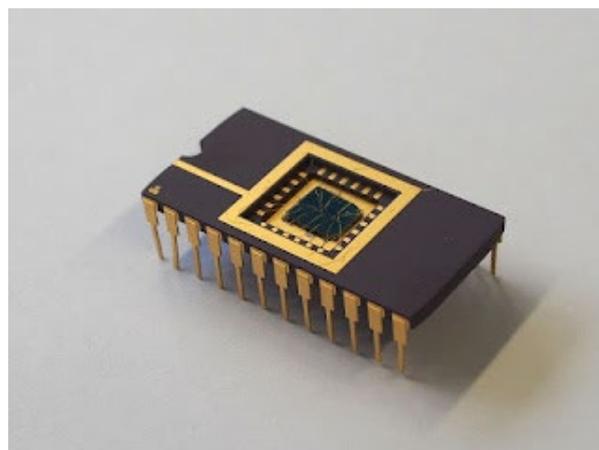


Рис. 2. Внешний вид одного из типов мемристора

На данный момент технология производства мемристоров еще находится в стадии разработки и исследования, и большинство компаний пока только экспериментируют с этими устройствами. Однако, есть несколько компаний, которые уже выпускают опытные образцы мемристоров и продвигаются вперед в их производстве (рис. 3). Одной из таких компаний является Hewlett-Packard, которая первой представила концепцию мемристора и активно исследует его свойства и возможности применения. Кроме того, компании Samsung, SK Hynix, Micron Technology и Fujitsu также работают над конструкциями мемристоров и планируют запустить в ближайшее время опытное производство этих

устройств. Также существует ряд стартапов, которые занимаются разработкой мемристоров: Crossbar, Inc., Adesto Technologies и Knowm Inc. Эти компании активно работают над разработкой и оптимизацией мемристоров, и многие из них уже выпускают опытные образцы для дальнейшего исследования и коммерциализации.

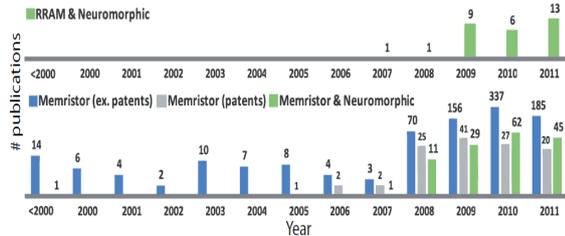


Рис. 3. Темпы производства различных типов мемристоров

Стоимость мемристоров на данный момент точно не определена, так как они находятся в стадии исследований и разработок. Кроме того, цена на мемристоры может сильно варьироваться в зависимости от многих факторов, таких как тип и размер устройства, производительность, степень интеграции, объем производства и т.д. Также следует учитывать, что производство мемристоров может быть достаточно дорогостоящим, поскольку требует высокотехнологичного оборудования и высокой квалификации работников. Поэтому, вероятно, что цена на мемристоры будет довольно высокой в начале выхода этого устройства на рынок. Однако, по мере увеличения объема производства и совершенствования технологий, цена на мемристоры должна будет снижаться. Также, в будущем будут разработаны новые типы мемристоров, более дешевые и производительные, что также может повлиять на их стоимость [7, 20].

### Принцип действия и основные свойства мемристора

Мемристор состоит из двух электродов, между которыми находится тонкий слой материала с переменным сопротивлением, который называется *резистивным переключателем*. Резистивный переключатель может быть выполнен из различных материалов, таких как оксиды металлов, полимеры или наночастицы, и обладает способностью изменять свое сопротивление при прохождении тока через него.

Мемристор сохраняет свое сопротивление после отключения питания благодаря явлению электрической поляризации в диэлектрике, ко-

торый находится между двумя электродами мемристора. При протекании электрического тока через мемристор, ионы из диэлектрика перемещаются в одном направлении и концентрируются на одном из электродов. Это приводит к изменению свойств диэлектрика и к изменению электрического сопротивления мемристора. Однако, когда ток перестает протекать, ионы остаются на своих местах, сохраняя изменения свойств диэлектрика и, соответственно, сопротивления мемристора. Это явление называется эффектом «внутренней поляризации» или «остаточной поляризацией». Таким образом, мемристор может сохранять свое состояние даже после отключения питания. Эти уникальные свойства могут быть использованы в различных приложениях в радиотехнике.

Одним из преимуществ мемристоров является их высокая плотность хранения информации. Значения сопротивления мемристоров могут изменяться в диапазоне от единиц МОм до единиц ГОм, что позволяет хранить большое количество информации на небольшой площади. Кроме того, мемристоры имеют быстрый доступ к данным и низкое энергопотребление, что делает их привлекательными для использования в электронике и компьютерах [8, 11, 17, 21].

Мемристоры могут работать на различных частотах в зависимости от их конструкции и материалов, из которых они изготовлены. Основным критерием, определяющим диапазон рабочих частот, является его временная постоянная, которая определяется материалом и геометрией мемристора [31, 35].

Несмотря на то, что мемристоры представляют собой многообещающую технологию для хранения информации, существуют некоторые проблемы, связанные с их использованием. Например, их рабочие характеристики могут быть нестабильными, а значения сопротивления меняются со временем. Кроме того, существует проблема «остаточного эффекта», который может привести к искажению сохраненной информации. Это происходит, когда заряды накапливаются в резистивном переключателе, что приводит к искажению электрического поля и, в итоге, к потере информации [2, 9, 14].

### Основные этапы процесса производства мемристора

Процесс производства мемристоров зависит от их типа и конструкции, но в общих чертах он может быть описан следующим образом:

1) Подготовка подложки: на первом этапе производства мемристора на подложку наносится слой материала, который будет использоваться в качестве базового электрода.

2) Нанесение слоя активного материала: на поверхность подложки наносится тонкий слой активного материала, который будет использоваться для изменения сопротивления мемристора. Обычно этот материал содержит металлы, оксиды и нитриды, которые обладают электрическими свойствами, позволяющими изменять сопротивление мемристора.

3) Нанесение второго электрода: на верхний слой активного материала наносится второй электрод, который будет использоваться для создания электрического поля, необходимого для изменения сопротивления мемристора. Этот электрод может быть нанесен методом напыления, испарения или химического осаждения.

4) Литография: на следующем этапе производства мемристора на поверхность слоев наносится фоторезист, который затем экспонируется светом с помощью маски. Это позволяет создать на поверхности мемристора шаблон для дальнейшей обработки.

5) Этап травления: на этом этапе обрабатываются слои мемристора с использованием растворов, которые могут растворять или выделять материалы. Это позволяет создать требуемую структуру мемристора, например, создать переключатель или более сложную форму.

6) Очистка поверхности: после травления поверхность мемристора очищается с помощью кислот и щелочей, чтобы удалить остатки фоторезиста и других загрязнений.

7) Финальная обработка: в конечной стадии производства мемристора его поверхность может быть покрыта защитным слоем для увеличения стойкости и защиты от окружающей среды.

### **Применение мемристоров в радиотехнике**

Одно из значимых возможных применений мемристоров в радиотехнике — это создание адаптивных антенн. Они могут быть использованы для управления формой и направлением излучения антенны. Путем изменения сопротивления мемристоров можно изменять параметры антенны, чтобы она лучше соответствовала условиям окружающей среды и требованиям передачи или приема сигнала. Кроме того, мемристоры могут быть использованы в радиочастотных фильтрах. Они могут помочь улучшить характеристики фильтров, такие как

добротность и полоса пропускания, путем изменения их электрических свойств, что позволит создавать более компактные и эффективные фильтры [4, 12].

Еще одно интересное применение мемристоров в радиотехнике — это создание электронных генераторов, которые могут работать на частотах свыше 100 ГГц. Мемристоры могут помочь улучшить стабильность и точность таких генераторов, что критически важно для многих приложений в радиотехнике и телекоммуникациях. Кроме того, мемристоры могут быть использованы для создания устройств для анализа и обработки радиосигнала в режиме реального времени. Это может быть полезно, например, для мониторинга и анализа сигналов в беспроводных сетях связи, радиовещании и спутниковой связи. В целом, использование мемристоров в радиотехнике открывает новые возможности для создания более эффективных и масштабируемых устройств, которые могут работать на более высоких частотах, потреблять меньше энергии и иметь более высокую производительность. Это может привести к созданию новых инновационных продуктов и технологий, которые будут использоваться в различных областях, включая телекоммуникации, радиовещание, спутниковую связь и другие [30-33, 77].

Мемристоры могут быть использованы для создания адаптивных антенн благодаря своей способности изменять свое электрическое сопротивление в зависимости от прошедного через них тока. Это позволяет использовать мемристоры для регулировки амплитуды и фазы сигнала, проходящего через антенну. Когда мемристор находится в определенном состоянии, его электрическое сопротивление изменяется, что в свою очередь изменяет электрические свойства антенны. Это позволяет настраивать направление и форму излучаемого сигнала для более эффективной передачи и приема сигналов. Также мемристоры могут быть использованы для автоматической настройки антенны на оптимальные параметры приема и передачи сигнала, в зависимости от изменений в окружающей среде или наличия помех в канале связи. Это позволяет улучшить качество связи и повысить скорость передачи данных. Адаптивная антенна с мемристорами позволяет настраивать направление и форму излучаемого сигнала для более эффективной передачи и приема сигналов. В адаптивной антенне могут использоваться несколько мемристоров, которые расположены на разных участках антенны. Эти мемристоры могут

быть настроены на разное сопротивление, что позволяет создавать разные фазовые задержки сигнала в разных участках антенны. Таким образом, сигналы, проходящие через антенну, могут быть сфокусированы и направлены в определенном направлении. При изменении окружающей среды или при наличии помех в канале связи мемристоры могут автоматически регулировать параметры антенны, чтобы обеспечить наилучшую производительность передачи и приема сигнала. Например, если в канале связи возникают помехи, мемристоры могут изменять фазу и амплитуду сигнала, чтобы уменьшить влияние помех на качество передачи. Таким образом, использование мемристоров в адаптивных антеннах позволяет создавать более эффективные и гибкие системы связи, которые могут быстро адаптироваться к изменяющимся условиям окружающей среды и обеспечивать наилучшую производительность передачи и приема сигнала. Работа мемристора в структуре адаптивной антенны может быть реализована на различных частотах в зависимости от конкретного приложения и конструкции антенны. Однако, как правило, мемристоры работают на высоких частотах, что делает их особенно полезными для использования в радиотехнических системах, работающих в диапазонах сверхвысоких и экстремально высоких частот. Например, в статье «Adaptive antenna systems using memristor devices» авторы упоминают, что мемристоры могут быть использованы в адаптивных антенных системах для работы на частотах от 2 ГГц до 20 ГГц. Кроме того, в других исследованиях были продемонстрированы примеры использования мемристоров в структурах адаптивных антенн на частотах от 1 ГГц до 100 ГГц. Мемристоры могут быть интегрированы в различные типы антенн, включая антенны с линейной, плоской или объемной конфигурацией. Одним из примеров использования мемристоров в адаптивной антенне является интеграция мемристоров в фазированную антенную решетку [15, 16, 18, 19].

В фазированной антенной решетке мемристоры могут быть расположены на каждом элементе антенной решетки. Каждый мемристор может быть настроен на определенное значение сопротивления, что позволяет регулировать фазу сигнала, проходящего через каждый элемент антенной решетки. Это позволяет создавать фазовые разности между элементами антенной решетки, которые могут быть

использованы для фокусировки излучения в определенном направлении. При настройке антенной решетки на определенную частоту мемристоры могут быть настроены на определенное значение сопротивления, чтобы достичь наилучшей производительности передачи и приема сигнала. При изменении условий окружающей среды или при наличии помех в канале связи мемристоры могут автоматически изменять свое сопротивление для оптимальной настройки антенной решетки и обеспечения наилучшей производительности передачи и приема сигнала. Таким образом, мемристоры позволяют создавать гибкие и эффективные адаптивные антенны, которые могут быстро адаптироваться к изменяющимся условиям окружающей среды и обеспечивать наилучшую производительность передачи и приема сигнала. В фазированной антенной решетке мемристивные переключатели могут быть интегрированы в элементы фазированной антенной решетки, такие как фазированные антенные элементы или рефлекторы. Эти переключатели могут управляться специальной электроникой, которая позволяет изменять проводимость переключателей и, следовательно, изменять фазу излучаемой волны и направленность излучения. Интеграция мемристора в фазированную антенную решетку означает, что каждый элемент антенной решетки, включая активные элементы и элементы фазировки, имеет мемристор в своей схеме включения. Мемристоры используются для настройки фазы и амплитуды сигнала на каждом элементе антенной решетки, что позволяет создавать фокусировку излучения в определенном направлении. Фазированная антенная решетка состоит из множества элементов, которые работают вместе для создания желаемой диаграммы направленности. Каждый элемент антенной решетки обычно имеет фазовращатель, который позволяет изменять фазу и амплитуду сигнала на элементе, чтобы сформировать желаемую диаграмму направленности. Интеграция мемристоров позволяет управлять фазой и амплитудой сигнала на каждом элементе антенной решетки в режиме реального времени, что позволяет создавать более точную и адаптивную диаграмму направленности. В результате интеграция мемристоров в фазированную антенную решетку может повысить ее производительность и улучшить качество сигнала, особенно в условиях изменчивой окружающей среды или в присутствии помех [24-29].

Для определения параметров и характеристик мемристоров можно воспользоваться пакетом программ для моделирования физических процессов COMSOL. Для моделирования мемристоров в программе COMSOL необходимо создать геометрию мемристора и задать материальные свойства для всех его компонентов. Это может быть выполнено с помощью инструментов графического интерфейса программы. Затем необходимо задать граничные условия и определить уравнения, описывающие поведение мемристора. Для этого могут быть использованы уравнения, описывающие электропроводность и электрические поля в материалах, а также уравнения, описывающие фазовые переходы и изменение сопротивления при изменении внешних условий. После этого можно выполнить численное моделирование и анализ результатов. COMSOL предоставляет множество инструментов для анализа электромагнитных и термических свойств мемристоров, а также для определения оптимальных параметров мемристора для конкретного приложения. В целом, моделирование мемристоров в программе COMSOL требует знания физических свойств материалов, из которых состоит мемристор, а также опыта в работе с программным обеспечением для моделирования физических систем [34, 36-48].

Также, помимо программы COMSOL, можно воспользоваться и другим программным обеспечением для моделирования мемристоров [49-56, 73]: SPICE, Sentaurus TCAD, Matlab, HSPICE, Silvaco, LTSpice, Synopsys TCAD, ANSYS, OnScale, QuantumWise, Coventor.

На данный момент представлено множество различных типов мемристоров, которые отличаясь своей структурой, параметрами и геометрией могут выполнять различные функции.

Некоторые из типов мемристоров, которые могут использоваться в радиотехнике, включают:

1) *Оксидные мемристоры (оксид-вакуумные мемристоры) (OxRAM)* — этот тип мемристоров может быть использован в радиотехнике для создания устойчивых состояний, необходимых для хранения данных, таких как параметры настроек радиосигналов или аналоговых сигналов.

2) *Ферромагнитные мемристоры (MRAM)* — эти мемристоры используют магнитные свойства материалов для хранения информации и могут использоваться в радиотехнике для создания высокоскоростных памятных устройств, таких как кэши памяти или быстродействующие буферы.

3) *Молекулярные мемристоры* — этот тип мемристоров может быть использован для создания устройств, которые работают на молекулярном уровне, и они могут быть использованы для управления параметрами радиосигналов, таких как частота, амплитуда и фаза.

4) *Термоэлектрические мемристоры* — этот тип мемристоров может быть использован для создания устройств, которые используют эффект Пельтье для управления параметрами радиосигналов, таких как температура и напряжение.

Как и у любых электронных устройств, мемристоры имеют свои достоинства и недостатки.

### Общие достоинства и недостатки мемристоров

Достоинства: малый размер и высокая интеграция, низкое энергопотребление, высокая скорость записи и чтения, высокая плотность хранения данных, сопротивление к радиационным воздействиям, гибкость и простота в производстве.

Недостатки: высокая чувствительность к температуре и окружающей среде, ограниченная долговечность и стабильность, ограниченная емкость, необходимость точной настройки в процессе производства, необходимость точного контроля электрических параметров [57, 58].

Кроме того, каждый тип мемристора имеет свои собственные уникальные свойства, достоинства и недостатки, которые могут быть учтены при выборе оптимального типа мемристора для конкретного приложения:

1) **Титанат-цирконатный мемристор (TCM)** — это один из типов оксидных мемристоров, в которых основной функциональный материал представляет собой соединение титаната циркония ( $ZrTiO_4$ ). Этот тип мемристора основывается на использовании ячеек памяти, состоящих из двух электродов (обычно металлических) и тонкой пленки титанат-цирконата между ними. Когда проходит ток через мемристор, возникают изменения его сопротивления, которые можно использовать для записи и хранения информации. Кроме того, он может быть легко интегрирован с другими электронными компонентами, что делает его привлекательным для использования в различных устройствах, включая нейроморфные компьютеры, IoT-устройства и другие приложения.

Достоинства: большое количество циклов перезаписи (более  $10^{12}$ ), низкий уровень

энергопотребления, высокая плотность интеграции, большая стабильность и надёжность.

Недостатки: ограниченная скорость записи и чтения данных, относительно высокая стоимость производства [59].

2) **Оксид-вакуумный мемристор (OxRAM)** — это тип мемристоров, в которых использование вакуума в качестве диэлектрика позволяет достичь высокой плотности хранения информации и низкой мощности, необходимой для переключения между состояниями. В таком мемристоре используется нанесенный на металлический электрод слой оксида, разделенный от другого металлического электрода вакуумом. При подаче напряжения на электроды происходит переключение между состояниями высокого и низкого сопротивления оксидного слоя. Эти состояния можно интерпретировать как "0" и "1", что делает оксид-вакуумные мемристоры подходящими для использования в цифровых приложениях.

Достоинства: очень быстрый доступ к данным и низкая задержка в работе, низкий уровень энергопотребления, высокая плотность интеграции, совместимость с существующими технологиями производства.

Недостатки: ограниченное количество циклов перезаписи (менее  $10^{11}$ ), низкая стабильность и надёжность, необходимость высокоточной контрольной системы для поддержания точности и стабильности хранения данных [10, 63].

3) **Фазовый мемристор (PCM)** — это тип мемристоров, в которых хранение информации основано на фазовых переходах в материалах с изменением фазы при изменении температуры. В PCM используется материал, называемый частотозорной фазовой памятью (Phase Change Memory, PCRAM), который имеет два стабильных состояния — кристаллическое и аморфное. При нагревании кристаллическое состояние быстро переходит в аморфное, а при охлаждении обратно в кристаллическое. Эти состояния можно интерпретировать как "0" и "1", что делает PCM подходящим для использования в цифровых приложениях.

Достоинства: быстрая скорость чтения и записи данных, высокий уровень энергоэффективности, большое количество циклов перезаписи (более  $10^{12}$ ), высокая стабильность и надёжность.

Недостатки: относительно низкая плотность интеграции, высокая стоимость производ-

ства, требуется дополнительное время для сброса состояния мемристора при перезаписи [61].

4) **Бионический мемристор** — это тип мемристоров, созданных на основе биологических материалов, таких как белки или ДНК. Они могут имитировать механизмы памяти и обучения мозга, что делает их потенциально применимыми в нейронных сетях и системах искусственного интеллекта. Одним из наиболее известных бионических мемристоров является мемристор, созданный на основе белка бактериородопсина. В этом устройстве используется свойство бактериородопсина изменять свою проводимость в зависимости от того, находится ли он в состоянии релаксации или активации. Эти состояния могут быть использованы для хранения информации.

Достоинства: высокий уровень энергоэффективности, низкий уровень энергопотребления, высокая стабильность и надёжность, может работать в экстремальных условиях, включая высокие температуры и радиационные поля.

Недостатки: низкая плотность интеграции, ограниченное количество циклов перезаписи, требуется биологическое окружение для работы [3, 60].

5) **Молекулярный мемристор** — это тип мемристоров, в которых основным элементом памяти представлен молекулами. Они могут быть использованы для создания высокоплотных и энергоэффективных устройств памяти. В молекулярных мемристорах молекулы могут иметь два стабильных состояния, соответствующие двум значениям памяти "0" и "1". Эти состояния могут быть изменены с помощью электрического или оптического воздействия. В некоторых случаях, изменение состояния молекул может приводить к изменению проводимости материала мемристора, что используется для чтения и записи данных.

Достоинства: очень высокая плотность интеграции, высокая скорость чтения и записи данных, низкий уровень энергоэффективности.

Недостатки: ограниченное количество циклов перезаписи (менее  $10^9$ ), низкая стабильность и надёжность, сложность в производстве [64].

6) **Оксидный мемристор** — это тип мемристоров, в которых основным элементом памяти является оксид материала. Они могут быть использованы для создания быстрых и энергоэффективных устройств памяти. В оксидных мемристорах используются материалы, такие как оксид титана, оксид цинка, оксид гафния и

др. Эти материалы имеют способность изменять свою проводимость при воздействии электрического поля, что позволяет использовать их для создания элементов памяти.

Достоинства: высокая интеграция и малый размер, низкое энергопотребление, высокая скорость записи и чтения, широкий диапазон рабочих температур, большая емкость хранения данных, простота в производстве.

Недостатки: низкая долговечность и стабильность, ограниченная чувствительность, необходимость точного контроля электрических параметров [62].

7) **Ферромагнитный мемристор** — это тип мемристоров, в которых основной элемент памяти представлен магнитным материалом. Они могут быть использованы для создания высокоскоростных и надежных устройств памяти. В ферромагнитных мемристорах используются магнитные материалы, такие как железо, кобальт, никель и их сплавы. Эти материалы имеют свойство сохранять свою магнитную полярность, что позволяет использовать их для создания элементов памяти.

Достоинства: большая чувствительность, высокая плотность хранения данных, отсутствие влияния на сигналы электромагнитной помехи.

Недостатки: ограниченная емкость, высокая чувствительность к внешним магнитным полям, высокая температура работы, сложность в производстве [77].

8) **Термоэлектрический мемристор** — это тип мемристоров, в которых изменение проводимости происходит в ответ на изменение температуры. Они могут быть использованы для создания устройств памяти, которые потребляют меньше энергии и могут быть быстрее, чем традиционные мемристоры. Термоэлектрические мемристоры могут быть созданы из различных материалов, таких как термоэлектрические полупроводники, металлы и полимеры. Они используются для создания устройств памяти, которые работают на основе изменения температуры в определенных областях материала.

Достоинства: Высокая интеграция и малый размер, низкое энергопотребление, широкий диапазон рабочих температур, высокая скорость записи и чтения.

Недостатки: ограниченная емкость хранения данных, ограниченная долговечность и стабильность, необходимость точного контроля электрических параметров.

9) **Электролитические мемристоры** — это тип мемристоров, который использует электролитический материал для управления

проводимостью. Они могут быть использованы для создания маленьких и быстрых устройств памяти. Электролитические мемристоры создаются путем нанесения тонкой пленки электролитического материала между двумя электродами. Проводимость материала может изменяться при приложении электрического напряжения к электродам.

Достоинства: высокая плотность записи и хранения информации благодаря небольшим размерам устройства, быстрый доступ к хранимой информации, низкое энергопотребление, высокая стабильность работы устройства, возможность создания трехмерной архитектуры устройств памяти.

Недостатки: ограниченный ресурс работы устройства из-за необходимости перемещения ионов в электролите, низкая точность и надежность чтения информации, низкая температурная стабильность, возможность разрушения устройства в результате образования газа при работе с электролитическим материалом, высокая чувствительность к воздействию внешних электрических и магнитных полей.

10) **Полимерные мемристоры** — это электронные устройства, которые используют полимерные материалы для хранения информации. Они обладают свойствами мемристивности, которые позволяют им сохранять и изменять свои электрические свойства в зависимости от предыдущего состояния. Полимерные мемристоры могут быть изготовлены из различных полимерных материалов, включая конденсированные ароматические полимеры, полимерные наночастицы, полимерные композиты и другие.

Достоинства: имеют высокую мемристивность и низкое энергопотребление, что делает их привлекательными для применения в энергоэффективных электронных устройствах, полимерные материалы, используемые в мемристорах, относительно легко доступны и имеют низкую стоимость, полимерные мемристоры могут быть изготовлены на гибких подложках, что позволяет создавать гибкие электронные устройства, обладают высокой стабильностью и долговечностью хранения информации.

Недостатки: имеют низкую скорость записи и чтения по сравнению с другими типами мемристоров, могут иметь низкую точность и надежность из-за того, что полимерные материалы могут быть подвержены деградации при длительном использовании, ограниченная емкость хранения информации по сравнению с другими типами мемристоров, некоторые по-

лимерные материалы могут быть чувствительны к окружающей среде и температурным изменениям, что может снижать их производительность и долговечность.

**11) Ионный мемристор** — это электронное устройство, в котором информация записывается изменением распределения ионов в твердом электролите между двумя электродами. Ионные мемристоры находят применение в некоторых типах нейроморфных систем, а также в электронных системах хранения информации.

Достоинства: высокая скорость работы, высокая плотность информации, малый размер, низкое энергопотребление, низкое напряжение записи.

Недостатки: необходимость поддержания постоянного напряжения для сохранения информации, ограниченное число перезаписей, чувствительность к температурным изменениям, ограниченный срок службы.

**12) Гибридный мемристор** — это мемристор, созданный путем комбинации двух или более типов мемристоров, что позволяет объединить их достоинства и уменьшить недостатки. Примеры гибридных мемристоров включают в себя комбинации оксидных и ферромагнитных мемристоров, РСМ и ферромагнитных мемристоров, РСМ и молекулярных мемристоров, и многие другие комбинации.

Достоинства: улучшенные характеристики, такие как скорость, плотность информации и энергоэффективность, расширенный диапазон возможных значений электрических параметров, возможность оптимизировать мемристор под конкретное приложение.

Недостатки: более сложный процесс изготовления, сложность управления и настройки, особенно в больших системах [68].

**13) Графеновый мемристор** — это мемристор, в котором использован графен, двумерный материал из атомов углерода.

Достоинства: очень высокая скорость записи и чтения информации, высокая стабильность состояния памяти благодаря стабильности графена, низкое потребление энергии, высокая плотность хранения информации.

Недостатки: высокая стоимость производства из-за сложности получения графена, ограниченная устойчивость к износу, поскольку графен очень тонкий материал, ограниченная температурная стабильность работы [65].

**14) Сверхпроводящие мемристоры** — это мемристоры, в которых используются сверхпро-

водящие материалы, способные проводить электрический ток без сопротивления.

Достоинства: очень высокая скорость записи и чтения информации, очень высокая плотность хранения информации, очень высокая стабильность состояния памяти благодаря отсутствию сопротивления в сверхпроводящем материале.

Недостатки: очень низкая температура работы (близкая к абсолютному нулю), что требует использования специальных криогенных установок, ограниченная устойчивость к износу, поскольку сверхпроводящие материалы очень тонкие и хрупкие, высокая стоимость производства и использования из-за необходимости использования криогенных установок [67].

**15) Керамические мемристоры** — это мемристоры, в которых используется керамический материал в качестве функционального элемента. Они могут быть разных типов, таких как оксидные, ферроэлектрические, ионные и др. [66].

