

ВЕСТНИК

Воронежского государственного технического университета



- РАДИОТЕХНИКА И СВЯЗЬ
- МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ
- ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА
И УПРАВЛЕНИЕ

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

ВЕСТНИК

**Воронежского государственного
технического университета**

Том 21 № 4 2025 г.

Основан в апреле 2000 г.

ВЕСТНИК ВОРОНЕЖСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

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

Учредитель: ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»

Подписной индекс в электронном каталоге Почты России – ПД033.

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. Малукова – Воронеж

ЧЛЕНЫ РЕДАКЦИОННОЙ КОЛЛЕГИИ:

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;
В.П. Смоленцев – д-р техн. наук – Воронеж;
С.Г. Бишутин – д-р техн. наук – Брянск;
В.Ф. Селиванов – д-р техн. наук – Воронеж;
О.Н. Кириллов – д-р техн. наук – Воронеж;
О.Ю. Макаров – д-р техн. наук – Воронеж;
В.П. Пашинцев – д-р техн. наук – Ставрополь;
Ю.Г. Пастернак – д-р техн. наук – Воронеж;
А.В. Ашихмин – д-р техн. наук – Воронеж;
П.П. Чураков – д-р техн. наук – Пенза;
А.А. Гладких – д-р техн. наук – Ульяновск;
А.В. Башкиров – д-р техн. наук – Воронеж

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

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

Телефон: +7 (473) 278-38-89

E-mail: vestnik@vorstu.ru

Издатель: ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»

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

© ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», 2025

12+

BULLETIN OF VORONEZH STATE TECHNICAL UNIVERSITY

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

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

Subscription Index in the Electronic Catalogue of the Russian Post - ПД033.

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:

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;
V.P. Smolentsev – Dr. Sc. (Tech.) – Voronezh;
S.G. Bishutin – Dr. Sc. (Tech.) – Bryansk;
V.F. Selivanov – Dr. Sc. (Tech.) – Voronezh;
O.N. Kirillov – Dr. Sc. (Tech.) – Voronezh;
O.Yu. Makarov – Dr. Sc. (Tech.) – Voronezh;
V.P. Pashintsev – Dr. Sc. (Tech.) – Stavropol;
Yu.G. Pasternak – Dr. Sc. (Tech.) – Voronezh;
A.V. Ashihmin – Dr. Sc. (Tech.) – Voronezh;
P.P. Churakov – Dr. Sc. (Tech.) – Penza;
A.A. Gladkikh – Dr. Sc. (Tech.) – Ulyanovsk;
A.V. Bashkirov – Dr. Sc. (Tech.) – Voronezh

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

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

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

E-mail: vestnik@vorstu.ru

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

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

© Voronezh State Technical University, 2025

12+

СОДЕРЖАНИЕ

Информатика, вычислительная техника и управление

Алгоритм применения каскадного шифрования и функций формирования ключа в условиях потоковой обработки данных М.С. Войтенко, В.Ф. Барабанов.....	7
Беспоисковая система экстремального управления фотоэлектрическими преобразователями У.А. Щеглова, Е.М. Васильев.....	11
Охлаждение тепловыделяющей среды в одноходовом перекрестноточном пластинчатом теплообменнике А.В. Ряжских, И.Г. Дроздов, В.И. Ряжских.....	18
Применение адаптивной системы управления веб-приложениями в технических системах для промышленного оборудования К.Г. Резников, С.Л. Подвальный.....	25
Математическое обеспечение управления положением нестационарных объектов информационно-телекоммуникационной системы И.А. Черноиваненко.....	31
Интеллектуальная система управления эволюционными алгоритмами в дискретных задачах оптимизации Д.А. Баранов, В.Ф. Барабанов.....	39
Комплексный метод оценки воздействия кумулятивного заряда на стенки скважины по результатам прогнозирования параметров ударной волны при помощи вектора Умова Н.Н. Федоров, Е.А. Пафилов, Н.А. Архипова.....	45
Динамическая вязкость наножидкостей с полидисперсными наночастицами А.В. Ряжских, И.Г. Дроздов, В.И. Ряжских.....	51
Математическая модель зависимости погрешности печати от размеров и угла наклона изделия Н.А. Вехтева, Ю.В. Литовка.....	56
Определение оптимального количества кластеров при идентификации окрестностных моделей И.А. Седых, К.Н. Макаров.....	64
Моделирование и исследование процессов управления подсистемой аккумуляторных батарей в составе автономной системы электроснабжения А.К. Тищенко, Р.Ю. Кузьменко, Е.М. Васильев.....	72
Стохастический поиск кратчайших путей с использованием параметров управления потоками данных на основе протокола динамической маршрутизации для мобильных AD-HOC сетей Али Иед Хуссейн, Н.А. Рындин.....	78

Радиотехника и связь

Оптимизация ПЛИС-архитектур для нейросетевого декодирования блоковых кодов М.В. Хорошайлова.....	87
Антенная решетка на основе параболических антенных элементов И.А. Баранников, Е.А. Ищенко, Ю.Г. Пастернак, Д.К. Проскурин, С.М. Фёдоров.....	95
Моделирование диаграммы направленности эквидистантной микрофонной решётки А.И. Сукачев, Р.А. Верлин, Е.А. Сукачева, А.В. Башкиров.....	99
Автоматическая диагностика технических средств территориально-распределенной системы радиоконтроля М.В. Жупиков, С.В. Баркалов, Д.А. Алексеев, А.Б. Токарев.....	105
Антенная решетка на основе сегменто-параболических элементов с плавным управлением линейной поляризацией И.А. Баранников, Е.А. Ищенко, Ю.Г. Пастернак, Д.К. Проскурин, С.М. Фёдоров.....	117

Анализ влияния полимерных покрытий на частотный диапазон антенно-фидерных устройств М.А. Ромашенко, Д.В. Васильченко, Е.А. Ищенко, С.Н. Паршин, Г.П. Золкин	122
Алгоритм оценки канала связи OFDM-систем, основанный на методах глубокого обучения О.Н. Чирков.....	129
Широкополосная антенна коротковолнового диапазона, состоящая из несимметричных вибраторов А.Н. Сысоев, Д.Ю. Муромцев, О.А. Белоусов, А.А. Тришаков.....	135
Линейная фазированная антенная решётка с мемристивной линией задержки Д.А. Шершов, И.А. Сафонов, С.М. Фёдоров, А.А. Силонов.....	139
Атмосферная оптическая линия связи с полярным кодированием Р.П. Краснов, А.В. Бобровников.....	145
Особенности разработки мобильного пассивного акустического детектора А.И. Сукачев, Н.А. Глаголев, М.С. Рябых, Е.А. Сукачева.....	151
Антенная решетка на основе патч-элементов с возможностью работы с двумя линейными поляризациями И.А. Баранников, Е.А. Ищенко, Ю.Г. Пастернак, Д.К. Проскурин, С.М. Фёдоров.....	162
Регистр последовательного приближения для отечественной КМОП-технологии А.В. Белявцев, А.В. Русанов.....	166
Методика проектирования мощных импульсных источников питания для аппаратуры специального назначения с улучшенными электромагнитными характеристиками А.В. Турецкий, А.А. Пирогов, М.В. Хорошайлова, И.А. Турецкий.....	172
Разработка и исследование микрополосковых фильтров для приемного модуля А.М. Безрукавый, И.С. Бобылкин, Н.А. Ключев.....	181
Обратноходовый преобразователь напряжения для питания подвижных объектов по тонким проводным линиям М.А. Ромашенко, Н.Ю. Веретенников, А.В. Гудков.....	185
Методика автоматического оптического контроля качества изготовления печатных плат с использованием нейронных сетей О.Н. Чирков, В.К. Здоровцов, М.Н. Тамбовцев.....	191

Машиностроение и машиноведение

Оптимизация маршрута клёпки панелей крыла малой толщины И.Н. Титов.....	199
Построение модели интерференции поверхностей резания, образованных зубьями охватывающей фрезы с конструктивной радиальной подачей в процессе фрезерования РК-профильных валов В.В. Куц, О.Н. Кириллов, А.Н. Кальченко.....	203
Технология и оборудование для комбинированных методов обработки объектов транспортного и энергетического машиностроения О.В. Уразов.....	210
Модернизация системы охлаждения фрезы при механической обработке деталей внутрикорпусного устройства ВВЭР Ю.П. Косогова, А.Г. Федотов.....	222
Газодинамический анализ БПЛА типа конвертоплан в снаряженном состоянии с применением CFD методов Е.Н. Некравцев, К.С. Сафонов.....	231
Подбор драйверов управления двигателями устройства для очистки каналов охлаждения после лазерной обработки И.Г. Дроздов, Е.А. Ищенко, А.А. Болдырев, Е.Д. Егорова.....	238

CONTENTS

Informatics, computer engineering and control

Algorithm for applying cascade encryption and key derivation functions in stream data processing environment	
M.S. Voytenko, V.F. Barabanov.....	7
Searchless system of extreme control of photovoltaic converters	
U.A. Shcheglova, E.M. Vasil'ev.....	11
Cooling of the heat-generating medium in a single-pass cross-flow plate heat exchanger	
A.V. Ryazhskikh, I.G. Drozdov, V.I. Ryazhskikh	18
Using of an adaptive web application management system in technical systems for industrial equipment	
K.G. Reznikov, S.L. Podvalny.....	25
Mathematical support for controlling the position of non-stationary objects of information and telecommunication system	
I.A. Chernoiivanenko.....	31
Intelligent control system for evolutionary algorithms in multi-criteria optimization problems	
D.A. Baranov, V.F. Barabanov.....	39
Comprehensive method for assessing the impact of a shaped charge on the wellbore walls based on the prediction of shock wave parameters using the Umov vector	
N.N. Fedodrov, E.A. Pafikov, N.A. Arkhipova.....	45
Dynamic viscosity of nanoliquids with polydisperse nanoparticles	
A.V. Ryazhskikh, I.G. Drozdov, V.I. Ryazhskikh.....	51
Mathematical model of the dependence of printing error on the dimensions and angle of the product	
N.A. Vekhteva, Yu.V. Litovka.....	56
Determining the optimal number of clusters when identifying neighborhood models	
I.A. Sedykh, K.N. Makarov.....	64
Modeling and studying control processes of a battery subsystem as part of an autonomous power supply system	
A.K. Tishchenko, R.Yu. Kuz'menko, E.M. Vasil'ev.....	72
Stochastic shortest path search using flow control parameters based on dynamic routing protocol for mobile AD-HOC networks	
A.E. Husein, N.A. Ryndin.....	78

Radio engineering and communication

Optimization of FPGA architectures for neural network decoding block codes	
M.V. Khoroshaylova.....	87
Antenna array based on parabolic antenna elements	
I.A. Barannikov, E.A. Ishchenko, Yu.G. Pasternak, D.K. Proskurin, S.M. Fedorov.....	95
Simulation of the radiation pattern of an equidistant microphone array	
A.I. Sukachev, R.A. Verlin, E.A. Sukacheva, A.V. Bashkirov.....	99
Automatic diagnostics of technical equipment of geographically distributed automated radio monitoring system	
M.V. Zhupikov, S.V. Barkalov, D.A. Alekseev, A.B. Tokarev.....	105
Antenna array based on segment-parabolic elements with smooth control of linear polarization	
I.A. Barannikov, E.A. Ishchenko, Yu.G. Pasternak, D.K. Proskurin, S.M. Fedorov.....	117

Analysis of the influence of polymer coatings on the frequency range of antenna-feeder devices M.A. Romashchenko, D.V. Vasil'chenko, E.A. Ishchenko, S.N. Parshin, G.P. Zolkin.....	122
OFDM systems communication channel estimation algorithm based on deep learning methods O.N. Chirkov.....	129
Broadband hf band antenna consisting of asymmetric vibrators A.N. Sysoev, D.Y. Muromtsev, O.A. Belousov, A.A. Trishakov.....	135
Linear phased antenna array with memristive delay line D.A. Shershov, I.A. Safonov, S.M. Fedorov, A.A. Silonov.....	139
Free-space optical system with polar coding R.P. Krasnov, A.V. Bobrovnikov.....	145
Features of the development of a mobile passive acoustic detector A.I. Sukachev, N.A. Glagolev, M.S. Ryabykh, E.A. Sukacheva.....	151
Antenna array based on patch elements with the capability of working with two linear polarizations I.A. Barannikov, E.A. Ishchenko, Yu.G. Pasternak, D.K. Proskurin, S.M. Fedorov.....	162
Successive approximation register for CMOS technology process A.V. Belyavtsev, A.V. Rusanov.....	166
Design methodology for high-power switching power supplies for special-purpose equipment with improved electromagnetic characteristics A.V. Turetskiy, A.A. Pirogov, M.V. Khoroshaylova, I.A. Turetskiy.....	172
Methodology for the development and research of microstrip filters for the receiver module A.M. Bezrukavy, I.S. Bobylkin, N.A. Klyuev.....	181
Flyback voltage converter for power supply of moving objects via thin wire lines M.A. Romashchenko, N.Yu. Veretennikov, A.V. Gudkov.....	185
Technique of automatic optical quality control of printed circuit boards using neural networks O.N. Chirkov, V.K. Zdorovtsov, M.N. Tambovtsev.....	191

Mechanical engineering and science of machines

Optimization of the riveting route for thin wing panels I.N. Titov.....	199
Construction of a model of interference of cutting surfaces formed by the teeth of an enclosing milling cutter with a constructive radial feed during milling of RC profile shafts V.V. Kuts, O.N. Kirillov, A.N. Kal'chenko.....	203
Technology and equipment for combined methods of processing objects of transport and power engineering O.V. Urazov.....	210
Modernization of the cooling system of the cutter in mechanical processing of parts of the internal vessel device of WWER Yu.P. Kosogova, A.G. Fedotov.....	222
Gas dynamic analysis of a convertoplan UAV in a loaded state using a CFD system E.N. Nekravtsev, K.S. Safonov.....	231
Motor control drivers selection for cooling channel cleaning after laser treatment I.G. Drozdov, E.A. Ishchenko, A.A. Boldyrev, E.D. Egorova.....	238

Информатика, вычислительная техника и управление

DOI 10.36622/1729-6501.2025.21.4.001

УДК 004.056

АЛГОРИТМ ПРИМЕНЕНИЯ КАСКАДНОГО ШИФРОВАНИЯ И ФУНКЦИЙ ФОРМИРОВАНИЯ КЛЮЧА В УСЛОВИЯХ ПОТОКОВОЙ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ

М.С. Войтенко, В.Ф. Барабанов

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

Аннотация: рассматривается актуальная проблема обеспечения безопасности данных при передаче и хранении. Предлагаемый алгоритм рассчитан на работу в поточном режиме с использованием каскадного (двойного) шифрования, что позволяет эффективно шифровать потоки данных, без создания и хранения файла с оригинальными данными на диске, а также исключает действия, связанные с повторным чтением шифруемой информации. В основе алгоритма лежит использование двух поточных шифров (ChaCha20 и HC-256) и функций формирования ключа – Argon2 и scrypt. Ключевыми особенностями алгоритма являются: использование каскадного шифрования поточными шифрами совместно с функциями формирования ключа для обеспечения уникальности зашифрованных данных даже при идентичных исходных данных; механизм шифрования ключа позволяет изменять пароли без необходимости полного повторного шифрования данных. Объектом рассмотрения в рамках данной статьи является алгоритм, обеспечивающий высокий уровень защиты, где для доступа к данным злоумышленнику потребуется одновременно подобрать два независимых ключа, что вычислительно крайне затратно, при использовании современного оборудования. Предложенное решение предназначено для безопасного долгосрочного хранения и передачи конфиденциальной информации, например, паролей, персональных и других чувствительных данных

Ключевые слова: шифрование, поточное шифрование, каскадное шифрование, функция формирования ключа

Введение

В настоящее время использование информационных технологий требует соблюдения мер безопасности для хранимых и передаваемых данных. Без использования шифрования передаваемая информация будет доступна для перехвата злоумышленниками: от личных сообщений и фотографий до данных банковских карт и коммерческой тайны. Подавляющее большинство данных передаётся посредством сети Интернет. В данной статье предложен алгоритм применения каскадного шифрования поточными шифрами и функциями формирования ключа. Алгоритм рассчитан на работу в поточном режиме, то есть данные читаются последовательно и только один раз. Это позволяет шифровать потоки данных, такие как видео или данные с датчиков, без задержек, связанных с необходимостью загружать весь объем данных на устройство в оперативную память или на диск.

В алгоритме используются поточные шифры. Поточный шифр – это симметричный алгоритм, в котором шифрование каждого элемента открытого текста зависит от текущего состояния алгоритма и производится в реальном времени [1].

Роль пароля и функции формирования ключа

Пароль подаётся в формате base64 [2]. Использование base64 обусловлено наличием возможности использовать в пароле символ переноса строки (0xA) как часть пароля. Символ переноса строки предполагается использовать для разделения одного пароля от другого, поэтому необходимо выполнить преобразование пароля для использования в алгоритме. Поступающий пароль будет декодирован из формата base64, что обеспечивает корректную обработку пароля независимо от используемых в пароле значений байт.

Когда пароль введён, срабатывает функция формирования ключа (key derivation function или KDF). KDF – это функция, формирующая один или несколько секретных ключей на основе секретного значения [3]. KDF участвует в шифровании ключа для последующего хранения, а также значительно усложняет процесс взлома методом перебора. Ключ представляет из себя случайную последовательность (например, /dev/random), которая будет использоваться в алгоритмах шифрования данных. Применение случайной последовательности делает зашифрованные данные уникальными, даже при одинаковых исходных данных.

В качестве функций формирования ключа предполагается использовать Argon2 и/или scrypt. Ключевой особенностью данных функций является интенсивное использование вычислительных ресурсов и оперативной памяти, что делает массовый параллельный перебор паролей на специализированном оборудовании крайне затратным и медленным [4, 5].

Обработанный функцией пароль используется для шифрования случайного секретного ключа с помощью логической операции XOR. Основное преимущество данного подхода в том, что пароль и производная от пароля не используются для непосредственного шифрования данных. Шифруется случайный ключ, который применяется в поточных шифрах. Это также позволяет менять пароли без необходимости повторно шифровать данные. Повторному шифрованию подвергнутся только ключи.

Результатом операции будет служить зашифрованный секретный ключ. Схема шифрования пароля обозначена на рис. 1.

Алгоритм шифрования ключа выглядит следующим образом:

$$EK = KDF(password) \oplus key,$$

где EK – это зашифрованный ключ (encrypted key). Аналогично выглядит алгоритм дешифрования:

$$key = KDF(password) \oplus EK.$$

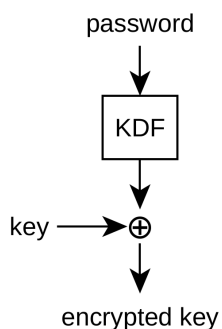


Рис. 1. Шифрование ключа с применением KDF

Каскадное шифрование данных

Предполагается шифровать дважды: первый раз с использованием поточкового шифра ChaCha20, второй – HC-256, так же поточкового.

На рис. 2 показана схема применения двойного шифрования данных.

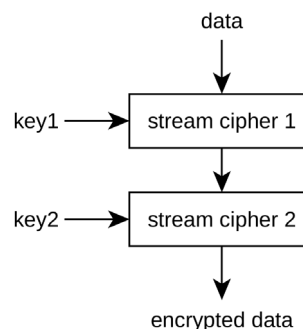


Рис. 2. Схема применения двойного шифрования данных

Оба перечисленных шифра являются поточными, то есть данные шифруются операцией XOR с псевдослучайной последовательностью, генерируемой на основе ключа. Двойное шифрование обеспечивает дополнительный уровень защиты, поэтому если один из ключей или алгоритмов шифрования будет скомпрометирован, данные останутся защищёнными благодаря второму уровню шифрования. Для взлома злоумышленнику потребуется подобрать оба ключа одновременно, что вычислительно крайне затратно при использовании современного оборудования.