Достоинства: высокая термическая стабильность и низкий коэффициент температурной дрейфовой нестабильности, высокая устойчивость к излучению и высоким температурам, хорошие электрические свойства, такие как низкое сопротивление и высокий коэффициент термической электропроводности, возможность создания малогабаритных устройств с высокой интеграцией.

Недостатки: низкая скорость записи и чтения информации по сравнению с другими типами мемристоров, сложность производства и высокая стоимость из-за использования специальных материалов и технологий, необходимость использования высокого напряжения для записи и считывания информации, что может приводить к электрическим шумам и искажениям сигнала, ограниченная долговечность, так как керамические материалы могут подвергаться износу и деградации при использовании.

**16) Наночастотные мемристоры** — это мемристоры, основанные на принципах фотоники и электродинамики на наномасштабах. Они используют эффекты, такие как метаматериалы, фотонные кристаллы, плазмоника, наночастицы и квантовые точки, для реализации мемристивных свойств.

Достоинства: высокая скорость записи и чтения данных, низкое потребление энергии, высокая плотность упаковки и хранения данных, возможность интеграции с другими нанoeлектронными компонентами на одном чипе.

Недостатки: высокая цена производства и сложность технологии изготовления, высокая чувствительность к окружающей среде и внешним электромагнитным полям, трудности в масштабировании производства и интеграции с существующими электронными устройствами, необходимость высоких температур и сложных условий при производстве [76].

17) **Нитевые мемристоры** — устройства на основе металлических нанонитей, которые имеют размеры порядка нескольких десятков нанометров в диаметре и нескольких микрометров в длину. Нанонити собираются в вертикальные массивы и используются в качестве активных элементов мемристивных устройств.

Достоинства: наночастотные мемристоры могут работать при очень высоких частотах, устройства на основе нанонитей имеют высокую плотность интеграции, могут быть легко произведены с использованием современных методов нанотехнологий.

Недостатки: наночастотные мемристоры могут работать при очень высоких частотах, устройства на основе нанонитей имеют высокую плотность интеграции, могут быть легко произведены с использованием современных методов нанотехнологий.

18) **Кольцевые мемристоры** — это мемристоры, которые состоят из кольцевого ядра из ферромагнитного материала, вокруг которого обмотаны две проводящие катушки. Использование кольцевой геометрии позволяет создавать магнитные поля, которые можно использовать для управления состоянием мемристора.

Достоинства: высокая плотность записи данных и быстрое переключение состояний благодаря магнитной структуре, относительно простая архитектура и возможность создания трехмерных структур.

Недостатки: требуются сложные процессы изготовления и высокая точность в производстве, необходимость использования магнитных полей для записи и чтения данных, что может ограничивать использование в некоторых приложениях [72].

19) **Графитовые мемристоры** — это мемристоры, которые используют графит в качестве функционального материала. Они обладают особыми свойствами, такими как высокая устойчивость к температуре, высокая производительность и высокая надежность.

Достоинства: высокая производительность благодаря быстрому переключению состояний, высокая устойчивость к температуре, высокая надежность и долговечность благода-

ря механизму переключения на основе графитового слоя [70].

Недостатки: недостаточное изучение и понимание механизмов переключения в графитовых мемристорах, сложность производства из-за необходимости высокоточной нанобработки графита.

20) **Мемристоры на основе перовскитов** — это мемристоры, использующие перовскитные материалы в качестве функциональных слоев. Они обладают множеством интересных свойств, включая ферроэлектричество, ферромагнетизм и полупроводниковую электропроводность.

Достоинства: высокие плотности хранения информации и скорости записи и чтения, широкий диапазон рабочих температур, относительно простая и дешевая производственная технология.

Недостатки: высокие плотности хранения информации и скорости записи и чтения, широкий диапазон рабочих температур, относительно простая и дешевая производственная технология [74].

21) **Сверхионный мемристор** — это устройство, основанное на использовании ионов для изменения состояния проводимости материала. В этом типе мемристора используется эффект переключения, вызываемый изменением количества ионов, проходящих через материал.

Достоинства: высокая плотность хранения информации, высокая скорость переключения состояний, малый размер устройства, возможность записи и считывания информации в многократных циклах.

Недостатки: требуется сложная система управления ионным потоком, необходимость управления электрическим полем для контроля ионного потока, низкая стабильность переключения в течение времени [71].

22) **Фото-мемристоры** — это тип мемристоров, которые основаны на эффекте фотоэлектрической эмиссии. Они имеют способность изменять свою электрическую проводимость под воздействием света.

Достоинства: высокая скорость записи и чтения, низкое энергопотребление, хорошая устойчивость к радиационным воздействиям, возможность использования в интегральных схемах.

Недостатки: низкая эффективность использования света, особенно в технологиях на основе кремния, ограниченный динамический диапазон, высокая цена изготовления [69].

**23) Полупроводниковые мемристоры** — это мемристоры, в которых электрическое сопротивление изменяется в ответ на электрические сигналы. Они основаны на различных механизмах изменения сопротивления, таких как изменение зарядовых переносов, изменение зарядового состояния в дефектах кристаллической решетки, изменение структуры кристаллической решетки и другие.

Достоинства: высокая скорость записи и чтения, низкое потребление энергии, высокая надежность.

Недостатки: ограниченная устойчивость к длительной экспозиции высокой температуры, необходимость точной калибровки процесса записи и чтения, ограниченное количество состояний памяти, которые можно сохранить [75].

### Заключение

Перечисленные выше типы мемристоров, их параметры, достоинства, недостатки, комбинирование их с другими элементами и применение в современной радиотехнике и электронике, а также других сферах, показывают, что данный электрический элемент имеет довольно широкое применение и, несомненно, сможет зарекомендовать себя в современной технике. Однако, в настоящее время его массовое применение осложнено отсутствием полноценной производственной базы. Развитие данного направления определенно принесет свои плоды и откроет новые горизонты развития техники с применением мемристоров [47, 48].

### Литература

1. The memristor as a building block for future electronics // H. Almasri et al. *OpenNano*, 2. 2017. pp.9-16.
2. Memristive devices for computing // J.J. Yang et al. *Nature Nanotechnology*, 8. 2013. pp. 13-24.
3. Nanoscale memristor device as synapse in neuromorphic systems // J. Kim et al. 2014. *Nano Letters*, 15(2). pp. 2203-2210.
4. Memristor-based adaptive filters for signal processing // K. Gao et al. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, 62(10). 2015. pp. 2499-2507.
5. The missing memristor found // D.B. Strukov et al. *Nature*, 453(7191). 2008. pp. 80-83.
6. Memristive devices for spiking neural networks with unsupervised learning // Y. Yang et al. *Neural Networks*, 45. 2013. pp. 27-36.
7. Short-term plasticity and long-term potentiation mimicked in single inorganic synapses // Y. Yang et al. *Nature Materials*, 10. 2011. pp. 591-595.
8. The physics of memristors // D.B. Strukov et al. *Proceedings of the IEEE*, 100(6). 2012. pp. 2071-2078.

9. Redox-based resistive switching memories – nanoionic mechanisms, prospects, and challenges // R. Waser et al. *Advanced Materials*, 21(25-26). 2009. pp. 2632-2663.

10. A low energy oxide-based electronic synaptic device for neuromorphic visual systems with tolerance to device variation // S. Yu et al. *Advanced Materials*, 25(14). pp. 1774-1779.

11. Yildiz M., Ozkan M. Memristors: Properties, models and applications // *Proceedings of the 2011 14th International Conference on Network-Based Information and Computing Systems*, 2011. pp. 1-4.

12. Zidan M.A., Strukov D.V., Stewart D.R. The role of memristors in mixed-signal computation // *IEEE Journal on Emerging and Selected Topics in Circuits and Systems*. Vol. 3. No. 1. 2013. pp. 64-73.

13. Chua L. Memristor – The missing circuit element // *IEEE Transactions on Circuit Theory*. Vol. 18. No. 5. 1971. pp. 507-519.

14. Prodromakis T., Toumazou C., Kouloumentas D.E. Memristive devices for computing // *Nature Electronics*. Vol. 1. No. 1. 2018. pp. 11-21.

15. Adaptive antennas with memristor-based programmable matching circuits / W. Qian, M. Xia, M.S. Rahman, H. Tenhunen // *Proceedings of the 2014 International Conference on Embedded and Ubiquitous Computing*. 2014. pp. 45-50.

16. Tarkiainen M., Rantanen M., Rahkonen T. Memristive RF switch and its applications in reconfigurable antennas // *Proceedings of the 2012 Loughborough Antennas and Propagation Conference (LAPC)*. 2012. pp. 1-4.

17. Veselka J.A.G., Yakovlev A.B. Physical principles of memristive nanodevices // *Journal of Physics: Condensed Matter*. Vol. 28. No. 35. 2016. p. 353001.

18. A tunable memristor-based matching circuit for reconfigurable antennas / M.S. Rahman, M. Xia, W. Qian, H. Tenhunen // *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. Vol. 63. No. 6. 2015. pp. 2715-2723.

19. Experimental evaluation of the impact of memristor-based tunable matching circuits on the radiation pattern of a Vivaldi antenna / A. Vandooren, M. Hertleer, H. Rogier, D. Schreurs, L. Knockaert // *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. Vol. 61. No. 5. 2013. pp. 2157-2166.

20. Three-dimensional integration of nanotechnologies for computing and data storage on a single chip / M.M. Shulaker, G. Hills, R.S. Park et al // *Nature*. Vol. 547. 2017. pp. 74–78.

21. Yu S., Li J.J., Wong H.-S.P. Phase-change memory: memristor's nasty cousin? // *IEEE Spectrum*. Vol. 47. No. 5. 2010. pp. 56–61.

22. The missing memristor found / D.B. Strukov, G.S. Snider, D.R. Stewart, R.S. Williams // *Nature*. Vol. 453. 2008. pp. 80–83.

23. Heba Abunahla // February 2023 *Frontiers in Neuroscience* 17 DOI:10.3389/fnins.2023.1144906 « Novel memristor-based devices and circuits for neuromorphic and AI applications"»

24. Vourkas I., Sirakoulis G.Ch. Memristor-Based Nanoelectronic Computing Circuits and Architectures // *Springer International October 2015*. 241 p.

25. A Memristive Phase-Shifter for Reconfigurable Phased-Array Antennas / P. Miranda, P. Aguilera, J.L. Masa-Campos, J.L. Huertas, A. Rueda, M. Sánchez-Soriano // *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. Vol. 64. No. 5. May 2016. pp. 1637-1646.

26. Zidan M., Talla C., Gupta S. Reconfigurable Antennas Enabled by Passive RF-MEMS and Memristive Devices // *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. Vol. 65. No. 1. Jan. 2017. pp. 16-30.
27. Design and Analysis of a Memristive Antenna for Cognitive Radio Applications / M. Braglia, G. Baruffa, E. Martini, L. Roselli // *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. Vol. 65. No. 12. Dec. 2017. pp. 6867-6875.
28. A Multi-Bit Memristor-Based Reconfigurable Antenna for Cognitive Radio Applications / L. Gao, X. Yu, L. Zhang, Z. Wang // *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. Vol. 67. No. 1. Jan. 2019. pp. 404-413.
29. A novel low-power high-gain memristor-based reconfigurable antenna for cognitive radio systems / S. Gao, D. Zhang, H. Li, L. Chen // *Microwave and Optical Technology Letters*. Vol. 62. No. 5. May 2020. pp. 1955-1959.
30. Datta D., Hayes J.P. A Survey of Memristive Devices and Applications // *Proceedings of the IEEE*. Vol. 100. No. 6. June 2012. pp. 2022-2040.
31. Zidan M., Strachan J.P., Lu W.D. Theoretical analysis of memristor-based radio-frequency switches // *Journal of Applied Physics*. Vol. 117. No. 7. Feb. 2015. pp. 074503-1-074503-10.
32. Gao L., Yu X., Zhang Y. Design and implementation of a high-isolation memristor-based RF switch // *International Journal of Microwave and Wireless Technologies*. Vol. 10. No. 4. Apr. 2018. pp. 391-399.
33. Zhai X., Hu Y., Wang C. An Ultra-Low Power Memristor-Based Wake-Up Radio for Wireless Sensor Networks // *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. Vol. 14. No. 8. Aug. 2018. pp. 3693-3702.
34. Modeling and Simulation of Metal Oxide Based Memristors Using COMSOL Multiphysics / H. Shokri-Kaveh et al // *IEEE Transactions on Nanotechnology*. Vol. 15. No. 3. May. 2016. pp. 398-406.
35. Salahuddin S., Datta S. Use of Negative Capacitance to Provide Voltage Amplification for Low Power Nanoscale Devices // *Nano Letters*. Vol. 8. No. 2. Feb. 2008. pp. 405-410.
36. Karel J., Vobecky J., Hudec P. Simulation of Memristor Devices with COMSOL Multiphysics // *Proceedings of the 19th Conference STUDENT EEICT 2013*. Czech Technical University in Prague. Czech Republic. Apr. 2013. pp. 394-398.
37. Modeling and Analysis of Memristor-Based Non-volatile Flip-Flops / S.Y. Kim et al. / *IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems*. Vol. 23. No. 7. Jul. 2015. pp. 1263-1271.
38. Xie Y., Haymaker W.H., Cao Y. 3D Modeling and Analysis of a Crossbar Memristor Array // *IEEE Transactions on Nanotechnology*. Vol. 11. No. 5. Sep. 2012. pp. 985-991.
39. Yang J.J., Williams R.S., Wu Q. Memristive Devices for Computing // *Nature Nanotechnology*. Vol. 8. No. 1. 2013. pp. 13-24.
40. Chen Y., Wu Y., Kang S. Modeling and simulation of memristor-based circuits and systems for radio frequency applications // *Journal of Micromechanics and Microengineering*. 27(3). 2017. 035012.
41. Murenets I.V., Potapov A.S., Chernyshev V.V. Microwave properties of memristor-based circuits // *Journal of Communications Technology and Electronics*. 63(2). 2018. pp. 162-170.
42. Banerjee A., Mukhopadhyay S., Sarkar A. Radio frequency (RF) memristor modeling and simulation for wireless communication applications // *In 2015 IEEE International Conference on Electronics, Computing and Communication Technologies (CONECCT)*. 2015. pp. 1-5.
43. Zhang Y., Wu J. A novel radio frequency (RF) memristor model for RF circuit design // *In 2016 International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology (ICMMT)*. 2016. pp. 1-4.
44. Ma Z., Chen J., Zhang J. An accurate and efficient method for radio-frequency memristor simulation // *Chinese Physics B*. 24(12). 2015. 128501.
45. Chen Y., Wu Y., Kang S. Modeling and simulation of memristor-based circuits and systems for radio frequency applications // *Journal of Micromechanics and Microengineering*. 27(3). 2017. 035012.
46. Murenets I.V., Potapov A.S., Chernyshev V.V. Microwave properties of memristor-based circuits // *Journal of Communications Technology and Electronics*. 63(2). 2018. pp. 162-170.
47. Banerjee A., Mukhopadhyay S., Sarkar A. Radio frequency (RF) memristor modeling and simulation for wireless communication applications // *In 2015 IEEE International Conference on Electronics, Computing and Communication Technologies (CONECCT)*. 2015. pp. 1-5.
48. Zhang Y., Wu J. A novel radio frequency (RF) memristor model for RF circuit design // *In 2016 International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology (ICMMT)*. 2016. pp. 1-4.
49. Ma Z., Chen J., Zhang J. An accurate and efficient method for radio-frequency memristor simulation // *Chinese Physics B*. 24(12). 2015. 128501.
50. Memristor-based artificial synapses for next-generation intelligent systems / B. Lee, S.H. Jo, S.R. Lee, J. Lee, W. Kim // *Nature Materials*. Vol. 18. No. 8. 2019. pp. 829-836.
51. Gao H., Xu Y., Li X. Design and simulation of memristive devices and networks for neuromorphic computing // *IEEE Transactions on Nanotechnology*. Vol. 17. No. 4. 2018. pp. 701-708.
52. Memristive devices for computing / M.M. Zidan, S. Gao, Y. Alkabani, J.P. Strachan, W.D. Lu // *Nature Electronics*. Vol. 3. No. 11. 2020. pp. 640-652.
53. Idrisov A., Vorobeva A., Vyatkin V. Simulation of memristive systems for development of wireless sensor networks // *Proceedings of the 5th International Conference on Control, Decision and Information Technologies, Barcelona, Spain*. 2017. pp. 420-424.
54. A Review of Silicon-based Memristors: Fabrication, Characterization and Applications / R. Kumar T P, R. Bjornsson, S. Barth, O. Ingólfsson // *Chem Sci*. V. 8(9). Sep 1. 2017. pp. 5949-5952.
55. Chua L. Memristor, Hodgkin-Huxley, and Edge of Chaos // *Nanotechnology*. 25(9). 2014. 095201.
56. Strukov D.B., Likharev K.K. CMOL FPGA: a reconfigurable architecture for hybrid digital circuits with two-terminal nanodevices // *Nanotechnology*. 23(38). 2012. 384006.
57. Pershin Y.V., Di Ventra M. Memory effects in complex materials and nanoscale systems // *Advances in Physics*. 60(2). 2010. pp. 145-227.
58. Resistance Switching and Multilevel Data Storage in ZrO<sub>2</sub>/TiO<sub>2</sub> Bilayer Thin Films for Nonvolatile Memory Applications / Y. Li et al. // *Nanotechnology*. 22. Jun. 2011. 254028 (5 pp).
59. Recent Advances in Cerium Oxide-Based Memristors for Neuromorphic Computing / S. Ali et al. // *Nanomaterials*. Sep. 2023. 13(17). 2443.
60. Phase-change random access memory (PRAM): a scalable technology / S. Raoux, G. Burr, M.J. Brewis, C. Rettner // *IBM Journal of Research and Development*. Vol. 52. No. 4(5). Jul.-Sep. 2008. pp. 465-479

61. Complementary resistive switches for passive nanocrossbar memories / E. Linn, R. Rosezin, C. Kügeler, R. Waser, M. Bäcker // *Nature materials*. 9(5). 2010. pp. 403-406.
62. Memristive switching mechanism for metal/oxide/metal nanodevices / J.J. Yang, M.D. Pickett, X. Li, D.A. Ohlberg, D.R. Stewart, R.S. Williams // *Nature nanotechnology*. 3(7). 2008. pp. 429-433.
63. Bioengineered Tunable Memristor Based on Protein Nanocage / F. Meng, B. Sana, Yu. Li, Yu. Liu // *Small*. Vol. 10. No. 2. Jan. 2014. pp. 213-241.
64. Direct laser writing of graphene oxide for ultra-low power consumption memristors in reservoir computing for digital recognition / M. Chen, Zh. Wan, H. Dong, Q. Chen, M. Gu1, Q. Zhang // *Natl Sci Open*. Vol. 1. No. 3. 2022. Special Topic: Novel Optoelectronic Devices.
65. Investigation of Thermoelectric Memristor Based on SiGe Alloy / M. Zhang, S. Wang, X. Wang, Y. Xia, L. Chen // *Journal of Electronic Materials*. Vol. 50. No. 9. 2021. pp. 5624-5631.
66. Yang C.Y., Lee W.H., Lin C.C. Electrochemical metallization memory cells based on nanocomposite solid electrolytes // *Journal of Applied Physics*. Vol. 103. No. 5. 2008. 053701.
67. Organic memristive devices based on conjugated polymers: A review / H. Zhu, Q. Zhang, X. Wei, X. Yang, W. Hu // *Materials Today*. Vol. 19. No. 4. 2016. pp. 188-197.
68. Li B., Liang G., Zhang S. Photonic Memristor Based on Coupled Microdisk Resonators // *Scientific Reports*. Vol. 6. 2016. 36480.
69. NeuroMem: Analog Graphene-Based Resistive Memory for Artificial Neural Networks / H. Abunahla, Ya. Halawani, A. Alazzam, B. Mohammad // *Scientific Reports*. Vol. 10(1). 2020.
70. Waser R., Aono M. Nanoionic resistive-switching memories // *Nanoscience and Technology*. Aug. 2009. pp. 158-165.
71. Zhou Y., Xu J. Modeling and simulation of circular memristors for neuromorphic computing // *Journal of Applied Physics*. 125(14). 2019. 144502.
72. Ielmini D., Zhang Y. Device concepts for physical computing based on resistive switching memories // *Proceedings of the IEEE*. 104(10). 2016. pp. 2000-2021.
73. Perovskite oxide memristive devices: materials, structures, and mechanisms / X. Wu, X. Zou, X. Zhu, J. Zhang, H. Zhang // *Journal of Materials Chemistry C*. 7(43). 2019. pp. 13259-13276.
74. Anatomy of a nanoscale conduction channel reveals the mechanism of a high-performance memristor / Y. Yang, P. Gao, Z. Li, S. Gaba, W. Lu // *Advanced Materials*. 25(31). 2013. pp. 5419-5425.
75. Wu X., Xu H., Zhang H. Photonic synapses based on two-dimensional materials for neuromorphic computing // *Advanced Materials*. 33(6). 2021. 2005328.
76. An electronic synapse device based on metal oxide resistive switching memory for neuromorphic computation / S. Yu, Y. Wu, R.G. Jeyasingh, D. Kuzum, H.S. Wong // *IEEE Transactions on Electron Devices*. 58(8). 2011. pp. 2729-2737.
77. A tunable memristor model for radar target recognition / X. Li, Y. Li, H. Li, H. Yang // *IEEE Access*. Vol. 8. 2020. pp. 107940-107951.

Поступила 27.11.2023; принята к публикации 26.02.2024

#### Информация об авторах

**Шершов Даниил Александрович** – студент кафедры радиоэлектронных устройств и систем, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, д. 84), e-mail: shershovdaniil@yandex.ru

**Фёдоров Сергей Михайлович** – канд. техн. наук, доцент кафедры радиоэлектронных устройств и систем, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, д. 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>

**Володько Александр Владиславович** – канд. техн. наук, доцент кафедры радиоэлектронных устройств и систем, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, д. 84), e-mail: zavlabvgtu@rambler.ru

**Зеленин Иван Алексеевич** – старший преподаватель кафедры радиоэлектронных устройств и систем, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, д. 84), e-mail: zia49zia@mail.ru

### MEMRISTORS. THE NEXT STEP IN THE DEVELOPMENT OF RADIO ENGINEERING

D.A. Shershov<sup>1</sup>, S.M. Fedorov<sup>1,2</sup>, A.V. Volod'ko<sup>1</sup>, I.A. Zelenin<sup>1</sup>

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

<sup>2</sup>International Institute of Computer Technologies, Voronezh, Russia

**Abstract:** the paper provides a review of scientific works on memristors, the history of proving the possibility of the existence and subsequent creation of this “missing” electrical element, as well as current prospects for setting up production and its commercial demand. Automated memristor design systems are considered with a description of the modeling process. Technical information about the structure of the memristor, its components, a circuit diagram and macrocircuit is presented, and the manufacturing process of the memristor is described in detail. Various types of memristors that are already in use or may be used in the future, their advantages and disadvantages, as well as the possibility of using memristors in various devices, such as adaptive antennas, phased array antennas, RF, microwave and UHF frequency filters are considered. (high, ultra-high, ultra-high frequencies) ranges or memory cells, both separately and in combination with a number of other devices and elements, the potential applications of memristors in the field of radio engineering and electronics are presented. The expected data of such a

passive electrical element as a memristor open up great prospects for its use in dual-use devices and equipment. Despite the fact that at the moment the production of a memristor is a technologically complex and financially expensive process, its use in both the civilian and military segments is extremely promising

**Key words:** memristor, adaptive antenna, phased array antenna, PIN diode, COMSOL

#### References

1. Almasri H. et al. "The memristor as a building block for future electronics", *OpenNano*, 2017, no. 2, pp.9-16.
2. Yang J.J. et al. "Memristive devices for computing", *Nature Nanotechnology*, 2013, no. 8, pp. 13-24.
3. Kim J. et al. "Nanoscale memristor device as synapse in neuromorphic systems", *Nano Letters*, 2014, no. 15 (2), pp. 2203-2210.
4. Gao K. et al. "Memristor-based adaptive filters for signal processing", *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, 2015, no. 62 (10), pp. 2499-2507.
5. Strukov D.B. et al. "The missing memristor found", *Nature*, 2008, no.453 (7191), pp. 80-83.
6. Yang Y. et al. "Memristive devices for spiking neural networks with unsupervised learning", *Neural Networks*, 2013, no. 45, pp. 27-36.
7. Yang Y. et al. "Short-term plasticity and long-term potentiation mimicked in single inorganic synapses", *Nature Materials*, 2011, no. 10, pp. 591-595.
8. Strukov D.B. et al. "The physics of memristors", *Proc. of the IEEE*, 2012, no. 100 (6), pp. 2071-2078.
9. Waser R. et al. "Redox-based resistive switching memories – nanoionic mechanisms, prospects, and challenges". *Advanced Materials*, 2009, no. 21 (25-26), pp. 2632-2663.
10. Yu S. et al. "A low energy oxide-based electronic synaptic device for neuromorphic visual systems with tolerance to device variation", *Advanced Materials*, no. 25(14). pp. 1774-1779.
11. Yildiz M., Ozkan M. "Memristors: Properties, models and application", *Proc. of the 2011 14th International Conference on Network-Based Information and Computing Systems*, 2011, pp. 1-4.
12. Zidan M.A., Strukov D.V., Stewart D.R. "The role of memristors in mixed-signal computation", *IEEE Journal on Emerging and Selected Topics in Circuits and Systems*, 2013, vol. 3, no. 1, pp. 64-73.
13. Chua L. "Memristor – The missing circuit element", *IEEE Transactions on Circuit Theory*, 1971, vol. 18, no. 5, pp. 507-519.
14. Prodromakis T., Toumazou C., Kouloumentas D.E. "Memristive devices for computing", *Nature Electronics*, 2018, vol. 1, no. 1, pp. 11-21.
15. Qian W., Xia M., Rahman M.S., Tenhunen H. "Adaptive antennas with memristor-based programmable matching circuits", *Proc. of the 2014 International Conference on Embedded and Ubiquitous Computing*, 2014, pp. 45-50.
16. Tarkkainen M., Rantanen M., Rahkonen T. "Memristive RF switch and its applications in reconfigurable antennas", *Proc. of the 2012 Loughborough Antennas and Propagation Conference (LAPC)*, 2012, pp. 1-4.
17. Veselka J.A.G., Yakovlev A.B. "Physical principles of memristive nanodevices", *Journal of Physics: Condensed Matter*, vol. 28, no. 35, 2016, p. 353001.
18. Rahman M.S., Xia M., Qian W., Tenhunen H. "A tunable memristor-based matching circuit for reconfigurable antennas", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2015, vol. 63, no. 6, pp. 2715-2723.
19. Vandooren A., Hertleer M., Rogier H., Schreurs D., Knockaert L. "Experimental evaluation of the impact of memristor-based tunable matching circuits on the radiation pattern of a Vivaldi antenna", *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2013, vol. 61, no. 5, pp. 2157-2166.
20. Shulaker M.M., Hills G., Park R.S. et al. "Three-dimensional integration of nanotechnologies for computing and data storage on a single chip", *Nature*, 2017, vol. 547, pp. 74–78.
21. Yu S., Li J.J., Wong H.-S.P. "Phase-change memory: memristor's nasty cousin?", *IEEE Spectrum*, 2010, vol. 47, no. 5, pp. 56–61.
22. Strukov D.B., Snider G.S., Stewart D.R., Williams R.S. "The missing memristor found", *Nature*, 2008, vol. 453, pp. 80–83.
23. Heba Abunahla, February 2023, *Frontiers in Neuroscience* 17 DOI:10.3389/fnins.2023.1144906, "Novel memristor-based devices and circuits for neuromorphic and AI applications".
24. Vourkas I., Sirakoulis G.Ch. "Memristor-Based Nanoelectronic Computing Circuits and Architectures", *Springer International*, October 2015, 241 p.
25. Miranda P., Aguilera P., Masa-Campos J.L., Huertas J.L., Rueda A., Sánchez-Soriano M. "A Memristive Phase-Shifter for Reconfigurable Phased-Array Antennas", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, May 2016, vol. 64, no. 5, pp. 1637-1646.
26. Zidan M., Talla C., Gupta S. "Reconfigurable Antennas Enabled by Passive RF-MEMS and Memristive Devices", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Jan. 2017, vol. 65, no. 1, pp. 16-30.
27. Braglia M., Baruffa G., Martini E., Roselli L. "Design and Analysis of a Memristive Antenna for Cognitive Radio Applications", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Dec. 2017, vol. 65, no. 12, pp. 6867-6875.
28. Gao L., Yu X., Zhang L., Wang Z. "A Multi-Bit Memristor-Based Reconfigurable Antenna for Cognitive Radio Applications", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Jan. 2019, vol. 67, no. 1, pp. 404-413.
29. Gao S., Zhang D., Li H., Chen L. "A novel low-power high-gain memristor-based reconfigurable antenna for cognitive radio systems", *Microwave and Optical Technology Letters*, May 2020, vol. 62, no. 5, pp. 1955-1959.
30. Datta D., Hayes J.P. "A Survey of Memristive Devices and Applications", *Proceedings of the IEEE*, June 2012, vol. 100, no. 6, pp. 2022-2040.
31. Zidan M., Strachan J.P., Lu W.D. "Theoretical analysis of memristor-based radio-frequency switches", *Journal of Applied Physics*, Feb. 2015, vol. 117, no. 7, pp. 074503-1-074503-10.