Алгоритм двойного шифрования выглядит следующим образом:

$$ED = cipher2(key2, cipher1(key1, data)),$$

где ED – это зашифрованные данные (encrypted data). Аналогично выглядит алгоритм для дешифрования:

$$data = cipher1(key1, cipher2(key2, ED))$$

Ввод и вывод данных

Порядок ввода и вывода данных представлен на рис. 3. В алгоритм подаётся два пароля (в формате base64 каждый) по очереди, производится операция шифрования или дешифрования (если используется соответствующий аргумент или переменная окружения). Выходные данные при шифровании будут следующими: первые 32 байта занимает зашифрованный ключ, вторые 32 байта – второй ключ, после чего некоторое место занимают данные, а последние 32 байта занимает зашифрованная хеш-сумма (например, «Стрибог» в режиме 256 бит [6]) оригинальных данных для проверки целостности.

В случае, если данные подлежат дешифровке, входной поток будет идентичным, но выходной поток будет содержать расшифрованную информацию. Последний байт в потоке, после окончания дешифровки, служит меткой о целостности расшифрованных данных на основе проверки хэш-суммы.

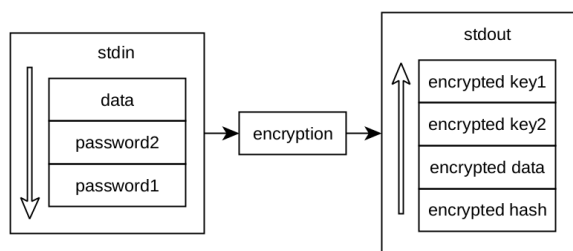


Рис. 3. Порядок ввода и вывода данных (режим шифрования)

Параметры функций формирования ключа

Параметры KDF следует задавать таким образом, чтобы использовать наибольший доступный объем оперативного запоминающего устройства (ОЗУ) и приемлемое время при формировании ключа. Это создаст дополнительные затраты атакующему, так как в случае подбора ключа грубой силой, будет необходимо применять идентичные параметры KDF.

Набор параметров, использующий 4 Гб ОЗУ и затрачивающий 32,76 секунд в Argon2d будет следующий: $p=4096000$, $t=15$, $p=1$.

Для Scrypt параметры будут следующие: $\log n=22$, $r=8$, $p=4$. Использование ОЗУ будет идентичным, а затрачиваемое время будет около 30,73 секунд.

Были использованы библиотеки на языке RUST: argon2 версии 0.5.3 и scrypt версии 0.11.0. Затрачиваемое время на формирование ключа было определено в ходе проведения тестов используя процессор AMD Ryzen 5 3600x в однопоточном режиме.

Следует отметить, что процессы формирования ключей не требуют последовательного исполнения и могут быть разделены на несколько потоков, но в таком случае объем использования ОЗУ будет суммироваться.

Заключение

Представленный в данной статье алгоритм применения каскадного шифрования с применением поточных шифров и функциями формирования ключа можно использовать для долгосрочного хранения чувствительных данных: паролей, данных паспорта, договоров и других частных данных, нуждающихся в защите от несанкционированного доступа при хранении и передаче посредством сети Интернет.

Конечный размер данных будет увеличен на 96 байт (64 байта в начале сообщения и 32 байта в конце сообщения), что позволяет прогнозировать итоговый размер зашифрованных данных.

В случае применения использования иных алгоритмов шифрования или функции хэширования, которые имеют отличные от представленных объемы ключей или хеш-сумм, итоговый объем данных можно вычислить следующим образом:

$$S = \sum Sk_i + Sd + Ssh,$$

где S – итоговый объем, Sk – объем ключа, Ssh – объем хэш-суммы.

Алгоритм может иметь ограничения по количеству данных, подлежащих шифрованию. Поточные шифры имеют внутренние n -битные счётчики, что задаёт данное ограничение. ChaCha20 имеет ограничение в 256 Гб, так как имеет 32-битный счётчик и использует 8 байт на блок [7]. Шифр HC-256 же способен генерировать ключевую последовательность длиной до 2^{128} бит [8].

Решением данной проблемы является замена алгоритмов потокового шифрования на другие с большим счётчиком состояний или создание производных ключа для генерации новых псевдослучайных последовательностей, однако, второй вариант может повлечь неустойчивые риски криптостойкости, так как создаёт связь между генерируемыми последовательностями.

Другим явным недостатком является необходимость использования двух разных паролей, что может оказаться трудным для запоминания или внести дополнительную сложность для реализации автоматической системы шифрования.

Литература

1. Криптографическая защита информации // Н.А. Гатченко, А.С. Исаев, А.Д. Яковлев. СПб: НИУ ИТМО, 2012. 142 с.
2. RFC 4648: The Base16, Base32, and Base64 Data Encodings. URL: <https://datatracker.ietf.org/doc/html/rfc4648#section-4> (дата обращения 18.09.2025)
3. Data privacy / M. Bezzi [et al.] // Privacy and Identity Management for Life. Springer, 2011. pp. 185-186.
4. Alwen J., Blocki J. Efficiently Computing Data-Independent Memory-Hard Functions // Advances in Cryptology. CRYPTO 2016. pp. 241-271.
5. RFC 7914: The scrypt Password-Based Key Derivation Function. URL: <https://datatracker.ietf.org/doc/html/rfc7914.html> (дата обращения: 18.09.2025).
6. ГОСТ 34.11-2018. Информационная технология. Криптографическая защита информации. Функция хеширования. М.: Стандартинформ, 2018. 25 с.
7. Королев И.Ф. Эффективная реализация поточного шифра CHACHA20 // Вестник Сыктывкарского университета. Сер. 1: Математика. Механика. Информатика. 2017. Вып. 4 (25). С. 33-43.
8. Wu H. A New Stream Cipher HC-256. URL: <https://www.iacr.org/archive/fse2004/30170226/30170226.pdf> (дата обращения: 18.09.2025).

Информация об авторах

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

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

**ALGORITHM FOR APPLYING CASCADE ENCRYPTION AND KEY DERIVATION FUNCTIONS
IN STREAM DATA PROCESSING ENVIRONMENT**

M.S. Voytenko, V.F. Barabanov

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract: this article addresses the current problem of ensuring data security during transmission and storage. The proposed algorithm is designed to operate in a stream mode using cascade (double) encryption, which enables efficient encryption of data streams without creating and storing a file with the original data on the disk; it also eliminates the need for re-reading the information being encrypted. The algorithm is based on the use of two stream ciphers (ChaCha20 and HC-256) and key derivation functions - Argon2 and scrypt. The key features of the algorithm are: the use of cascade encryption with stream ciphers combined with key derivation functions to ensure the uniqueness of encrypted data even when the original data is identical; the key encryption mechanism allows for changing passwords without the need for complete data re-encryption. The object of consideration in this article is an algorithm that provides a high level of protection, where an attacker would need to simultaneously compromise two independent keys to access the data, which is computationally prohibitive even with modern equipment. The proposed solution is intended for the secure long-term storage and transmission of confidential information, such as passwords, personal, and other sensitive data

Key words: encryption, stream cipher, cascade encryption, key derivation function

References

1. Ganchenko N.A., Isaev A.S., Yakovlev A.D. "Cryptographic information security" ("Kriptograficheskaya zashchita informatsii"), ITMO University, 2012, 142 p.
2. RFC 4648: The Base16, Base32, and Base64 Data Encodings, available at: <https://datatracker.ietf.org/doc/html/rfc4648#section-4> (date of access: 18.09.2025).
3. Bezzi M. et al. "Data privacy", *Privacy and Identity Management for Life*, Springer, 2011, pp. 185-186.
4. Alwen J., Blocki J. "Efficiently computing data-independent memory-hard functions", *Advances in Cryptology. CRYPTO 2016*, pp. 241-271.
5. RFC 7914: The scrypt Password-Based Key Derivation Function, available at: <https://datatracker.ietf.org/doc/html/rfc7914.html> (date of access: 18.09.2025).
6. GOST 34.11-2018 "Information technology. Cryptographic data security. Hash-function", 2018, 25 p.
7. Korolev I.F. "Efficient implementation of ChaCha20 stream cipher", *Bulletin of Syktyvkar University, Series 1: Mathematics. Mechanics. Infotmatics (Vestnik Syktyvskarskogo universiteta. Ser. 1: Matematika. Mekhanika. Informatika)*, 2017, no. 4 (25), pp. 33-43.
8. Hongjun Wu. "A New Stream Cipher HC-256", available at: <https://www.iacr.org/archive/fse2004/30170226/30170226.pdf> (date of access: 18.09.2025).

Submitted 20.10.2025; revised 10.11.2025

Information about the authors

Maksim S. Voytenko, graduate student, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya, Voronezh 394006, Russia), e-mail: voytenkom@yandex.ru

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

БЕСПОИСКОВАЯ СИСТЕМА ЭКСТРЕМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯМИ

У.А. Щеглова, Е.М. Васильев

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

Аннотация: решается проблема повышения энергоэффективности фотоэлектрических преобразователей (солнечных батарей), работающих в условиях с нестационарной плотностью светового потока и переменной нагрузки. Существо этой проблемы заключается в экстремальном характере ватт-амперных характеристик преобразователей, положение максимума отдаваемой мощности в которых изменяется в соответствии с указанными условиями эксплуатации. Это обстоятельство приводит к существенному снижению коэффициента использования батарей по мощности. Ставится задача автоматического поддержания положения рабочей точки батареи в точке с максимальной мощностью, отдаваемой в нагрузку. Для решения этой задачи предложен беспойсковый способ определения текущего положения экстремума, который использует рабочие движения системы управления батареями, обусловленные широтно-импульсной модуляцией её тока. Применена параллельная схема управления током преобразователя, что даёт возможность в режиме с постоянной плотностью светового потока при переменной нагрузке поддерживать постоянной не только отбираемую от батареи мощность, но и напряжение на её выходе. В режиме с переменной плотностью светового потока предложенная система переходит в режим динамического слежения за точкой экстремума мощности. Для обеспечения устойчивых переключений в малых окрестностях экстремума введена нелинейная статическая характеристика регулятора, формируемая системой нечётких решающих правил. Приведены результаты модельных экспериментов, подтверждающих работоспособность предложенного способа экстремального управления

Ключевые слова: источники возобновляемой энергии, фотоэлектрические преобразователи, точка максимальной мощности, экстремальное управление

Введение

В настоящее время в перечне используемых альтернативных видов энергии, возобновляемых или поступающих на Землю естественным путём, доминирующую роль занимает солнечная энергия [1, 2]. Этому способствует не только доступность солнечной энергии на большей части земного шара, но и быстрое снижение стоимости оборудования, необходимого для преобразования энергии света в электрическую энергию [3].

Наиболее важным функциональным элементом такого оборудования являются полупроводниковые фотоэлектрические преобразователи, конструктивно объединяемые в солнечные батареи [4]. Энергетическую эффективность солнечных батарей характеризуют два показателя:

1) коэффициент полезного действия – доля солнечной энергии, преобразуемая батареями в электрическую энергию. Этот показатель для батарей массового применения не превышает 30 %, и для его повышения ведётся поиск новых полупроводниковых материалов и их сочетаний [5];

2) коэффициент использования электрической мощности солнечной батареи, определяе-

мый как отношение фактически отбираемой от батареи электрической мощности к максимальному значению мощности батареи, которую она способна отдать потребителям при данных условиях освещения и температуре. На рис. 1 показаны кривые изменения мощности P солнечной батареи при изменении отдаваемого ею тока I и различной плотности J светового потока.

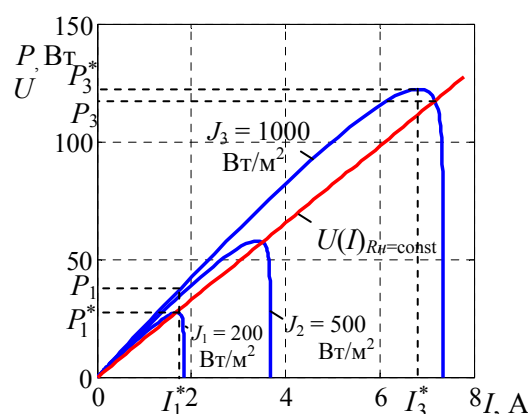


Рис. 1. Зависимость напряжения U и мощности P солнечной батареи от тока I нагрузки и плотности J светового потока

Из рис. 1 следует, что зависимость мощности от нагрузки носит экстремальный характер, и положение экстремума отбираемой мощ-

ности существенно изменятся при изменении плотности светового потока. Это изменение при постоянном значении отдаваемого тока (например, $I_1^* = \text{const}$ на рис. 1) приводит к тому, что батарея будет многократно недоиспользована по мощности $P_1 \ll P_3^*$. Если батарея функционирует в режиме работы с постоянным сопротивлением нагрузки ($R_n = \text{const}$, рис. 1), коэффициент использования снижается в меньшей степени, но по-прежнему остаётся заметно меньшим единицы, в частности: $P_3 < P_3^*$.

Таким образом, при практической эксплуатации солнечных батарей возникает актуальная задача автоматического поддержания (стабилизации) их состояния в точке с максимальной отдаваемой мощностью.

Наиболее распространенный способ решения этой задачи содержит следующие процедуры [6, 7, 8, 9]:

введение в процесс работы системы стабилизации специального поискового возмущающего воздействия;

наблюдение реакции системы на это воздействие;

последующая оценка расположения рабочей точки батареи относительно экстремума;

выработка управления, перемещающего текущую рабочую точку в сторону экстремума.

Принципиальным недостатком этого способа является необходимость выявления реакции системы на специальное возмущающее воздействие на фоне аналогичных реакций системы на непрерывно изменяющиеся текущие

условия её функционирования – плотность светового потока и сопротивление нагрузки [10, 11]. Кроме того, известные алгоритмы экстремального управления при неизменяющемся световом потоке отдадут в нагрузку также неизменяющийся оптимальный ток I^* (рис. 1), хотя потребность потребителей в этом токе не является постоянной.

Целью предлагаемой работы является:

построение беспоиcкового алгоритма автоматического поддержания состояния солнечной батареи в точке с максимальной отдаваемой мощностью, использующего собственные рабочие движения системы и обеспечивающего при этом отслеживание требуемого тока нагрузки в режиме с постоянной плотностью светового потока;

апробация регулятора системы управления, построенного на основе набора нечётких решающих правил;

исследование работоспособности полученной системы экстремального управления в условиях изменяющихся сопротивления нагрузки и плотности светового потока.

Алгоритм беспоиcкового экстремального управления

Для достижения заявленных целей работы откажемся от традиционной последовательной схемы управления током батареи и воспользуемся параллельным включением управляющего ключевого элемента в соответствии с рис. 2.

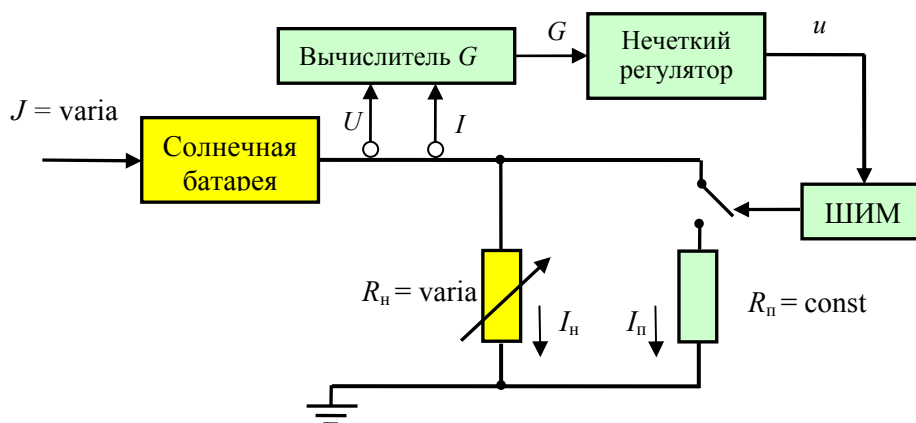


Рис. 2. Функциональная схема системы экстремального управления

Основная группа потребителей обозначена на рис. 2 переменным резистором R_n , ток через который в режиме постоянного напряжения U на батарее также будет изменяться. Поскольку средний ток I солнечной батареи определяется суммой:

$$I = I_n + I_{\pi} \quad (1)$$

то, управляя ключом с помощью широтно-импульсного модулятора (ШИМ), можно изменять средний ток I_n , протекающий через па-

параллельную часть нагрузки, обозначенную постоянным резистором R_n , изменение тока через которую не является критичным (например, нагревательные элементы).

На рис. 2 обозначены также датчики напряжения U и тока I на выходе солнечной батареи. На основании текущих значений этих величин необходимо вычислить оценку G расположения рабочей точки батареи относительно текущего экстремума мощности.

Способ вычисления этой оценки показан на рис. 3.

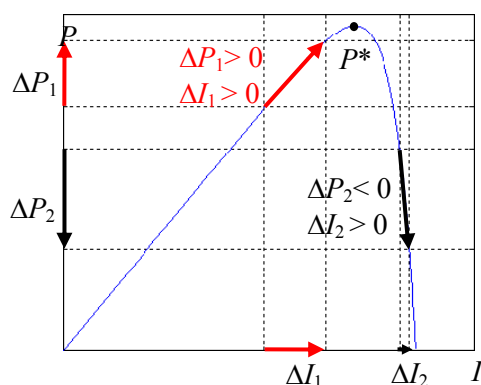


Рис. 3. Способ определения расположения текущей рабочей точки батареи относительно точки с максимальной отдаваемой мощностью

Синхронное измерение тока ΔI и напряжения ΔU через заданные интервалы времени позволяет вычислять приращения этих величин ΔI , ΔU , приращение мощности ΔP :

$$\Delta P = \Delta I \cdot \Delta U, \quad (2)$$

и, далее, оценку G :

$$G = \Delta P \cdot \Delta U, \quad (3)$$

знак которой указывает на расположение текущей рабочей точки относительно экстремума, а амплитуда — на близость к нему.

Действительно, если по рис. 3 рабочая точка расположена левее экстремума, то $G > 0$, если правее, то $G < 0$. В окрестностях экстремума $G \approx 0$. В работе [11] отмечалось, что полученная оценка выполняет роль градиента функции мощности относительно тока:

$$G \sim \nabla P(I), \quad (4)$$

но в отличие от [11], в данном случае используется не только знак оценки G , но и её амплитуда, дающая возможность реализовать непрерывное управление движением к экстремуму в

силу того, что по мере приближения к последнему амплитуда оценки G стремится к нулю, и процесс движения автоматически завершается в окрестностях экстремума.

Вышесказанное подтверждает рис. 4, на котором показан процесс изменения оценки G при прохождении рабочей точки через экстремум (G — мгновенные значения, \bar{G} — средние значения за 10 периодов квантования).

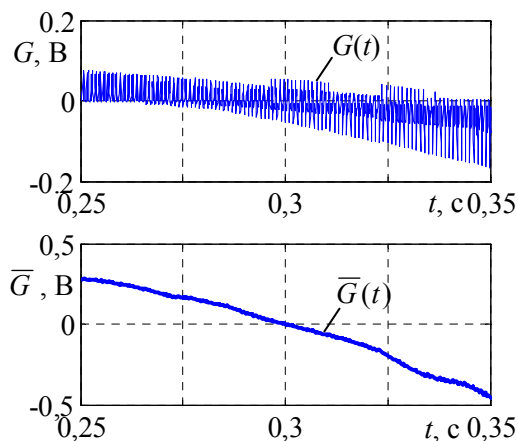


Рис. 4. Процесс изменения оценки G при прохождении рабочей точки через экстремум

Важно отметить, что процесс получения информации о приращениях тока и напряжения совмещён с процессом регулирования с помощью ШИМ, работа которого приводит к неизбежным пульсациям (приращениям) всех электрических величин в системе. То есть процесс движения к экстремуму мощности имеет беспоисковый характер и не требует введения пробных возмущений.

Нечёткий регулятор системы управления

Использование оценки G для непосредственного управления широтно-импульсным модулятором может привести к колебательному характеру процесса движения к экстремуму вплоть до потери устойчивости системы. По этой причине в контур системы следует вводить дополнительный регулятор, обеспечивающий требуемое качество управления.