32. Gao L., Yu X., Zhang Y. "Design and implementation of a high-isolation memristor-based RF switch", *International Journal of Microwave and Wireless Technologies*, Apr. 2018, vol. 10, no. 4, pp. 391-399.
33. Zhai X., Hu Y., Wang C. "An Ultra-Low Power Memristor-Based Wake-Up Radio for Wireless Sensor Networks", *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, Aug. 2018, vol. 14, no. 8, pp. 3693-3702.
34. Shokri-Kaveh H. et al. "Modeling and Simulation of Metal Oxide Based Memristors Using COMSOL Multiphysics", *IEEE Transactions on Nanotechnology*, May 2016, vol. 15, no. 3, pp. 398-406.
35. Salahuddin S., Datta S. "Use of Negative Capacitance to Provide Voltage Amplification for Low Power Nanoscale Devices", *Nano Letters*, Feb. 2008, vol. 8, no. 2, pp. 405-410.
36. Karel J., Vobecky J., Hudec P. "Simulation of Memristor Devices with COMSOL Multiphysics", *Proceedings of the 19th Conference STUDENT EEICT 2013. Czech Technical University in Prague. Czech Republic*, Apr. 2013, pp. 394-398.
37. S.Y. Kim et al. "Modeling and Analysis of Memristor-Based Nonvolatile Flip-Flops", *IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems*, Jul. 2015, vol. 23, no. 7, pp. 1263-1271.
38. Xie Y., Haymaker W.H., Cao Y. "3D Modeling and Analysis of a Crossbar Memristor Array", *IEEE Transactions on Nanotechnology*, Sep. 2012, vol. 11, no. 5, pp. 985-991.
39. Yang J.J., Williams R.S., Wu Q. "Memristive Devices for Computing", *Nature Nanotechnology*, 2013, vol. 8, no. 1, pp. 13-24.
40. Chen Y., Wu Y., Kang S. "Modeling and simulation of memristor-based circuits and systems for radio frequency applications // Journal of Micromechanics and Microengineering. 27(3). 2017. 035012.
41. Murenets I.V., Potapov A.S., Chernyshev V.V. "Microwave properties of memristor-based circuits", *Journal of Communications Technology and Electronics*, 2018, no. 63(2), pp. 162-170.
42. Banerjee A., Mukhopadhyay S., Sarkar A. "Radio frequency (RF) memristor modeling and simulation for wireless communication applications", *2015 IEEE International Conference on Electronics, Computing and Communication Technologies (CONECCT)*, 2015, pp. 1-5.
43. Zhang Y., Wu J. "A novel radio frequency (RF) memristor model for RF circuit design", *2016 International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology (ICMMT)*, 2016, pp. 1-4.
44. Ma Z., Chen J., Zhang J. "An accurate and efficient method for radio-frequency memristor simulation", *Chinese Physics B*, 2015, no. 24 (12), 128501.
45. Chen Y., Wu Y., Kang S. "Modeling and simulation of memristor-based circuits and systems for radio frequency applications", *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2017, no. 27 (3), 035012.
46. Murenets I.V., Potapov A.S., Chernyshev V.V. "Microwave properties of memristor-based circuits", *Journal of Communications Technology and Electronics*, 2018, no. 63 (2), pp. 162-170.
47. Banerjee A., Mukhopadhyay S., Sarkar A. "Radio frequency (RF) memristor modeling and simulation for wireless communication applications", *2015 IEEE International Conference on Electronics, Computing and Communication Technologies (CONECCT)*, 2015, pp. 1-5.
48. Zhang Y., Wu J. "A novel radio frequency (RF) memristor model for RF circuit design", *2016 International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology (ICMMT)*, 2016, pp. 1-4.
49. Ma Z., Chen J., Zhang J. "An accurate and efficient method for radio-frequency memristor simulation", *Chinese Physics B*, 2015, no. 24 (12), 128501.
50. Lee B., Jo S.H., Lee S.R., Lee J., Kim W. "Memristor-based artificial synapses for next-generation intelligent systems", *Nature Materials*, 2019, vol. 18, no. 8, pp. 829-836.
51. Gao H., Xu Y., Li X. "Design and simulation of memristive devices and networks for neuromorphic computing", *IEEE Transactions on Nanotechnology*, 2018, vol. 17, no. 4, pp. 701-708.
52. Zidan M.M., Gao S., Alkabani Y., Strachan J.P., Lu W.D. "Memristive devices for computing", *Nature Electronics*, 2020, vol. 3, no. 11, pp. 640-652.
53. Idrisov A., Vorobeva A., Vyatkin V. "Simulation of memristive systems for development of wireless sensor networks", *Proceedings of the 5th International Conference on Control, Decision and Information Technologies, Barcelona, Spain*, 2017, pp. 420-424.
54. Kumar R., Bjornsson R., Barth S., Ingólfsson O. "A Review of Silicon-based Memristors: Fabrication, Characterization and Applications", *Chem Sci.*, Sep. 2017, vol. 8 (9), pp. 5949-5952.
55. Chua L. "Memristor, Hodgkin-Huxley, and Edge of Chaos", *Nanotechnology*, 2014, no. 25(9), 095201.
56. Strukov D.B., Likharev K.K. "CMOL FPGA: a reconfigurable architecture for hybrid digital circuits with two-terminal nanodevices", *Nanotechnology*, 2012, no. 23 (38), 384006.
57. Pershin Y.V., Di Ventra M. "Memory effects in complex materials and nanoscale systems", *Advances in Physics*, 2010, no. 60 (2), pp. 145-227.
58. Li Y. et al. "Resistance Switching and Multilevel Data Storage in ZrO<sub>2</sub>/TiO<sub>2</sub> Bilayer Thin Films for Nonvolatile Memory Applications", *Nanotechnology*, Jun. 2011, 254028 (5 pp).
59. Ali S. et al. "Recent Advances in Cerium Oxide-Based Memristors for Neuromorphic Computing", *Nanomaterials*, Sep. 2023, no. 13 (17), 2443.
60. Raoux S., Burr G., Brewisch M.J., Rettner C. "Phase-change random access memory (PRAM): a scalable technology", *IBM Journal of Research and Development*, Jul.-Sep. 2008, vol. 52, no. 4 (5), pp. 465-479.
61. Linn E., Rosezin R., Kügeler C., Waser R., Bäcker M. "Complementary resistive switches for passive nanocrossbar memories", *Nature materials*, 2010, no. 9 (5), pp. 403-406.
62. Yang J.J., Pickett M.D., Li X., Ohlberg D.A., Stewart D.R., Williams R.S. "Memristive switching mechanism for metal/oxide/metal nanodevices", *Nature nanotechnology*, 2008, no. 3(7), pp. 429-433.
63. Meng F., Sana B., Li Yu., Liu Yu. "Bioengineered Tunable Memristor Based on Protein Nanocage", *Small*, Jan. 2014, vol. 10, no. 2, pp. 213-241.

64. Chen M., Wan Zh., Dong H., Chen Q., Gu1 M., Zhang Q. "Direct laser writing of graphene oxide for ultra-low power consumption memristors in reservoir computing for digital recognition", *Natl Sci Open. Special Topic: Novel Optoelectronic Devices*, 2022, vol. 1, no. 3.
65. Zhang M., Wang S., Wang X., Xia Y., Chen L. "Investigation of Thermoelectric Memristor Based on SiGe Alloy", *Journal of Electronic Materials*, 2021, vol. 50, no. 9, pp. 5624-5631.
66. Yang C.Y., Lee W.H., Lin C.C. "Electrochemical metallization memory cells based on nanocomposite solid electrolytes", *Journal of Applied Physics*, 2008, vol. 103, no. 5, 053701.
67. Zhu H., Zhang Q., Wei X., Yang X., Hu W. "Organic memristive devices based on conjugated polymers: A review", *Materials Today*, 2016, vol. 19, no. 4, pp. 188-197.
68. Li B., Liang G., Zhang S. "Photonic Memristor Based on Coupled Microdisk Resonators", *Scientific Reports*, 2016, vol. 6, 36480.
69. Abunahla H., Halawani Ya., Alazzam A., Mohammad B. "NeuroMem: Analog Graphene-Based Resistive Memory for Artificial Neural Networks", *Scientific Reports*, 2020, vol. 10 (1).
70. Waser R., Aono M. "Nanoionic resistive-switching memories", *Nanoscience and Technology*, Aug. 2009, pp. 158-165.
71. Zhou Y., Xu J. "Modeling and simulation of circular memristors for neuromorphic computing", *Journal of Applied Physics*, 2019, no. 125 (14), 144502.
72. Ielmini D., Zhang Y. "Device concepts for physical computing based on resistive switching memories", *Proceedings of the IEEE*, 2016, no. 104 (10), pp. 2000-2021.
73. Wu X., Zou X., Zhu X., Zhang J., Zhang H. "Perovskite oxide memristive devices: materials, structures, and mechanisms", *Journal of Materials Chemistry C*, 2019, no. 7 (43), pp. 13259-13276.
74. Yang Y., Gao P., Li Z., Gaba S., Lu W. "Anatomy of a nanoscale conduction channel reveals the mechanism of a high-performance memristor", *Advanced Materials*, 2013, no. 25 (31), pp. 5419-5425.
75. Wu X., Xu H., Zhang H. "Photonic synapses based on two-dimensional materials for neuromorphic computing", *Advanced Materials*, 2021, no. 33 (6), 2005328.
76. Yu S., Wu Y., Jeyasingh R.G., Kuzum D., Wong H.S. "An electronic synapse device based on metal oxide resistive switching memory for neuromorphic computation", *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2011, no. 58 (8), pp. 2729-2737.
77. Li X., Li Y., Li H., Yang H. "A tunable memristor model for radar target recognition", *IEEE Access*, 2020, vol. 8, pp. 107940-107951.

Submitted 27.11.2023; revised 26.02.2024

#### Information about the authors

**Daniil A. Shershov** – Student, Department of Radioelectronic Devices and Systems, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: shershovdaniil@yandex.ru

**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); International Institute of Computer Technologies (29b Solnechanya str., Voronezh 394026, Russia), tel.: +7 (473)243-77-29, e-mail: fedorov\_sm@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9027-6163>

**Alexander V. Volod'ko** – Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Department of Radioelectronic Devices and Systems, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: zavlabvgtu@rambler.ru

**Ivan A. Zelenin** – Senior Lecturer, Department of Radioelectronic Devices and Systems, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: zia49zia@mail.ru

## УЛУЧШЕНИЕ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ИСПРАВЛЕНИЯ ОШИБОК В БЛОЧНЫХ НИЗКОПЛОТНОСТНЫХ КОДАХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОМПОНЕНТОВ КОДЕКА

М.В. Хорошайлова, И.В. Свиридова, Д.В. Лялин

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

**Аннотация:** на основе метода передачи суперпозиции цепей Маркова (BMST) представлен новый класс объединенных кодов с низкой плотностью проверок на четность (LDPC) для передачи на основе транспортных блоков (ТБ) с целью улучшения эффективности коррекции ошибок. При кодировании предыдущие кодовые LDPC-слова, соответствующие ТБ (в предыдущем временном интервале), чередуются и накладываются на текущие кодовые LDPC-слова, в результате чего получаются передаваемые кодовые слова. Для декодирования может быть использован алгоритм декодирования скользящего поля суммы-произведения или минимальной суммы, отличающийся относительно низкой задержкой декодирования. Для анализа эффективности BMST LDPC-кодов на уровне ошибки используем нижнюю границу системы передачи пакетов, использующих механизм случайного множественного доступа, которая позволяет оперативно предсказать эффективность исправления ошибок. Численные результаты показывают, что предложенные коды могут иметь производительность, приближающуюся к пропускной способности, с отрывом в 0,007 дБ от соответствующего предела Шеннона. Они также показывают, что с помощью предложенной конструкции BMST можно значительно улучшить эффективность исправления ошибок исходных блочных LDPC-кодов 5G, достигая выигрыша в кодировании до 1 дБ для каналов с аддитивным белым гауссовским шумом (АБГШ) и до 2 дБ для каналов с быстрыми замираниями

**Ключевые слова:** метод передачи суперпозиции цепей Маркова, коды с низкой плотностью проверок на четность, транспортные блоки, скорость передачи

### Введение

В последнее время, благодаря высокой пропускной способности при декодировании и хорошим характеристикам коррекции ошибок, LDPC-коды были приняты в стандарте нового радио (NR) 5G для каналов передачи данных, включая стандарт расширенной мобильной широкополосной связи (eMBB) [1] и стандарт сверхнадежной и низкой задержки связи для критически важных требований (URLLC) [2]. На практике в современных стандартах беспроводной связи (таких как 5G NR и LTE) используется передача на основе транспортных блоков (ТБ), когда ТБ (информация MAC-уровня) сегментируется на несколько кодовых блоков (КБ), и каждый КБ независимо кодируется (в кодовый блок, называемый также кодовым словом) и декодируется. Однако в случае неудачного восстановления некоторых КБ (даже одного) требуется повторная передача всего ТБ в стандарте беспроводной высокоскоростной передачи данных (LTE) [3] или всей группы КБ (CBG) в 5G [4]. Спектральная эффективность и мощность передачи при таких протоколах может быть потрачена впустую.

Для повышения эффективности использования ресурсов одним из простых способов является улучшение характеристик коррекции ошибок при первой передаче. Для достижения конкурентоспособных характеристик в большинстве конструкций пространственно связанных LDPC-кодов (SC-LDPC) избегаются короткие циклы графа Таннера. Однако архитектура кодека традиционных SC-LDPC-кодов слабо связана с архитектурой компонентных блочных LDPC-кодов. При условии наличия готового блочного LDPC-кода практическая реализация и реальное проектирование с использованием обычных SC-LDPC-кодов могут оказаться неудобными.

В обычных кодах на основе метода передачи суперпозиции цепей Маркова базовые коды обычно плохие, поэтому для обеспечения хорошей производительности требуется большая память для кодирования и относительно большая задержка декодирования. В отличие от традиционных BMST-кодов, используют в качестве базовых кодов декартово произведение готовых LDPC-кодов, причем для обеспечения удовлетворительных характеристик достаточно одной кодирующей памяти. Также предлагается ориентированная на транспортные блоки конструкция связанных LDPC-кодов, в которой вместо частичной суперпози-

ции используется полная суперпозиция, а вместо случайного перемежителя - перемежитель строка-столбец, что позволяет получить более практичную конструкцию.

### Кодирование LDPC-кодов с использованием метода передачи суперпозиции цепей Маркова

Пусть  $F_2 \triangleq \{0; 1\}$  – двоичное поле. Пусть  $C[n,k]$  обозначает двоичный блочный LDPC-код, длина которого равна  $n$ , а размерность –  $k$  [5]. Матрица проверки четности и матрица генератора  $C[n,k]$  обозначаются через  $H$  и  $G$  соответственно. В отличие от BMST или рекурсивного BMST кодов LDPC с частичной суперпозицией,  $B$ -кратное декартово произведение кодов LDPC, обозначаемое как  $C[n,k]$ , берется в качестве базовых кодов (адаптированных для передачи на основе транспортных блоков). Пусть  $u = (u^0, u^1, \dots, u^{L-1})$  обозначает  $L$  транспортных блоков, где каждый ТБ  $u^{(t)} \in F_2^{Bk}$  состоит из  $B$  кодовых блоков, обозначается как  $u = (u_0^{(t)}, u_1^{(t)}, \dots, u_{B-1}^{(t)})$  с  $u_i^{(t)} \in F_2^k$  для  $0 \leq i \leq B-1$ . Кодирование кодов BMST-LDPC может быть описано аналогично лестничным кодам. Как показано на рис. 1, закодированные блоки разделены на  $L$  слоев, каждый из которых, за исключением последнего, состоит из блоков двух типов. Таким образом, пунктирные блоки обозначают кодовые слова  $v^{(t)}$  LDPC, а сплошные блоки обозначают передаваемые кодовые слова  $c^{(t)}$ .

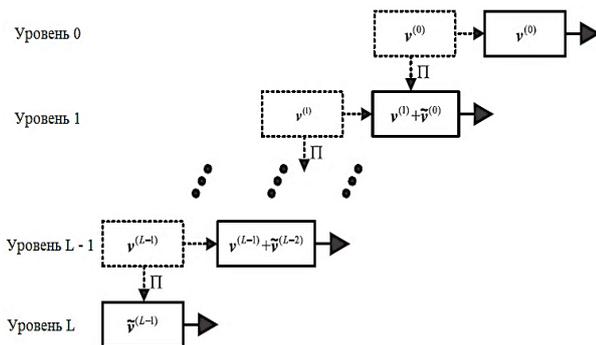


Рис. 1. Кодирование LDPC-кодов с использованием метода передачи суперпозиции цепей Маркова

В интервале времени  $t$  значение ТБ  $u^t = (u_0^{(t)}, u_1^{(t)}, \dots, u_{B-1}^{(t)})$  сначала кодируется (параллельно для обеспечения высокой пропускной способности) LDPC-кодером, в результате чего получаются двоичные кодовые слова

$v^t = (v_0^{(t)}, v_1^{(t)}, \dots, v_{B-1}^{(t)})$ , где  $v_i^{(t)} = u_i^{(t)}G \in F_2^n$  – это кодовое LDPC-слово. Предполагая, что есть доступ к предыдущей LDPC-кодированному блоку  $v^{(t-1)} = (v_0^{(t-1)}, v_1^{(t-1)}, \dots, v_{B-1}^{(t-1)})$  с  $v_i^{(t-1)} \in F_2^n$  Кодовое слово, передаваемых  $c^t$  может быть вычислено как

$$c^{(t)} = v^{(t)} + \Pi(v^{(t-1)}) = v^{(t)} + \hat{v}^{(t-1)}, \quad (1)$$

где “+” обозначает побитовое сложение по  $F_2^{nB}$  и  $\Pi$  – это перемежитель строк и столбцов для практического использования. Нужно отметить, что  $v^{(L)}$  имеет значение “все нули” для инициализации, а  $v^{(L)}$  имеет значение “все нули” для завершения.

### Декодирование LDPC-кодов с использованием метода передачи суперпозиции цепей Маркова

Ниже описан итерационный алгоритм декодирования BMST-LDPC-кодов с мягким входом и мягким выходом (SISO), в качестве основных компонентов которого выступают декодеры блочных LDPC-кодов [6]. Предположим, что кодовые слова  $c = (c^0, c^1, \dots, c^L)$  передаются по АБГШ-каналу с BPSK-сигналом, в результате чего на приемнике формируется зашумленная версия, обозначаемая как  $y = (y^0, y^1, \dots, y^L)$ . Коэффициенты логарифмического правдоподобия LLR), связанные с  $c^{(t)}$ , рассчитываются следующим образом

$$\Lambda_i(c^{(t)}) = \ln \frac{Pr\{y_i^{(t)} | c_i^{(t)} = 0\}}{Pr\{y_i^{(t)} | c_i^{(t)} = 1\}} = \frac{2y_i^{(t)}}{\sigma^2}$$

для  $0 \leq i \leq nB - 1$ .

Алгоритм передачи сообщения для уровня  $t$ :  $+ \rightarrow = \rightarrow$  LDPC  $\rightarrow = \rightarrow +$ .

Обновление сообщения на каждом узле указывается последовательно следующим образом. Узел +: Взять в качестве входного сигнала  $\Lambda(c^t)$  и  $\Lambda^e(v^{(t-1)})$  и доставить как выход  $\Lambda^a(v^{(t)})$ , чей  $i$ -й компонент рассчитывается как

$$\Lambda_i^a(v^{(t)}) = 2 \tanh^{-1}(\tanh(\frac{1}{2}\Lambda_i(c^t))\tanh(\frac{1}{2}\Lambda_i^e(v^{(t-1)}))).$$



где  $\Pi^i$  -  $i$ -я мощность  $\Pi$ , а  $H^B$  - матрица проверки четности компонентного кода ( $B$ -кратное декартово произведение LDPC-кода), заданная в виде

$$H^B = \begin{bmatrix} H & & & \\ & H & & \\ & & \ddots & \\ & & & H \end{bmatrix}. \quad (6)$$

Для обращения регистра в нуль в процедуре завершения обычных SC-LDPC-кодов необходимо передать конец вектора (обычно ненулевой), который вычисляется на основе предыдущих закодированных информационных битов. В то время как для завершения BMST-LDPC-кодов можно использовать простые векторы со всеми нулями. Таким образом, по сравнению с обычными SC-LDPC-кодами, предлагаемые коды имеют более простую процедуру завершения. При частичной суперпозиции BMST-LDPC или рекурсивной частичной суперпозиции BMST-LDPC можно получить только дополнительный выигрыш в кодировании по сравнению с блочными LDPC-кодами. В то время, как предлагаемые LDPC-коды на основе метода передачи суперпозиции цепей Маркова позволяют не только получить выигрыш в кодировании, но и продемонстрировать производительность, приближающуюся

к пропускной способности. В частично-суперпозиционных BMST-LDPC или рекурсивных частично-суперпозиционных BMST-LDPC в качестве базового кода принимается одноблочный LDPC-код. В предлагаемых BMST-LDPC-кодах в качестве базового кода используется  $B$ -кратное декартово произведение LDPC-кода, что позволяет естественным образом улучшить передачу на основе ТБ.

В предлагаемых кодах используется полная суперпозиция, а не частичная, что позволяет избежать оптимизации в зависимости от SNR в рекурсивных BMST-LDPC-кодах с частичной суперпозицией. В предлагаемых кодах вместо случайного чередования используется чередование строк и столбцов, что позволяет реализовать их более практично по сравнению с рекурсивными BMST-LDPC-кодами с частичной суперпозицией.

### Графическое представление

Описание процедуры сцепления SC-LDPC-кодов представлено на рис. 3, где для создания цепочки сцепления SC-LDPC-кодов применяются операция копирования и функция отклика на ступень.

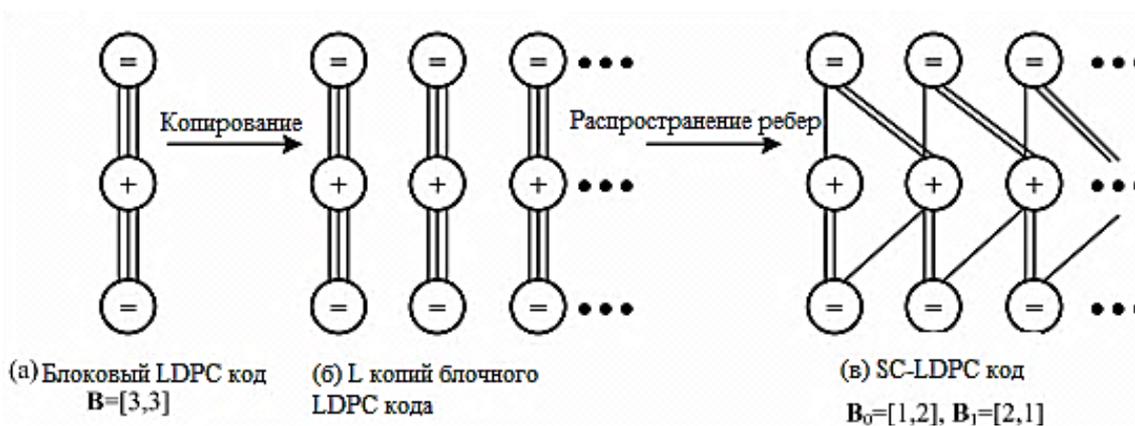


Рис. 3. Условное протографическое описание SC-LDPC-кодов для процедуры сопряжения

При заданной базовой матрице  $B = [3,3]$  сокращенный вариант для блочных кодов LDPC показан на рис. 3(а). С помощью операции копирования можем получить серию из  $L$  независимых и идентичных графов для несвязанных блочных кодов LDPC, как показано на рис. 3(б). С помощью операции расширения ребер  $L$  независимых графов соединяются в последователь-

ную цепочку, которая является прототипом кода SC-LDPC, показано на рис. 3(в).

Операцией копирования можно получить серию из  $L$  независимых и одинаковых графов для несвязанных блочных LDPC-кодов. С использованием функции отклика на ступень  $L$  независимых графов объединяются в последовательную цепь, которая и является протогра-

фом SC-LDPC-кода. Если задана матрица проверки на четность  $H = [H_{i,j}]$  размером  $(N - K) \times N$ , то можно построить двудольный граф, состоящий из  $N - K$  контрольных узлов и  $N$  переменных узлов, где связь между этими двумя типами узлов определяется  $H$ .

### Пороговые значения с использованием различных составляющих кодов

Анализ диаграммы состояния EXIT для кодовых наборов BMST-LDPC (J, 2J, 50) с различными компонентами кодов показан на рис. 4. Требуемое значение SNR  $E_b/N_0$  для кодов BMST-LDPC с различными компонентными LDPC-кодами, полученное с помощью моделирования методом Монте-Карло при заданном целевом значении BER, равном  $10^{-3}$ , также представлено на этом рисунке, где параметр декартова произведения установлен как  $V = n/2$ .