В рассматриваемом случае для устранения колебательности переходных процессов используется нелинейная характеристика регулятора, сформированная в виде поверхности в координатах оценки G и её градиента во времени ∇G с помощью системы нечётких решающих правил, хорошо приспособленных для синтеза нелинейных законов управления.

Входными лингвистическими переменными системы являются оценка \tilde{G} с нечёткими значениями:

$$\tilde{G} = \{\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, \alpha_5\}, \quad (5)$$

где α_1 – нечёткая переменная «намного меньше нуля», α_2 – «немного меньше нуля», α_3 – «около нуля», α_4 – «немного больше нуля», α_5 – «намного больше нуля»; и градиент:

$$\nabla \tilde{G} = \{\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4, \beta_5\}, \quad (6)$$

с аналогичными нечёткими переменными.

Выходная лингвистическая переменная u также формируется в виде лингвистической переменной \tilde{u} :

$$\tilde{u} = \{\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3, \gamma_4, \gamma_5\}, \quad (7)$$

нечёткие значения которой имеют смысл: γ_1 – нечёткая переменная «намного уменьшить», γ_2 – «немного уменьшить», γ_3 – «не изменять», γ_4 – «немного увеличить», γ_5 – «намного увеличить».

Функции принадлежности μ_α переменных α_i ($i = 1, \dots, 5$) показаны на рис. 5. Функции принадлежности для переменных β_i и γ_i имеют аналогичный вид.

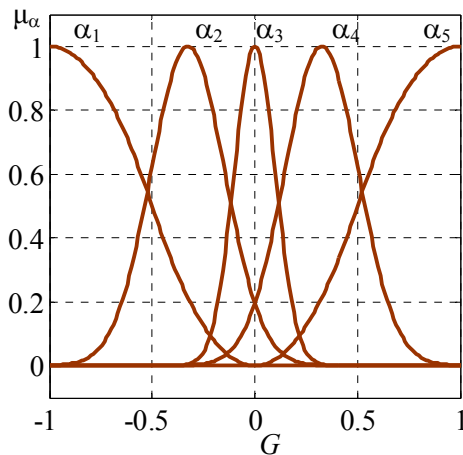


Рис. 5. Функции принадлежности μ_α нечётких переменных α_i , $i = 1 \dots 5$

Система решающих правил представлена в табл. 1.

Таблица 1

Решающие правила для переменной \tilde{u}

\tilde{G}	$\nabla \tilde{G}$				
	β_1	β_2	β_3	β_4	β_5

α_1	γ_1	γ_1	γ_1	γ_2	γ_3
α_2	γ_1	γ_1	γ_2	γ_3	γ_4
α_3	γ_1	γ_2	γ_3	γ_4	γ_5
α_4	γ_2	γ_3	γ_4	γ_5	γ_5
α_5	γ_3	γ_4	γ_5	γ_5	γ_5

Нелинейность сформированной поверхности управления иллюстрируется рис. 6.

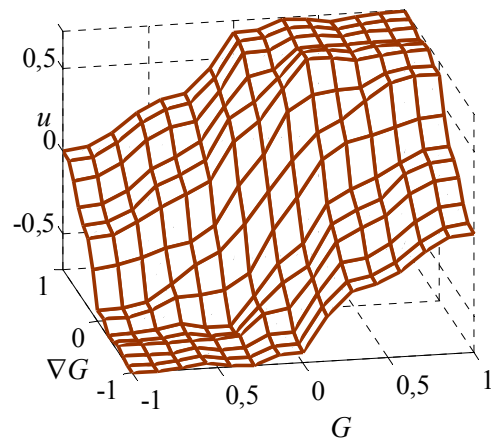


Рис. 6. Нелинейная поверхность управляющего воздействия u

Исследование системы экстремального управления

Для исследования показателей качества синтезированной системы использовалась схема, представленная на рис. 2, в которой выбраны: солнечная батарея с ватт-амперной характеристикой, показанными на рис. 1; $R_n = 3 \dots 40$ Ом; $R_n = 2$ Ом; плотность светового потока $J = 100 \dots 1000$ Вт/м²; напряжение холостого хода при максимальной плотности светового потока $U_{xx} = 21,6$ В; ток короткого замыкания при максимальной плотности светового потока $I_{кз} = 7,34$ А.

Проводились следующие модельные эксперименты:

проверка удержания экстремума мощности при скачкообразном изменении сопротивления нагрузки и постоянной плотности светового потока;

проверка отслеживания системой точки максимальной мощности при изменении плотности светового потока и постоянном сопротивлении нагрузки.

Результаты экспериментов приведены на рис. 7.

На рис. 7, а сопротивление нагрузки скачком увеличивалось от значения 2,6 Ом до значения 8 Ом, на рис. 7, б — уменьшалось от значения 2,6 Ом до значения 1,4 Ом при постоянной плотности светового потока $J = 1000 \text{ Вт/м}^2$. При этом ток нагрузки изменялся от 6,85 А до, соответственно, 2,6 А и 7,4 А.

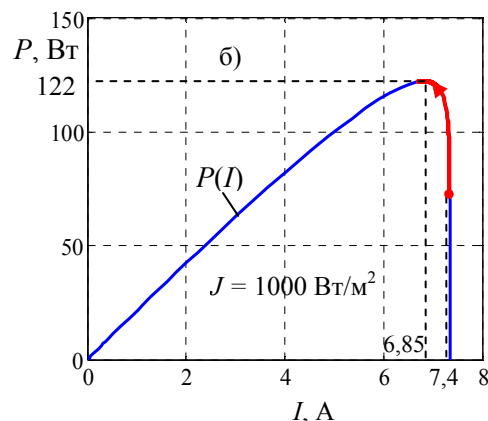
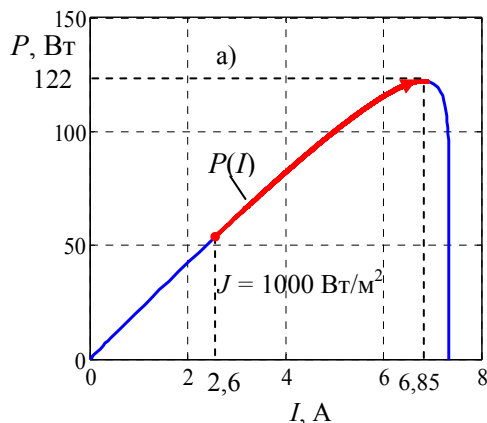


Рис. 7. Процессы приведения состояния батареи в точку максимальной мощности при изменении нагрузки: а) при уменьшении тока нагрузки; б) при увеличении тока нагрузки

Время возвращения в точку экстремума для указанных параметров эксперимента составило не более 0,4 с, что вполне приемлемо для реальных условий эксплуатации солнечных батарей. Существенно, что в окрестностях точки экстремума в системе происходят непрерывные рабочие колебания, вызванные работой широтно-импульсного модулятора. Следует также отметить, что стабилизация точки максимальной мощности в режиме с постоянной плотностью светового потока означает одновременную стабилизацию значения напряжения на нагрузке, в то время как сопротивление R_n и ток I_n нагрузки изменяются.

Результаты работы системы в режиме с переменной плотностью светового потока показаны на рис. 8.

Рис. 8, а иллюстрирует изменение плотности светового потока от значения 100 Вт/м^2 до значения 300 Вт/м^2 за время 0,4 с. В соответствии с этим изменением ток, отдаваемый солнечной батареей, также увеличивается, причём рабочая точка батареи постоянно поддерживается в окрестностях смещающегося экстремума её мощности, рис. 8, б.

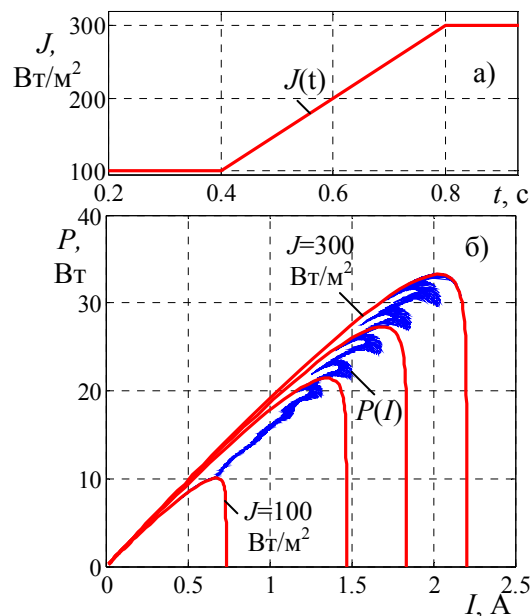


Рис. 8. Процесс динамического отслеживания системой точки экстремума при изменении плотности светового потока

Заключение

1. Предложенная система экстремального управления состоянием фотоэлектрического преобразователя позволяет определять текущее положение рабочей точки преобразователя относительно экстремума его ватт-амперной ха-

рактеристики без использования специальных возмущающих воздействий, вводимых в систему для этой цели. Роль этих воздействий выполняют рабочие движения в системе, вызванные широтно-импульсным регулированием тока, отбираемого от преобразователя.

2. Используемая в системе схема параллельного управления током даёт возможность в режиме с постоянной плотностью светового потока одновременно со стабилизацией точки максимальной мощности поддерживать постоянным напряжение на выходе преобразователя при переменном сопротивлении в цепи потребителей.

3. В режиме с переменной плотностью светового потока система обеспечивает слежение за смещением точки экстремума в реальном масштабе времени.

4. Применение в системе управления регулятора с нечёткими решающими правилами позволяет реализовать нелинейную поверхность его статической характеристики, обеспечивающую непрерывные колебания системы в окрестностях точки экстремума.

Литература

1. Global energy review 2025 / International Energy Agency. France: IEA, 2025. 41 p.
2. Renewable energy technology / F.R.S. Maging, Y.S. Chan, Y.H. Tan, M.D.M. Samsudin // Proceedings of the International Conference on Sustainable Energy and Environmental Technology for Circular Economy, Bangkok, Thailand. 2024. P. 75-83.
3. Кудрявцева О.В., Васильев С.В., Зорина Т.Г. Эффективность реализации программы поддержки возобновляемой энергетики (на примере солнечной энергетики) // Russian Journal of Economics and Law. 2023. Т. 17. №. 4. С. 745-774.
4. Тищенко А.К., Васильев Е.М., Тищенко А.О. Моделирование и анализ устойчивости системы преобразования энергии солнечной батареи космической станции // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2022. Т. 20. № 3. С. 44-51.
5. Моделирование полупроводниковых гетероструктур для преобразователей энергии и датчиков / М.В. Долгополов [и др.] // Вестник Самарского университета. Естественнонаучная серия. 2024. Т. 30(1). С. 64-81.
6. Пученкин А.В. Регулятор точки максимальной мощности для солнечных батарей // Состояние и перспективы развития электротехнологии: сб. науч. трудов Междунар. науч.-техн. конф. Иваново: ИГЭУ, 2011. С. 60-63.
7. Автономная энергетическая установка с экстремальным шаговым регулятором мощности солнечных батарей / Ю.А. Шиняков [и др.] // Альтернативная энергетика и экология. 2015. № (8-9). С. 12-18.
8. Maximum power extraction from solar PV systems using intelligent based soft computing strategies: A critical review and comprehensive performance analysis / A. Saxena, R. Kumar, M. Amir, S.M. Mueen // Heliyon. 2024. Vol. 10. Issue 2. E22417.
9. Eltamaly A.M., Farh H.M.H., Abokhalil A.G. A novel PSO strategy for improving dynamic change partial shading photovoltaic maximum power point tracker // Energy sources, part a: recovery, utilization, and environmental effects. 2024. Vol. 46. No. 1. P. 8736-8750.
10. Малинин Г.В., Серебрянников А.В. Слежение за точкой максимальной мощности солнечной батареи // Вестник Чувашского университета. 2016. № 3. С. 76-93.
11. Бураков М.В., Шишлаков В.Ф. Нечёткое управление солнечной батареей // Информационно-управляющие системы. 2017. № 5. С. 62-70.

Поступила 05.06.2025; принята к публикации 28.08.2025

Информация об авторах

Щеглова Ульяна Александровна – студент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: vgtu-aits@yandex.ru, тел.: +7 (473) 243-77-20

Васильев Евгений Михайлович – д-р техн. наук, профессор, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: vgtu-aits@yandex.ru, тел.: +7 (473) 243-77-20, ORCID 0000-0002-9008-5364

SEARCHLESS SYSTEM OF EXTREME CONTROL OF PHOTOVOLTAIC CONVERTERS

U.A. Shcheglova, E.M. Vasil'ev

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract: the problem of increasing the energy efficiency of photovoltaic converters (solar batteries) operating under conditions of non-stationary luminous flux density and variable load is solved. The essence of this problem lies in the extreme nature of the watt-ampere characteristics of the converters, the position of the maximum output power in which changes in accordance with the specified operating conditions. This circumstance leads to a significant decrease in the battery utilization factor by power. The task is set to automatically maintain the position of the battery operating point at the point with the maximum power output to the load. To solve this problem, a search-free method for determining the current extremum position is proposed, which uses the working movements of the battery control system caused by the pulse-width modulation of its current. A parallel current control circuit of the converter is used, which makes it possible to maintain not only the power taken from the battery constant in the mode with a constant luminous flux density under a variable load, but also a constant voltage at

its output. In the mode with a variable luminous flux density, the proposed system switches to the mode of dynamic tracking of the power extremum point. To ensure stable switching in small extremum neighborhoods, a nonlinear static characteristic of the controller is introduced, formed by a system of fuzzy decision rules. The results of model experiments are presented, confirming the operability of the proposed method of extremal control

Key words: renewable energy sources, photovoltaic converters, maximum power point, extreme control

References

1. International Energy Agency “Global energy review 2025”, France: IEA, 2025, 41 p.
2. Majing F.R.S., Chan Y.S., Tan Y.H., Samsudin M.D.M. “Renewable energy technology”, *Proc. of the Int. Conf. on Sustainable Energy and Environmental Technology for Circular Economy*, Bangkok, Thailand, 2024, pp. 75-83.
3. Kudryavtseva O.V., Vasil’ev S.V., Zorina T.G. “Efficiency of the implementation of the renewable energy support program (on the example of solar energy)”, *Russian Journal of Economics and Law*, 2023, vol. 17, no. 4, pp. 745-774.
4. Tishchenko A.K., Vasil’ev E.M., Tishchenko A.O. “Modeling and stability analysis of the energy conversion system of the solar battery of the space station”, *Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2022, vol. 20, no. 3, pp. 44-51.
5. Dolgoplov M.V., Elisov M.V., Radzhapov S.A., Rakhmankulov I.R., Chipura A.S. “Modeling of semiconductor heterostructures for energy converters and sensors”, *Bulletin of Samara University. Natural Science Series (Vestnik Samarskogo universiteta. Estestvennonauchnaya seriya)*, 2024, vol. 30, issue 1, pp. 64-81.
6. Puchenkin A.V. “Maximum power point controller for solar batteries”, *Proc. of the Int. Scientific-Practical Conf.: State and Prospects of Development of Electrotechnology (Sostoyanie i perspektivy razvitiya elektrotekhnologii)*, Ivanovo, 2011, pp. 60-63.
7. Shinyakov Yu.A., Otto A.I., Osipov A.V., Chernaya M.M. “Autonomous power plant with extreme step-by-step regulator of solar battery power”, *Alternative Energy and Ecology (Alternativnaya energetika i ekologiya)*, 2015, no.(8-9), pp. 12-18.
8. Saxena A., Kumar R., Amir M., Muyeen S.M. “Maximum power extraction from solar PV systems using intelligent based soft computing strategies: a critical review and comprehensive performance analysis”, *Heliyon*, 2024, vol. 10, issue 2, E22417.
9. Eltamaly A.M., Farh H.M. H., Abokhalil A.G. “A novel PSO strategy for improving dynamic change partial shading photovoltaic maximum power point tracker”, *Energy sources, part a: recovery, utilization, and environmental effects*, 2024, vol. 46, no. 1, pp. 8736-8750.
10. Malinin G.V., Serebryannikov A.V. “Tracking the maximum power point of a solar battery”, *Bulletin of Chuvash University (Vestnik Chuvashskogo universiteta)*, 2016, no. 3, pp. 76-93.
11. Burakov M.V., Shishlakov V.F. “Fuzzy control of a solar battery”, *Information and Control Systems (Informatsionno-upravlyayushchiye sistemy)*, 2017, no. 5, pp. 62-70.

Submitted 05.06.2025; revised 28.08.2025

Information about the authors

Ul’jana A. Shcheglova, MA, Voronezh State Technical University (84, 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: vgtu-aits@yandex.ru, tel.: (473) 243-77-20

Evgeniy M. Vasil’ev, Dr. Sc. (Technical), Professor, Voronezh State Technical University (84, 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: vgtu-aits@yandex.ru, tel.: (473) 243-77-20, ORCID 0000-0002-9008-5364

ОХЛАЖДЕНИЕ ТЕПЛОВЫДЕЛЯЮЩЕЙ СРЕДЫ В ОДНОХОДОВОМ ПЕРЕКРЕСТНОТОЧНОМ ПЛАСТИНЧАТОМ ТЕПЛООБМЕННИКЕ

А.В. Ряжских, И.Г. Дроздов, В.И. Ряжских

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

Аннотация: в предположении об идеальном движении в одноходовом перекрестноточном пластинчатом теплообменнике «горячего» теплоносителя с объемным тепловыделением и «холодного» теплоносителя при постоянных теплофизических свойствах и отсутствии термического сопротивления теплопередающей поверхности без потерь в окружающую среду получены с помощью одностороннего интегрального преобразования Лапласа аналитические выражения для температурных полей потоков теплоносителей в теплообменнике. Система уравнений в частных производных с начальными условиями классифицирована как задача Коши в формате 2-D на полуограниченном квадранте, решение представлено в квадратурах с использованием специальных функций Бесселя и Дирака. При отсутствии тепловыделения решение совпадает с решением Шумана. Вычислительным экспериментом показано, что неучет тепловыделения «горячего» теплоносителя может привести к существенной ошибке в определении температур на выходе из теплообменника и в конечном итоге к некорректному значению величины площади теплопередачи. На основе полученного аналитического решения задачи о теплопередаче в одноходовом перекрестноточном пластинчатом теплообменнике, в предположении гидродинамического режима, близкого к режиму идеального вытеснения (в первом приближении соответствует турбулентному течению), разработана методика определения основных термогидравлических характеристик, обеспечивающих заданный режим охлаждения тепловыделяющей среды. Представленная методика продемонстрирована для конкретного примера, показывающего существенное влияние величины объемного тепловыделения в охлаждаемом теплоносителе на геометрические характеристики перекрестноточного пластинчатого теплообменника и соответственно на площадь теплопередачи, что в конечном итоге может привести к снижению эффективности теплообменника

Ключевые слова: теплообмен, теплообменник, перекрестноточный пластинчатый аппарат, тепловыделяющая среда

Введение

Жидкие (газообразные) среды, выделяющие тепло, встречаются в различных приложениях: радиоактивные потоки [1]; электропроводящие растворы [2]; реагирующие смеси, например, при получении аммиака из азота и водорода [3] или оксида серы из сернистого газа и кислорода [4] и т.д. Поэтому в технических и технологических системах необходимо их охлаждение для исключения перегрева оборудования и поддержки штатного режима функционирования.

Для этих целей, как правило, используются теплообменные аппараты с широким спектром конструкторских решений [5]. Причем перекрестноточные пластинчатые теплообменники имеют преимущества в увеличенной площади теплопередачи и высокой герметичности, малом весе при компактном исполнении, а также в отсутствии дополнительных эксплуатационных затрат, износоустойчивости, надежности и безопасной эксплуатации. Эффективность таких теплообменников при охлаждении

тепловыделяющих теплоносителей определяется величиной площади поверхности теплопередачи, которая зависит от расходов «горячего» и «холодного» теплоносителей, их температур на входе в аппарат, теплофизических свойств, гидравлических диаметров проточных элементов, а также от величины удельного тепловыделения.