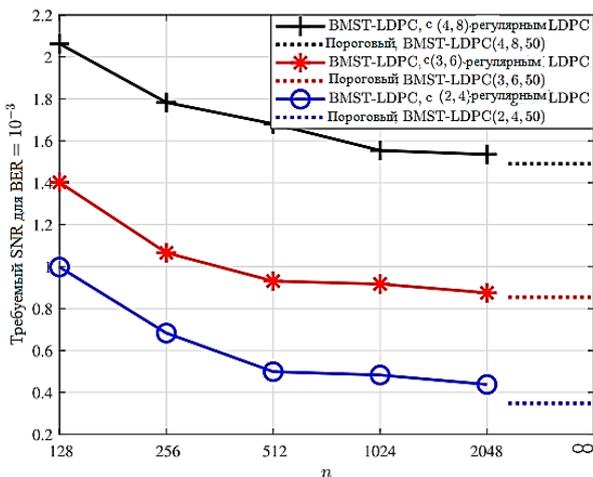


Рис. 4. Анализ диаграммы состояния EXIT для кодовых наборов с различными компонентами кодов

На рис. 4 сплошными линиями обозначено требуемое значение SNR  $E_b/N_0$  для кодов BMST-LDPC, полученных путем моделирования для BER, где длина кода  $n$  базового блока LDPC равна 128, 256, 512, 1024 или 2048. Пунктирные линии обозначают пороговое значение для кодовых наборов BMST-LDPC, полученных с помощью диаграммы EXIT. Как для алгоритма декодирования, так и для алгоритма диаграммы EXIT размер окна равен  $d = 4$ . Из этого рисунка видим, что требуемый SNR  $E_b/N_0$  при моделировании может приближаться к порогу декодирования  $\epsilon$  при анализе диаграммы EXIT по мере увеличения

длины кода  $n$ , что приводит к разрыву в 0,090 дБ, 0,021 дБ или 0,044 дБ от соответствующего  $\epsilon$ . Это подтверждает эффективность предлагаемого анализа EXIT для наборов LDPC-кода на основе метода передачи суперпозиции цепей Маркова. Также можно заметить, что коды BMST-LDPC, использующие (2, 4)-обычные блочные коды LDPC в качестве базовых кодов.

### Результаты моделирования

Численные результаты предложенных кодов предполагают каналы BPSK-AWGN. Для кодирования представленные двухдиагональные LDPC-коды как со строками, так и со столбцами веса 2 из подматричных P и 5G LDPC-кодов используются для построения соответствующих BMST-LDPC-кодов. Во всех моделированиях для каждого L = 50 ТБ кодер завершает работу. Для декодирования выполняется алгоритмы декодирования с SPA и MSA (с коэффициентом масштабирования 0,65), где устанавливаем  $J_{max} = 10$  для глобальной итерации и  $I_{max} = 50$  для локальной итерации (для встроенных блочных кодов LDPC). Для стандартных блочных LDPC-кодов максимальное число итераций установлено равным 50.

При той же задержке декодирования приводим следующий пример для сравнения производительности декодирования между (3, 6) - обычными кодами SC-LDPC и (2, 4) - обычными кодами SC-LDPC. Возьмите двухдиагональный (2, 4)-обычный блочный код LDPC длиной  $n = 1000$  бит с  $V = 2$  в качестве кода компонента и построим соответствующий BMST-код LDPC. Размер окна для декодирования установлен равным  $d = 3$ , что приводит к задержке декодирования в  $dnB = 6000$  бит. Для сравнения в качестве эталона выбраны обычные (3, 6)-регулярный SC-LDPC и (2, 4)-регулярный SC-LDPC, оба из которых имеют одинаковую задержку декодирования в 6000 бит.

На рис. 5 показаны сравнения производительности BER, где видим, что предлагаемый связанный код превосходит как (3, 6)-обычный, так и (2, 4) -обычный SC-LDPC-коды в области каскада.

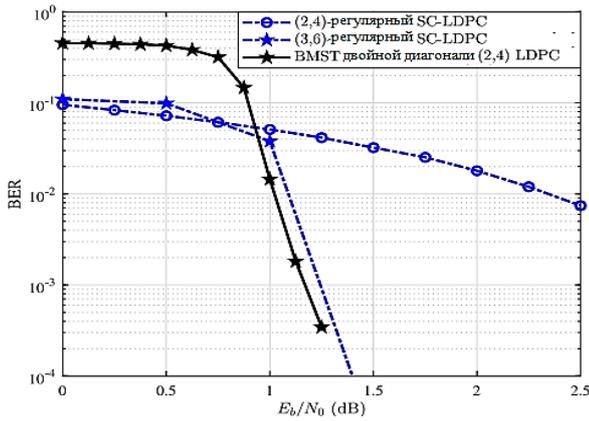


Рис. 5. Сравнение производительности BER для различных кодов

Рассмотрим двухдиагональный  $(2, 4)$  обычный блочный LDPC-код длиной  $n = 512$  бит в качестве компонентного кода для построения соответствующего BMST-LDPC-кода, где  $B = 1, 32$  и  $64$ . Размер окна для декодирования кода BMST-LDPC равен  $d = 4$ . На рис. 6 показано сравнение производительности BER.

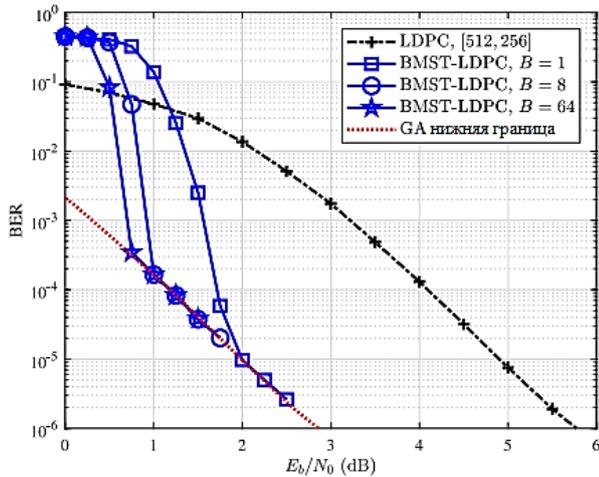


Рис. 6. Производительность декодирования и нижняя граница предлагаемых кодов для различных декартовых параметров, где  $B = 1, 8$  и  $64$

Из этого рис. 6 видим, что при увеличении декартова параметра  $B$  производительность декодирования может быть улучшена. Базовый код представляет собой двухдиагональный  $(2, 4)$  LDPC-код длиной 512 бит. Размер окна для декодирования устанавливается равным  $d = 4$ .

Чтобы показать улучшение производительности предлагаемых кодов по сравнению с исходными блочными LDPC-кодами стандарта 5G, возьмем  $B$ -кратное декартово произведе-

ние 5G блочных LDPC-кодов  $[2112,1056]^8$ ,  $[1056,528]^{16}$  и  $[528,264]^{32}$  в качестве кодов компонентов и построим соответствующие BMST-LDPC-коды, где все 5G LDPC-коды получены на основе BG2. При такой настройке длина кода  $s^{(t)}$  для кодов BMST-LDPC является постоянной и составляет 16,896 бит. В частности, согласно стандарту NR, к каждому кодовому блоку в пределах ТБ добавляются 24 бита CRC, сгенерированных с помощью  $g(x) = x^{24} + x^{23} + x^6 + x^5 + x^1$ . Основываясь на дополнительных CRC-битах, вышеупомянутые стратегии ранней остановки используются в процедуре декодирования, где размер окна для декодирования устанавливается равным  $d = 2$ , что приводит к небольшой задержке декодирования. На рис. 7 показано сравнение производительности частоты ошибок блока (FER), соответствующее каждому кодовому блоку. Для предлагаемых связанных кодов размер окна для декодирования устанавливается равным  $d = 2$ .

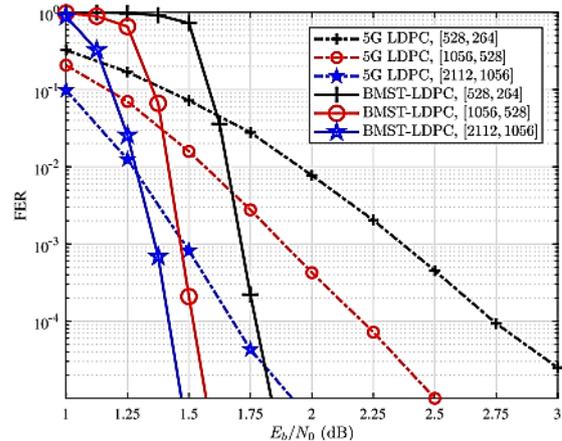


Рис. 7. FER исходных кодов LDPC блока 5G и соответствующих кодов BMST-LDPC

Можно заметить, что предлагаемые коды превосходят исходные блочные LDPC-коды 5G, демонстрируя усиление кодирования на 2,0 дБ при FER  $10^{-4}$  (с 5G LDPC  $[528,264]^{32}$  в качестве базового кода).

### Заключение

Представлен новый класс связанных LDPC-кодов, построенных на основе готовых блочных LDPC-кодов с системой передачи данных с суперпозицией блочных марковских кодов. Представленные BMST-LDPC-коды являются аппаратно-ориентированными, поскольку их кодер/декодер может быть реали-

зован путем повторного использования архитектуры компонентных блочных LDPC-кодов. Производительность в области спада может быть эффективно спрогнозирована с помощью представленного анализа диаграммы EXIT, а производительность в области минимума может быть эффективно спрогнозирована с помощью нижней границы. Кроме того, используя LDPC-коды стандарта 5G и коды LDPC с двойной диагональю (2, 4), в качестве кодов компонентов, были сконструированы соответствующие коды BMST-LDPC для практического использования, что привело к значительному выигрышу в кодировании по сравнению с исходными блочными LDPC-кодами.

#### Литература

1. Mitchell L. D.G.M., Lentmaier M., Costello D.J. Spatially coupled LDPC codes constructed from protographs // IEEE Trans. Inf. Theor. No. 61. 2015. PP. 4866–4889.
2. Iterative decoding threshold analysis for LDPC convolutional codes / M. Lentmaier, A. Sridharan, D.J. Costello,

K.S. Zigangirov // IEEE Trans. Inf. Theor. No. 56. 2010. PP. 5274–5289.

3. Kudekar S., Richardson T., Urbanke R. Threshold saturation via spatial coupling: why convolutional LDPC ensembles perform so well over the BEC // IEEE Trans. Inf. Theor. No. 57 (2). 2011. PP. 803–834.

4. Kudekar S., Richardson T., Urbanke R. Spatially coupled ensembles universally achieve capacity under belief propagation // IEEE Trans. Inf. Theor. No. 59 (12). 2013. PP. 7761–7813.

5. Хорошайлова М.В. Архитектура для стохастических LDPC-декодеров с использованием эффективной площади кристалла на основе ПЛИС // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2018. Т. 14. № 1. С. 95–100.

6. Разработка QC-LDPC-декодера с высокой пропускной способностью для 5G беспроводной радиосвязи / А.В. Башкиров, М.В. Хорошайлова, П.П. Чураков, Е.В. Турецкая // Радиотехника. 2022. Т. 86. № 7. С. 14–19.

7. Хорошайлова М.В. Архитектура канального кодирования на основе ПЛИС для 5G беспроводной сети с использованием высокоуровневого синтеза // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2018. Т. 14. № 2. С. 99–105.

Поступила 25.12.2023; принята к публикации 01.03.2024

#### Информация об авторах

**Хорошайлова Марина Владимировна** – канд. техн. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: pmv2205@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9167-9538>

**Свиридова Ирина Владимировна** – старший преподаватель, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: ri-ss-ka@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5279-0807>

**Лялин Дмитрий Витальевич** – студент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: dmitrylialin95@gmail.com

## PERFORMANCE IMPROVEMENT ERROR CORRECTION IN BLOCK LOW-DENSITY CODES USING CODEC COMPONENTS

**M.V. Horoshailova, I.V. Sviridova, D.V. Lyalin**

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

**Abstract:** this article presents a new class of combined codes with low density parity checks (LDPC) for transmission based on transport blocks (TB) based on the Markov chain superposition transmission method (BMST) in order to improve the efficiency of error correction. During encoding, the previous LDPC code words corresponding to TB (in the previous time interval) are alternated and superimposed on the current LDPC code words, resulting in transmitted code words. For decoding, an algorithm for decoding a sliding sum-product field or a minimum sum can be used, characterized by a relatively low decoding delay. To analyze the effectiveness of BMST LDPC codes at the error level, we use the lower bound of the packet transmission system using the random multiple access mechanism, which allows us to effectively predict the effectiveness of error correction. Numerical results show that the proposed codes can have a performance approaching throughput, with a margin of 0.007 dB from the corresponding Shannon limit. They also show that using the proposed BMST design, the error correction efficiency of the original 5G block LDPC codes can be significantly improved, achieving coding gains of up to 1 dB for channels with additive white Gaussian noise (AWGN) and up to 2 dB for channels with fast fading

**Key words:** Markov chain superposition transmission method, low-density parity check codes, transport blocks, transmission rate

### References

1. Mitchell L. D.G.M., Lentmaier M., Costello D.J., “Spatially coupled LDPC codes constructed from protographs”, *IEEE Trans. Inf. Theor.*, 2015, no. 61, pp. 4866–4889.
2. Lentmaier M., Sridharan A., Costello D.J., Zigangirov K.S. “Iterative decoding threshold analysis for LDPC convolutional codes”, *IEEE Trans. Inf. Theor.*, 2010, no. 56, pp. 5274–5289.
3. Kudekar S., Richardson T., Urbanke R. “Threshold saturation via spatial coupling: why convolutional LDPC ensembles perform so well over the BEC”, *IEEE Trans. Inf. Theor.*, 2011, no. 57 (2), pp. 803–834.
4. Kudekar S., Richardson T., Urbanke R. “Spatially coupled ensembles universally achieve capacity under belief propagation”, *IEEE Trans. Inf. Theor.*, 2013, no. 59 (12), pp. 7761–7813.
5. Horoshailova M.V. “Architecture for stochastic LDPC decoders using the effective crystal area based on FPGA”, *The Bulletin of the Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2018, vol. 14, no. 1, pp. 95-100.
6. Bashkirov A.V., Horoshailova M.V., Churakov P.P., Turetskaja E.V. “Development of a QC-LDPC decoder with high bandwidth for 5G wireless radio communication”, *Radio Engineering (Radiotekhnika)*, 2022, vol. 86, no. 7, pp. 14-19.
7. Horoshaylova M.V. “Architecture of FPGA based channel coding for 5G wireless network using high-level synthesis”, *The Bulletin of the Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2018, vol. 14, no. 2, pp. 99-105.

Submitted 25.12.2023; revised 01.03.2024

### Information about the authors

**Marina V. Horoshaylova** – Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Ochyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: pmv2205@mail.ru, orcid.org/0000-0001-9167-9538  
**Irina V. Sviridova** - Senior Lecturer, Voronezh State Technical University, (84 20-letiya Ochyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: ri-ss-ka@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5279-0807>  
**Dmitry V. Lyalin** – Student, Voronezh State Technical University, (84 20-letiya Ochyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: dmitrylyalin95@gmail.com

**АППАРАТНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ КОМПЛЕКСИРОВАННОГО АЛГОРИТМА ИДЕНТИФИКАЦИИ РАДИОСИГНАЛОВ ПО ФОРМЕ СПЕКТРА**А.Г. Студеникин<sup>1,2</sup>, В.А. Козьмин<sup>1</sup>, А.Б. Токарев<sup>1,2,3</sup><sup>1</sup>АО «ИРКОС», г. Воронеж, Россия<sup>2</sup>Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия<sup>3</sup>Международный институт компьютерных технологий, г. Воронеж, Россия

**Аннотация:** развитие технологий беспроводной связи, и, как следствие, систем радиоконтроля требует всё большего быстродействия при обработке сигналов, в частности при их идентификации в смысле определения принадлежности стандарту связи. Для обеспечения высокого быстродействия при анализе диапазонов частот шириной в несколько гигагерц идентификационные процедуры разделяются на этапы, первичный из которых базируется на оценках «внешних» признаков сигналов, одним из которых является форма спектра. Подходящей аппаратной основой для реализации высокоскоростных алгоритмов обработки сигналов являются программируемые логические интегральные схемы (ПЛИС). Вместе с тем, как и множество других алгоритмов обработки сигналов, идентификационные алгоритмы, как правило, представляют собой последовательные процедуры, ориентированные на программную реализацию, т.е. на выполнение на микропроцессоре. Это относится и к комплексированному алгоритму идентификации по спектральным маскам, осуществляющему первичную идентификацию радиосигналов на основе формы их спектра. Однако подход к реализации алгоритмов обработки сигналов на ПЛИС имеет принципиальные отличия от программной реализации, поэтому отдельной и весьма актуальной задачей является разработка «аппаратных версий» алгоритмов. Рассмотрены особенности реализации на ПЛИС комплексированного алгоритма идентификации радиосигналов по спектральным маскам, обеспечивающей скорость анализа частотных диапазонов в 4,6 ГГц/с на сравнительно низкопроизводительных ПЛИС, например, Xilinx Zynс 7020

**Ключевые слова:** радиоконтроль, идентификация сигналов, спектральная маска, ПЛИС

**Введение**

Развитие технологий беспроводной связи вызывает потребность в совершенствовании систем радиоконтроля (СРК), позволяющих анализировать радиообстановку и выявлять проблемы использования радиочастотного спектра. Одной из задач радиоконтроля является идентификация радиоизлучений в смысле определения их принадлежности стандарту связи. При этом, как правило, ширина анализируемых частотных диапазонов (АДЧ) многократно превышает ширину полосы одновременного обзора (ПОО) СРК, и для анализа используется панорамный режим. В этом режиме приёмник СРК циклически перестраивается с одной ПОО на очередную, смежную по частоте, последовательно собирая данные о действующих излучениях в пределах ПОО. При достижении последней из ПОО, входящих в АДЧ, осуществляется переход к его началу, и цикл сбора данных повторяется заново [1, 2].

Надёжная идентификация сопряжена со значительными вычислительными затратами, т.к. для каждой частоты, где действует идентифицируемый сигнал, требует выполнения

множества операций: понижающего преобразования частоты, передискретизации, частотно-временной синхронизации, демодуляции, декодирования. С другой стороны, скорость потока данных, подлежащих идентификации, возрастает вместе с развитием беспроводных технологий: ростом ширины спектра сигналов, расширением используемых диапазонов частот, и т.д. Поэтому и каждое новое поколение СРК должно обеспечивать всё большую скорость сбора данных о радиообстановке. Так, производимая АО «ИРКОС» СРК АРГАМАК-Д11 модели 4 обладает ПОО шириной 24 МГц, скоростью панорамного анализа АДЧ – 20 ГГц/с [3], а скорость потока данных временной выборки достигает 1 Гб/с. Новая модель 5 СРК АРГАМАК-Д11 обладает ПОО шириной 100 МГц, скоростью панорамного анализа АДЧ – 60 ГГц/с [4], а скорость потока данных временной выборки достигает 4 Гб/с. Как следствие, ускорение процедуры идентификации радиосигналов является актуальной задачей.

Подходом, повышающим быстродействие решения задачи идентификации, является разделение процедуры идентификации на этапы. Согласно рекомендации Международного союза электросвязи [5], на первом этапе решение

о принадлежности излучения классу (стандарту) принимается на основе первичных признаков: центральной частоты, периода излучения, ширины и формы спектра. На втором этапе для отобранных излучений выполняется демодуляция и декодирование. В силу высокой скорости потока обрабатываемых данных подходящей аппаратной основой для осуществления первичной идентификации являются программируемые логические интегральные схемы (ПЛИС). В настоящей работе рассмотрены особенности аппаратной реализации алгоритма первичной идентификации радиосигналов по спектральным маскам (АСМ), представленного в работе [6].

В основе алгоритма АСМ лежит тот факт, что сигналы конкретных стандартов связи имеют характерную форму спектра, и идентификация базируется на сопоставлении наблюдаемого спектра с образцом – спектральной маской (СМ), представляющей собой совокупность амплитуд спектральных отсчётов сигнала, выраженных, например, в децибелах. На рис. 1 показана СМ для сигнала базовой станции UMTS, наложенная на накопленный по максимуму спектр этого сигнала.

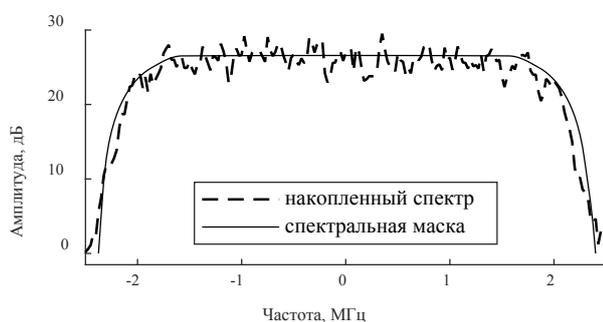


Рис. 1. СМ для сигнала базовой станции UMTS, наложенная на его накопленный спектр

Вместе с тем, при аппаратной реализации алгоритмов обработки сигналов необходимо учитывать следующие особенности ПЛИС.

1. Параллелизм вычислений. При выполнении программы на микропроцессоре при обработке ветвлений (например, операторов «if») исполняется только тот код, который соответствует условию. При выполнении того же алгоритма на ПЛИС вычисления проводятся сразу по всем ветвлениям с последующим использованием лишь того из результатов, который соответствует сработавшей ветви.

2. Ограниченный объем аппаратных ресурсов. В силу особенности №1 на ПЛИС должны быть размещены сразу все ветви обра-

ботки. Но для каждого конкретного кристалла ПЛИС имеющиеся аппаратные ресурсы ограничены, а потому их экономное использование является важным принципом при реализации алгоритмов обработки сигналов независимо от требований к быстродействию.

Как следствие, целью настоящей работы являются поиск способа рациональной реализации на ПЛИС алгоритма идентификации радиоизлучений по их принадлежности к различным стандартам связи, а также исследование влияния ПЛИС-оптимизации на показатели качества работы этого алгоритма.

### Подготовка исходных данных и основные этапы АСМ

Исходными данными для идентификации сигналов по форме спектра служат отсчеты  $S(i)$  ( $i = 0, 1, \dots, N_{SFsamp}-1$ ) панорамы спектра (ПС), получаемые накоплением по максимуму оценок спектральной плотности амплитуд (далее – спектра) на совокупности ПОО, представляющей некоторый участок АДЧ, с их последующим сглаживанием по частоте. Количество  $N_{SFsamp}$  отсчетов, составляющих ПС, определяется числом ПОО в ПС, и числом  $N$  спектральных отсчетов в ПОО.

Идентификация радиосигналов по их принадлежности различным стандартам связи подразумевает поиск на частотной оси таких участков, на которых совокупность отсчетов ПС соответствует по форме СМ, характеризующей конкретный стандарт радиоизлучения, и представляющей собой набор отсчетов  $\mu(m)$  ( $m = 0, 1, \dots, M-1$ ), соответствующий типовому спектру этого излучения, выраженному в децибелах. Количество отсчетов СМ  $M$  определяется дискретностью рассчитанного спектра, а также шириной полосы частот, занимаемой сигналом опознаваемого стандарта.

Как будет подробнее показано ниже, в целях выявления радиоизлучений алгоритм АСМ предполагает формирование ряда показателей, характеризующих степень сходства отсчетов ПС с СМ ожидаемых стандартов. Это позволяет определить выражаемые в номерах отсчетов ПС возможные позиции сигналов (ВПС) конкретных стандартов на оси частот. На завершающем этапе алгоритм АСМ сопоставляет ВПС по степени их правдоподобия и выбирает наиболее вероятный вариант в качестве результата первичной идентификации.

Формирование ПС является типовым этапом при решении многих задач радиоконтроля и подробно описано в различных работах, в частности в [6], поэтому на детализации способа получения отсчётов  $S(i)$  накопленной ПС останавливаться не будем, а основное внимание уделим методике расчёта и сопоставления ключевых показателей АСМ.

Отметим, что в соответствии с [7, 8] в СРК может использоваться однонаправленный или реверсивный режим сбора данных, а обработка информации может производиться в синхронном режиме, либо в режиме отложенной обработки. Каждый из упомянутых вариантов имеет свои достоинства и недостатки, которые, однако, не являются ключевыми с позиции реализации АСМ на ПЛИС. В связи с этим в рамках настоящей работы будем полагать, что в СРК используется классический однонаправленный режим сбора данных, и синхронный режим их обработки, требующий меньшего объёма памяти и обеспечивающий более быструю идентификацию сигналов в сравнении с отложенным режимом [9].

Вместе с тем, синхронный режим обработки данных отличается повышенной сложностью процедуры отбора решений, скорость потока данных на этом, финальном этапе обработки оказывается сравнительно малой, а требования к объёму памяти – существенными, поэтому целесообразно использовать программную реализацию этого этапа АСМ

(например, на компьютере, реализующем отображение результатов). Тогда процесс идентификации с использованием алгоритма АСМ можно представить в виде последовательности этапов, показанной на рис. 2:

- 1) перестроение приёмника СРК на центральную частоту очередной ПОО и приём временной выборки;
- 2) расчёт накопленного спектра и сохранение его в память;
- 3) при достаточном количестве сохранённых спектров для формирования ПС – выдача этой ПС на обработку АСМ;
- 4) обработка ПС при помощи АСМ и выдача ВПС для программной обработки;
- 5) формирование решений о расположении в ПС сигналов различных стандартов на основе полученных ВПС.

При этом процессы сбора данных новой ПС и обработки данных предыдущей ПС могут выполняться одновременно. Этапы 1-4 реализуются на ПЛИС, а этап 5 отбора решений – на универсальном компьютере.

Как уже отмечалось выше, первые три этапа являются типовыми, а потому остановимся на реализации АСМ на ПЛИС, под которой будем понимать четвёртый этап – формирование ВПС. Этот этап при реализации на ПЛИС можно разделить на структурные блоки, показанные на рис. 3. Рассмотрим смысл и детали реализации каждого из них.

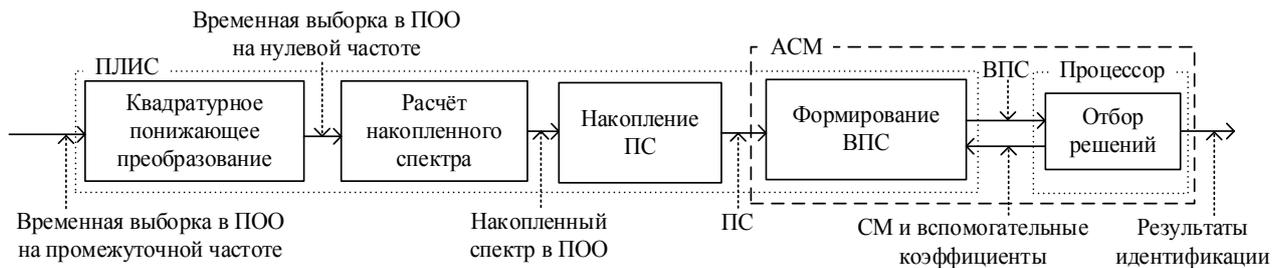


Рис. 2. Этапы обработки данных при аппаратной реализации АСМ



Рис. 3. Основные блоки аппаратной реализации этапа формирования ВПС

### Блок конфигурации

Ряд величин, которые остаются неизменными в процессе поиска сигналов каждого из стандартов, целесообразно рассчитать заранее и загружать в ПЛИС в виде набора констант, что и реализует блок конфигурации. Этот блок принимает от процессора и сохраняет в памяти ПЛИС для каждой СМ:

1) набор отсчётов СМ  $\mu(m)$  и их количество  $M$ ;

2) максимальное значение СМ

$$\mu_{max} = \max_m \mu(m); \quad (1)$$

3) сумму отсчётов СМ

$$S1_{\mu} = \sum_{m=0}^{M-1} \mu(m); \quad (2)$$

4) сумму квадратов отсчётов СМ

$$S2_{\mu} = \sum_{m=0}^{M-1} \mu^2(m); \quad (3)$$

5) величину задержки, значение которой пояснено далее

$$N_{PAD} = (M_{max} - M) / 2, \quad (4)$$

где  $M_{max}$  – максимальное число отсчётов СМ, поддерживаемое реализацией АСМ;

6) порог обнаружения

$$R = \mu_{max} \cdot t_h, \quad (5)$$

где  $t_h$  – порог, препятствующий распознаванию в качестве СМ слабых спектральных всплесков, схожих с СМ по форме;

7) показатели  $t_h, N$ .