При анализе такой задачи для классических теплоносителей в отсутствии тепловыделения (теплопоглощения) определены аналитические выражения для полей температур в перекрестноточном пластинчатом теплообменнике с допущением о гидродинамическом режиме течения теплоносителей в виде идеального вытеснения [6-8]. В случае тепловыделяющих сред эти решения не применимы.

В связи с этим рассматривается задача определения температурных полей в одноходовом перекрестноточном пластинчатом теплообменнике, когда «горячий» теплоноситель дополнительно является и тепловыделяющим потоком.

Постановка задачи

Рассматривается одноходовой перекрестноточный пластинчатый теплообменник (рис. 1), у которого ширина входного сечения l_1 по «горячему» теплоносителю с температурой t_h является длиной плоского канала «холодного» теплоносителя с входной температурой t_c , и его ширина l_2 есть длина канала с «горячим» теплоносителем, а h_1 и h_2 являются соответственно высотами этих проточных элементов. Принимается гидродинамический режим течения теплоносителей, близким к идеальному вытеснению, а теплопередающая поверхность, которую омывают теплоносители, не имеет теплового сопротивления. Предполагается, что теплофизические характеристики теплоносителей, а именно, плотности $\rho_{1,2}$ и массовые теплоёмкости $c_{p_{1,2}}$, не зависят от температуры и координат, причем их скорости через теплообменник $v_{1,2} = \text{const}$, а объемная мощность тепловыделения q в «горячем» теплоносителе считается известной. Внешние поверхности теплообменника адиабатны.

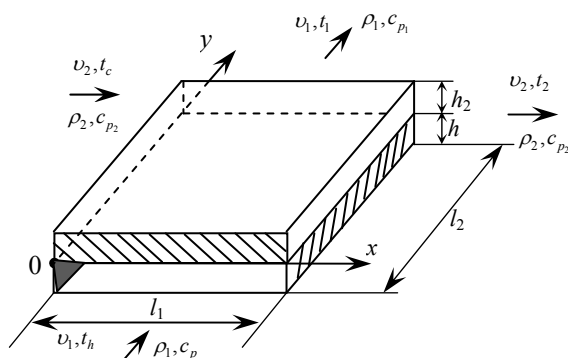


Рис. 1. Расчетная схема одноходового перекрестноточного пластинчатого теплообменника

Симметричность геометрии рассматриваемого теплообменника и совокупность принятых выше допущений позволяют выбрать 2-D декартову систему координат с началом на входной кромке теплопередающей поверхности (рис. 1), которая представлена в более удобном ракурсе на рис. 2 с изображением элементарной площадки $ABCD$ с переменными сторонами по осям ox и oy и длиной dx и dy .

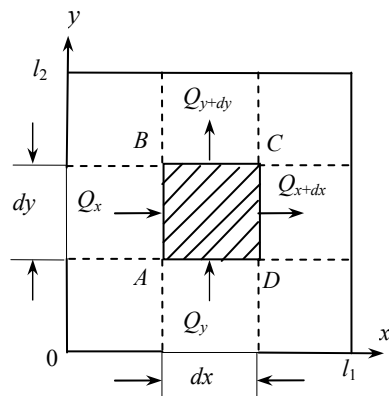


Рис. 2. К выводу уравнений модели

Количество теплоты, проходящее через AD и выходящее через BD (рис. 2), вместе с «горячим» теплоносителем за время $d\tau$ составляет

$$dQ_y = \rho_1 c_{p_1} v_1 t_1(x, y) dx d\tau, \quad (1)$$

$$dQ_{y+dy} = \rho_1 c_{p_1} v_1 \left[t_1(x, y) + \frac{\partial t_1(x, y)}{\partial y} dy \right] dx d\tau. \quad (2)$$

Количество теплоты, проходящее через AB и выходящее через CD (рис. 2), вместе с «холодным» теплоносителем за время $d\tau$ составляет

$$dQ_x = \rho_2 c_{p_2} v_2 t_2(x, y) dy d\tau, \quad (3)$$

$$dQ_{x+dx} = \rho_2 c_{p_2} v_2 \left[t_2(x, y) + \frac{\partial t_2(x, y)}{\partial x} dx \right] dy d\tau. \quad (4)$$

Количество теплоты, сгенерированное за время $d\tau$ в «горячем» теплоносителе есть

$$dQ_i = q dx dy h_1 d\tau. \quad (5)$$

Количество теплоты, переданное от «горячего» теплоносителя «холодному» теплоносителю через теплопередающую стенку

$$dQ_F = k(t_1 - t_2) dx dy d\tau, \quad (6)$$

где k – коэффициент теплопередачи.

Тепловые балансы в дифференциальной форме для «горячего» и «холодного» теплоносителей имеют вид

$$dQ_y - dQ_{y+dy} + dQ_i = dQ_F, \quad (7)$$

$$dQ_x - dQ_{x+dx} = -dQ_F. \quad (8)$$

Подставляя (1) – (6) в (7) и (8), получим

$$\begin{aligned} \rho_1 c_{p_1} \nu_1 h_1 \frac{\partial t_1(x, y)}{\partial y} = \\ = -k[t_1(x, y) - t_2(x, y)] + qh_1, \end{aligned} \quad (9)$$

$$\rho_2 c_{p_2} \nu_2 h_2 \frac{\partial t_2(x, y)}{\partial y} = k[t_1(x, y) - t_2(x, y)], \quad (10)$$

с начальными условиями

$$t_1(x, 0) = t_h, \quad t_2(0, y) = t_c. \quad (11)$$

В безразмерной форме записи система (9) – (11) такова:

$$\frac{\partial T_1(X, Y)}{\partial Y} = T_2(X, Y) - T_1(X, Y) + Q; \quad (12)$$

$$\frac{\partial T_2(X, Y)}{\partial Y} = T_1(X, Y) - T_2(X, Y); \quad (13)$$

$$T_1(X, 0) = 1, \quad T_2(0, Y) = 0, \quad (14)$$

где $X = x / (\rho_2 c_{p_2} \nu_2 h_2)$, $Y = k y / (\rho_1 c_{p_1} \nu_1 h_1)$,
 $T_{1,2}(X, Y) = [t_{1,2}(x, y) - t_c] / (t_h - t_c)$,
 $Q = qh_1 / [k(t_h - t_c)]$.

Анализ

Синтезированная математическая модель с распределенными параметрами (12) – (14) представляет собой задачу Коши, решение которой найдено с помощью одностороннего интегрального преобразования Лапласа [9-12] по переменной X :

$$T_1(X, Y) = 1 + QY - \int_0^Y \Phi(X, \alpha) d\alpha, \quad (15)$$

$$T_2(X, Y) = \int_0^X \Phi(\beta, Y) d\beta, \quad (16)$$

где

$$\begin{aligned} \Phi(X, Y) &= T_1(X, Y) - T_2(X, Y) = \\ &= I_0(2\sqrt{XY}) \exp[-(X+Y)] + Q \int_0^X [1 + \delta(X)] \cdot \\ &\quad \cdot \exp[-(X-\xi)] \cdot \\ &\quad \cdot \{1 - I_0[2\sqrt{(X-\xi)Y}] \exp(-Y)\} d\xi; \end{aligned} \quad (17)$$

$\delta(X)$ - функция Дирака [13].

Результаты вычислений по (15) – (17) для различных величин безразмерных объемных тепловыделений «горячего» теплоносителя» приведены на рис. 3. При $Q = 0$ температурные поля теплоносителей совпадают с температурными полями из решения Шумана [7]. При той же площади теплопередачи, когда $Q = 0,1$, тепловыделение приводит к повышению температуры как «горячего», так и «холодного» теплоносителя, а при более высоких величинах тепловыделений ($Q = 0,25$), в «горячем» теплоносителе, это повышение возрастает еще более значительно.

В практическом плане возникает вопрос об использовании полученного решения для выбора соответствующих геометрических и гидротермических характеристик одноходового пластинчатого перекрестноточного теплообменника.

Методика расчета

Пусть необходимо охладить тепловыделяющую жидкость с объемным расходом U_1 , удельной мощностью тепловыделения q и с начальной температурой t_h до температуры \bar{t}_1 потоком охлаждающей жидкости, имеющим температуру t_c . Теплофизические параметры потоков: плотность $\rho_{1,2}$, массовая теплоемкость $c_{p_{1,2}}$, теплопроводность $\lambda_{1,2}$ и динамическая вязкость $\mu_{1,2}$ считаются независимыми от температуры.

Положим $h_1 \ll l_1$, чтобы проточный канал для тепловыделяющей жидкости являлся плоским, тогда скорость движения «горячего» теплоносителя равна

$$\nu_1 = U / (h_1 l_1). \quad (18)$$

Определяем реперную температуру $t_m = (t_c + t_h)/2$, по которой идентифицируются теплофизические характеристики потоков. В зависимости от числа Рейнольдса, т.е. от гидродинамического режима течения теплоносителя, в проточном канале выбирается эмпирическое соотношение для расчета числа Нуссельта [14]

$$Nu_1 = \begin{cases} 0,15 Re_1^{0,33} Pr_1^{0,43}, & Re_1 < 2100 \\ 0,021 Re_1^{0,8} Pr_1^{0,43}, & Re_1 > 2100 \end{cases}, \quad (19)$$

где $Nu_1 = \alpha_1 d_1 / \lambda_1$; $Re_1 = \nu_1 d_1 \rho_1 / \mu_1$; $Pr_1 = \mu_1 c_{p_1} / \lambda_1$; $d_1 = 2h_1$ - гидравлический диаметр поперечного сечения проточного канала «горячего» теплоносителя.

В предположении отсутствия термического сопротивления теплопередающей поверхности коэффициент теплопередачи может быть определен так

$$k = \alpha_1 \alpha_2 / (\alpha_1 + \alpha_2). \quad (20)$$

Полагаем в первом приближении, что $\alpha_1 \approx \alpha_2$, тогда $k = \alpha_1 / 2$. Это дает возможность найти относительную ширину проточного канала по «горячему» теплоносителю

$$\bar{X} = kl_1 / (\rho_2 c_{p_2} \nu_2 h_2), \quad (21)$$

причем на этом этапе вычислений можно приближенно положить $\nu_2 h_2 \approx \nu_1 h_1$, $\rho_2 c_{p_2} \approx \rho_1 c_{p_1}$. Нахождение длины проточного канала по «горячему» теплоносителю возможно из уравнения

$$\bar{T} = \frac{\bar{t}_1 - t_c}{t_h - t_c} = \frac{1}{\bar{X}} \int_0^{\bar{X}} T_1(X, \bar{Y}) dX, \quad (22)$$

тогда

$$l_2 = \bar{Y} \rho_1 c_{p_1} \nu_1 h_1 / k. \quad (23)$$

Пример

Определить характеристики одноходового перекрестноточного пластинчатого теплообменника для охлаждения тепловыделяющей жидкости ($q = 2 \cdot 10^4 \text{ Вт/м}^3$; $t_h = 75^\circ\text{C}$; $U_1 = 1,25 \cdot 10^{-7} \text{ м}^3/\text{с}$) до $\bar{t} = 40^\circ\text{C}$ охлаждающим теплоносителем с $t_c = 5^\circ\text{C}$. Будем считать, что «горячий» и «холодный» теплоносители по своим физико-химическим и теплофизическим характеристикам близки к воде для средней температуры $t_s = (t_c + t_h)/2 = 40^\circ\text{C}$ [15]:

$\rho_1 = \rho_2 = 1000 \text{ кг/м}^3$; $c_{p_1} = 4200 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{K)}$; $c_{p_2} = 4200 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{K)}$; $\lambda_1 = 0,63 \text{ Вт/(м} \cdot \text{K)}$; $\lambda_2 = 0,63 \text{ Вт/(м} \cdot \text{K)}$; $\mu_1 = 0,658 \cdot 10^{-3} \text{ Па} \cdot \text{с}$; $\mu_2 = 0,658 \cdot 10^{-3} \text{ Па} \cdot \text{с}$.

Зададимся $h_1 = 5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$, $l_1 = 0,25 \text{ м}$ и из (18) определим $\nu_1 = 10^{-3} \text{ м/с}$. Проточные элементы в теплообменнике являются плоскими каналами с гидравлическими диаметрами $d_{1,2} = 2h_{1,2}$. Так как число Рейнольдса $Re_1 = \nu_1 d_1 / \nu_1 = 15,2$ соответствует ламинарному режиму, то согласно (19) $Nu_1 = 0,693$, откуда $\alpha_1 = 43,66 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{K)}$. В предположении, что $\nu_1 = \nu_2$ и $h_1 = h_2$, коэффициент $\alpha_2 \approx \alpha_1$, тогда из (20) следует $k = \alpha_1 / 2 = 21,83 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{K)}$. Безразмерная ширина проточной части «горячего» теплоносителя согласно (21) есть $\bar{X} = 0,26$. С учетом того, что $Q = 0,065$, то из уравнения (22) может быть найдено $\bar{Y} = 0,53$ и из (23) соответственно $l_2 = 0,51 \text{ м}$. При этом расход «холодного» теплоносителя должен быть

$$U_2 = \nu_2 l_2 h_2 = 2,55 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}.$$

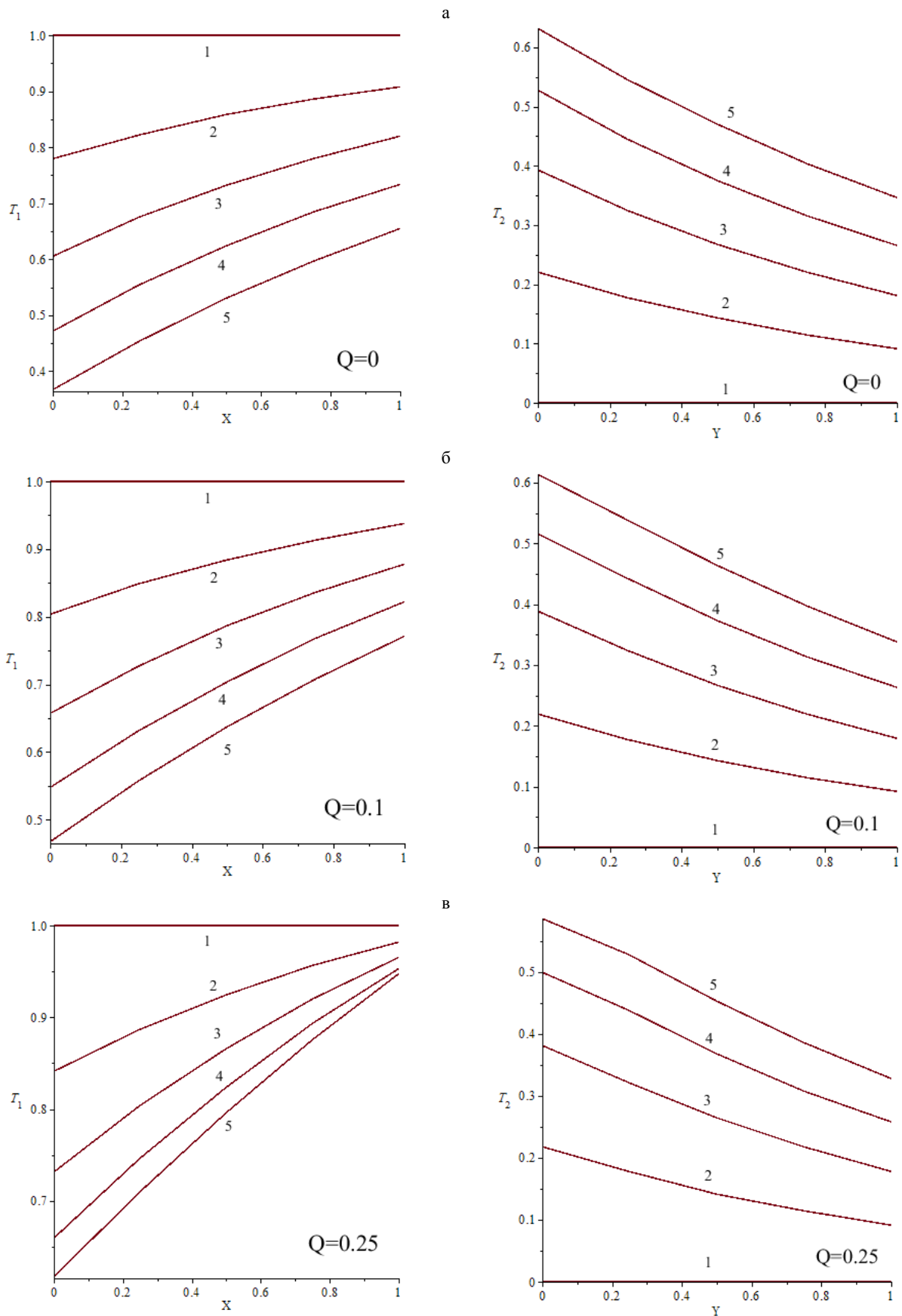


Рис. 3. Температурные поля «горячего» и «холодного» теплоносителей при различных безразмерных объемных тепловыделениях Q (а – 0; б – 0,1; в – 0,25); кривые справа на графиках: 1 – $Y=0$; 2 – $Y=0,25$; 3 – $Y=0,5$; 4 – $Y=0,75$; 5 – $Y=1$; кривые слева на границах: 1 – $X=0$; 2 – $X=0,25$; 3 – $X=0,5$; 4 – $X=0,75$; 5 – $X=1$

Заключение

1. Сгенерирована математическая модель перекрестноточного теплообменника, учитывающая тепловыделения в охлаждаемом теплоносителе.

2. Методом интегральных преобразований найдено аналитическое решение уравнений математической модели в квадратурах.

3. Предложена на основе полученного решения методика расчета перекрестноточного теплообменника с тепловыделением охлаждаемого теплоносителя.

4. Приведен пример расчета, иллюстрирующий корректность математической модели и эффективность предложенной на ее основе инженерной методики расчета.

Полученные результаты могут быть применены при проектировании нового теплообменного оборудования и при модернизации существующего на предприятиях энергетической отрасли.

Литература

1. Никифоров А.С., Куличенко В.В., Жихарев М.И. Обезвреживание жидких радиоактивных отходов. М.: Энергоатомиздат, 1986. 183 с.
 2. Вяткин А.А., Козлов В.Г., Сабиров Р.Р. Конвекция тепловыделяющей жидкости во вращающемся горизонтальном цилиндре // Конвективные течения. 2011. Вып. 5. С. 5-17.
 3. Айнштен В.Г. Процессы и аппараты химической технологии. Книга 1. СПб.: Лань, 2018. 916 с.
 4. Ахметов Н.С. Общая и неорганическая химия. М.: Вшш. школа, 2001. 743 с.
 5. Nemati H., Ardekani M.M., Mahootchi J., Meyer J.P. Fundamentals of Industrial Heat Exchangers Selection, Design, Construction and Operation. NY: Elsevier, 2024. 498 p.
 6. Хаузен Х. Теплопередача при противотоке, прямотоке и перекрестном токе. М.: Энергоиздат, 1988. 384 с.
 7. Фомин Н.В., Буланов А.Б. Жидкостные криогенные системы. Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1985. 247 с.
 8. Sangsawang R., Matum T., Nontskew U. Analytical solution for the temperature distribution in cross-flow plate heat exchanger channels of isosceles triangular geometry // Mechanical Eng.: An International Journal (MEU). 2014. V.1. № 2. P. 1-10.
 9. Деч Г. Руководство к практическому применению преобразования Лапласа и z-преобразования. М.: Наука, 1971. 289 с.
 10. Диткин В.А., Прудников А.П. Интегральные преобразования и операционное исчисление. М.: Изд-во физико-математической литературы, 1961. 524 с.
 11. Бэйтмен Г., Эрдейк А. Высшие трансцендентные функции. Т. 2. М.: Изд-во «Наука», 1966. 297 с.
 12. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике. М.: Наука, 1973. 834 с.
 13. Colombean J.F. Elementary introduction to New Generalized Functions. Amsterdam: Elsevier Science, 1985. 281 p.
 14. Цветков Ф.Ф., Григорьев Б.А. Тепломассообмен. М.: Издательский дом МЭИ, 2011. 561 с.
 15. Варгафтик Н.Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. М.: Наука, 1972. 721 с.
- Поступила 28.08.2025; принята к публикации 06.10.2025

Информация об авторах

Рязских Александр Викторович – канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры прикладной математики и механики, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: ryazhskihav@bk.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9823-3165>

Дроздов Игорь Геннадьевич – д-р техн. наук, профессор кафедры ракетных двигателей, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: dig@cchgeu.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5779-4727>

Рязских Виктор Иванович – д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой прикладной математики и механики, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: ryazhskih_vi@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2834-3000>

COOLING OF THE HEAT-GENERATING MEDIUM IN A SINGLE-PASS CROSS-FLOW PLATE HEAT EXCHANGER

A.V. Ryazhskikh, I.G. Drozdov, V.I. Ryazhskikh

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract: under the assumption of ideal flow in a single-pass cross-flow plate heat exchanger of a "hot" coolant with volumetric heat release and a "cold" coolant with constant thermophysical properties and no thermal resistance of the heat-transfer surface, analytical expressions for the temperature fields of coolant flows in the heat exchanger are obtained using a one-sided integral Laplace transform. The system of partial differential equations with initial conditions is classified as a 2-D Cauchy problem on a semi-bounded quadrant, and the solution is presented in quadratures using special Bessel and Dirac func-

tions. In the absence of heat release, the solution coincides with the Schumann solution. A computational experiment has shown that failing to account for the heat release of the "hot" coolant can lead to a significant error in determining the temperature at the heat exchanger outlet and, ultimately, to an incorrect value of the heat transfer area. Based on the analytical solution obtained for the heat transfer problem in a single-pass cross-flow plate heat exchanger, under the assumption of a hydrodynamic regime close to the ideal plug flow regime (in a first approximation, corresponding to turbulent flow), a method for determining the main thermohydraulic characteristics that ensure a given cooling regime for the heat-generating medium has been developed. The presented method is demonstrated using a specific example demonstrating the significant influence of the volumetric heat release in the cooled coolant on the geometric characteristics of the cross-flow plate heat exchanger and, accordingly, on the heat transfer area, which can ultimately lead to a decrease in the heat exchanger's efficiency

Key words: heat exchange, heat exchanger, cross-flow plate apparatus, heat-generating medium

References

1. Nikiforov A.S., Kulichenko V.V., Zhiharen M.I. "Neutralization of liquid radioactive waste" ("Obezvrezhivanie zhidkikh radioaktivnykh otkhodov"), Moscow: Energoatomizdat, 1986, 183 p.
2. Vyatkin A.A., Kozlov V.G., Sabirov R.R. "Convection of heat-releasing liquid in a rotating horizontal cylinder", *Convective Currents (Konvektivnye techeniya)*, 2011, vol. 5 pp. 5-17.
3. Ainshten V.G. "Processes and apparatus of chemical engineering" ("Protsessy i apparaty khimicheskoy tekhnologii"), Spb.: Lan', 2018, 916 p.
4. Akhmetov N.S. "General and inorganic chemistry" ("Obshchaya i neorganicheskaya khimiya"), Moscow: Vssh. shkola, 2001, 743 p.
5. Nemati H., Ardekani M.M., Mahootchi J., Meyer J.P. "Fundamentals of Industrial heat exchangers selection, design, construction and operation", NY: Elsevier, 2024, 498p.
6. Hauzen H. "Heat transfer under counter, direct, and cross-flow conditions" ("Teploperedacha pri protivotoke, pryamotoke i perekrestnom toke"), Moscow: Energoizdat, 1988, 384 p.
7. Fomin N.V., Bulanov A.B. "Liquid cryogenic systems" ("Zhidkostnye kriogennye sistemy"), Leningrad: Mashinostroyeniye, 1985, 247 p.
8. Sangsawang R., Matum T., Nontskew U. "Analytical solution for the temperature distribution in cross-flow plate heat exchanger channels of isosceles triangular geometry", *Mechanical Eng.: An International Journal (MEU)*, 2014, vol.1, no. 2, pp. 1-10.
9. Dech G. "Guide to the practical application of the laplace and z-transforms" ("Rukovodstvo k prakticheskomu primeneniyu preobrazovaniya Laplasy i z-preobrazovaniya"), Moscow: Nauka, 1971, 289 p.
10. Ditkin V.A., Prudnikov A.P. "Integral transforms and operational calculus" ("Integral'nye preobrazovaniya i operatsionnoe ischislenie"), Moscow: Izd-vo fiziko-matematicheskoy literatury, 1961, 524 p.
11. Bateman G., Erdake A. "Higher transcendental functions", Moscow: Nauka, 1966, 297 p.
12. Korn G., Korn T. "Handbook of Mathematics" ("Spravochnik po matematike"), Moscow: Nauka, 1973, 834 p.
13. Colombean J.F. "Elementary introduction to new generalized functions", Amsterdam: Elsevier Science, 1985, 281 p.
14. Tsvetkov F.F., Grigor'ev B.A. "Heat and Mass Transfer", Moscow: MEI, 2011, 561 p.
15. Vargaftik N.B. "Handbook of thermophysical properties of gases and liquids" ("Spravochnik po teplofizicheskim svoystvam gazov i zhidkostey"), Moscow: Nauka, 1972, 721 p.

Submitted 28.08.2025; revised 06.10.2025

Information about the authors

Aleksandr V. Ryazhskikh, Cand. Sc. (Physics and Mathematics), Associate Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: ryazhskihav@bk.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9823-3165>

Igor' G. Drozdov, Dr. Sc. (Technical), Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: dig@cchgeu.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5779-4727>

Viktor I. Ryazhskikh, Dr. Sc. (Technical), Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: ryazhskih_vi@mail.ru ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2834-3000>

ПРИМЕНЕНИЕ АДАПТИВНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ВЕБ-ПРИЛОЖЕНИЯМИ В ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ ДЛЯ ПРОМЫШЛЕННОГО ОБОРУДОВАНИЯ

К.Г. Резников, С.Л. Подвальный

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

Аннотация: представлена интеграция адаптивной системы управления веб-приложениями с техническими системами для промышленного оборудования. Представленная система позволяет интегрировать ее в окружение технических устройств. Рассмотрена модель контроллера и интеграции адаптивной системы управления веб-приложениями с техническими системами. Представлен динамично настраиваемый интерфейс. Описаны элементы конфигурирования процессов с демонстрацией примера возможного сценария. Продемонстрирована программная реализация и список подготовленных функций для активизации сигналов, помощи оператору и расширения доступности технических систем. Представлен модуль визуализации с различными способами изображения данных в виде графической информации. Интеграция расширяет возможности мониторинга показателей оборудования, в автоматическом режиме корректировать ход работы, повышает качество и безопасность, а также снижает риск поломок и выхода из строя. Процесс настройки и конфигурирования доступен специалисту или оператору из интерфейса системы для ручной и автоматической настройки без необходимости внесения корректировок в работу адаптивной системы управления разработчиком. Разработанная адаптивная система управления позволяет интегрировать ее в различные технические системы, предназначенные для промышленности и не только. Интеграция расширяет возможности мониторинга показателей оборудования, в автоматическом режиме корректировать ход работы, повышает качество и безопасность, а также снижает риск поломок и выхода из строя элементов и системы в целом

Ключевые слова: системы управления, технические системы, промышленное оборудование, динамичный интерфейс, программное обеспечение

Введение

В настоящее время современная промышленность проходит через этап глубокой цифровизации [1]. Ключевым элементом такой трансформации является интеграция технических систем в единое информационное окружение, обеспечивающее удаленный мониторинг, сбор статистических показателей и их автоматизированной обработки с использованием искусственного интеллекта, дальнейшей адаптацией с применением методов принятия решений, а также управление системами в реальном времени из специализированного интерфейса.

Веб-приложения, выступающие в качестве универсального и платформонезависимого интерфейса являются основным решением для реализации человеко-машинного интерфейса и панелей управления для различных систем, в том числе технических [2]. Однако, классические решения, применяемые для разработки интерфейсов управления часто не способны эффективно справляться с высокой изменчивостью условий использования и работы технических систем, связующих каналов, разнородных устройств и прочих требований к качеству, надежности, безопасности и времени

отклика, а являются строго ориентированным механизмом управления без возможности конфигурирования и расширения системы [3].

Важной функцией технических систем является отслеживание показателей в реальном времени, их обработка и возможность автоматического внесения корректировок системой в процесс, либо в виде уведомлений для оператора технической системы для ручного управления. Своевременное отслеживание показателей позволяет, например, точно рассчитывать расходный материал в необходимых пропорциях, автоматизировать ручное управление за счет дополнительных контроллеров, учитывать внешние параметры и свойства оборудования, такие как влажность, температура, напряжение и т.д. Учет параметров способствует не только экономному расходу, но и продлевает срок службы оборудования и деталей, а также сообщает о возможных поломках или износе составляющих.

С ростом производительности вычислительных устройств появилась возможность реализовывать более сложные связанные сервисы, в том числе и для технических систем. Сложные адаптивные системы управления предоставляют функции для одновременного множественного мониторинга систем ряда устройств как одного типа, так и различного, например, при произ-

водстве предметов на всех этапах, когда в производстве одного предмета предмет переходит из одной стадии к другой пошагово, например, фрезерования, покраска и упаковка, либо параллельная обработка различных частей, которые соединяются в последующих шагах, а также комбинированное, при их сочетании.

Функционал адаптивных систем управления веб-приложениями позволяет интегрироваться в различные технические системы и динамично конфигурироваться на основе доступных интерфейсов систем, датчиков, прямого подключения к числовому программному управлению (ЧПУ) устройств, что позволяет многократно расширить спектр возможностей управления оборудования как для малых, так и для крупных технических систем [4]. Современные технические устройства оснащены множеством датчиков, но все равно не покрывают весь спектр запросов технических специалистов или операторов. Для устаревших моделей возникает возможность продления срока службы и повышения качества эксплуатации за счет интеграции подобных систем управления.

В данной статье будут рассмотрены вопросы интеграции адаптивной системы управления веб-приложениями в технические системы для промышленного оборудования, структуры динамично настраиваемого интерфейса и базовых функций, предоставляемых адаптивной системой управления. Кроме того, будут отражены особенности и детали доработок адаптивной системы управления для возможности корректного подключения.

Прежде всего, рассмотрим модель контроллера для подключения устройства.

Модель контроллера и интеграция

Оборудование, которое требует мониторинга системой, необходимо подключить к системе управления по средствам датчиков или встроенного готового интерфейса устройства при его наличии. Датчики закрепляются на устройстве и подключаются к основному контроллеру, находящемуся вблизи устройства путем проводного или беспроводного подключения, например, Bluetooth или Wi-Fi.

Контроллером может являться персональный компьютер, мобильное устройство, смартфон, микроконтроллер, например, на базе Arduino, а также любое другое вычислительное устройство, имеющее функции связи между устройствами.

Контроллер считывает параметры датчиков в реальном времени и предоставляет точку входа для считывания данных параметров, а также предоставляет дополнительные точки входа для конфигурирования или управления подключенного устройства. Во многих современных технических устройствах, контроллером может являться блок ЧПУ или электронный блок управления (ЭБУ). Возможности технической системы с наличием блока ЧПУ или ЭБУ позволяет дополнительно расширить за счет адаптивной системы управления, а в ряде случаев заменяет ее [5]. Структура связей адаптивной системы управления с технической системой представлена на рис. 1.

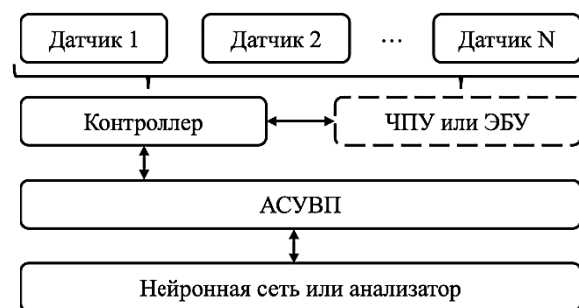


Рис. 1. Структура связей адаптивной системы управления и технической системы

Ключевой связью является отношение между контроллером и адаптивной системой управления веб-приложениями, которая осуществляется через проводное соединение, Интернет, Bluetooth, Wi-Fi или любой другой способ связи, позволяющий передавать информацию. Наиболее функциональным является Интернет-соединение, так как позволяет взаимодействовать контроллеру и системе управления на любом удаленном расстоянии при наличии удовлетворительного качества связи.

Вся доступная информация и панель управления представлены в динамично настраиваемом интерфейсе.

Динамично настраиваемый интерфейс

Адаптивная система позволяет корректировать базовый вид и дополнительно настраивать панель управления и мониторинга оборудования, в том числе сохранять различные экраны, переключаться между рядом устройств или отображать несколько. Модуль визуализации обеспечивает широкий спектр функций, например, отслеживание разницы между показателями одной или несколькими устройствами.

ми либо сравнение с предыдущими или эталонными записями.

На рис. 2 представлен пример панели навигации, настроенный оператором технической системы. Она отражает те показатели, которые указал пользователь: количество ошибок, время в работе, текущая температура двигателя, полученная с установленного датчика температуры, и график изменения температуры двигателя в реальном времени.

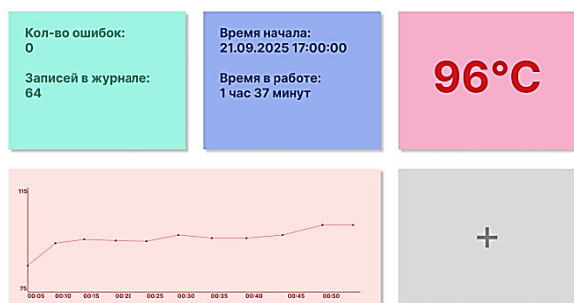


Рис. 2. Интерфейс с показателями, поступающих с контроллера

Адаптивность системы управления веб-приложениями достигается за счет ее универсальности применения и способности адаптации к изменяющимся условиям ее использования и окружения в целом. Возникновение новых показателей или добавление дополнительных не требует доработок системы управления, а корректируется автоматически или в ручном режиме администратором или оператором системы, без необходимости обращения к разработчикам или техническим специалистам. Система управления позволяет использовать и расширять область применения в различных целях без необходимости доработок разработчиками, и обходиться корректировками ее из интерфейса администраторами, в том числе процессов и алгоритмов работы [6].

Рассмотрим элементы конфигурирования адаптивной системы управления веб-приложениями.

Конфигурирование процессов

Кроме базовых функций и алгоритмов, предоставляемых адаптивной системой управления, рассмотрим свободное конфигурирование процессов [7].

Зададим в адаптивной системе управления сущность шага процесса или сценария

$$X_{step} = (x_f),$$

где x_f является определенной функцией шага, тогда

$$Y_{step} = (Y_{step,1}, Y_{step,2}, \dots, Y_{step,k})$$

являются шагами, каждый имеет свою функцию y_k и тогда

$$Y_{step,k} = (y_k).$$

Каждая функция может ссылаться на функцию другого шага. Важно определить начальный и конечные шаги процесса. Каждый шаг может содержать набор системных команд, обращений во внешние сервисы или интеграцию с искусственными нейронными сетями для генерации или распознавания информации различных видов. Структуры связей шагов могут быть различными, некоторые из них представлены на рис. 3.

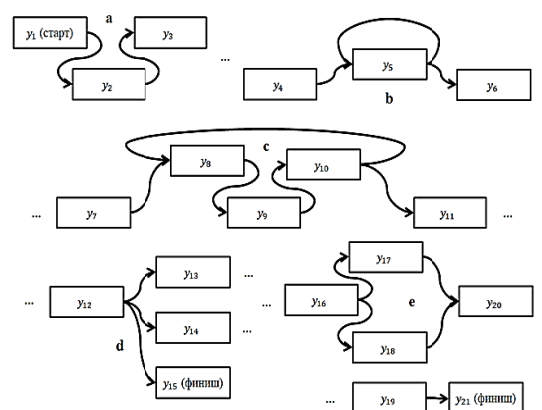


Рис. 3. Различные структуры связей процессов

Комбинирование различных структур позволяет реализовать алгоритмы любой сложности, а за счет интеграции с внешними сервисами расширяет спектр возможностей до максимально допустимых вычислительных ресурсов.

Например, интерфейс позволяет администратору сконфигурировать следующий сценарий:

1. Пусть точкой входа служит сигнал о подключении технического устройства к микроконтроллеру и отправкой запроса в адаптивную систему управления.

2. При срабатывании сигнала, по сценарию, начинается циклический опрос датчика температуры с интервалом в одну секунду.

3. Показатель с датчика записывается в журнал логирования температуры и отображается в реальном времени.

4. Модель нейронной сети обрабатывает весь список переданных показателей и сообщает о возможных ошибках.

5. Модель, отвечающая за управление с использованием методов принятия решений, формирует корректирующие значения для уровня напряжения.

6. Корректировки, переданные на микроконтроллер, сообщаются через ЭБУ техническому устройству.

7. При достижении критических температур, происходит остановка работы в безопасном режиме.

Адаптивная система управления позволяет интегрировать различные сервисы в конфигурацию сценариев, а также содержит ряд готовых решений и функций.

Программная реализация и функции

Адаптивная система управления имеет ряд предзаготовленных функций и возможностей, например, внести исходный код на языке программирования JavaScript [8], интегрировать сервис, указать функцию и т.д.

За счет грамотно построенной архитектуры адаптивной системы, дополнение новых функций не является сложной задачей. Рассмотрим ряд полезных настроенных функций.

Первая часть функций связана с провоцированием сигналов по достижению определенных событий:

- отсчет времени и таймеры, например, автоматическое отключение устройства через один час работы с целью избежания перегрева.
- лимиты, например, при достижении показателя до определенного значения,
- уведомления на панели управления, для своевременного доведения до оператора важных сообщений.

Вторая часть относится к аналитическим помощникам оператора:

- прогнозирование и рекомендации, например, при считывании значений показателей, возникают, распознанные системой ситуации и их комбинации, которые привели к губительным последствиям,
- расхождение с эталонными показателями и сохранение наилучших результатов работы в качестве эталонных,
- автоматический поиск и обработка системных ошибок системы.

Третья часть связана с расширением доступности систем:

- перевод и озвучивание элементов управления для операторов с отличающимся языком или имеющим сложности в восприятии информации,
- симуляция работы технических систем для обучения начинающих специалистов и использования в качестве тренажеров.

Так как система управления визуально представляет собой различные настраиваемые панели и интерфейс для взаимодействия с пользователем, то особое внимание уделяется модулю визуализации.

Модуль визуализации

Модуль визуализации включает ряд встроенных решений для детального отображения различных графиков, диаграмм, схем, в том числе визуализацию данных в трехмерном пространстве [9].

Визуализация данных поддерживает одновременное отображение множества массивов, а также любые формы их преобразования, например, с использованием формул и зависимостей. Например, на рис. 4 отображен график показателей отклонений относительно исходного положения с нескольких датчиков акселерометров.

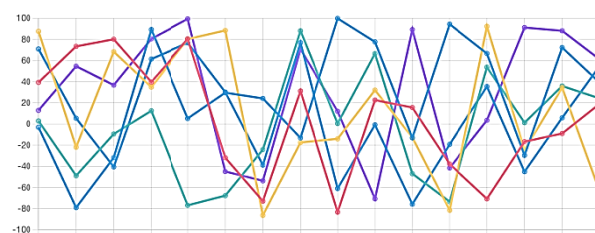


Рис. 4. График показателей датчиков отклонения

На рис. 5 отражена круговая диаграмма показателей, распределенных по группам для визуального анализа.