### Блок первичных оценок

Последовательное выполнение этапов АСМ сокращает объём информации, обрабатываемой на каждом из них, что приводит к оптимальному использованию вычислительных ресурсов при программной реализации. Однако при реализации алгоритмов обработки сигналов на ПЛИС выигрыш от потенциального снижения объёма данных оказывается не столь значительным, и для обработки, как правило, используются потоковые схемы, где над

данными в порядке их поступления (в конвейерном режиме) выполняются одновременно все операции (включая и проверку различных условий). Как следствие, описанные выше расчёты тех или иных показателей для одного конкретного смещения СМ в ПС, при реализации на ПЛИС преобразуются в последовательный расчёт для всех возможных смещений; иначе говоря, расчёт выполняется скользящим окном. Например, вычисление максимума заменяется расчётом скользящего максимума, суммы – скользящей суммы, а скалярного произведения ПС и СМ – фильтрацией ПС при помощи КИХ-фильтра с коэффициентами, соответствующими СМ. Подобные «оконные» операции выделим в отдельный аппаратный блок первичных оценок, отвечающий за расчёт:

1) максимума и минимума ПС среди  $M$  отсчётов, начиная с  $i$ -го,

$$S_{max}(i) = \max_m S(i+m), \quad m = 0, 1, \dots, M-1, \quad (6)$$

$$S_{min}(i) = \min_m S(i+m), \quad m = 0, 1, \dots, M-1, \quad (7)$$

2) суммы отсчётов ПС на длине СМ, начиная с  $i$ -го отсчёта

$$S1_a(i) = \sum_{m=0}^{M-1} S(i+m), \quad (8)$$

3) суммы квадратов отсчётов  $j$ -ой СМ,

$$S2_a(i) = \sum_{m=0}^{M-1} S^2(i+m), \quad (9)$$

4) скалярного произведения ПС и СМ

$$P_{a\mu}(i) = \sum_{m=0}^{M-1} S(i+m) \cdot \mu(m). \quad (10)$$

Также данный блок содержит ряд элементов задержки, назначение которых будет описано далее. Схематически блок расчёта первичных оценок показан на рис. 4.

Применительно к реализации блока первичных оценок на ПЛИС рассмотрим возможности оптимизации составляющих его операций, одной из которых является расчёт скользящих максимума и минимума. При этом, поскольку эти операции идентичны, конкретизируем реализацию лишь скользящего максимума.

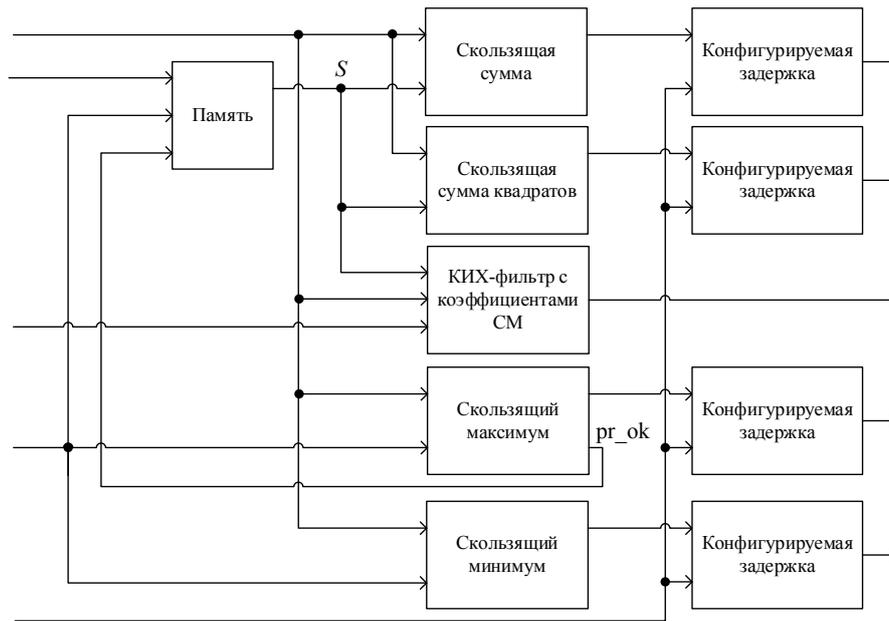


Рис. 4. Состав блока расчёта первичных оценок

### Оптимизация ресурсов ПЛИС при расчёте скользящего максимума

Прямая реализация *скользящего* максимума (СКМ)  $S_{max}(i)$  на ПЛИС при типовой длине окна  $M$ , составляющей минимум несколько десятков отсчётов, достаточно ресурсозатратна, т.к. требует сдвигового регистра длиной  $M-1$ , равного этой длине числа компа-

раторов,  $M$ -входного мультиплексора, а также порядка  $M$  элементарных логических элементов и триггеров. При этом все эти элементы должны иметь разрядность  $W$ , соответствующую отсчётам ПС (типсовая разрядность ПС составляет  $W = 8$  бит). Пример такой реализации при  $M = 3$  показан на рис. 5, где обозначение «clk» соответствует сигналу тактовой частоты.

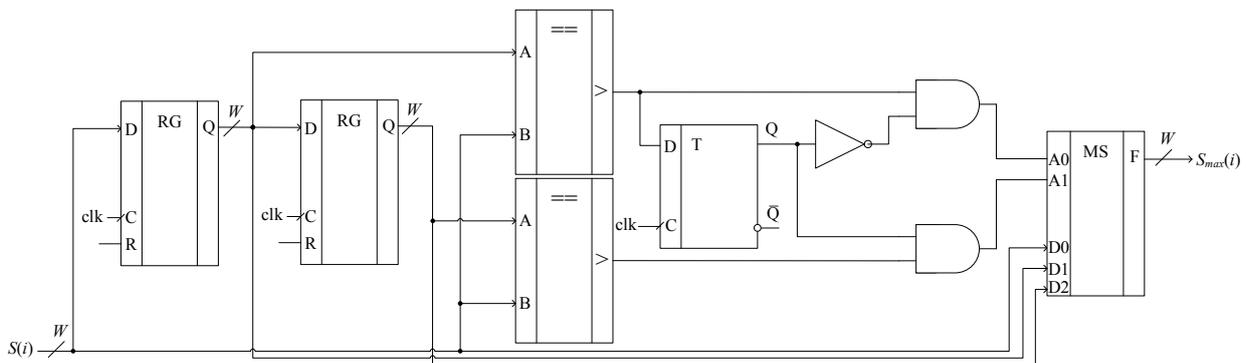


Рис. 5. Прямая реализация СКМ на ПЛИС при  $M = 3$

Намного меньших ресурсов требует расчёт *накопленного* максимума (НКМ)  $S_n(i)$ , при котором по мере анализа входной последовательности каждому её элементу ставится в соответствие максимальное среди всех проанализированных элементов значение. Соответствующая схема показана на рис. 6 сверху и состоит из компаратора, регистра, а также элемента логического «И».

Сопоставимый с расчётом НКМ объём ресурсов требует расчёт *поэлементного* максимума (ПЭМ)  $S_p(i)$ , при котором для двух массивов  $S_1(i)$  и  $S_2(i)$  равного объёма, по мере их последовательного и синхронного анализа каждой паре элементов массивов с одинаковым номером ставится в соответствие максимальное значение из этих двух элементов. Соответствующая схема показана на рис. 6 снизу и состоит из компаратора и мультиплексора.

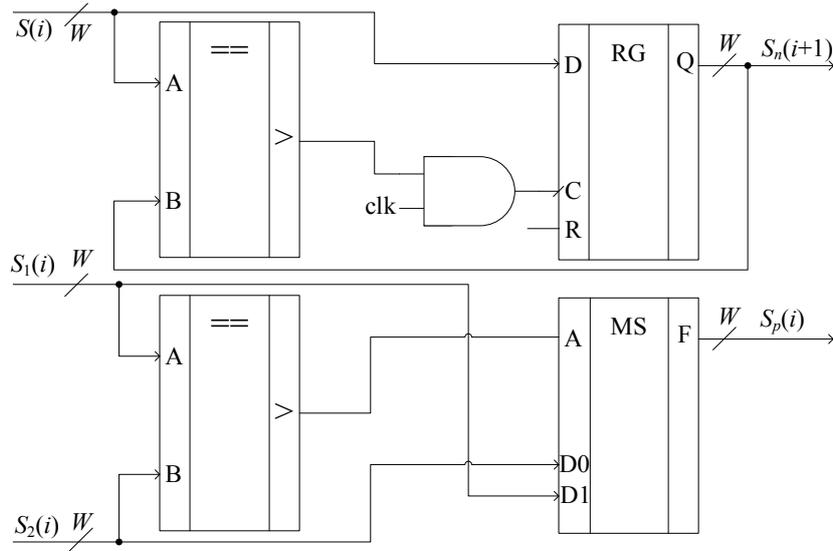


Рис. 6. Схема расчёта НКМ (сверху) и ПЭМ (снизу)

Оптимизация объёма вычислений, применённая в аппаратной реализации СКМ, основана на том, что СКМ возможно получить через НКМ и ПЭМ, что реализуется при помощи алгоритма van Herk/Gil-Werman (HGW) [10, 11], состоящего из трёх этапов.

На первом этапе вычисляется НКМ  $S_n^+(i)$  для фрагментов из  $M$  отсчётов ПС из массива  $S(i)$ :

$$S_n^+(i) = \begin{cases} S(i), & i \bmod M = 0, \\ \max(S_n^+(i-1), S(i)), & i \bmod M \neq 0, \end{cases} \quad (11)$$

где  $i = 0, 1, \dots, N_{SFsamp}-1$  – номер элемента входного массива,  $M$  – размер окна, «mod» – операция вычисления остатка от деления.

Второй этап аналогичен первому, но размер окна уменьшен на единицу, а расчёт проводится в обратном порядке:

$$S_n^-(i) = \begin{cases} S(i), & i \bmod M = 0, \\ \max(S_n^-(i-1), S(i)), & i \bmod M \neq 0, \end{cases} \quad (12)$$

где  $i = N_{SFsamp}-1, N_{SFsamp}-2, \dots, 0$  – номер элемента входного массива.

На третьем этапе рассчитывается СКМ путём вычисления ПЭМ для результатов первых этапов:

$$S_{max}(i) = \max(S_n^+(i + M/2), S_n^-(i - M/2)), \quad (13)$$

где  $i = 0, 1, \dots, N_{SFsamp}-1$ .

Отметим, что необходимость обработки массива  $S(i)$  в обратном порядке на втором этапе делает невозможной потоковую обработку как при программной, так и аппаратной реализации, т.к. обработка не может быть начата до тех пор, пока не будет получен последний отсчёт ПС, а вследствие ненулевого времени обработки один массив отсчётов ПС не может быть загружен в ту же область памяти для обработки непосредственно за другим. При аппаратной реализации это значит, что ПС должен быть сначала записан в память, а затем вычитан в обратном порядке (что сопровождается заметной задержкой). Ширина ПС при этом формально ограничена объёмом памяти ПЛИС, однако существенным это ограничение не является. Например, при типовом представлении уровня спектральных отсчётов при помощи  $W = 8$  бит, и использовании актуальных ПЛИС Xilinx семейства Zynq-7000, один блок памяти BRAM позволит хранить 4096 спектральных отсчётов [12]. В то же время, младшая ПЛИС семейства – модель 7010 – имеет 60 BRAM [12], что при типовых для СРК АРГАМАК-Д11 модели 4 ширине ПОО в 24 МГц и числе спектральных отсчётов в ПОО  $N = 960$ , позволит хранить ПС шириной 6 ГГц.

Схема основных блоков аппаратной реализации алгоритма HGW показана на рис. 7. Схемы, контролирующие запись и чтение в память, а также формирующие разрешающие сигналы, выделены на рис. 7 в блок управления. Индексы массивов на рис. 7 опущены, т.к. их значение зависит от задержек, задаваемых блоком управления.

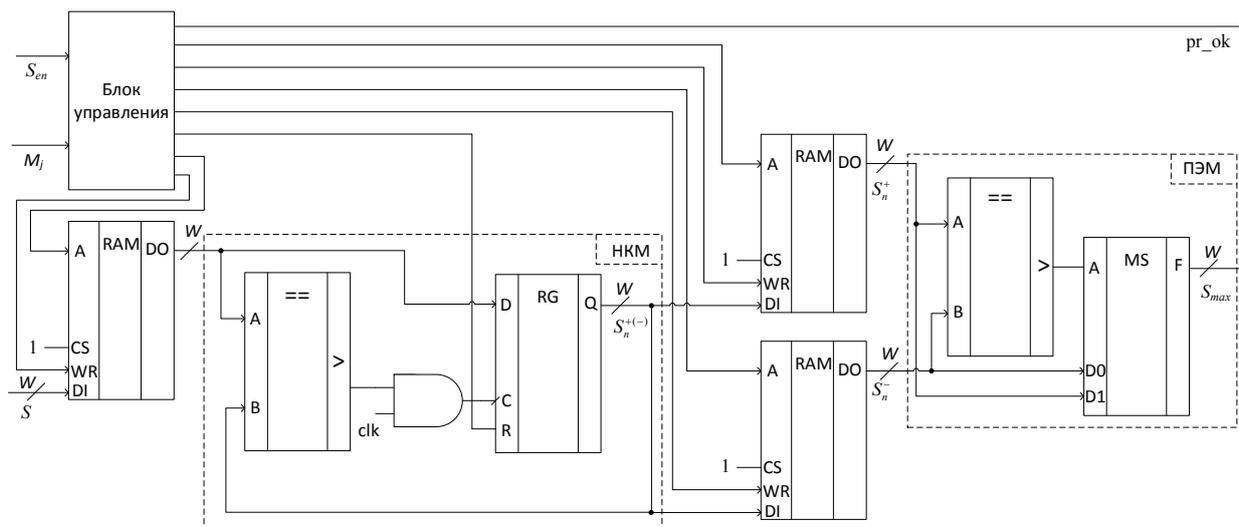


Рис. 7. Схема основных блоков аппаратной реализации алгоритма HGW

Задержка выдачи результата расчёта СКМ зависит от числа отсчётов ПС  $N_{SFs_{amp}}$  и окна обработки  $M$ , а готовность результатов расчёта определяется сигналом готовности `pr_ok`. Поэтому исходные данные для остальных операций блока скользящих оценок, помимо СКМ, записываются в память, и считываются из неё по сигналу готовности СКМ, как показано на рис. 4. Помимо этого, т.к. число отводов КИХ-фильтра с коэффициентами СМ неизменно и соответствует максимальной ширине СМ  $M_{max}$ , а массив отсчётов СМ перед загрузкой в фильтр дополняется нулями, то отсчёты на выходе фильтра оказываются задержаны относительно СКМ и скользящих сумм на  $N_{PAD}$  тактов. Поэтому результаты расчётов блока скользящих оценок также задерживаются на  $N_{PAD}$  тактов, как показано на рис. 4.

Как следствие, для обеспечения синхронной выдачи первичных оценок отсчёты ПС параллельно с расчётом СКМ подаются на элементы конфигурируемой задержки, настраиваемой при загрузке каждой СМ на величину в  $N_{PAD}$  тактов. С такой задержкой отсчёты ПС поступают на КИХ-фильтр с коэффициентами СМ и блоки вычисления скользящих сумм, сконфигурированные на длину окна  $M$  при загрузке СМ.

Рассмотрев детали реализации операции скользящего максимума, перейдём к следующей операции блока первичных оценок – расчёту скользящих сумм.

### Оптимизация ресурсов ПЛИС при расчёте скользящих сумм

Прямая реализация операций (8)-(9), показанная на рис. 8 (а), требует значительных ресурсов ПЛИС при длине окна в сотни отсчётов, поэтому следует заменить её рекурсивной реализацией, показанной на рис. 8 (б).

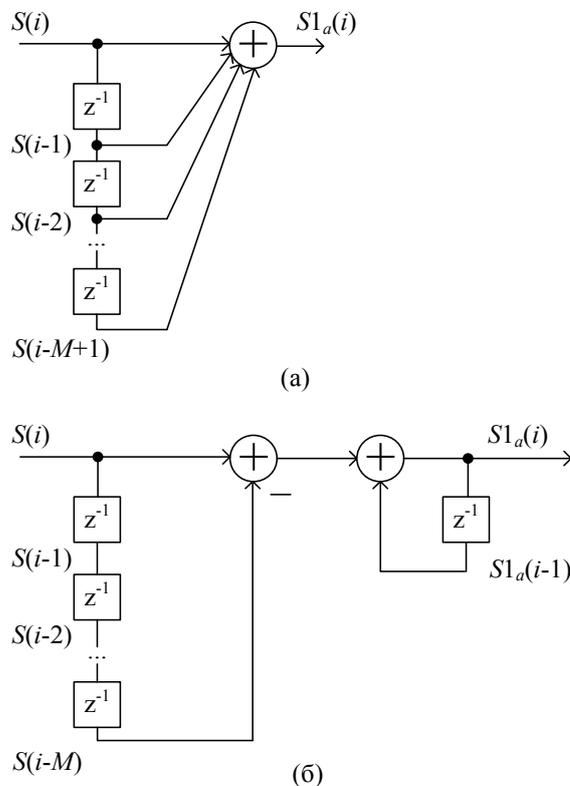


Рис. 8. Прямая (а) и рекурсивная (б) реализации скользящей суммы

Так как требуемая длина окна суммирования определяется используемой СМ, то исходно следует предусмотреть реализацию линии задержки с длиной, соответствующей максимально возможному числу отсчётов СМ  $M_{max}$ , а при загрузке конкретной СМ скорректировать используемую длину до  $M$  тактов.

Аналогично рис. 8 (б) может быть реализован и расчёт скользящей суммы квадратов спектральных отсчётов, если подаваемые на вход схемы суммирования отсчёты СП предварительно возводить в квадрат при помощи умножителя (блока DSP).

### Оптимизация расчёта скалярного произведения

Как было отмечено ранее, при аппаратной реализации расчёт скалярного произведения выполняется посредством КИХ-фильтра. При этом для работы с различными СМ он должен предоставлять возможность загрузки разных коэффициентов в процессе работы. Соответствующие блоки являются типовыми, поэтому не требуют отдельной разработки. При этом доступны следующие стандартные способы оптимизации ресурсов:

- 1) использование симметричных коэффициентов;
- 2) снижение разрядности коэффициентов;
- 3) повышение тактовой частоты умножителей и сумматоров в сравнении с частотой входных данных для их переиспользования.

Так как СМ может быть несимметричной, то для реализации КИХ-фильтра требуется  $M$  умножителей (блоков DSP), работающих на частоте входных данных. В то же время, ши-

рина СМ  $M$  может составлять сотни отсчётов, а количество блоков DSP во многих ПЛИС оказывается меньшим (например, 80 для Zynq 7010 [12]). При этом повышение тактовой частоты этих блоков оказывается недостаточным для реализации нужного числа умножений.

В то же время, перемножение чисел разрядностью менее 8 бит довольно эффективно реализуется без умножителей, на универсальных элементах LUT. Поэтому вариантом решения проблемы нехватки блоков DSP является снижение разрядности коэффициентов фильтра. При этом повышение тактовой частоты для таких умножителей также позволяет снизить использование ресурсов ПЛИС.

Итак, при реализации АСМ применим упомянутые выше способы оптимизации № 2, снизив разрядность коэффициентов до 5 бит, и № 3, подняв тактовую частоту арифметических блоков в 4 раза относительно частоты входных данных. При этом из-за малой разрядности чисел такой фильтр не потребует использования блоков DSP.

Опираясь на представленные выше способы расчёта «скользящих показателей», обеспечивающие заметную экономию ресурсов ПЛИС, перейдём к описанию ПЛИС-оптимизированной реализации алгоритма АСМ в целом.

### Блок формирования ВПС

Структура блока формирования ВПС приведена на рис. 9. Индексы массивов на рис. 9 опущены, т.к. их значение зависит от задержек, задаваемых соответствующими расчётными подблоками.

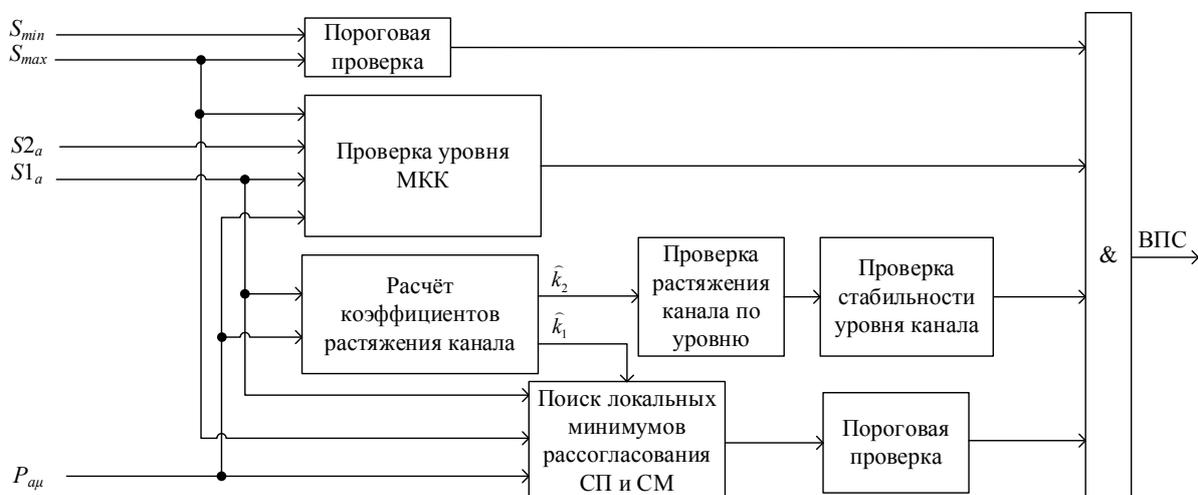


Рис. 9. Структура блока формирования ВПС

При выполнении АСМ проводится последовательный отбор отсчётов ПС, потенциально соответствующих сигналам определённого стандарта. Первичный отбор, фактически, является энергетическим обнаружением и состоит в проверке условия

$$S_{max}(i) - S_{min}(i) > R. \quad (14)$$

Далее для отсчётов ПС, соответствующих условию (14), выполняется расчёт модифицированного коэффициента корреляции (МКК) отсчётов ПС с СМ [6]. При этом для снижения объёма вычислений СМ сдвигается по уровню так, чтобы её минимум был равен нулю, а фрагмент ПС – так, чтобы его максимум совпал с максимальным значением СМ:

$$\Delta_{a\mu}(i) = S_{max}(i) - \mu_{max}. \quad (15)$$

С учётом этого выражение для МКК принимает вид:

$$MCC(i) = \frac{P_{a\mu}(i) - S1_{\mu} \Delta_{a\mu}(i)}{\sqrt{S2_{\mu}(S2_a(i) - 2S1_a(i) \Delta_{a\mu}(i) + M \Delta_{a\mu}^2(i))}}. \quad (16)$$

Далее проводится отбор отсчётов ПС путём проверки уровня МКК:

$$MCC(i) > t_{MCC}, \quad (17)$$

где  $t_{MCC}$  – пороговое значение МКК.

При реализации на ПЛИС для минимизации используемых ресурсов проверка уровня МКК подверглась следующим модификациям:

1) так как операция расчёта квадратного корня на ПЛИС более ресурсоёмка и менее точна, чем умножение, она заменяется умножением путём возведения в квадрат выражения (16);

2) так как реализация операции деления на ПЛИС также представляет собой определённую сложность, более эффективного использования ресурсов ПЛИС можно добиться, выполняя вместо деления сравнение числителя МКК со знаменателем, домноженным на коэффициент  $t_{MCC}$ .

В итоге получим оптимизированное условие (17) для МКК:

$$(P_{a\mu}(i) - \Delta_{a\mu}(i) \cdot S1_{\mu})^2 > (S2_a(i) - 2 \cdot S1_a(i) \cdot \Delta_{a\mu}(i) + M \cdot \Delta_{a\mu}^2(i)) \cdot t_{MCC\_eq}, \quad (18)$$

где  $t_{MCC\_eq} = S2_{\mu} \cdot t_{MCC}^2$  – эквивалентная величина порога для МКК.

Решающие статистики, используемые для дальнейшего отбора отсчётов ПС, базируются на модели представления её участка, начиная с  $i$ -го отсчета, при помощи СМ:

$$S(i+m) = k_2 \cdot \mu(m) + k_1 + \xi_m, \quad m = 0, 1, \dots, M-1, \quad (19)$$

где  $k_2$  – коэффициент растяжения СМ, соответствующий наблюдаемому в точке приёма отношению сигнал-шум,  $k_1$  – коэффициент смещения СМ, определяемый уровнем шума,  $\xi_m$  – случайные поправки, порождаемые шумом и погрешностями измерений.

Соответственно, АСМ предполагает расчёт оценок коэффициентов  $k_1$  и  $k_2$  для возможных смещений СМ в ПС:

$$\hat{k}_1(i) = \frac{S2_{\mu} \cdot S1_a(i) - S1_{\mu} \cdot P_{a\mu}(i)}{M \cdot S2_{\mu} - S1_{\mu}^2}, \quad (20)$$

$$\hat{k}_2(i) = \frac{M \cdot P_{a\mu}(i) - S1_{\mu} \cdot S1_a(i)}{M \cdot S2_{\mu} - S1_{\mu}^2}. \quad (21)$$

Оценки (20)-(21) соответствуют гипотезе о размещении соответствующего используемой СМ стандарту сигнала в ПС  $S$ , начиная с  $i$ -го отсчёта, и обеспечивают для этой гипотезы минимальную среднеквадратическую погрешность представления спектра моделью (19) [6].

По формулам расчёта коэффициентов растяжения (20)-(21) видно, что в них присутствует деление, а также то, что делитель является постоянной величиной для каждой СМ. Поэтому при вычислении этих коэффициентов заменим деление умножением на обратную величину  $k_{12den} = M \cdot S2_{\mu} - S1_{\mu}^2$ , которая не зависит от отсчётов ПС, поэтому подлежит предварительному вычислению и загрузке в блок конфигурации.