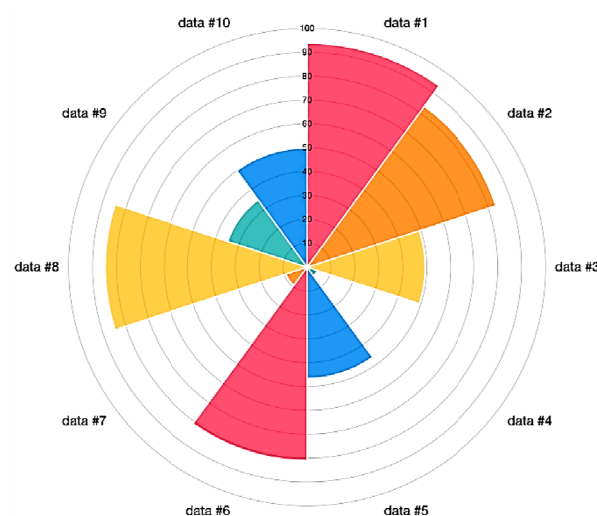


Рис. 5. Круговая диаграмма модуля визуализации

Графические методы визуализации предоставляют возможность изобразить на панели

управления показатели различных типов, в том числе зависимые или рассчитанные по определенным алгоритмам. Таким образом, анализ в динамике или по завершению процессов становится доступнее [10].

Заключение

Таким образом, в данной статье представлена адаптивная система управления веб-приложениями, позволяющая интегрировать ее в окружение технических систем. Рассмотрена модель контроллера и интеграции адаптивной системы управления веб-приложениями с техническими системами. Представлен динамично настраиваемый интерфейс. Описаны элементы конфигурирования процессов с демонстрацией примера возможного сценария. Продемонстрирована программная реализация и список подготовленных функций для активизации сигналов, помощи оператору и расширения доступности технических систем. Представлен модуль визуализации с различными способами изображения данных в виде графической информации.

Разработанная адаптивная система управления позволяет интегрировать ее в различные технические системы, предназначенные для промышленности и не только. Интеграция расширяет возможности мониторинга показателей оборудования, позволяет в автоматическом режиме корректировать ход работы, повышает качество и безопасность, а также снижает риск поломок и выхода из строя. Процесс настройки и конфигурирования доступен специалисту или оператору из интерфейса системы для ручной и автоматической настройки без необходимости внесения корректировок в работу адаптивной системы управления разработчиком.

Литература

1. Тимофеев С.В., Резников К.Г. Разработка веб-приложения для мониторинга и управления промышленным оборудованием // Математика, информационные технологии, приложения: сб. трудов Межвуз. науч. конф. молодых ученых и студентов. Воронеж: Издательско-полиграфический центр «Научная книга», 2024. С. 895-901.
2. Тиханович О.В. Пользовательские интерфейсы в автоматизированных системах: проблемы разработки // Программные системы и вычислительные методы. 2019. № 2. С. 11-22.
3. Гучук В.В. Проектирование человеко-машинных интерфейсов для систем испытания сложных научно-технических объектов // Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. 2014. № 12-1. С. 46-51.
4. Быкова А.В. Передача динамических показателей с цифровых датчиков через контроллер Arduino NANO на контроллер Arduino UNO // Инновационные научные исследования. 2021. № 6-3(8). С. 264-269.
5. Исмаилова И.М., Валеев С.С. Построение динамических адаптивных интерфейсов информационно-управляющих систем на основе методов искусственного интеллекта // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. 2018. Т. 22. № 2(80). С. 122-130.
6. Русов А.И., Машков В.Г. Динамические процессы в модели пользователя-специалиста в системах автоматизированного освоения сложных технических систем // Информатика: проблемы, методология, технологии: материалы XV междунар. науч.-метод. конф. Воронеж: Воронежский государственный университет, 2015. Т. 3. С. 138-141.
7. Резников К.Г., Подвальный С.Л. Разработка модуля веб-приложений для конфигурирования алгоритмов обработки данных в виде блок-схем // Оптимизация и моделирование в автоматизированных системах: труды Междунар. молод. науч. шк. Воронеж: Воронежский государственный технический университет, 2025. С. 74-77.
8. Современный учебник JavaScript. URL: <https://learn.javascript.ru/> (дата обращения: 26.09.2025)
9. Резников К.Г., Медведев С.Н. Разработка программного обеспечения для визуализации трехмерных поверхностей в веб-браузере // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2021. Т. 17. № 6. С. 13-19.
10. Кудрявцев М.А. Методика измерения сложности восприятия графического интерфейса пользователя // Современные инновации. 2017. № 4 (18). С. 10-12.

Поступила 15.09.2025; принята к публикации 10.11.2025

Информация об авторах

Резников Константин Георгиевич – аспирант кафедры автоматизированных и вычислительных систем, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: rkg@reznikovk.ru, тел.: +7 (951) 564-36-44

Подвальный Семен Леонидович – д-р техн. наук, профессор, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: spodvalny@yandex.ru, тел.: +7 (929) 011-21-53

USING OF AN ADAPTIVE WEB APPLICATION MANAGEMENT SYSTEM IN TECHNICAL SYSTEMS FOR INDUSTRIAL EQUIPMENT

K.G. Reznikov, S.L. Podvalny

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract: the article presents the integration of an adaptive web application control system with technical systems for industrial equipment. The presented system enables its integration into the environment of technical devices. A controller model and the integration of the adaptive web application control system with technical systems are considered. A dynamically configurable interface is presented. Process configuration elements are described, with an example of a possible processes demonstrated. A software implementation and a list of pre-configured functions for activating signals, assisting the operator, and expanding the availability of technical systems are demonstrated. A visualization module with various methods for displaying data as graphical information is presented. Integration expands the capabilities of monitoring equipment performance, automatically adjusting operation, improving quality and safety, and reducing the risk of breakdowns and failures. The setup and configuration process is accessible to a specialist or operator from the system interface for manual and automatic configuration, without the need for the developer to make adjustments to the adaptive control system

Key words: management systems, technical systems, industrial equipment, dynamic interface, software

References

1. Timofeenko S.V., Reznikov K.G. "Development of a web application for monitoring and controlling industrial equipment", *Applied Mathematics, Computational Science and Mechanics: Current Problems* ("Razrabotka veb-prilozheniya dlya monitoringa i upravleniya promyshlennym oborudovaniyem", *Aktualnyye problemy prikladnoy matematiki, informatiki i mekhaniki*), Voronezh, VSU, 24-25 April 2024, pp. 895-901.
2. Tikhanychev O.V. "User interfaces in automated systems: development issues", *Software Systems and Computational Methods* (*Programmye sistemy i vychislitel'nyye metody*), 2019, no. 2, pp. 11-22.
3. Guchuk V.V. "Design of human-machine interfaces for testing systems of complex scientific and technical objects", *Current Issues in Humanities and Construction Sciences* (*Aktual'nye problemy gumanitarnykh i estestvennykh nauk*), 2014, no. 12-1, pp. 46-51.
4. Bykova A.V. "Transferring dynamic readings from digital sensors via the Arduino NANO controller to the Arduino UNO controller", *Innovative Scientific Research* (*Innovatsionnye nauchnye issledovaniya*), 2021, no. 6-3(8), pp. 264-269.
5. Ismagilova I.M., Valeev S.S. "Construction of dynamic adaptive interfaces for information and control systems based on artificial intelligence methods", *Bulletin of Ufa State Aviation Technical University* (*Vestnik Ufimskogo gosudarstvennogo aviatsionnogo tekhnicheskogo universiteta*), 2018, vol. 22, no. 2(80), pp. 122-130.
6. Rusov A.I., Mashkov V.G. "Dynamic processes in the user-specialist model in automated systems for mastering complex technical systems", *Proc. of the XV Int. Sci. and Methodological Conf.: Computer Science: Problems, Methodology, Technologies*, Voronezh, VSTU, February 12-13, 2015, vol. 3, pp. 138-141.
7. Reznikov K.G., Podvalny S.L. "Development of a web application module for configuring data processing algorithms in the form of flowcharts", *Proc. of the Int. Youth Scientific School: Optimization and Modeling in Automated Systems*, Voronezh, VSTU, December 11-12, 2024, pp. 74-77.
8. Modern textbook about JavaScript, available at: <https://learn.javascript.ru/> (date of access: 26.09.2025)
9. Reznikov K.G., Medvedev S.N. "Development of software for visualization of three-dimensional surfaces in a web browser", *Bulletin of Voronezh State Technical University* (*Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*), 2021, vol. 17, no. 6, pp. 13-19.
10. Kudryavtsev M.A. "Methodology for measuring the complexity of perception of a graphical user interface", *Modern Innovations*, 2017, no. 4 (18), pp. 10-12.

Submitted 15.09.2025; revised 10.11.2025

Information about the authors

Konstantin G. Reznikov, graduate student, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: rkgr@reznikovk.ru, tel.: +7 (951) 564-36-44

Semyon L. Podvalny, Dr. Sc. (Technical), Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: spodvalny@yandex.ru, tel.: +7 (929) 011-21-53

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ УПРАВЛЕНИЯ ПОЛОЖЕНИЕМ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ОБЪЕКТОВ ИНФОРМАЦИОННО-ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ

И.А. Черноиваненко

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

Аннотация: планирование перемещений важно для бесперебойного выполнения задач функционирования автономных мобильных объектов (АМО), а также является предметом пристального внимания ученых со всего мира. АМО выбирает оптимальный или субоптимальный маршрут от начальной до конечной точки с целью удовлетворения заранее определенных целевых требований при одновременном обеспечении собственной мобильности и в условиях внешних помех. Несмотря на то, что многие исследования улучшили метод планирования траектории, его сходимость по-прежнему остается актуальной темой, поскольку сложность алгоритма высока, и легко попасть в локальные оптимумы. Предложен новый подход к решению этой задачи – алгоритм многокритериальной оптимизации на основе навигационных переменных (МОНП). Впервые маршрут планируется как задача многокритериальной оптимизации с использованием набора целевых функций, отражающих условия оптимальности и безопасности управления АМО. МОНП применяется для минимизации этих функций посредством поиска оптимальности по Парето. В алгоритме реализовано новое представление траекторий, основанное на навигационных переменных, позволяющее учитывать кинематические ограничения и динамические возможности АМО. Кроме того, используется адаптивный механизм трансформации для повышения разнообразия решений и получения более эффективных траекторий. Результаты моделирования показали, что метод МОНП имеет возможность формировать множество недоминируемых решений, что делает данный алгоритм универсальным инструментом, способным удовлетворять различные требования прикладных задач, и позволяет повысить вероятность успешного планирования

Ключевые слова: метаэвристические методы, планирование траектории, навигационные переменные, многокритериальная оптимизация, автономные мобильные объекты

Введение

Планирование траектории автономного мобильного объекта (АМО) – это поиск оптимальной траектории перемещения объекта от начальной до конечной точки при определенных ограничениях, которые могут соответствовать как маневренности, так и целям миссии [1]. Однако ряд целей и ограничений может вступать в противоречие, из-за чего отсутствует универсально оптимальный путь. Следовательно, методы планирования маршрутов должны обеспечивать компромисс между различными требованиями для достижения наилучших возможных решений.

В последние годы в задаче планирования маршрутов АМО начали активно применяться методы природной оптимизации, обладающие высокой способностью к нахождению эффективных решений [2]. Среди алгоритмов, вдохновлённых природными механизмами, оптимизация роя объектов (PSO) считается одним из наиболее эффективных подходов, способных находить оптимальные решения с высокой скоростью сходимости. Хотя такой метод прост в

реализации, он приводит к общей целевой функции, оптимизация которой не гарантирует достижения оптимума по каждой из составляющих целей. В таких случаях требуется иной подход – многокритериальная оптимизация.

В этой области были предложены различные методы для планирования маршрутов, основанные на многокритериальном подходе, включая многокритериальный алгоритм светлячков (MOFA), многокритериальный вариант PSO (MOPSO) и алгоритм недоминируемой сортировки второго поколения (NSGA-II). Преимущество таких методов заключается в получении множества решений, образующих фронт Парето – совокупность лучших компромиссных результатов. Тем не менее, современные многокритериальные алгоритмы, как правило, не учитывают кинематические ограничения АМО. Поскольку учёт этих ограничений критичен для построения реалистичных траекторий, их необходимо интегрировать в алгоритм.

В рамках данного исследования предлагается новый метод – алгоритм многокритериальной оптимизации на основе навигационных переменных (МОНП), предназначенный для генерации траекторий перемещения, соответствующих требованиям АМО и формирующих

оптимальные по Парето маршруты. В первую очередь определяется множество целевых функций и навигационных переменных, отражающих как требования к траектории, так и ограничения, налагаемые кинематикой объектов. Далее, для нахождения множества решений, наилучшим образом соответствующих заданным целевым функциям, применяется многокритериальный алгоритм МОНП. С целью повышения эффективности поиска и предотвращения преждевременной сходимости был добавлен механизм трансформации. Для проверки работоспособности предложенного метода было смоделировано два сценария с использованием реальных цифровых моделей рельефа, отличающихся по степени сложности.

Математическое обеспечение и накладываемые ограничения

Объект рассматривается как материальная точка, перемещающаяся в трёхмерном пространстве. Согласно работе [3], его движение описывается следующими кинематическими уравнениями:

$$\begin{cases} \dot{x} = V \cos \alpha \cos \beta \\ \dot{y} = V \cos \alpha \sin \beta, \\ \dot{z} = V \sin \alpha \end{cases} \quad (1)$$

где $[x, y, z]^T$ — координаты положения АМО;

V — линейная скорость;

α и β — углы подъема и поворота.

Из-за физических ограничений на движение АМО его скорость и углы перемещения ограничены следующими условиями:

$$\begin{cases} V_{\min} \leq V \leq V_{\max} \\ |\Delta \alpha| = |\theta| \leq \theta_{\max}, \\ |\Delta \beta| = |\psi| \leq \psi_{\max} \end{cases} \quad (2)$$

где V_{\min} и V_{\max} обозначают минимальную и максимальную линейные скорости;

θ_{\max} и ψ_{\max} — максимальные допустимые изменения углов поворота и подъема. Учет этих ограничений необходим для формирования реалистичных маршрутов, пригодных для фактического выполнения перемещения АМО.

Целевые функции для планирования перемещений

Траектория оценивается с помощью набора целевых функций, формализующих требования к её характеристикам. Функции разработаны на основе существующих исследований [4], однако были модифицированы и нормированы в диапазоне $[0, 1]$ для соответствия требованиям многокритериальной оптимизации.

Длина маршрута

В автономном режиме перемещения в объекте заранее загружается последовательность контрольных точек, через которые он должен пройти. Таким образом, траектория перемещения p_i может быть описана множеством n точек маршрута: $p_i = \{P_{i1}, \dots, P_{in}\}$, где каждая точка P_{ij} представлена координатами (x_{ij}, y_{ij}, z_{ij}) , как показано на рис. 1.

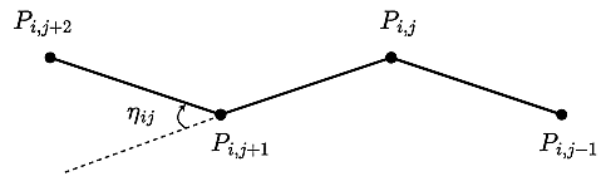


Рис. 1. Параметры траектории перемещения

Евклидово расстояние между двумя соседними точками обозначается как $\|P_{ij}P_{i,j+1}\|$. Затраты по длине пути определяются следующим выражением:

$$F_1 = \begin{cases} 1 - \frac{\|P_{i1}P_{in}\|}{\sum_{j=1}^{n-1} \|P_{ij}P_{i,j+1}\|}, & \|P_{ij}P_{i,j+1}\| \geq R_{\min} \\ \infty, & \text{иначе} \end{cases} \quad (3)$$

где R_{\min} — минимально допустимое расстояние между путевыми точками. Задача нахождения кратчайшего маршрута сводится к минимизации функции F_1 , заданной в (3).

Обход препятствий

Траектория должна быть построена таким образом, чтобы избегать столкновений с препятствиями. В данном случае каждое препятствие k представлено в виде цилиндра с центром C_k и радиусом R_k (рис. 2).

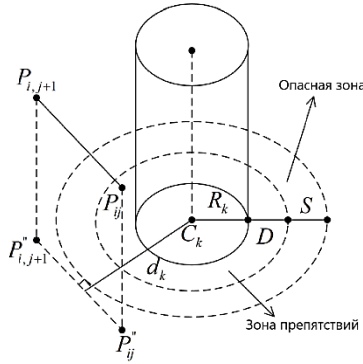


Рис. 2. Иллюстрация обхода препятствий

Расстояние от препятствия до отрезка пути между точками P_{ij} и $P_{i,j+1}$ обозначается как d_k . Пусть D – размер АМО, а S – необходимое безопасное расстояние. Целевая функция, отвечающая за предотвращение столкновений, формулируется следующим образом:

$$F_2 = \frac{1}{K(n-1)} \sum_{j=1}^{n-1} \sum_{k=1}^K T_k(\overrightarrow{P_{ij}P_{i,j+1}}), \quad (4)$$

где K – общее число препятствий в зоне перемещения, а T_k вычисляется по формуле

$$T_k(\overrightarrow{P_{ij}P_{i,j+1}}) = \begin{cases} 0, & \text{если } d_k \geq D + R_k + S \\ 1 - \frac{d_k - D - R_k}{S}, & D + R_k < d_k \\ \infty, & \text{иначе} \end{cases} \quad (5)$$

Из уравнения (5) следует: если участок маршрута находится вне опасной зоны (рис. 2), то он не влечёт дополнительных затрат. Если же путь пересекает опасную зону, стоимость обратно пропорциональна расстоянию до центра препятствия. При прямом столкновении к функции добавляется бесконечная стоимость, указывающая на недопустимость траектории.

Поддержание высоты

Для энергоэффективной работы предпочтительно, чтобы АМО двигался на стабильной высоте. Обозначим h_{\max} и h_{\min} – максимальную и минимальную допустимые высоты перемещения, а h_{ij} – текущую высоту в точке маршрута. Предпочтительная высота рассчитывается как $h_{\text{mean}} = (h_{\max} + h_{\min})/2$. Целевая функция, отражающая отклонения от желаемой высоты, задаётся следующим образом:

$$F_3 = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n H_{ij}, \quad (6)$$

где:

$$H_{ij} = \begin{cases} \frac{2|h_{ij} - h_{\text{mean}}|}{h_{\max} - h_{\min}}, & \text{если } h_{\min} \leq h_{ij} \leq h_{\max} \\ \infty, & \text{иначе} \end{cases} \quad (7)$$

Плавность перемещения

Еще одним важным критерием является минимизация резких изменений направления движения, так как они напрямую влияют на потребление энергии. Угол поворота n_{ij} определяется как угол между двумя последовательными векторами траектории $\overrightarrow{P_{ij}P_{i,j+1}}$ и $\overrightarrow{P_{i,j+1}P_{i,j+2}}$:

$$n_{ij} = \arctan\left(\frac{\|\overrightarrow{P_{ij}P_{i,j+1}} \times \overrightarrow{P_{i,j+1}P_{i,j+2}}\|}{\overrightarrow{P_{ij}P_{i,j+1}} \cdot \overrightarrow{P_{i,j+1}P_{i,j+2}}}\right). \quad (8)$$

Учитывая, что n_{ij} отражает степень отклонения направления движения, функция F_4 , отвечающая за плавность, вычисляется по формуле

$$F_4 = \frac{1}{n-2} \sum_{j=1}^{n-2} \frac{|n_{ij}|}{\pi}, \quad (9)$$

где π – максимальный угол поворота, применяемый для нормализации значения.

Подход к многокритериальной оптимизации

Учитывая целевые функции от F_1 до F_4 , идеальный маршрут должен минимизировать их одновременно. Однако в реальности не существует единственного решения, которое сводило бы к минимуму все функции одновременно, так как между ними могут возникать противоречия: улучшение одного критерия может повлечь ухудшение другого. Наиболее распространённый способ решения этой проблемы – объединение всех функций в одну обобщённую целевую функцию через взвешенную сумму [4].

Хотя этот подход прост в реализации, он требует точного подбора весов для каждой функции, что затрудняет достижение истинной оптимальности. В связи с этим в данных исследованиях предлагается использование методов многокритериальной оптимизации.