Следующий после проверки уровня МКК этап отбора отсчётов ПС состоит в контроле уровня сигнала – коэффициента  $\hat{k}_2$ , а также его стабильности, путём проверки выполнения условия для нескольких смежных отсчётов ПС:

$$\hat{k}_2(p) > t_h, \quad p = i-4, i-3, \dots, i. \quad (22)$$

Для принятия решений о наличии в ПС сигнала стандарта, соответствующего СМ,

рассчитывается соответствующий коэффициентам  $\widehat{k}_1$  и  $\widehat{k}_2$  квадрат показателя рассогласования СМ и ПС [6]:

$$dz^2(i) = (S2_a(i) + M \cdot \widehat{k}_1^2(i) + S2_\mu \cdot \widehat{k}_2^2(i) - 2\widehat{k}_1(i) \cdot S1_a(i) - 2\widehat{k}_2(i) \cdot P_{a\mu}(i) + 2\widehat{k}_1(i) \cdot \widehat{k}_2(i) \cdot S1_\mu) / M \quad (23)$$

Как и в случае расчёта МКК, при ПЛИС-реализации расчёт величины показателя рассогласования в рамках АСМ не требуется: этот показатель имеет значение только для сравнения с порогом, поэтому его можно заменить упрощённым показателем

$$dz(i) = S2_a(i)/2 + \widehat{k}_1(i) \cdot (\widehat{k}_1(i) \cdot M/2 - S1_a(i)) + \widehat{k}_2^2(i) \cdot (\widehat{k}_1(i) \cdot S1_\mu - P_{a\mu}(i) + \widehat{k}_2^2(i) \cdot S2_\mu/2) \quad (24)$$

Тогда величина порога для проверки величины рассогласования участка ПС с СМ преобразуется к виду

$$t_{dz\_opt} = t_{dz} \cdot M / 2. \quad (25)$$

На базе показателей (14), (17), (22) формируется подмножество  $I$ , состоящее из номеров отсчётов ПС, прошедших все этапы отбора.

Далее внутри  $I$  производится поиск отсчётов, соответствующих локальным минимумам рассогласований (23). При этом локальный минимум фиксируется, если «левее»  $i$ -го отсчёта ПС имеется по меньшей мере два значения ( $i_{(-)} < i_{(-)}$ ) из  $I$ , для которых

$$dz^2(i_{(-)}) > dz^2(i) \text{ и } dz^2(i_{(-)}) \geq dz^2(i), \quad (26)$$

«правее»  $i$ -го отсчёта ПС имеется по меньшей мере два значения ( $i_{(++)} > i_{(++)}$ ) из  $I$ , для которых

$$dz^2(i_{(++)}) \geq dz^2(i) \text{ и } dz^2(i_{(++)}) > dz^2(i), \quad (27)$$

и соответствующая величина рассогласования не превышает некоторый порог  $t_{dz}$ .

Смещения  $i_{min}$ , соответствующие локальным минимумам рассогласования (23), запоминаются как ВПС, соответствующие  $j$ -ой СМ.

### Этап АСМ № 2. Отбор решений

Пусть в АДЧ выполняется идентификация радиосигналов  $J$  различных стандартов. Тогда СМ для стандарта под номером  $j = 0, 1, \dots, J-1$

представляет собой массив из отсчётов  $\mu_j(m)$  ( $m = 0, 1, \dots, M_j-1$ ), где  $M_j$  – количество отсчётов СМ. Хотя одному стандарту могут соответствовать и несколько СМ, если ширина спектра его сигнала может варьироваться, здесь рассмотрим более простой случай, когда число СМ равно числу стандартов.

Отметим, что АСМ подразумевает, что СМ упорядочены в порядке уменьшения их ширины, а обработка стартует с наиболее широкой СМ  $\mu_0$ , и после принятия решения по наличию/отсутствию подобных сигналов в ПС (точнее, её части без областей неопределённости [8, 9], однако здесь для простоты этой особенностью пренебрежём), начинается проверка с СМ  $\mu_1$ , и т.д. Исключением являются сигналы с близкой шириной спектра, обрабатываемые отдельно. Причина такого порядка обработки состоит в возможном сходстве фрагментов спектра более широкополосных сигналов со спектром более узкополосных [6].

1) если на протяжении  $M_1$  шагов после фиксации ВПС  $i_{min}$  нового локального минимума  $dz^2(i)$  с уровнем ниже  $dz^2(i_{min})$  не обнаруживается, то ранее запомненному смещению присваивается статус обнаруженного сигнала  $i_{min} \rightarrow n_1^{(q)}$  (где  $q$  – порядковый номер выявленного сигнала первого стандарта), а относящаяся к обнаруженному сигналу часть оси частот помечается как «занятая» и не используется при последующем поиске сигналов. Другим условием прекращения поиска альтернативных локальных минимумов  $dz^2(i)$  является выполнение неравенства

$$i > N - M_1, \quad (28)$$

означающего, что наиболее широкая СМ  $\mu_0$  уже не уместается в оставшейся части ПС.

2) если же на интервале менее  $M_1$  отсчётов от  $i_{min}$  обнаруживается новый локальный минимум  $dz^2(i)$ , то из пары сопоставляемых вариантов статус ВПС остаётся за тем, для которого  $dz^2(i)$  – меньше, а «конфликтующий» с ним вариант отбрасывается. После завершения сканирования ПС вследствие выполнения условия (28) на обработку загружается СМ  $\mu_1$  и вновь начинается расчёт вдоль оси частот статистики (23), но при отборе решений разрешёнными считаются номера отсчётов ПС, для которых сигналы 2-го стандарта не приходятся на участки, занятые ранее выявленными сигналами 1-го стандарта (кроме сопостави-

мых по ширине СМ – для них отбор происходит по величине показателя рассогласования).

3) аналогично производится поиск сигналов для всех последующих СМ.

Опираясь на описанные этапы АСМ, перейдём к рассмотрению особенностей его адаптации к аппаратной реализации на ПЛИС.

### Оценка качества идентификации при аппаратной реализации АСМ

Программная реализация алгоритмов цифровой обработки сигналов зачастую предполагает использование чисел с плавающей запятой, в то время как аппаратная реализация – с фиксированной запятой, а также меньшей разрядностью. Так, для экономии ресурсов

ПЛИС разрядность коэффициентов СМ была ограничена до 5 бит, тогда как при программной реализации на их представление отводилось 32 бита. Поэтому для оценки пригодности аппаратной реализации соответствующие ей показатели качества идентификации следует сопоставить с программной реализацией.

Результаты работы двух реализаций АСМ при коэффициенте накопления спектра, равном 64, и при хороших условиях приёма сигнала, представлены на рис. 10 в виде матриц перепутывания, где в качестве образцового результата использовалась разметка сигналов («частотный план»). Показатели в процентах на матрицах перепутывания соответствуют доле спектральных отсчётов, принадлежащих классу строки, отнесённых к классу столбца.

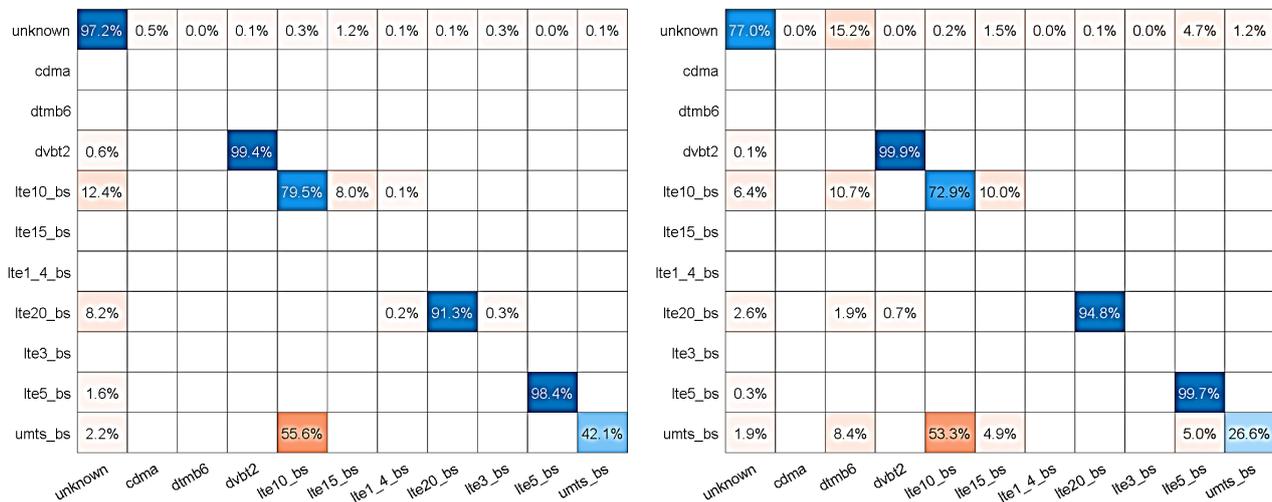


Рис. 10. Результаты идентификации программной (слева) и аппаратной (справа) реализацией АСМ

По рис. 10 видно, что при использовании аппаратной реализации АСМ изменение в доле правильно идентифицированных спектральных отсчётов для большинства из стандартов сигналов не превысило 6,6 %. Исключением является стандарт UMTS, для которого эта доля снизилась на 15,5 %, однако для этого стандарта она и исходно была практически вдвое меньше, что обусловлено сходством спектра пары сигналов стандарта UMTS, излучаемых в соседних частотных каналах, с сигналом стандарта LTE<sub>10</sub>. Данный эффект учитывается в алгоритме, описанном в [6], для аппаратной же реализации была использована более простая версия алгоритма без учёта данной особенности.

Применительно к доле спектральных отсчётов, отнесённых к неправильному стандарту (перепутываний), по данным на рис. 10

можно отметить, что при переходе от программной к аппаратной реализации для пары стандартов она заметно возросла: на 12,6 % для LTE<sub>10</sub> и на 16 % для UMTS; для остальных же стандартов либо возросла незначительно (на 2,1 % для LTE<sub>20</sub>), либо не изменилась (для DVB-T2 и LTE<sub>5</sub>).

Применительно к доле спектральных отсчётов, принадлежащих сигналам и при этом не идентифицированных (пропусков), можно отметить, что она снизилась на величину от 0,5 % до 6 %, при этом её наиболее существенные снижения (6 % для LTE<sub>10</sub> и 5,6 % для LTE<sub>20</sub>) произошли за счёт роста доли ложных идентификаций.

В качестве обобщённого показателя степени совпадения результатов аппаратной и программной реализаций была использована величина

$$d = n_{eq} / n_{all} \cdot 100\%, \quad (29)$$

где  $n_{eq}$  – число отсчётов спектра с совпадающими классами,  $n_{all}$  – общее число спектральных отсчётов. При этом указанные количества отсчётов подсчитываются по всем используемым в эксперименте спектрам.

Рассчитанный для результатов на рис. 10 показатель (29) составил  $d = 81\%$ .

Из сопоставления результатов работы различных реализаций АСМ можно заключить, что аппаратная реализация обеспечивает сопоставимое с программной качество идентификации.

### Использование временных и аппаратных ресурсов схемой АСМ

Для оценки возможности реализации АСМ на конкретной ПЛИС рассмотрим объём аппаратных ресурсов, занимаемый схемой АСМ, при использовании актуальных ПЛИС Xilinx семейства Zynq-7000 [12] и следующих параметров АСМ:

- 1) максимальное число отсчётов в СП  $N_{S, F_{samp}}$ : 1024, 2048, 8192, 16384, 32768;
- 2) максимальное число СМ  $J$ : 64;
- 3) разрядность коэффициентов СМ: 5 бит;
- 4) максимальная ширина СМ  $M_{max}$ : 736.

В табл. 1 приведены показатели использования аппаратных ресурсов ПЛИС, соответствующие использованию одной из младших в семействе ПЛИС модели 7020.

Таблица 1  
Использование ресурсов ПЛИС Xilinx Zynq 7020 схемой АСМ

Ресурс	Использовано	Всего
LUT	25404 (48%)	53200
FF	50249 (47%)	106400
BRAM	19 (14%) / 22 (16%) / 46 (33%) / 54 (39%) / 78 (56%)	140
DSP	19 (9%)	220

Как видно по табл. 1, разработанная схема отличается небольшим использованием аппаратных ресурсов, т.к. занимает лишь их половину в одной из младших ПЛИС Xilinx актуального семейства.

Для оценки применимости разработанной схемы, кроме использования ресурсов ПЛИС, имеет значение и время обработки, а также задержки при работе схемы. Эти показатели

оценивались при тактовой частоте, равной 102,4 МГц, при этом все блоки схемы, кроме КИХ-фильтра, работали на частоте 25,6 МГц. По результатам измерений задержка обработки от момента готовности ПС до получения ВПС для первой СМ составляет 150 мкс, а интервалы между выдачей ВПС находятся в диапазоне 164-174 мкс. Время обработки схемой  $N_{SF_{samp}} = N = 960$  отсчётов спектра при  $J = 5$  СМ составляет 879 мкс. Тогда при 10 СМ и 3 вариациях их длин (суммарно  $J = 30$  СМ) время обработки составит  $t_p = 879 \cdot 30 / 5 = 5274$  мкс, что при ширине ПОО  $B_{an} = 24$  МГц соответствует скорости обработки  $B_{an} / t_p = 4,6$  ГГц/с.

### Заключение

Алгоритм первичной идентификации радиосигналов по форме спектра, реализованный на ПЛИС, позволяет осуществлять идентификацию сигналов в панорамном режиме спектрального анализа с высоким быстродействием. Скорость обработки спектральной панорамы аппаратной реализацией алгоритма составляет 4,6 ГГц/с, а предложенные оптимизации и технические решения позволяют реализовать алгоритм АСМ на ПЛИС начального класса. Например, при реализации алгоритма на ПЛИС Xilinx Zynq 7020 используется около 50% основных элементов ПЛИС: LUT и FF, от 14% до 56% элементов BRAM, и 9% элементов DSP. Сопоставление результатов работы аппаратной реализации алгоритма с программной показало совпадение на 81%, поэтому аппаратная реализация может служить полноценной заменой программной версии.

### Литература

1. Справочник по контролю за использованием спектра. Женева, 2011. URL: <https://www.itu.int/pub/R-HDB-23-2011> (дата обращения: 31.12.2023).
2. Рембовский А.М., Ашихмин А.В., Козьмин В.А. Автоматизированные системы радиоконтроля и их компоненты. М.: Горячая линия-Телеком, 2017. 424 с
3. АРГАМАК-Д11 (модель 4) – двухканальное цифровое панорамное радиоприемное устройство. URL: [https://www.ircos.ru/ru/rsv\\_d11-4.html](https://www.ircos.ru/ru/rsv_d11-4.html) (дата обращения: 31.12.2023).
4. АРГАМАК-Д11 (модель 5) – двухканальное цифровое панорамное радиоприемное устройство. URL: [https://www.ircos.ru/ru/rsv\\_d11-5.html](https://www.ircos.ru/ru/rsv_d11-5.html) (дата обращения: 31.12.2023).
5. Техническая идентификация цифровых сигналов. Рекомендация МСЭ-R SM.1600-3. Женева, 2018. URL: <https://www.itu.int/rec/R-REC-SM.1600> (дата обращения: 31.12.2023).

6. Алгоритм предварительной идентификации радиосигналов по спектральным маскам / А.Г. Студеникин, И.Б. Крыжко, А.Б. Токарев, А.В. Ашихмин, А.А. Фатеев // Системы управления, связи и безопасности. 2021. № 4. С. 10–39.

7. Влияние режима сбора данных на вероятность обнаружения одиночных радиоимпульсов при панорамном радиоконтроле / А.Г. Студеникин, А.Б. Токарев // Радиолокация, навигация, связь: сб. тр. XXIX Междунар. науч.-техн. конф., Воронеж, 18–20 апреля 2023 года. Воронежский государственный университет. 2023. Т. 5. С. 75–82.

8. Способы организации процесса идентификации сигналов при панорамном радиоконтроле / А.Г. Студеникин, А.Б. Токарев // Радиолокация, навигация, связь: сб. тр. XXVIII Междунар. науч.-техн. конф., Воронеж, 27–29 сентября 2022 года. Воронежский государственный университет. 2022. Т. 6. С. 196–206.

9. Analysis of Data Gathering and Processing Modes during the Primary Identification of Radio Signals through the Panoramic Spectral Analysis / A. Studenikin, A. Tokarev, T. Demina, S. Pergamenshchikov, A. Salsnikova // Software Engineering Application in Systems Design: Proceedings of 6th Computational Methods in Systems and Software 2022. Czech Republic. Lecture Notes in Networks and Systems. Cham: Springer. 2023. Vol. 596. PP. 540–562.

10. Van Herk M. A fast algorithm for local minimum and maximum filters on rectangular and octagonal kernels // Pattern Recognition Letters. 1992. Vol. 13. No. 7. PP. 517–521.

11. Gil J., Werman M. Computing 2-D Min, Median, and Max Filters // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 1993. Vol. 15. No. 5. PP. 504–507.

12. Zynq-7000 SoC Data Sheet: Overview. Product Specification DS190. 2018. URL: <https://docs.xilinx.com/v/u/en-US/ds190-Zynq-7000-Overview> (дата обращения: 31.12.2023).

Поступила 17.01.2024; принята к публикации 01.03.2024

#### Информация об авторах

**Студеникин Алексей Геннадьевич** – инженер-программист, АО «ИРКОС» (394049, Россия, г. Воронеж, Рабочий проспект, 101Б); аспирант, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: studenikinag@ircoc.vrn.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2980-1859>

**Козьмин Владимир Алексеевич** – канд. техн. наук, доцент, директор по научной работе, АО «ИРКОС» (394049, Россия, г. Воронеж, Рабочий проспект, 101Б), e-mail: kv@ircoc.vrn.ru

**Токарев Антон Борисович** – д-р техн. наук, доцент, старший научный сотрудник, АО «ИРКОС» (394049, Россия, г. Воронеж, Рабочий проспект, 101Б); профессор кафедры радиотехники, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84); профессор кафедры информационной безопасности и систем связи, Международный институт компьютерных технологий (394026, Россия, г. Воронеж, ул. Солнечная, д. 29Б), e-mail: TokarevAB@ircoc.vrn.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2621-4336>

### HARDWARE IMPLEMENTATION OF AN INTEGRATED ALGORITHM FOR IDENTIFYING RADIO SIGNALS BY SPECTRUM SHAPE

A.G. Studenikin<sup>1,2</sup>, V.A. Koz'min<sup>1</sup>, A.B. Tokarev<sup>1,2,3</sup>

<sup>1</sup>JSC «IRCOS», Voronezh, Russia

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

<sup>3</sup>International Institute of Computer Technology, Voronezh, Russia

**Abstract:** the development of wireless communication technologies, and, as a consequence, radio monitoring systems requires increasing speed in signal processing, in particular when identifying them in the sense of determining whether they belong to a communication standard. To ensure high performance when analyzing frequency ranges several gigahertz wide, identification procedures are divided into stages, the primary of which is based on assessments of the “external” characteristics of signals, one of which is the shape of the spectrum. A suitable hardware basis for implementing high-speed signal processing algorithms is programmable logic integrated circuits (FPGAs). At the same time, like many other signal processing algorithms, identification algorithms, as a rule, are sequential procedures focused on software implementation, that is, execution on a microprocessor. This also applies to the integrated identification algorithm based on spectral masks, which performs the primary identification of radio signals based on the shape of their spectrum. However, the approach to implementing signal processing algorithms on FPGAs has fundamental differences from software implementation, so a separate and very urgent task is the development of “hardware versions” of algorithms. This paper examines the features of the implementation on an FPGA of an integrated algorithm for identifying radio signals using spectral masks, which provides a frequency range analysis speed of 4.6 GHz/s on relatively low-performance FPGAs, for example, Xilinx Zynq 7020

**Key words:** radio monitoring, signal identification, spectrum mask, FPGA

#### References

1. “Spectrum Monitoring Handbook”, Geneva, 2011, available at: <https://www.itu.int/pub/R-HDB-23-2011> (accessed 31.12.2023).

2. Rembovsky A. M., Ashikhmin A. V., Kozmin V.A. “Automated radio monitoring systems and their components” (“Avtomatizirovannyye sistemy radiokontrolya i ikh komponenty”), Moscow, Goryachaya liniya-Telekom, 2017, 424 p.
3. “ARGAMAK-D11 (Model 4) – Two-Channel Digital Panoramic Radio Receiver”, available at: [https://www.ircos.ru/ru/rsv\\_d11-4.html](https://www.ircos.ru/ru/rsv_d11-4.html) (accessed 31.12.2023).
4. “ARGAMAK-D11 (Model 5) – Two-Channel Digital Panoramic Radio Receiver”, available at: [https://www.ircos.ru/ru/rsv\\_d11-5.html](https://www.ircos.ru/ru/rsv_d11-5.html) (accessed 31.12.2023).
5. “Technical Identification of digital signals. ITU-R Recommendation SM.1600-3”, Geneva, 2018, available at: <https://www.itu.int/rec/R-REC-SM.1600> (accessed 31.12.2023)
6. Studenikin A.G., Kryzhko I.B., Tokarev A.B., Ashikhmin A.V., Fateev A.A. “Algorithm for preliminary identification of radio signals with spectral masks”, *Systems of Control, Communication and Security (Sistemy kontrolya, svyazi i bezopasnosti)*, 2021, no. 4, pp. 10-39.
7. Studenikin A.G., Tokarev A.B. “Influence of data gathering mode on probability of detection of single radio pulses during panoramic radio monitoring”, *Radar, navigation, communication (Radiolokatsiya, navigatsiya, svyaz)*, proc. of the XXIX International Scientific and Technical conference, Voronezh, 2023, vol. 5, pp. 75-82.
8. Studenikin A.G., Tokarev A.B. “Methods for organizing the process of signal identification under panoramic radio monitoring”, *Radar, navigation, communication (Radiolokatsiya, navigatsiya, svyaz)*, proc. of the XXVIII International Scientific and Technical conference, Voronezh, 2022, vol. 6, pp. 196-206.
9. Studenikin A., Tokarev A., Demina T., Pergamenschikov S., Salnikova A. “Analysis of Data Gathering and Processing Modes during the Primary Identification of Radio Signals through the Panoramic Spectral Analysis”, *Software Engineering Application in Systems Design: Proc. of 6th Computational Methods in Systems and Software 2022, Czech Republic. Lecture Notes in Networks and Systems*. Cham, Springer, 2023, vol. 596, pp. 540–562.
10. Van Herk M. “A fast algorithm for local minimum and maximum filters on rectangular and octagonal kernels”, *Pattern Recognition Letters*, 1992, vol. 13, no. 7, pp. 517–521.
11. Gil J., Werman M. “Computing 2-D Min, Median, and Max Filters”, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1993, vol. 15, no. 5, pp. 504–507.
12. “Zynq-7000 SoC Data Sheet: Overview. Product Specification DS190”, 2018, available at: <https://docs.xilinx.com/v/u/en-US/ds190-Zynq-7000-Overview> (accessed 31.12.2023).

Submitted 17.01.2024; received 01.03.2024

#### Information about the authors

**Aleksey G. Studenikin** – Software Engineer, JSC «IRCOS» (101B Rabochiy prospekt, Voronezh 394049, Russia); Postgraduate Student, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: studenikinag@ircoc.vrn.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2980-1859>

**Vladimir A. Koz'min** – Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Director for Scientific Work, JSC «IRCOS» (101B Rabochiy prospekt, Voronezh 394049, Russia), e-mail: kv@ircoc.vrn.ru

**Anton B. Tokarev** – Dr. Sc. (Technical), Associate Professor, Senior Staff Scientist, JSC «IRCOS» (101B Rabochiy prospekt, Voronezh 394049, Russia), Professor, Department of Radio Engineering, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia); Professor, Department of Information Security and Communication Systems, International Institute of Computer Technology (29B Solnechnaya str., Voronezh 394026, Russia); e-mail: TokarevAB@ircoc.vrn.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2621-4336>

**ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И ПАРАМЕТРЫ НАПРАВЛЯЮЩЕЙ ЛИНИИ ПЕРЕДАЧИ В ПОДЗЕМНОМ КВАЗИОДНОМЕРНОМ СООРУЖЕНИИ**Д.В. Федосов<sup>1</sup>, А.В. Колесников<sup>1</sup>, А.В. Николаев<sup>2</sup><sup>1</sup>Научно-производственное общество с ограниченной ответственностью «КВ-СВЯЗЬ»,  
г. Омск, Россия<sup>2</sup>Институт машиноведения им. А.А. Благоднарова Российской академии наук,  
г. Москва, Россия

**Аннотация:** представлены результаты моделирования методом конечных элементов направляющей линии передачи, проложенной вдоль туннеля в сплошной полупроводящей породе – подземного квазиодномерного сооружения. Получены зависимости затухания, коэффициента замедления и импеданса при различном расстоянии между направляющей линией и стенкой туннеля для канала связи в диапазоне средних волн. Использована модель туннеля в форме полуцилиндра радиусом 2 метра, находящегося в породах с различной электропроводностью. Импеданс направляющей линии находится в пределах 500-700 Ом и снижается при уменьшении расстояния, приближаясь к значению 200 Ом для низкоомных пород. При приближении линии передачи к породе увеличивается затухание сигнала, причем более быстрое затухание наблюдалось для пород с меньшей электропроводностью. Приведены аналитические выражения коэффициента затухания для нескольких практических примеров. Проведенный анализ усредненных коэффициентов замедления сигнала вдоль линии передачи выявил сильную зависимость фазы сигнала от расстояния между линией и породой, электрических параметров полупроводящей породы и от дальности источника сигнала. Технические характеристики и параметры линии передачи важны при проектировании систем связи, передачи информации и фазовой навигации в подземном квазиодномерном сооружении

**Ключевые слова:** импеданс направляющей линии, подземная связь, затухание в шахтах, замедление направляющей линии

**Введение**

В целях изучения и освоения верхней толщи земной коры возводятся подземные сооружения, к ним относятся шахты, рудники, коллекторы, туннели метро, научные объекты, объекты атомной промышленности и т.п. Такие объекты относятся к квазиодномерным, то есть их протяженность на несколько порядков превышает поперечные габариты. Учитывая эту особенность конструкции, представляется возможным организовывать коммуникацию в относительно ограниченном координатном пространстве. Один из возможных вариантов обеспечения связью и навигацией подвижных объектов (персонала и транспортных средств) заключается в использовании радиоустройств диапазона средних волн [1, 2, 3]. Особенность такой аппаратуры – узкая полоса пропускания, обусловленная конструкцией электрически малой резонансной антенны (отношение ширины полосы к рабочей частоте  $\Delta f/f$  порядка 0,01) [1, 4], которой достаточно для передачи голосовой информации и телеметрии.

Наиболее изученными и надёжными механизмами передачи информации в данном частотном диапазоне являются радиоканалы связи через направляющие линии передачи (НЛ) – проводники, протянутые вдоль туннелей. Для организации канала связи могут быть использованы либо радиостанции с непосредственным включением в НЛ, либо с индукционным возбуждением НЛ рядом расположенной радиостанцией. В современной научной литературе недостаточно освещен вопрос технических характеристик и параметров таких НЛ, в частности зависимости импеданса, затухания и фазовой задержки от электрофизических параметров горных пород и расстояния между проводником НЛ и стенкой туннеля (породой). Известны аналитические оценки удельного затухания НЛ в приближении бесконечного проводника внутри цилиндрического туннеля и результаты экспериментальных измерений [1, 5, 6]. На рис. 1 приведена схема включения радиостанции в однопроводную НЛ. Стоит отметить, что не исследованный ранее вопрос изменения фазы сигнала и укорочения длины волны вдоль НЛ важен при калибровке систем локального позиционирования (навигации) в подземном квазиодномерном сооружении [7].

Для получения этих данных проведено моделирование методом конечных элементов [8] с условиями:

- частота  $f = 1$  МГц;
- туннель имеет форму полуцилиндра с радиусом 2 м;
- расстояние между проводником и породой  $h$  переменное;
- диэлектрическая проницаемость среды выбрана постоянной  $\epsilon = 10$ ;
- электропроводность среды - переменна  $\sigma = \{0,5; 0,1; 0,01; 0,001\}$  См/м;
- внешние границы – открытые границы излучения.

Геометрия модели приведена на рис. 2: 1) – сосредоточенный порт с активным импедансом  $Z_{\Pi} = 600$  Ом, 2) – НЛ с импедансным условием  $\sigma_{НЛ} = 58 \cdot 10^7$  См/м.

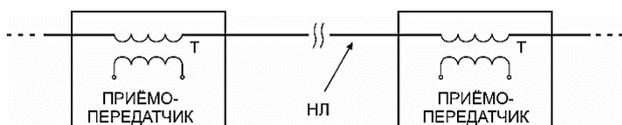


Рис. 1. Схема включения приёмопередатчиков в НЛ

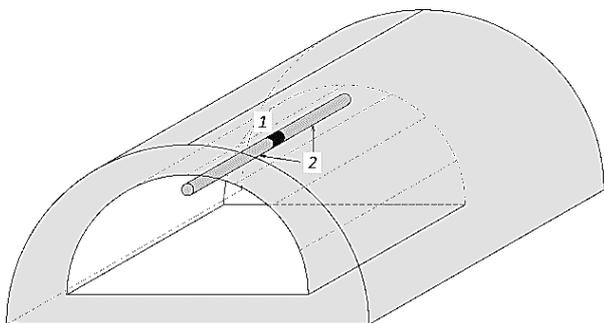


Рис. 2. Геометрия модели НЛ в туннеле

### Затухание в направляющей линии

Результаты моделирования методом конечных элементов показали, что величина затухания на частоте 1 и 2 МГц в туннеле с различными параметрами среды (породы) (диэлектрическая проницаемость  $\epsilon = 10$ ) обладает экспоненциальным спадом при отдалении НЛ от породы при электропроводности  $\sigma = 0,001$  см/м и достаточно пологим изменением при электропроводности  $\sigma = 0,1$  см/м (рис. 3).

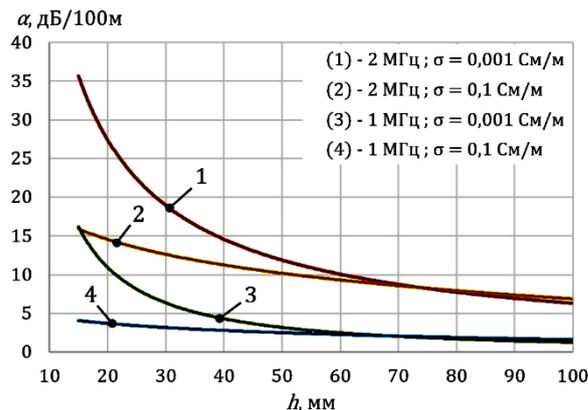


Рис. 3. Величина затухания сигнала в зависимости от расстояния между НЛ и горной породой на частотах 1 и 2 МГц

В табл. 1 приведены аналитические выражения для функций приближения, по которым можно провести расчет характеристик НЛ с заданными параметрами, а именно удельных затуханий при исследуемом механизме передаче электромагнитной энергии.

Таблица 1

Функции приближения для расчёта затухания НЛ

Параметры НЛ	Выражение для $\alpha$ , дБ/100м
$f = 1$ МГц, $\sigma = 0,1$ См/м	$-1,3 \ln(h) + 7,6$
$f = 1$ МГц, $\sigma = 0,001$ См/м	$625h^{(-1,35)}$
$f = 2$ МГц, $\sigma = 0,1$ См/м	$-4,77 \ln(h) + 28,8$
$f = 2$ МГц, $\sigma = 0,001$ См/м	$422h^{(-0,91)}$

Полученные результаты зависимости затухания от расстояния  $h$  соответствуют ранее полученным результатам на рис. 4 и рис. 5, приведённым в [1]. На рис. 5 приведены результаты для цилиндрического туннеля с радиусом  $b = 2$  м с НЛ, протянутой на расстоянии  $h$ , где штриховая линия –  $b-h = 0,5$  м, сплошная линия:  $b-h = 0,2$  м.

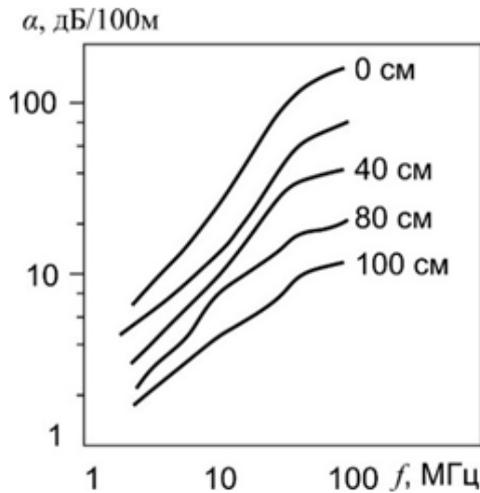


Рис. 4. Затухание сигнала в зависимости от расстояния между проводником НЛ и бортом выработки [1]

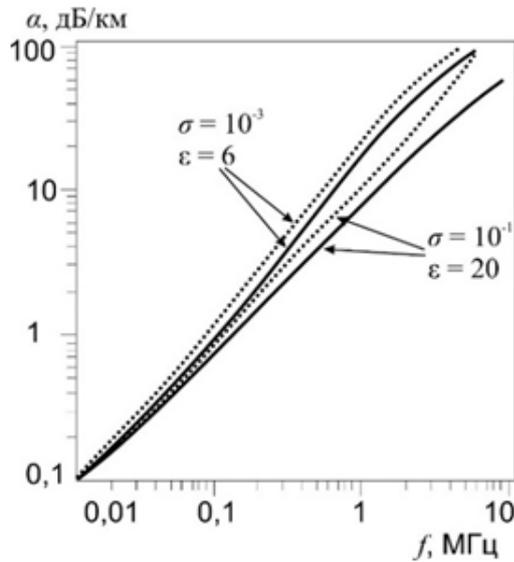


Рис. 5. Затухание сигнала НЛ в цилиндрическом туннеле [1]

### Зависимости импеданса направляющей линии

На рис. 6-9 приведены зависимости импеданса от расстояния между однопроводной НЛ и стеной горной выработки и кривые аппроксимации для полученных значений при различных параметрах среды  $\epsilon$  и  $\sigma$ .

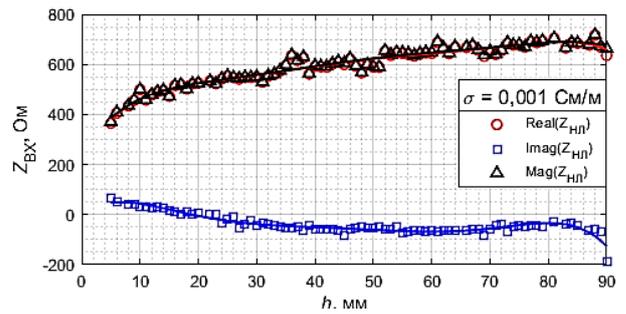


Рис. 6. Зависимости импеданса от расстояния между НЛ и горной породой при  $\sigma = 0,001$  См/м на частоте 1 МГц

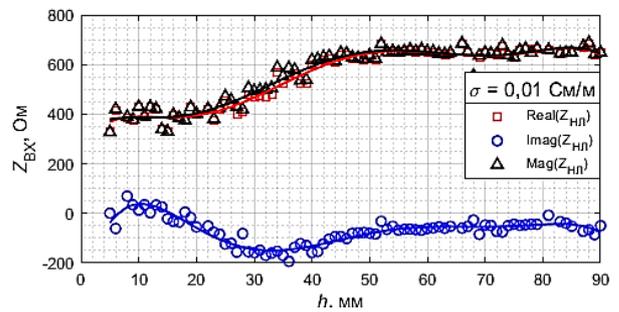


Рис. 7. Зависимости импеданса от расстояния между НЛ и горной породой при  $\sigma = 0,01$  См/м на частоте 1 МГц

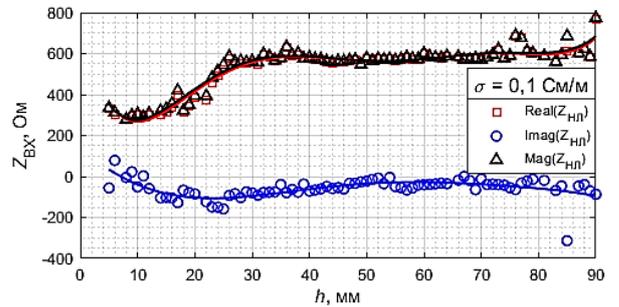


Рис. 8. Зависимости импеданса от расстояния между НЛ и горной породой при  $\sigma = 0,1$  См/м на частоте 1 МГц

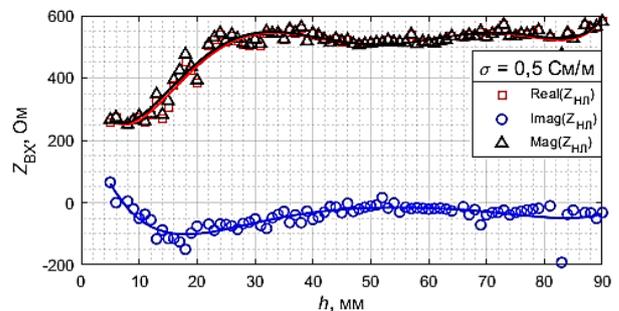


Рис. 9. Зависимости импеданса от расстояния между НЛ и горной породой при  $\sigma = 0,5$  См/м на частоте 1 МГц

Полученные результаты совпадают с реальными измерениями сопротивления НЛ, лежащими около величины 600 Ом.

### Фазовое замедление в направляющей линии

Сигнал в однопроводной НЛ, вблизи которой расположена полупроводящая среда, будет испытывать замедление, которое можно охарактеризовать усреднённым коэффициентом замедления  $K_3$ :

$$c = K_3 v_\Phi, \quad \lambda_\Phi = \lambda_0 / K_3,$$

где  $v_\Phi$  – фазовая скорость в среде;

$c$  – скорость света;

$\lambda_0$  – длина волны в свободном пространстве.

Уравнение мгновенного значения сигнала в НЛ вдоль направления  $z$  будет выражаться следующим образом:

$$S_{НЛ} = \sin(2\pi f - K_3 2\pi z / \lambda_0).$$

На рис. 9 приведены графики сигнала вдоль НЛ, полученные моделированием НЛ в туннеле с  $\sigma = 0,1$  См/м на расстоянии 30 мм от стенки горной породы, сигнала в свободном

пространстве и при замедлении поверхностной радиоволны с коэффициентом  $K_3$ .

По графикам рис. 10 видно, что длина первого, второго и последующих полупериодов различна, то есть длина поверхностной волны постепенно укорачивается. Данный эффект характерен сигналу вблизи конкретной точки возбуждения линии передачи. Техническое устройство туннелей достаточно разнообразно: различные углы наклона, изгибы, поперечные размеры, расстояния провода НЛ от стены с учётом провисания, электрические параметры пород и элементов внутреннего обустройства туннелей. Поскольку протяженность туннелей, в которых организуется канал связи, обычно составляет более половины длины волны, то теоретически рассчитать изменение фазы вдоль НЛ с учётом разнообразного обустройства подземного сооружения различной геометрической формы проблематично. Поэтому, при развёртывании систем фазовой радионавигации следует проводить калибровку каждого участка подземного сооружения.

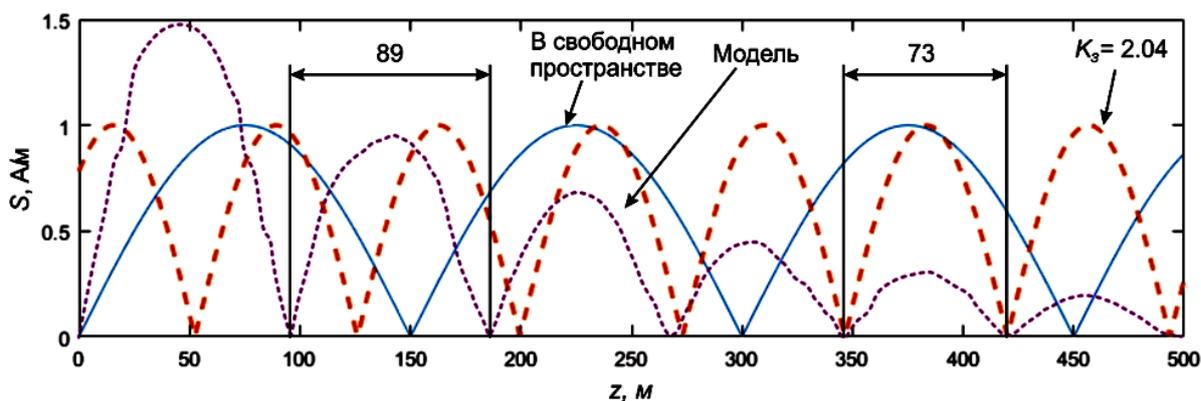


Рис. 10. Графики сигнала в свободном пространстве (сплошная линия), сигнала вдоль НЛ, полученные моделированием в туннеле с  $\sigma = 0,1$  См/м на расстоянии 30 мм от горной породы (короткий пунктир), и сигнала в свободном пространстве при аналогичном замедлении волны (длинный пунктир)

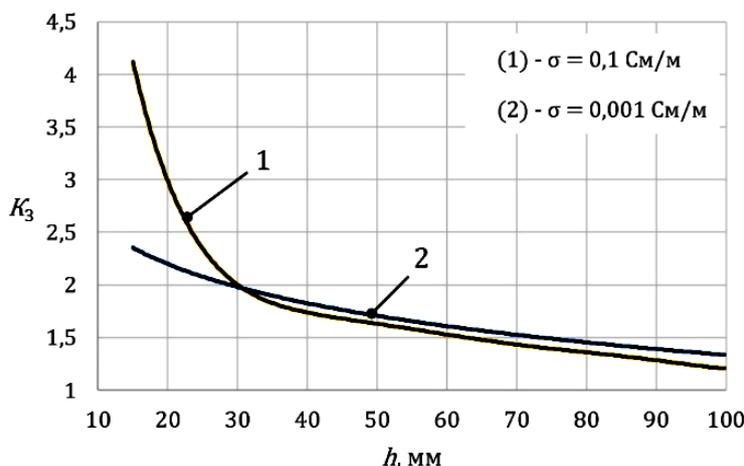


Рис. 11. Зависимости  $K_3$  от  $h$  на частотах 1 и 2 МГц при  $\epsilon = 10$

Коэффициент  $K_3$  является зависимым от расстояния до стен выработки  $h$  и от параметров окружающей среды. На рис. 10 приведены зависимости  $K_3$  от  $h$  на частотах 1 и 2 МГц, из которых следует, что приближение НЛ к стене горной выработки приводит к сильному укорочению длины волны в туннеле. С учётом непостоянства электрофизических параметров многих обводнённых горных пород следует ожидать в процессе работы системы навигации непредсказуемое изменение фазы сигнала.

В связи с этим в процессе монтажа системы радионавигации следует соблюдать требования по фиксации НЛ на расстоянии не менее 50 мм от стенки туннеля с интервалом крепления, исключающим значительное провисание и механическое колебание провода.

### Заключение

Анализ технических характеристик направляющей линии передачи и некоторых параметров радиоустройств подземной связи показал, что:

- импеданс линии на частоте 1 МГц находится в пределах 500-700 Ом и снижается до 200 Ом при уменьшении расстояния между НЛ и породой до 10 мм для низкоомных пород;
- затухание сигнала практически линейно возрастает при уменьшении расстояния между НЛ и стенкой породы, а при расстоянии 50 мм и менее – начинает резко возрастать по мере приближения НЛ к горным породам с низкой электропроводностью;
- приближение НЛ к стене горной выработки приводит к усилению эффекта укороче-

ния длины волны, при этом коэффициент  $K_3$  становится более 4.

Ввиду указанного, фиксировать проводник линии передачи в системе связи следует на расстоянии не менее 50 мм с интервалом между точками крепления, исключающим значительное провисание и вибрацию провода, а при развёртывании систем навигации следует проводить калибровку каждого участка подземного сооружения.

### Литература

1. Корчагин Ю.А., Саломатов В.П., Чернов А.А. Радиосвязь в проводящих средах. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1990. 148 с.
2. Обзор способов организации подземной связи и перспективы использования диапазона средних волн в шахтах / Д.В. Федосов, А.В. Николаев, А.В. Колесников, С.Э. Лапин, А.Г. Бабенко // Труды НИИР, №1, 2022. С. 19-36.
3. Федосов Д.В., Колесников А.В. Обоснование концепции системы связи диапазона средних волн в подземных квазидномерных сооружениях // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2023. Т. 26. № 3. С. 89-97.
4. Колесников А.В. Эксплуатационные особенности малогабаритных антенных устройств СВ диапазона в рудниках и шахтах // Труды НИИР, 2021, №4. С. 49-60.
5. Wait J.R., Hill D.A. Coaxial and Bifilar Modes on a Transmission Line in a Circular Tunnel // Applied physics. 1974. Vol. 4. pp. 307-312.
6. Mahmoud S.F. On the Attenuation of Monofilar and Bifilar Modes in Mine Tunnels (Short Papers) // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 1974. Vol. 22 (9). pp. 845-847.
7. Патент № 2797240 РФ, СПК G01S 17/06. Способ навигации и измерения расстояний в протяженных объектах; заявл. 05.05.2022; опубл. 01.06.2023; Бюл. № 16 / Д.В. Федосов.
8. Чебышев В.В. Основы проектирования антенных систем. М.: Горячая линия-Телеком, 2018. 150 с.

Поступила 06.12.2023; принята к публикации 12.02.2024

### Информация об авторах

**Федосов Дмитрий Витальевич** – канд. техн. наук, генеральный директор, Научно-производственное общество с ограниченной ответственностью «КВ-СВЯЗЬ» (644012, Россия, г. Омск, пр. Академика Королева, 32), e-mail: xferga@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5904-2710>

**Колесников Андрей Викторович** – канд. техн. наук, инженер, Научно-производственное общество с ограниченной ответственностью «КВ-СВЯЗЬ» (644012, Россия, г. Омск, пр. Академика Королева, 32), e-mail: kollesnikov.radio@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9048-2899>

**Николаев Алексей Владимирович** – д-р техн. наук, главный научный сотрудник, Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН (101990, Россия, г. Москва, Малый Харитоньевский переулок, д. 4), e-mail: alarmoren@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3642-0707>.

## TECHNICAL CHARACTERISTICS AND PARAMETERS OF A TRANSMISSION LINE IN AN UNDERGROUND QUASI-ONE-DIMENSIONAL STRUCTURE

D.V. Fedosov<sup>1</sup>, A.V. Kolesnikov<sup>1</sup>, A.V. Nikolaev<sup>2</sup>

<sup>1</sup>RPSLL «HF-COMMUNICATION», Omsk, Russia

<sup>2</sup>Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

**Abstract:** the article presents the results of a finite element simulation of a guide transmission line laid along a tunnel in solid semiconducting rock. The dependences of attenuation, velocity factor and impedance were obtained for different distances between the guide line and the tunnel wall for typical cases characteristic of a communication channel in the medium frequency range. The approximation of a flat semi-cylindrical tunnel with a radius of 2 meters, located in rocks with different electrical conductivity, was used. The guide line impedance is in the range of 500-700 ohms and decreases with decreasing distance, approaching 200 ohms for low-impedance rocks. As the transmission line approaches the rock, signal attenuation increases, with faster attenuation observed for rocks with lower electrical conductivity. Analytical expressions for the attenuation coefficient are given for several special cases. The analysis of the average signal velocity factor along the transmission line revealed a strong dependence of the signal phase on the distance between the line and the rock, the electrical parameters of the semiconducting rock and the range of the signal source. The technical characteristics and parameters of the transmission line are important when designing communication systems, information transfer and phase navigation in an underground structure

**Key words:** transmission line impedance, underground communication, attenuation in mines, guide line deceleration

### References

1. Korchagin Yu.A., Salomatov V.P., Chernov A.A. "Radio communication in conductive media" ("Radiosvyaz v provodyashchih sredah"), Novosibirsk, Nauka, 1990, 148 p.
2. Fedosov D.V., Nikolaev A.V., Kolesnikov A.V., Lapin S.E., Babenko A.G. "Review of methods for organizing of underground communications and prospects for using the medium wave range in mines", *The Proceedings of NIIR (Trudy NIIR)*, 2022, no. 1, pp. 19-36.
3. Fedosov D.V., Kolesnikov A.V. "Substantiation of the concept of a communication system in the range of medium waves in underground quasi-one-dimensional structures", *Physics of Wave Processes and Radio Systems (Fizika volnovykh protsessov i radiotekhnicheskiye sistemy)*, 2023, vol. 26, no. 3, pp. 89-97.
4. Kolesnikov A.V. "Operational characteristics of small-sized antenna devices of the medium frequency range in mines", *The Proceedings of NIIR (Trudy NIIR)*, 2021, no. 4, pp. 49-60.
5. Wait J.R., Hill D.A. "Coaxial and Bifilar Modes on a Transmission Line in a Circular Tunnel", *Applied physics*, 1974, vol. 4, pp. 307-312.
6. Mahmoud S.F. "On the Attenuation of Monofilar and Bifilar Modes in Mine Tunnels (Short Papers)", *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 1974, vol. 22 (9), pp. 845-847.
7. Fedosov D.V. "Method of navigation and distance measurement in extended objects" ("Sposob navigatsii i izmereniya rasstoyaniy v protyazhennykh ob'yektakh"), Patent of RF no. 2797240, sub. 05.05.22., publ. 01.06.2023.
8. Chebyshev V.V. "Antenna System Design Fundamentals" ("Osnovy proektirovaniya antennoy systemy"), Moscow, Goryachaya liniya-Telekom, 2018, 150 p.

Submitted 06.12.2023; revised 12.02.2024

### Information about the authors

**Dmitry V. Fedosov** – Cand. Sc. (Technical), General Director, RPSLL «HF-Communication» (32 Akademika Koroleva avenue, Omsk 644012, Russia), e-mail: xferra@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5904-2710>

**Andrey V. Kolesnikov** – Cand. Sc. (Technical), Engineer, RPSLL «HF-Communication» (32 Akademika Koroleva avenue, Omsk 644012, Russia), e-mail: kolesnikov.radio@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9048-2899>

**Alexey V. Nikolaev** – Dr. Sc. (Technical), Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences (4 Malyy Kharitonievskiy per., Moscow 101990, Russia), e-mail: alarmoren@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3642-0707>

**МНОГОЛУЧЕВАЯ АНТЕННА НА ОСНОВЕ СФЕРИЧЕСКОГО РЕФЛЕКТОРА И СИСТЕМЫ ОБЛУЧАТЕЛЕЙ В ВИДЕ СИММЕТРИЧНЫХ ВИБРАТОРОВ С ДИРЕКТОРАМИ****Е.А. Ищенко<sup>1</sup>, Ю.Г. Пастернак<sup>1</sup>, В.А. Пендюрин<sup>2</sup>, Д.К. Проскурин<sup>1</sup>, С.М. Фёдоров<sup>1,3</sup>****<sup>1</sup>Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия****<sup>2</sup>АО НПП «Автоматизированные системы связи», г. Воронеж, Россия****<sup>3</sup>Международный институт компьютерных технологий, г. Воронеж, Россия**

**Аннотация:** рассматривается многолучевая направленная антенна с 7 лучами, построенная на основе сферического зеркала и антенных элементов квази-Уда-Яги. Полученная антенна построена на основе объединения в единую конструкцию семи антенных элементов Уда-Яги и единого сферического зеркала, которое осуществляет фокусировку электромагнитных волн в пространстве. Применение предложенной конструкции обеспечивает многолучевую направленную связь на частоте 2.4 ГГц, что позволяет применять антенну для передачи связи на больших расстояниях в одном из наиболее распространенных диапазонов частот. Полученная антенна обладает коэффициентом направленного действия в 21.8 дБ, шириной лепестка в 15.9°. Благодаря таким характеристикам удастся реализовать сканирование сектора пространства в 102 градуса путем формирования семи независимых лучей. Полученная конструкция позволяет повысить эффективность применения многолучевых антенн, так как для формирования дополнительных лучей не требуется применение дорогостоящих и сложных фазовращателей. Использование полученной полусферической антенны также позволяет значительно повысить обтекаемость конструкции, а также возможность добавления второй полусферы из полистирола, что сформирует сферическую антенну, которая будет обладать минимальным аэродинамическим профилем со всех направлений, что обеспечивает ветряную устойчивость полученной конструкции, а также снижает парусность в пространстве

**Ключевые слова:** многолучевая антенна, сферический рефлектор, оптические принципы

**Благодарности:** работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания (проект № FZGM-2023-0013)

**Введение**

Многолучевые антенны являются востребованными в задачах организации высоконаправленной связи. Многолучевые антенны могут быть построены на основе различных типов конструкций: фазированные антенные решетки, комбинации многофокусных зеркал, комбинации частотоселективных поверхностей [1] и т.д. Наиболее перспективными конструкциями представляются многолучевые антенны, которые построены на основе рефлекторных антенн. Преимуществами таких антенн являются высокий коэффициент направленного действия (КНД) и узкий главный лепесток, что позволяет реализовать систему связи с большой дальностью и высоким разрешением. В работе [2] автором предлагается конструкция многолучевой антенны, которая построена на основе рефлектора и фазированной антенной решетки, выступающей в роли облучателя. Недостатком такой конструкции является то, что для сканирования пространства необходимо использование фазовращателей, значительно повышающих стоимость конечного устройства, а также усложня-

ющих процесс управления направлениями излучения. При этом максимальный КНД антенны будет непостоянным, так как при отклонении луча антенной решетки от нормали будут возникать боковые лепестки.

В работе [3] авторы предлагают многолучевую антенну рефлекторного типа, которая построена на основе параболического отражателя и многоантенного облучателя, расположенного в фокусе антенны. Данная конструкция антенны обладает большими геометрическими размерами, сложна в реализации, а также очень чувствительна в настройке параметров. В работах [4, 5] авторы предлагают формировать отражающую поверхность рефлектора на основе метаматериалов типа EBG (электромагнитная запрещенная зона). Применение таких метаматериалов позволяет сформировать частотно-зависимые линзы, пропускающие электромагнитные волны только в определенном диапазоне частот. К недостаткам такого подхода можно отнести узкополосность метаматериалов, а также их высокую чувствительность к точности изготовления.

В работе [6] авторы предлагают многолучевую антенну миллиметрового диапазона, построенную на основе отражения волн, падающих на рефлектор через многоканальную линию передачи. Недостатками данной конструк-

ции являются ее высокая конструкционная сложность, непостоянство уровня КНД.

В данной работе предлагается многолучевая антенна, построенная на основе сферического зеркала и антенных элементов квази-Уда-Яги, обладающая простой конструкцией и высокими направленными свойствами.