Эффективность Парето

Пусть X – маршрут, построенный для АМО. Задача планирования заключается в нахождении

такой траектории \hat{X} , которая одновременно минимизирует все целевые функции F_i .

$$\hat{X} = \arg \min[F_1, F_2, F_3, F_4]. \quad (10)$$

Согласно теории многокритериальной оптимизации, не всегда возможно найти единственное решение \hat{X} , минимизирующее все функции одновременно. Вместо этого ищется множество решений X^* , которые обеспечивают наилучший возможный компромисс между функциями. Такие решения называются оптимальными по Парето и определяются следующим образом:

Определение 1. Решение $X \in \mathcal{X} \subset R^4$ не является доминируемым, если не существует такого решения $X' \in \mathcal{X}$, что $F_i(X') \leq F_i(X)$ для $i = 1, \dots, 4$, но при этом существует хотя бы один j , для которого $F_j(X') < F_j(X)$.

Определение 2. Пусть F – допустимая область решений, следовательно, $X^* \in F \subset R^4$ будет являться оптимальным решением по Парето в том случае, если оно недоминируемо относительно других элементов из множества F .

Определение 3. Множество Парето-оптимальных решений P^* можно определить как совокупность всех решений $X^* \in F | X^*$, являющихся оптимальными по Парето.

Таким образом, Парето-оптимальное решение – это решение, при котором невозможно добиться улучшения одного критерия без ухудшения другого. По сравнению с оптимизацией только одного компонента, может существовать несколько оптимальных решений по Парето, которые в совокупности образуют фронт Парето. Среди подходов к построению таких решений можно выделить взвешивание, лексикографическую оптимизацию и целевое программирование. В настоящей работе выбран метод оптимизации роя PSO, благодаря его высокой эффективности и стабильности.

Многокритериальная оптимизация роя

Оптимизация роя объектов (PSO) представляет собой широко используемый метод, изначально предназначенный для задач с одной целевой функцией, реализуемый через механизмы роевого интеллекта. На начальном этапе инициализируется множество объектов, где каждый из них соответствует потенциальному решению. Далее рассчитывается функция стоимости, оценивающая пригодность каждого объекта. Объекты обновляют своё положение, ориентируясь на индивидуальный лучший резуль-

тат и на лучшее глобальное решение, пока не достигнута сходимость или заданное число итераций.

Пусть x_i^t и v_i^t – положение и скорость объекта i на итерации t . Обозначим $x_{pbest,i}^t$ как индивидуально лучшее положение объекта, а x_{gbest}^t – глобально лучшее положение роя. Тогда перемещение объекта описывается следующими уравнениями:

$$\begin{aligned} v_i^{t+1} &= wv_i^t + c_1r_1(x_{pbest,i}^t - x_i^t) \\ &\quad + c_2r_2(x_{gbest}^t - x_i^t), \\ x_i^{t+1} &= x_i^t + v_i^{t+1}. \end{aligned} \quad (11)$$

где w — инерционный вес;

c_1 и c_2 — коэффициенты когнитивной и социальной составляющих;

r_1 и r_2 — случайные значения из равномерного распределения на $[0, 1]$.

При решении многокритериальных задач с помощью PSO необходимо управлять распределением объектов таким образом, чтобы они могли находить недоминируемые решения. Для этого используется концепция лидеров – объектов, не доминируемых над другими. Объекты должны развиваться под их руководством, чтобы обеспечить разнообразие в пространстве решений. Один из популярных подходов заключается в создании хранилища недоминируемых решений, из которых затем выбираются лидеры.

Пусть P – множество решений из хранилища. Создаётся гиперсетка, в которую помещаются объекты на основе значений целевых функций (рис. 3).

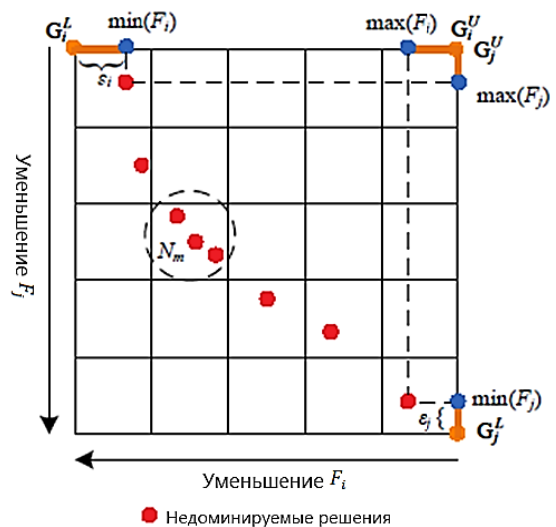


Рис. 3. Наглядное изображение гиперсетки и распределения недоминируемых решений

Нижняя и верхняя границы гиперсетки по измерению i задаются как:

$$G_i^L = \min_{x \in P} F_j(x) - \epsilon_i, \quad (12)$$

$$G_i^U = \max_{x \in P} F_i(x) + \epsilon_i, \quad (13)$$

где ϵ_i — размер ячейки, вычисляемый по числу делений M .

Обозначим $x_{lbest,i}^t$ — позицию выбранного лидера для объекта i . Тогда обновление положения объекта записывается так:

$$\begin{aligned} v_i^{t+1} &= wv_i^t + c_1 r_1 (x_{lbest,i}^t - x_i^t) \\ &\quad + c_2 r_2 (x_{lbest,i}^t - x_i^t), \\ x_i^{t+1} &= x_i^t + v_i^{t+1}. \end{aligned} \quad (14)$$

Основное отличие многокритериального PSO от классического заключается в замене глобального лучшего положения x_{gbest}^t на положение выбранного лидера $x_{lbest,i}^t$. Это позволяет объектам двигаться в различных направлениях, исследуя фронт Парето.

В данной работе также внесены два ключевых усовершенствования MOPSO — использование навигационных переменных и внедрение механизма адаптивной трансформации.

Навигационные переменные для представления положения объектов

При применении алгоритма PSO к задаче планирования траектории положение каждого объекта интерпретируется как потенциальное решение, соответствующее конкретной траектории перемещения. Для маршрута p_i , включающего n путевых точек $P_{ij} = [x_{ij}, y_{ij}, z_{ij}]^T$, положение объекта X_i , представляющее этот маршрут, можно выразить в виде:

$$X_i = (x_{i1}, y_{i1}, z_{i1}, x_{i2}, y_{i2}, z_{i2}, \dots, x_{in}, y_{in}, z_{in}). \quad (15)$$

Однако использование декартовых координат, как в (15), не позволяет учесть маневренные характеристики АМО. Это затрудняет получение недоминируемых решений и мешает соблюдению кинематических ограничений, предъявляемых к допустимым траекториям.

Согласно существующим подходам, применимым в робототехнике, в частности — методами, используемыми для управления манипуляторами, мы моделируем траекторию АМО

как цепь, состоящую из n сегментов. Каждый сегмент описывается набором параметров, аналогичных параметрам Денавита-Хартенберга [5], включая:

- угол подъема θ ;
- угол поворота ψ ;
- длину сегмента r .

Конечное положение каждого сегмента определяется путем последовательного применения матриц преобразования, соответствующих предыдущим сегментам траектории.

Для реализации этой идеи в каждой точке P_{ij} задается локальная система координат, связанная с ориентацией АМО (рис. 4):

- ось x направлена вперед по линии $P_{i,j-1}$ и P_{ij} ;
- ось y — влево относительно направления движения;
- ось z — вертикально вверх, перпендикулярно плоскости x и y .

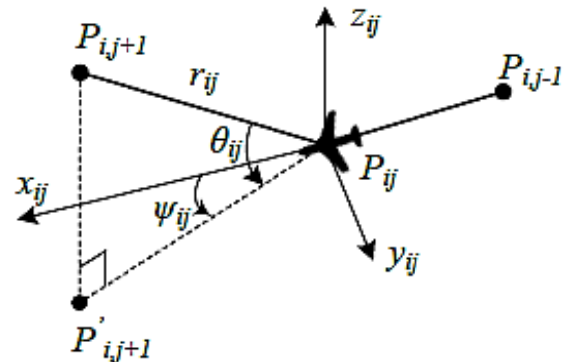


Рис. 4. Переменные для представления объектов

В этой системе используются три навигационные переменные:

- r_{ij} — расстояние между последовательными путевыми точками $\overrightarrow{P_{ij}P_{i,j+1}}$, $r_{ij} = \|\overrightarrow{P_{ij}P_{i,j+1}}\|$;
- ψ_{ij} — угол подъема между отрезками $\overrightarrow{P_{i,j-1}P_{ij}}$ и проекцией точки $\overrightarrow{P_{ij}P'_{i,j+1}}$ на плоскость $Ox_{ij}y_{ij}$;
- θ_{ij} — угол поворота между тем же отрезком и его проекцией.

Эти параметры (r, θ, ψ) называются навигационными переменными. Совокупность этих переменных для маршрута p_i формирует вектор Γ_i в навигационном пространстве:

$$\begin{cases} \Gamma_i = (r_{i1}, \theta_{i1}, \psi_{i1}, r_{i2}, \theta_{i2}, \psi_{i2}, \dots, r_{in}, \theta_{in}, \psi_{in}) \\ |\theta_{ij}| \leq \theta_{max} \text{ при } \forall j \in \{1, \dots, n\} \\ |\psi_{ij}| \leq \psi_{max} \text{ при } \forall j \in \{1, \dots, n\} \end{cases}, \quad (16)$$

В отличие от (15), представление траектории с использованием навигационных переменных позволяет учитывать маневренность АМО и направленно ограничивать пространство поиска [6]. Ограничения на углы θ и ψ , определённые в (2), могут быть включены напрямую через допустимые диапазоны этих переменных.

Для оценки пригодности объектов необходимо преобразовать навигационные параметры Γ_i обратно в декартовое представление X_i , что достигается с помощью последовательных матриц преобразования. Перемещение АМО от точки P_{ij} к $P_{i,j+1}$ включает три операции:

- поворот на угол ψ_{ij} вокруг оси z_{ij} ;
- поворот на угол θ_{ij} вокруг оси y_{ij} ;
- смещение на расстояние r_{ij} вдоль оси

x_{ij} .

Матрица преобразования между двумя путевыми точками определяется как:

$$T_{i,j+1}^j = R_z(\psi_{ij})R_y(\theta_{ij})M_x(r_{ij}), \quad (17)$$

где R_y и R_z – матрицы поворота вокруг осей y и z , а M_x – матрица смещения вдоль оси x .

Механизм адаптивной трансформации

В процессе поиска недоминируемых решений отдельные объекты роя могут застревать в локальных оптимумах, что снижает общую эффективность алгоритма. Особенно это актуально для MOPSO, где объекты распределяются по различным областям пространства решений. Для устранения этой проблемы в нашем подходе реализован механизм адаптивной трансформации, уровень которой зависит от плотности распределения объектов.

Для случайно выбранного объекта x_i на итерации t , трансформация выполняется по следующему правилу:

$$x_{ij}^t = x_{ij}^t + N_{ij}G^t x_{pbest,i}^t, \quad (18)$$

где j — случайно выбранный индекс компонент;

N_{ij} — случайная величина с нормальным распределением;

G — коэффициент усиления трансформации.

Чтобы адаптировать значение G к задаче многокритериальной оптимизации, его величина изменяется в зависимости от распределения недоминируемых решений во фронте Парето. Плотность этих решений оценивается через

количество занятых гиперкубов в гиперсетке. Пусть N_r^t — число таких гиперкубов на итерации t . Тогда усиление трансформации задается функцией:

$$G^t = \tanh\left(\frac{\Delta}{N_r^t}\right), \quad (19)$$

где Δ — предварительно заданная константа, определяемая как количество гиперкубов, занятых на момент инициализации роя.

Реализация и анализ эффективности

Для оценки эффективности предложенного алгоритма МОНП были проведены численные эксперименты.

Настройка сценария

Оценка производительности проводилась на основе реальных цифровых моделей рельефа, отличающихся по характеру местности. Для повышения сложности карта была дополнена искусственными препятствиями, в результате чего были сформированы два сценария с различным уровнем сложности.

Настройки параметров алгоритма МОНП во всех экспериментах сохранялись неизменными и задавались следующим образом:

- количество узлов в траектории: $n = 10$;
- инерционный вес: $w = 1$ с коэффициентом затухания 0,98;
- когнитивные и социальные коэффициенты: $c_1 = c_2 = 1.5$;
- деление гиперсетки: $M = 7$;
- коэффициент масштабирования: $\kappa = 2$;
- коэффициент трансформации: $\Delta = 5$;
- пределы углов поворота и подъема: $\theta_{max} = \psi_{max} = \pi/4$.

Результаты планирования траектории

На рис. 5-8 представлены траектории, построенные с использованием МОНП для двух сценариев. Второй сценарий отличается повышенным уровнем сложности рельефа.

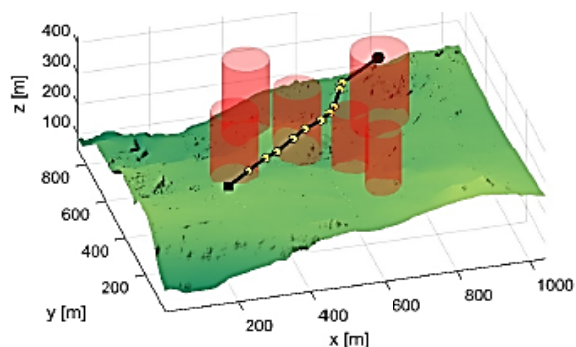


Рис. 5. Трёхмерный вид перемещений по алгоритму МОНП для сценария 1

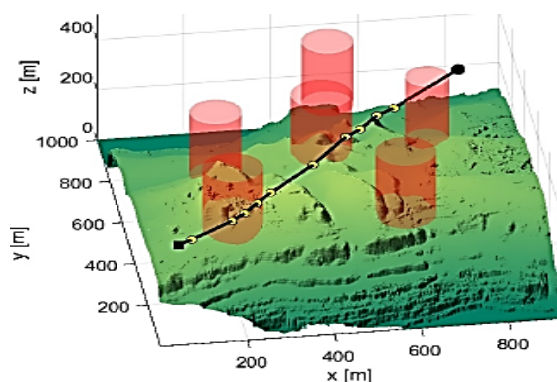


Рис. 6. Трёхмерный вид перемещений по алгоритму МОНП для сценария 2

По рисункам видно, что все полученные маршруты успешно достигают заданных целевых точек, не нарушая условий избегания препятствий.

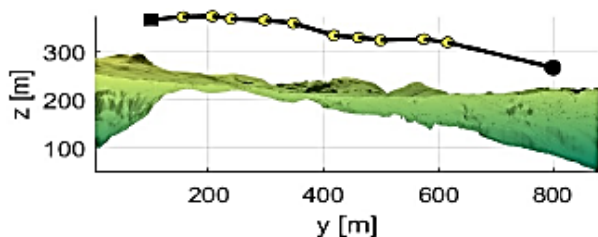


Рис. 7. Боковая проекция для сценария 1

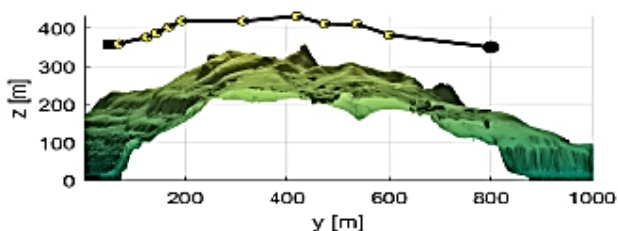


Рис. 8. Боковая проекция для сценария 2

Боковая проекция демонстрирует, что траектории адаптируются к рельефу местности, однако резкие изменения высоты сглаживаются

за счёт учёта кинематических ограничений и требований к плавности движения.

Показанные траектории являются лишь отдельными представителями множества решений, сформировавших фронт Парето. Каждое из них оптимально с точки зрения определённой целевой функции. Это означает, что предпочтительность конкретного маршрута может варьироваться в зависимости от конкретных требований приложения.

Полученные нормированные значения целевых функций для различных сценариев приведены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты значений целевых функций

Сценарий	Показатель	Результаты		
1	F_1	0,013	0,016	0,038
	F_2	0,026	0,025	0
	F_3	0,289	0,086	0,07
	F_4	0,036	0,036	0,06
2	F_1	0,213	0,052	0,144
	F_2	0,015	0,006	0
	F_3	0,088	0,16	0,086
	F_4	0,094	0,074	0,148

Предлагаемый алгоритм МОНП имеет возможность формировать множество недоминируемых решений, что делает данный метод универсальным инструментом.

Заключение

В данной работе предложен новый подход к планированию перемещений АМО – алгоритм МОНП, сочетающий принципы многокритериальной оптимизации с учётом кинематических ограничений.

Таким образом, МОНП демонстрирует высокую эффективность, масштабируемость и надёжность в задачах планирования траектории и может быть использован как основа для построения автономных систем управления перемещением АМО.

Литература

1. UAV path planning in mountain areas based on a hybrid parallel compact arithmetic optimization algorithm / R.B. Wang [et al.] // Neural Computing and Applications. 2023. P. 1-16.
2. Черноиваненко И.А., Кравец О.Я. Проблемы и особенности управления автономными мобильными объектами // Информационные технологии в экономике и управлении: сб. тр. VI Всеросс. НПК, Махачкала. 2024. С. 18-26.

3. A hybrid offline optimization method for reconfiguration of multi-UAV formations / B. Li [et al.] // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. 2021. Vol. 57. No. 2. Pp. 506-520.

4. Phung M.D., Ha Q. Safety-enhanced UAV path planning with spherical vector-based particle swarm optimization // Applied Soft Computing. 2021. Vol. 107. No. 2. 107376 p.

5. Corke P.I. A simple and systematic approach to assigning denavit–hartenberg parameters // IEEE Transactions on Robotics. 2007. Vol. 23. No. 3. P. 590-594.

6. Черноиваненко И.А. Математическое обеспечение и особенности управления несинхронизированным набором мобильных объектов // Информатика. Экономика. Управление. 2025. Т. 4. № 1. С. 1015-1021.

Поступила 23.06.2025; принята к публикации 08.09.2025

Информация об авторе

Черноиваненко Игорь Александрович – аспирант, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: chernoivanenko2000@mail.ru

MATHEMATICAL SUPPORT FOR CONTROLLING THE POSITION OF NON-STATIONARY OBJECTS OF INFORMATION AND TELECOMMUNICATION SYSTEM

I.A. Chernoiivanenko

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract: movement planning is important for the smooth performance of the tasks of autonomous mobile objects (AMO), and is also the subject of close attention by scientists from all over the world. The AMO chooses the optimal or suboptimal route from the start to the end point in order to meet pre-defined target requirements while ensuring its own mobility and in the face of external interference. Despite the fact that many studies have improved the trajectory planning method, its convergence is still an urgent topic, since the complexity of the algorithm is high and it is easy to get into local optimum. Within the framework of this work, a new approach to solving this problem is proposed – a multi-criteria optimization algorithm based on navigation variables (MCNV). For the first time, the route is planned as a multi-criteria optimization task using a set of objective functions reflecting the conditions of optimality and safety of AMO management. MCNV is used to minimize these functions by searching for Pareto optimality. The algorithm implements a new trajectory representation based on navigation variables, which allows taking into account the kinematic limitations and dynamic capabilities of the AMO. In addition, an adaptive transformation mechanism is used to increase the diversity of solutions and obtain more effective trajectories. The simulation results showed that the MCNV method has the ability to generate a variety of non-dominant solutions, which makes this algorithm a universal tool capable of meeting various requirements of applied tasks, and increases the likelihood of successful planning

Key words: metaheuristic methods, trajectory planning, navigation variables, multi-criteria optimization, autonomous mobile objects

References

1. Wang R.B., Wang W.F., Geng F.D., Pan J.S., Chu S.C., Xu L. “UAV path planning in mountain areas based on a hybrid parallel compact arithmetic optimization algorithm”, *Neural Computing and Applications*, 2023, pp. 1-16.
2. Chernoiivanenko I.A. “Problems and features of management of autonomous mobile objects”, *Proc. of the VI NPC «Information Technologies in Economics and Management» (Informatsionnye tekhnologii v ekonomike i upravlenii)*, Makhachkala, 2024, pp. 18-26.
3. Li B., Zhang J., Dai L., Teo K. L., Wang S. “A hybrid offline optimization method for reconfiguration of multi-UAV formations”, *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2021, vol. 57, no. 2, p. 506-520.
4. Phung M.D., Ha Q. “Safety-enhanced UAV path planning with spherical vector-based particle swarm optimization”, *Applied Soft Computing*, 2021, vol. 107, no. 2, pp. 107376.
5. Corke P.I. “A simple and systematic approach to assigning Denavit–Hartenberg parameters”, *IEEE Transactions on Robotics*, 2007, vol. 23, no. 3, p. 590-594.
6. Chernoiivanenko I.A. “Mathematical support and features of managing an unsynchronized set of mobile objects”, *Informatics. Economics. Management*, 2025, vol. 4, no. 1, p. 1015-1021.