### Конструкция многолучевой антенны

Базовая конструкция антенны Уда-Яги (или антенны волновой канал) состоит из одного рефлектора, одного активного элемента и одного или несколько директоров, ориентированных в направлении приема/передачи сигнала [7]. Характеристики антенны Уда-Яги зависят от всех геометрических параметров решетки. Недостатками антенны Уда-Яги являются малое входное сопротивление и узкая полоса рабочих частот. К достоинствам можно отнести высокие направленные свойства и хорошее передне-заднее отношение.

Активный элемент антенны Уда-Яги обычно представляет собой симметричный вибратор размером примерно в половину длины волны. Для увеличения коэффициента направленности после активного вибратора устанавливаются пассивные директоры размером немного меньше длины волны. С той же целью, позади активного вибратора (обычно на расстоянии от 0.1 до 0.25 длины волны) размещается рефлектор. В традиционной конструкции антенны Уда-Яги рефлектор представляет собой пассивный вибратор с длиной немного большей, чем активный вибратор. Однако, данный вариант конструкции рефлектора обладает узкой полосой и обеспечивает малый прирост коэффициента направленности антенны. В данной работе предлагается использовать экран сферической формы, внутри которого размещались несколько антенн квази-Уда-Яги для реализации возможности управления лучом (рис. 1).

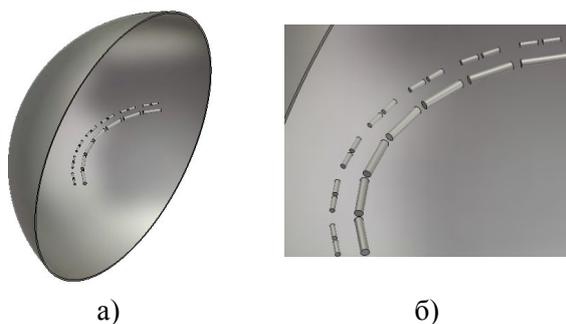


Рис. 1. Внешний вид многолучевой антенны на основе сферического рефлектора (а) и антенных элементов (б)

Сферический рефлектор был выбран благодаря возможности реализации широкоугольного сканирования и простоты изготовления из-за симметричности своей конструкции. Данный тип рефлектора изначально был разработан для оптических приложений, но нашел широкое применение и в радиодиапазоне. Облучатели были установлены на радиусе 263 мм (середина между активными вибраторами и рефлекторами). Активные вибраторы были диаметром 6 мм, длиной 48 мм, директоры диаметром 10 мм, длиной 54 мм. Питание для антенных элементов осуществлялось от фидерных линий 50 Ом. При изготовлении данной многолучевой антенны, фидерные линии можно отвести горизонтально за антенну – они не будут отражать вертикально-поляризованные электромагнитные волны.

### Характеристики разработанной многолучевой антенны

В ходе математического моделирования были получены S-параметры антенны при запитывании крайнего антенного элемента (рис. 2). Полученные зависимости показывают хорошее согласование антенны с фидерным трактом на частоте 2.4 ГГц.

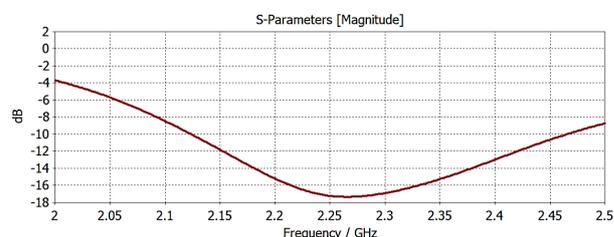


Рис. 2. Частотная зависимость S-параметров для крайнего порта

Для подтверждения направленных свойств разработанной многолучевой антенны были получены диаграммы направленности антенны (рис. 3). Крайний порт обладает худшими свойствами направленности их всех: для него коэффициент усиления составил 21.8 дБ при ширине луча 15.9°; у центрального те же характеристики были равны 22.4 дБ и 14.9°, соответственно.

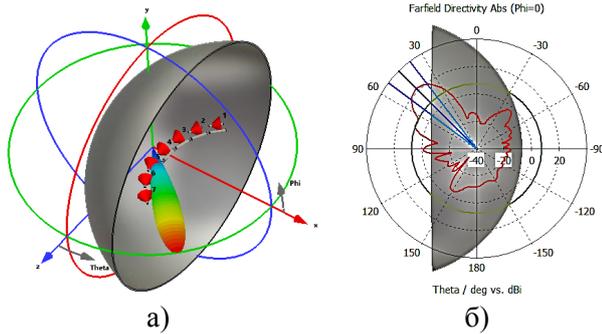


Рис. 3. Диаграмма направленности для крайнего порта на частоте 2.4 ГГц: объемная (а) и проекция на азимутальную плоскость (б)

Разработанная многолучевая антенна способна сканировать пространство в секторе  $102^\circ$ , формируя 7 лучей с шагом примерно  $15^\circ$ .

### Заключение

Таким образом, в данной работе была разработана и исследована конструкция многолучевой антенны, полученная с использованием оптических принципов, и представляющая собой сферический рефлектор с расположенными внутри него семью облучателями квази-Уда-Яги. Разработанная конструкция обладает следующими преимуществами: простотой, высокой чувствительностью, высокой скоростью за счет 7-лучевой диаграммы направленности.

Поступила 07.11.2023; принята к публикации 28.11.2023

### Информация об авторах

**Ищенко Евгений Алексеевич** – аспирант, инженер, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), тел. +7(473)243-77-29, e-mail: kursk1998@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5270-0792>

**Пастернак Юрий Геннадьевич** – д-р техн. наук, профессор, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, д. 84), e-mail: pasternakyg@mail.ru

**Пендюрин Владимир Андреевич** – генеральный директор, АО НПП «Автоматизированные системы связи» (394062, Россия, г. Воронеж, ул. Пеше-Стрелецкая, д. 108, офис 415), e-mail: infonpp-acc.ru@yandex.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. 29 б), тел. +7(473)243-77-29, e-mail: fedorov\_sm@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9027-6163>

## MULTIBEAM ANTENNA BASED ON A SPHERICAL REFLECTOR AND A SYSTEM OF FEEDERS IN THE FORM OF SYMMETRICAL VIBRATORS WITH DIRECTORS

E.A. Ishchenko<sup>1</sup>, Yu.G. Pasternak<sup>1</sup>, V.A. Penduyrin<sup>2</sup>, D.K. Proskurin<sup>1</sup>, S.M. Fedorov<sup>1,3</sup>

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

<sup>2</sup>Research and Production Enterprise «Automated Communication Systems», Voronezh, Russia

<sup>3</sup>International Institute of Computer Technologies, Voronezh, Russia

Кроме того, благодаря размещению всех облучателей внутри «чашки» рефлектора, ее можно закрыть обтекателем из полистирола для защиты внутренней полости антенны.

### Литература

1. Balling P. Multibeam Antennas // Encyclopedia of RF and Microwave Engineering. 2005. 10 p.
2. Ueno K. Multibeam antenna using a phased array fed reflector // IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium. Vol. 2. 1997. pp. 840-843.
3. Trade-off of multibeam reflector antenna configuration for satellite onboard application / T. Tomura, M. Takikawa, Y. Inasawa, H. Miyashita // 2016 URSI Asia-Pacific Radio Science Conference (URSI AP-RASC). 2016. pp. 867-868.
4. Application of EBG Structures to the Design of a Multibeam Reflector Feed / A. Tayebi, J. Gómez, J.R. Almagro, I. González, F. Cátedra // IEEE Antennas and Propagation Magazine. Vol. 56. No. 5. 2014. pp. 60-73.
5. Enhanced Two Level EBG Antenna for a High F/D Multibeam Reflector Antenna in Ka Band: Design and Characterization / R. Chantalat, C. Menudier, M. Troubat, E. Arnaud, T. Monediere, M. Thevenot, B. Jecko, P. Dumon // The Second European Conference on Antennas and Propagation. 2007. 7 p.
6. Design and experimental investigation of a multibeam integrated reflector antenna of the millimeter wave band / S.E. Bankov, G.G. Grachev, M.D. Duplenkova, E.V. Frolova // J. Commun. Technol. Electron. Vol. 59. 2014. pp. 504-522.
7. Optimization and Application of the Yagi-Uda Antenna for Meteor Burst Communication / L. Juan, F. Guang, Y. Lin, F. Demin // 2007 International Symposium on Microwave, Antenna, Propagation and EMC Technologies for Wireless Communications. 2007. pp. 669-672.

**Abstract:** the article discusses a multi-beam directional antenna with 7 beams, built on the basis of a spherical mirror and quasi-Uda-Yagi antenna elements. The resulting antenna is built on the basis of combining in a single design seven Uda-Yagi antenna elements and a single spherical mirror, which focuses electromagnetic waves in space. The use of the proposed design allows for multi-beam directional communication at a frequency of 2.4 GHz, which allows the antenna to be used for transmitting communications over long distances in one of the most common frequency ranges. The resulting antenna has a directivity coefficient of 21.8 dB and a lobe width of 15.9°. Thanks to these characteristics, it is possible to implement scanning of a sector of space of 102 degrees by forming seven independent rays. The resulting design makes it possible to increase the efficiency of using multibeam antennas, since the formation of additional beams does not require the use of expensive and complex phase shifters. The use of the resulting hemispherical antenna also makes it possible to significantly increase the streamlining of the structure, as well as the possibility of adding a second hemisphere made of polystyrene, which will form a spherical antenna that will have a minimal aerodynamic profile in all directions, which ensures wind stability of the resulting structure and also reduces windage in space

**Key words:** multibeam antenna, spherical reflector, optical principles

**Acknowledgments:** the work was carried out with financial support from the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation as a part of the state assignment (project no. FZGM-2023-0013)

### References

1. Balling P. "Multibeam Antennas", Encyclopedia of RF and Microwave Engineering, 2005.
2. Ueno K. "Multibeam antenna using a phased array fed reflector", *IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium*, 1997, vol. 2, pp. 840-843.
3. Tomura T., Takikawa M., Inasawa Y., Miyashita H. "Trade-off of multibeam reflector antenna configuration for satellite onboard application", *2016 URSI Asia-Pacific Radio Science Conference (URSI AP-RASC)*, 2016, pp. 867-868.
4. Tayebi A., Gómez J., Almagro J.R., González I., Cátedra F. "Application of EBG Structures to the Design of a Multibeam Reflector Feed", *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 2014, vol. 56, no. 5, pp. 60-73.
5. Chantalat R., Menudier C., Troubat M., Arnaud E., Monediere T., Thevenot M., Jecko B., Dumon P. "Enhanced Two Level EBG Antenna for a High F/D Multibeam Reflector Antenna in Ka Band: Design and Characterization", *The Second European Conference on Antennas and Propagation*, 2007, 7 p.
6. Bankov S.E., Grachev G.G., Duplenkova M.D., Frolova E.V. "Design and experimental investigation of a multibeam integrated reflector antenna of the millimeter wave band", *J. Commun. Technol. Electron*, 2014, vol. 59, pp. 504-522.
7. Juan L., Guang F., Lin Y., Demin F. "Optimization and Application of the Yagi-Uda Antenna for Meteor Burst Communication", *2007 International Symposium on Microwave, Antenna, Propagation and EMC Technologies for Wireless Communications*, 2007, pp. 669-672.

Submitted 07.11.2023; revised 28.11.2023

### Information about the authors

**Evgeny A. Ishchenko** – Engineer, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), tel.: +7 (473)243-77-29, e-mail: kursk1998@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5270-0792>

**Yuriy G. Pasternak** – Dr. Sc. (Technical), Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: pasternaky@mail.ru.

**Vladimir A. Pandyurin** – General Director, JSC RPE «Automated Communication Systems» (of. 415, 108 Peshe-Streletskaya str., Voronezh 394062, Russia), e-mail: infonpp-acc.ru@yandex.ru

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

**Sergei M. Fedorov** – Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), International Institute of Computer Technologies (29b Solnechnaya str., Voronezh 394026, Russia), tel.: +7 (473)243-77-29, e-mail: fedorov\_sm@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9027-6163>

**ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА СЛОИСТЫХ ПАНЕЛЕЙ КАНАЛА ВОЗДУХОЗАБОРНИКА САМОЛЁТА**

**В.И. Максименков<sup>1</sup>, М.В. Молод<sup>1</sup>, В.В. Вялых<sup>1</sup>, Ю.В. Молод<sup>2</sup>**

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

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

**Аннотация:** рассмотрены вопросы повышения эффективности звукопоглощающих двухслойных конструкций. Рассмотрены три типа конструкций: однослойные, двухслойные и трехслойные, которые применяются в каналах воздухозаборника самолета. Слоистые панели состоят из перфорированных и сплошных несущих слоев из Д16АМ и сотового заполнителя из стеклопластика ССП. Приведены типы перфорации, применяемые в несущих слоях сотовых панелей. Перфорация в несущих слоях, полученная методом пробивки в штампах. Приведено направление повышения эффективности слоистых конструкций для получения 14 главы Международного стандарта Международной организации стандартов авиации (ИКАО). Это достигается разработкой новых типов и совершенствованием технологии изготовления слоистых конструкций. Показано, что в процессе изготовления слоистой панели происходит затекание клея в отверстие перфорированной обшивки выше допустимой величины определяемой техникой, что оказывает влияние на акустические характеристики панели. Разработан технологический процесс устранения затекания клея в перфорированные обшивки в процессе склейки в автоклаве. Разработано устройство для уменьшения затекания клея, получена зависимость для оценки давления горячего воздуха, обеспечивающего требуемое качество перфорированной обшивки. Приведены экспериментальные исследования, которые подтвердили эффективность разработанного способа. Данный способ рекомендуется для промышленной реализации при изготовлении канала воздухозаборника

**Ключевые слова:** сотовые конструкции, перфорация, затекание клея, обшивка

**Введение**

В конструкциях каналов воздухозаборников самолётов применяются слоистые панели с сотовым заполнителем (рис. 1) [1], которые могут быть однослойными, двухслойными и трехслойными. В статье рассмотрена панель с двухслойным сотовым заполнителем.

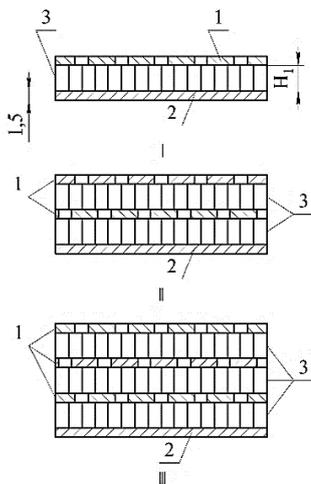


Рис. 1. Типы сотовых панелей: 1 – перфорированная обшивка, 2 – сплошная обшивка, 3 – сотовый заполнитель

Рассмотренные конструкции комбинированные, в которых обшивки выполняются из алюминиевых сплавов Д16АМ толщиной 0,5-1,5 мм, а сотовый заполнитель из композиционных материалов ССП толщиной 0,2 мм. К данным конструкциям предъявляются особые требования по обеспечению эффективности шумоглушения. Количество слоёв панелей влияет на их эффективность. Следует отметить, что в настоящее время применение данных конструкций в каналах воздухозаборников самолётов обеспечивает 4 главу международного стандарта ИКАО. В статье разработаны направления по повышению эффективности слоистых панелей для достижения 14 Главы ИКАО [2].

**Цель работы**

Проведение исследований слоистых панелей для повышения акустической эффективности, что требуют совершенствования технологических процессов, с учётом конструктивных особенностей панелей.

### Базовый технологический процесс изготовления двухслойной панели

Рассмотрен технологический процесс изготовления слоистых панелей для канала воздухозаборника с оценкой его качества (рис. 2).



Рис. 2. Схема технологического процесса изготовления канала воздухозаборника

Анализ технологического процесса позволил выявить появление браковочных признаков при изготовлении панелей — затекание клея в зону перфорации, что влияет на акустические характеристики панелей. Техническими условиями (ТУ) определена их величина — не более 17 %. Этот параметр трудно контролировать, а следовательно это требует поиска решений по совершенствованию технологии изготовления панелей.

### Конструктивные особенности панелей

Акустическая эффективность слоистых панелей зависит от высоты сотовой панели, диаметра отверстий, степени перфорации верхней и средней обшивок. Высота панели определена конструкцией применяемых панелей и изменить ее практически невозможно. Рассмотрим второй фактор — получение перфорации в обшивках.

### Основные типы перфорации

Существуют следующие методы изготовления перфорации в обшивках — с помощью лазе-

ра, электрофизического метода, получения отверстий методом сверления и пробивки в штампах.

Наиболее качественные отверстия в обшивках получают методом пробивки в штампах. Рассмотрим типы перфораций (рис. 3) [3].

Расположение отверстий в обшивках панели I — по шестиугольнику, II — по квадрату.

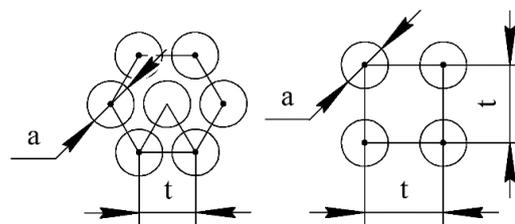


Рис. 3. Основные типы перфорации

### Новый технологический процесс изготовления двухслойной панели

В процессе проведенных исследований был разработан технологический процесс (рис. 4), включающий процесс уменьшения затекания клея при применении устройства (рис. 5).

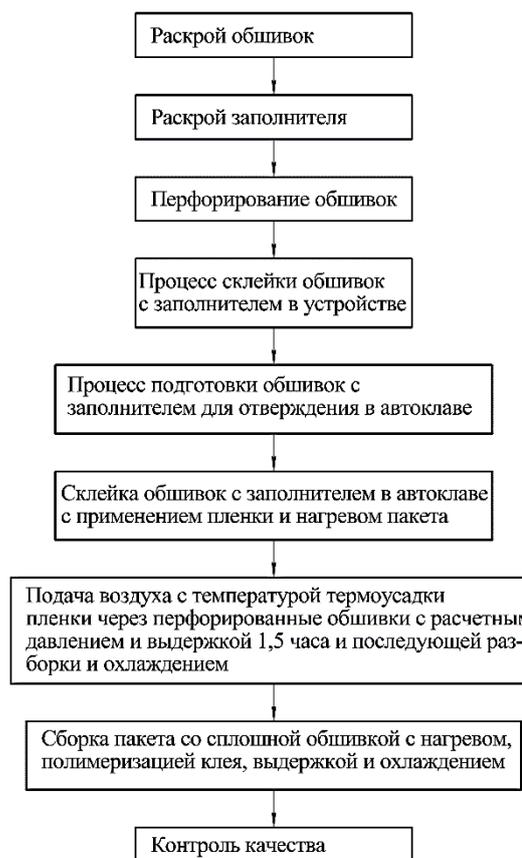


Рис. 4. Технологический процесс изготовления слоистых панелей

**Разработка устройства для уменьшения затекания клея в двухслойной панели**

Рассмотрим конструкцию устройства (рис. 5) и процесс уменьшения затекания клея. На основание 1 устройства укладывают пакет технологических деталей и деталей ЗПК в следующем составе и последовательности – плетеная технологическая сетка 2, внутренняя перфорированная обшивка 3, клеевая пленка 4, наполнитель 5, клеевая пленка 4, промежуточная перфорированная обшивка 6, клеевая пленка 4, наполнитель 7, технологическая перфорированная накладка 8, плетеная сетка 9, листовая накладка 10, эластичная накладка 11, нагрузчитель 12. С боковых сторон по периметру пакет герметизируют эластично-жесткими прижимами 13.

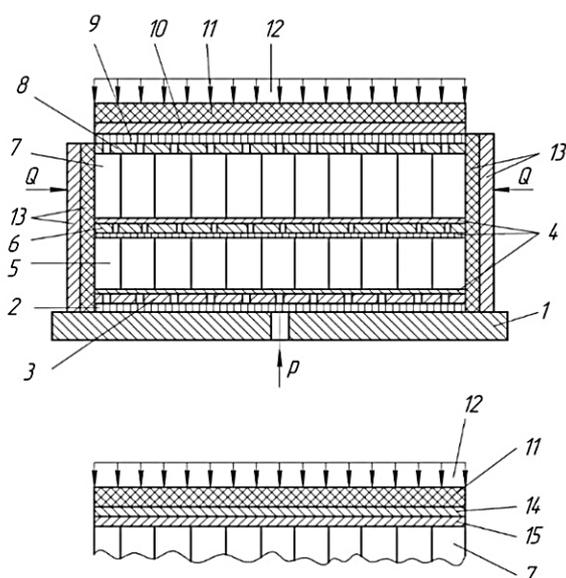


Рис. 5. Устройство для уменьшения затекания клея

Собранный пакет помещают в автоклав и обеспечивают нагрев. После нагрева пакета до температуры, находящейся в интервале между температурой термоусадки и полимеризации клея, под обшивку 3 подают газ или воздух с вышеуказанной температурой под давлением, определяемым по формуле [4]

$$P = \frac{2\sigma_v \cdot S}{R} \cdot K \# \quad (1)$$

где  $\sigma_v$  — предел прочности клеевой пленки;  
 $S$  — толщина клеевой пленки;  
 $R$  — радиус кривизны пленки, затекающей в отверстия;  
 $K$  — коэффициент запаса давления.

Под воздействием давления и температуры воздуха клей в обшивках 3 и 6 вытесняется из отверстий. Затем пакет выдерживают при тем-

пературе полимеризации клея, охлаждают и разбирают. Далее на наполнитель 7 укладывают обшивку 14 с предварительно прикатанной к ней клеевой пленкой 15, накладку 11 и нагрузчитель 12. Этот пакет помещают в автоклав, нагревают до температуры полимеризации клея, осуществляют выдержку и охлаждение.

Результаты экспериментальных исследований

Результаты экспериментальных исследований приведены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты определения давления газа

№ п/п	Материал обшивки	Диаметр отверстий обшивки $a_{от}$ , мм	Толщина клеевой пленки ВК-36, мм	Радиус кривизны пленки $R$ , мм	Коэффициент запаса давления $K$	Предел прочности пленки $\sigma_v$ , кг/мм <sup>2</sup>	Давление газа $P$ , кг/см <sup>2</sup>
1	Д16АМ	1,5	0,2	1	1,2	0,01	0,48

Проведённые экспериментальные исследования на устройстве показали, что степень перфорации в сотовой панели соответствуют 90–95 %, что подтверждает эффективность разработанного способа.

Разработаны предложения и конструкторская документация на изготовление канала воздухозаборника с обеспечением способа по уменьшению затекания клея.

Разработанный способ уменьшения затекания клея может быть использован при изготовлении несущих слоев из углепластиков.

**Заключение**

1. Рассмотрены типы слоистых панелей, применяемых в каналах воздухозаборниках самолета.

2. Приведена схема технологического процесса изготовления двухслойной панели канала воздухозаборника-базовый вариант.

3. Разработан новый технологический процесс изготовления двухслойной панели, исключающий появление браковочных признаков в виде затекания клея в отверстия перфорации.

4. Разработано устройство для уменьшения затекания клея в отверстия обшивок.

5. Получена зависимость для определения величины давления горячего воздуха при продувке отверстий перфорированных обшивок.

### Литература

1. Панин В.Ф. Конструкции с сотовым наполнителем. М.: Машиностроение, 1982. С. 152.
2. Современные отечественные полимерно-композиционные материалы для авиастроения / В.О. Старцев, В.В. Антипов, А.В. Славин, М.А. Горбовец // *Авиационные материалы Курчатовский институт, ВИАМ № 2*. 2023.

3. Максименков В.И., Молод М.В., Огурцов П.А. Слоистая панель для канала воздухозаборника самолета // *Вестник ВГТУ*. Т. 19. № 2. 2023. С. 135-139.
4. Коротков А.А., Максименков В.И., Мишин В.И. Способ изготовления шумопоглощающих многослойных панелей // Заявка на изобретение № 2 004 116 888 ФГУП НИИАСПК, 2005.

Поступила 20.01.2024; принята к публикации 01.03.2024

### Информация об авторах

**Максименков Владимир Иванович** – д-р техн. наук, профессор, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: kafedra\_ss@bk.ru  
**Молод Марина Владиславовна** – д-р техн. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: kafedra\_ss@bk.ru  
**Вялых Валерия Владимировна** – специалист, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: markovavaleria86@gmail.com  
**Молод Юлия Владимировна** – магистр, Воронежский государственный университет (394018, Россия, г. Воронеж, Университетская пл., 1), e-mail: vamouy@mail.ru

## IMPROVING THE QUALITY OF LAYERED PANELS OF THE AIRCRAFT AIR INTAKE CHANNEL

V.I. Maksimenkov<sup>1</sup>, M.V. Molod<sup>1</sup>, V.V. Vyalykh<sup>1</sup>, Yu.V. Molod<sup>2</sup>

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

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

**Abstract:** the article discusses the issues of improving the efficiency of sound-absorbing two-layer structures. Three types of structures are considered: single-layer, double-layer and three-layer, which are used in the air intake ducts of the aircraft. Laminated panels consist of perforated and solid bearing layers of D16AM and a cellular filler made of SSP. The types of perforations used in the bearing layers of honeycomb panels are given. Perforation in the bearing layers obtained by punching in stamps. The direction of increasing the efficiency of layered structures for obtaining Chapter 14 of ICAO is given. This is achieved by developing new types and improving the technology of manufacturing layered structures. It is shown that during the manufacture of a laminated panel, glue flows into the hole of the perforated cladding above the permissible value determined by the technique. Which affects the acoustic characteristics of the panel. A technological process has been developed to eliminate glue leakage into perforated sheaths during gluing in an autoclave. A device has been developed to reduce the leakage of glue and a dependence has been obtained to estimate the pressure of hot air provided by a decrease in leakage. Experimental studies are presented, which confirmed the effectiveness of the developed method. This method is recommended for industrial implementation in the manufacture of an air intake duct

**Key words:** honeycomb structures, perforation, glue leakage, sheathing

### References

1. Panin V.F. "Constructions with a honeycomb filler" (Konstruktсии s sotovym zapolnitelem), Moscow, Mashinostroenie, 1982, 152 p.
2. Startsev V.O., Antipov V.V., Slavin A.V., Gorbovets M.A. "Modern domestic polymer composite materials for aircraft construction", *Aviation Materials Kurchatov Institute, VIAM (Aviatsionnyye materialy Kurchatovskiy institut, VIAM)*, 2023, no. 2
3. Maksimenkov V.I., Molodov M.V., Ogurtsov P.A. "Layered panel for the air intake channel of the aircraft", *The Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2023, vol. 19, no. 2, pp. 135-139.
4. Korotkov A.A., Maksimenkov V.I., Mishin V.I. "Method of manufacturing noise-absorbing multilayer panels" (Sposob izgotovleniya shumopogloshchayushchikh mnogosloynnykh paneley), // Application for an invention no. 2 004 116 888 FSUE NI-IASPK, 2005.

Submitted 20.01.2024; revised 01.03.2024

### Information about the authors

**Vladimir I. Maksimenkov** – Dr. Sc. (Technical), Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Ocyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: kafedra\_ss@bk.ru  
**Marina V. Molod** – Dr. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Ocyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: kafedra\_ss@bk.ru  
**Valeria V. Vyalykh** – Specialist, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Ocyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: markovavaleria86@gmail.com  
**Yulia V. Molod** – Master's Degree, Voronezh State University (1 Universitetskaya pl., Voronezh 394018, Russia), e-mail: vamouy@mail.ru