Submitted 23.06.2025; revised 08.09.2025

Information about the author

Igor’ A. Chernoiivanenko, graduate student, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: chernoivanenko2000@mail.ru

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ЭВОЛЮЦИОННЫМИ АЛГОРИТМАМИ В ДИСКРЕТНЫХ ЗАДАЧАХ ОПТИМИЗАЦИИ

Д.А. Баранов, В.Ф. Барабанов

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

Аннотация: рассматривается разработка интеллектуальной системы управления эволюционными алгоритмами для решения дискретных комбинаторных задач оптимизации, включающих поиск перестановок, маршрутов и распределений ресурсов. В качестве базового метода интеллектуального анализа используется модифицированная версия k-ближайших соседей – «Анализ компонентов соседства», обеспечивающая обучение линейного преобразования пространства признаков и вычисление вероятностей «выбора соседей». Для обучения модели применялись нормализованные матрицы смежности с синтезированной выборкой, включающей около 250 тыс. образцов с 50 конфигурациями эволюционных алгоритмов (генетический, пчелиный, муравьиный и имитация отжига). Система состоит из двух моделей: «быстрой» для начальной сходимости и «качественной» для углубленного поиска. В ходе обучения показано, что точность выбора конфигураций достигает 90 % при монотонном снижении потерь, что подтверждает устойчивость и отсутствие переобучения. Интеллектуальный механизм мониторинга приспособленности позволяет автоматически переключаться между алгоритмами в соответствии с динамикой решения. Предложенная архитектура демонстрирует высокую адаптивность и масштабируемость, не требуя ручной перенастройки при изменении размерности задач и параметров. Полученные результаты открывают перспективы для внедрения в автономные системы управления ресурсами в логистике, производстве, телекоммуникации и др.

Ключевые слова: дискретная оптимизация, эволюционные алгоритмы, искусственный интеллект, машинное обучение, нейронные сети

Введение

Дискретные задачи оптимизации представляют собой обширный класс комбинаторных задач, в которых требуется найти наилучшее решение среди конечного множества вариантов. К ним относятся задачи маршрутизации (задача коммивояжёра), распределения (задача о назначениях, о рюкзаке), а также задачи раскраски графов, покрытия множеств и планирования. Такие задачи часто включают противоречивые цели — например, минимизацию расстояния и времени при ограничениях на ресурсы.

Эти задачи широко применяются в телекоммуникациях (оптимизация топологии сетей), производстве (распределение заказов и ресурсов), транспорте (планирование маршрутов, логистика), а также в биоинформатике и управлении потоками данных.

Высокую эффективность в решении таких задач показывают эволюционные алгоритмы за счет способности обрабатывать нелинейные функции и большие пространства поиска. Эти методы особенно ценны для дискретной оптимизации, поскольку они могут находить приближенные решения, близкие к оптимальным,

даже в условиях высокой вычислительной сложности и конфликтующих целей.

Однако выбор подходящего алгоритма и его конфигурации для конкретной задачи остаётся нетривиальной проблемой: производительность методов зависит от размерности пространства поиска, особенностей ограничений и текущего состояния решения. Интеллектуализация этого процесса — автоматизация выбора и переключения между алгоритмами на основе анализа динамики решения — является актуальным направлением развития вычислительных систем.

Представленная интеллектуальная система способна анализировать постановку задачи и динамику решения, адаптивно подстраивая стратегию оптимизации. Это особенно важно в условиях переменной размерности задач и необходимости быстрого получения качественных решений в режиме реального времени.

Таким образом, разработка интеллектуальной модели управления эволюционными алгоритмами в задачах дискретной оптимизации позволяет повысить производительность вычислений и открыть возможности для автоматизации сложных процессов в различных прикладных областях.

Описание объекта исследования

Пусть дана дискретная задача оптимизации на графе согласно уравнению (1)

$$G = (V, E), |V| = n, \quad (1)$$

где n – размерность задачи.

Каждой дуге $(i, j) \in E$ сопоставлены значения функции стоимости C_{ij} , определяющие «цену» перехода. Необходимо найти маршрут $\pi = (\pi_1, \dots, \pi_n)$ – перестановку вершин, при которой значение функции (2) минимизируется или максимизируется в зависимости от постановки задачи

$$F(\pi) = \sum_{i=1}^{n-1} C_{\pi_i \pi_{i+1}}. \quad (2)$$

Для автоматизации выбора стратегии решения вводится модель интеллектуального управления, которая:

— анализирует постановку задачи: преобразует данные в вектор признаков;

— прогнозирует оптимальную стратегию решения: $y = M(\pi), y \in \Psi$, где $\Psi = \{\psi_1, \psi_2, \dots, \psi_n\}$ – множество возможных конфигураций эволюционных алгоритмов, а M – обученная ИИ-модель;

— запускает решение задачи с выбранным методом;

— оценивает прогресс решения (например, при $\Delta F_k(\pi^{(t)}, \pi^{(t+1)}) < \epsilon$ нужна смена алгоритма);

— адаптивно переключает используемые алгоритм и конфигурации.

Целью интеллектуальной системы является поиск управляющего правила M , при котором сокращается общее время решения задачи, а общая приспособленность достигает максимально возможных значений.

Объектом исследования является интеллектуальная модель, которая анализирует постановку задачи и текущий прогресс решения. Модель динамически выбирает наиболее подходящий эволюционный алгоритм и его конфигурацию для текущего этапа оптимизации, стремясь максимизировать улучшение общей приспособленности решений.

Объект исследования охватывает как процесс решения дискретной задачи оптимизации, так и механизм интеллектуального управления, обеспечивающий адаптивность и эффективность в условиях переменной размерности и структуры задачи.

Описание исходных данных

Для решения поставленной дискретной задачи оптимизации было выделено около 50 конфигураций следующих эволюционных алгоритмов: генетический [2, 3], пчелиный, муравьиный [4] и имитации отжига [5]. Краткое описание параметров эволюционных алгоритмов и их значений приведено в табл. 1 ниже.

Таблица 1

Описание параметров эволюционных алгоритмов и их значения

Наименование алгоритма	Диапазоны параметров
Муравьиный	α : 0,5; 1,0 β : 0,5; 1,0 q : 10,0; 100,0; 1000,0 p : 0,01; 0,1, 0,5 Кол-во акторов: 20, 50, 100
Пчелиный	Доля пчел-рабочих: 0,3; 0,5; 0,7 Методы поиска: Реверс подмножества, Смена индексов Кол-во акторов 20, 50, 100
Генетический	Шанс мутации: 0,01; 0,05 Метод мутации: Смена индексов, Реверс подмножества Метод отбора: Турнирный, Рулетка, Лучшие N Кол-во акторов 100; 200
Имитации отжига	Начальная температура: 500, 1000 Конечная температура: 1 Коэффициент охлаждения: 0,8; 0,95; 0,99 Метод мутации: Смена индексов, Реверс подмножества

В качестве признаков у обучающей выборки представлены нормализованные методом MinMax матрицы смежности. Каждому

образцу соответствует метка, представляющая собой идентификационный номер конфигурации эволюционного алгоритма.

Набор данных был получен на основе вычислительного эксперимента, описанного в источнике [1]. Данные сгруппированы по постановкам задачи, выбраны те решения (и их алгоритмы), которые показали абсолютную наибольшую эффективность. В целях увеличения объема обучающей выборки набор данных был синтезирован при помощи метода SMOTE [6, 7]. В конечном итоге, для обучения представлено 245 тыс. образцов.

Методы исследования

Для обучения интеллектуальной модели выбора алгоритма использовался метод «Анализ компонент соседства» (далее – АКС). Данный метод является модификацией метода «k-ближайших соседей». Из основных особенностей данной модификации можно выделить следующие:

— вместо использования фиксированного расстояния (например, евклидова), АКС обучает линейное отображение пространства признаков, что позволяет более эффективно различать классы;

— обучает и сохраняет значения весов, что позволяет интегрировать модель в другие системы.

Пусть существует обучающая выборка $\{(x_i, y_i)\}_{i=1}^n$, где $x \in \mathbb{R}^d$ – входной вектор признаков, $y_i \in \{1, 2, \dots, 50\}$ – метка класса. Тогда, для установления степени «близости» между постановками, вычисляется расстояние между примерами в преобразованном пространстве согласно формуле (3)

$d_A(x_i, x_j) = \|Ax_i - Ax_j\|^2$, где $A \in \mathbb{R}^{d' \times d}$, (3)
где A – матрица линейного преобразования.

В отличие от классического «k-ближайших соседей», где выбирается k ближайших, АКС использует статистическую вероятность того, что объект i «выберет» j в качестве «соседа». Вероятность вычисляется в соответствии с формулой (4).

$$p_{ij} = \begin{cases} \frac{e^{-\|Ax_i - Ax_j\|^2}}{\sum_{k \neq i} e^{-\|Ax_i - Ax_k\|^2}}, & \text{если } i \neq j. \\ 0, & \text{если } i = j \end{cases} \quad (4)$$

Таким образом, для каждого объекта i определяются вероятности p_{ij} , с которыми он «голосует» за другие точки j .

Целью АКС является максимизация вероятности правильной классификации. Для вычисления величины потерь вероятности p_{ij} суммируются как показано в формуле (5)

$$L = \sum_i \sum_{j: y_j \neq y_i} p_{ij}. \quad (5)$$

Данная функция дифференцируема по параметрам A , поэтому обучение проводится градиентным методом.

Для обучения модели использовалась реализация АКС из библиотеки Scikit-learn с рядом параметров, подобранных в ходе эмпирических экспериментов. Первым из таких параметров было количество итераций в размере 1000, что позволило избежать преждевременной остановки в «застойных» периодах обучения. В качестве инициализации матрицы преобразования использовался метод главных компонент, что обеспечило эффективное начало процесса обучения. В качестве порога точности была выбрана величина 10^{-5} .

Для минимизации потерь использовался метод L-BFGS [8]. Выбор в пользу данного метода обусловлен стабильностью и скоростью сходимости на имеющемся объеме данных. В ряде экспериментов использовался стохастический градиентный спуск (скорость обучения 0,01), однако результаты оказались менее стабильными.

Размерность признакового пространства после линейного преобразования была ограничена значением 50. Это компромисс между сохранением достаточной информации о данных и снижением вычислительной нагрузки.

Результаты обучения

В целях повышения эффективности решения дискретной задачи было обучено две модели, первая из которых отвечает за выбор «качественного» алгоритма, а вторая – «быстрого».

На рис. 1 показана динамика точности и потерь в процессе обучения моделей. По оси X отложен номер итерационного шага, по осям Y – точность (шкала слева) и величина потерь (шкала справа). Динамика потерь на графике обозначена пунктирной линией.

На начальных этапах обучения (до 100 итерации) наблюдается стремительный рост точности до 75 %, сопровождаемый резким снижением потерь с 2,9 до 1,1. Это указывает на быструю адаптацию матрицы преобразования к структуре обучающих данных. Далее процесс обучения обретает более «плавный» вид и достигает значения около 89 %, а потери снижаются к уровню 0,5 и ниже. Таким образом, в результате обучения модели удалось

достигнуть монотонной сходимости без переобучения. Это подтверждает, что выбранные

гиперпараметры являются оптимальными для текущего объема и структуры данных.

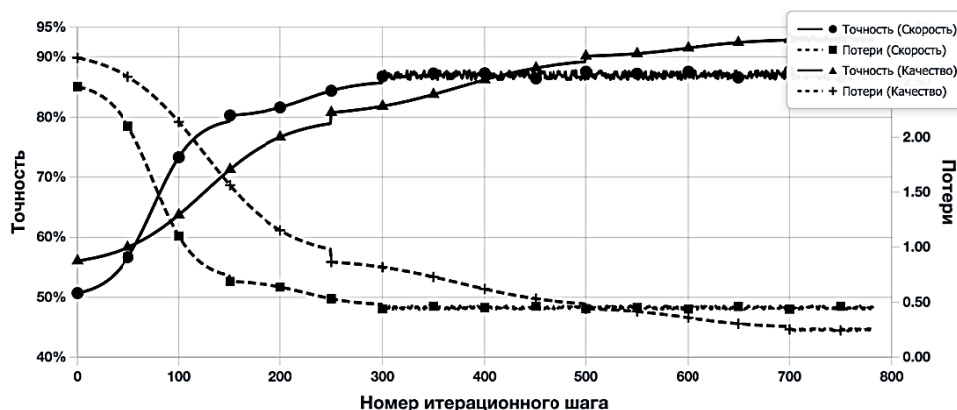


Рис. 1. График точности и потерь в процессе обучения по итерациям

Принцип интеллектуального выбора алгоритмов

На рис. 2 приведена схема интеллектуального решения дискретной задачи оптимизации.

В начале процесса, помимо общих процессов инициализации, с использованием «быстрой» интеллектуальной модели производится выбор алгоритма для достижения ранней сходимости.

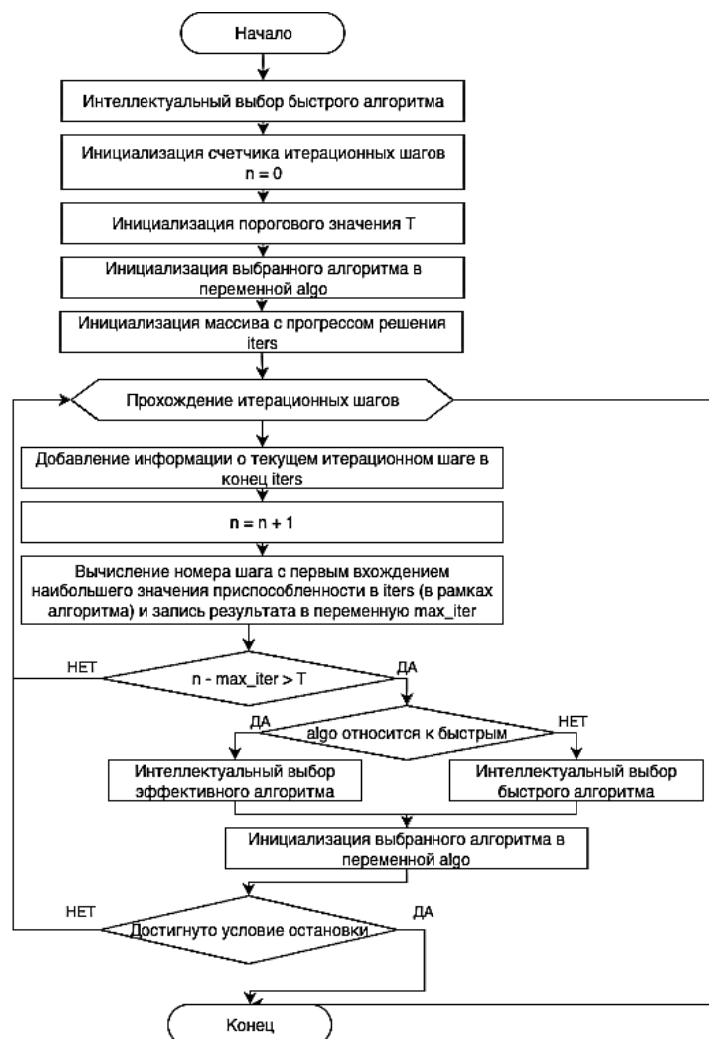


Рис. 2. Схема интеллектуального решения дискретной задачи оптимизации

В теле основного цикла проводится анализ процесса решения следующим образом: система фиксирует номер итерационного шага, при котором было достигнуто максимальное значение приспособленности, если разница между текущим номером шага и шага с максимальной приспособленностью превышает пороговое, система, используя заранее обученные «быструю» и «качественную» интеллектуальные модели, избирает для последующей работы иную конфигурацию эволюционного алгоритма. Данный процесс продолжается до достижения одного из критериев остановки:

— достижение предельной численности итерационных шагов;

— отсутствие улучшения приспособленности на протяжении значительно большего количества шагов.

Заключение

В результате проведенного исследования разработана интеллектуальная система управления эволюционными алгоритмами для дискретных задач оптимизации. Подход на основе метода «Анализ компонентов соседства» продемонстрировал высокую точность выбора конфигураций эволюционных алгоритмов (до 90 %) без признаков переобучения. Это позволило существенно сократить число итераций, необходимых для достижения эффективных решений и повысить общую приспособленность популяции в динамике оптимизации.

Разделение выбора на «быстрые» и «качественные» обеспечивает как оперативную стартовую сходимост, так и стабильное улучшение решений. Механизм мониторинга динамики решения позволяет системе своевременно переключаться между алгоритмами, что гарантирует высокую устойчивость при изменении сложных целевых функций.

Данная система не привязана к конкретному типу дискретной задачи и легко может быть интегрирована в множество существующих процессов (например, логистика, коммутация, оптимизация состояний, планирование и т.д.).

Дальнейшие исследования могут быть сосредоточены на расширении набора рассматриваемых методов, адаптации к новым классам задач и исследовании влияния факторов неопределенности на качество прогноза выбора алгоритмов.

Литература

1. Баранов Д.А. Сравнительный анализ методов эволюционного проектирования в программном обеспечении для решения многокритериальных задач оптимизации. Моделирование, оптимизация и информационные технологии. 2025;13(2). URL: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=1854> (дата обращения: 16.07.25)
2. Вирсански Э. Генетические алгоритмы на Python; пер. с англ. А.А. Слинкина. М. ДМК Пресс, 2020. 288 с.
3. Саймон Д. Алгоритмы эволюционной оптимизации; пер. с англ. А.В. Логунова // ДМК Пресс, 2020. 1002 с.
4. Белых М.А., Баранов Д.А. Решение задачи коммивояжера вариативным муравьиным алгоритмом // Информационные технологии моделирования и управления. 2024. Т. 136. № 2. С. 116-119.
5. Баранов Д.А. Модификация алгоритма имитации отжига для решения многокритериальной транспортной задачи // Цифровые системы и модели: теория и практика проектирования, разработки и использования: материалы междунар. науч.-практ. конф. Казань: Казанский государственный энергетический университет, 2025. С. 757-761.
6. SMOTE: Synthetic Minorify Over-sampling Technique / N.V. Chawla [et al.] // Journal of Artificial Intelligence Research. 2002. № 16. pp. 321-357.
7. SMOTE in Python: A guide to balanced datasets - Train in Data's Blog. URL: <https://www.blog.trainindata.com/smote-in-python-a-guide-to-balanced-datasets/> (дата обращения: 10.07.2025)
8. Метод BFGS или один из самых эффективных методов оптимизации. Пример реализации на Python / Хабр. URL: <https://habr.com/ru/articles/333356/> (дата обращения: 30.07.2025).

Поступила 03.08.2025; принята к публикации 20.10.2025

Информация об авторах

Баранов Дмитрий Алексеевич – аспирант, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: oblivvion333@gmail.com

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

INTELLIGENT CONTROL SYSTEM FOR EVOLUTIONARY ALGORITHMS IN MULTI-CRITERIA OPTIMIZATION PROBLEMS

D.A. Baranov, V.F. Barabanov

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract: this paper presents the development of an intelligent control system for evolutionary algorithms to solve multi criteria optimization problems. The core analytical method is a modified k nearest neighbors algorithm—"Analysis of Neighborhood Components"—which learns a linear transformation of the feature space and computes neighbor selection probabilities. The model was trained on normalized adjacency matrices with a synthesized dataset comprising approximately 250,000 samples and 50 evolutionary algorithm configurations (genetic, bee, ant colony, and simulated annealing). The system employs two models: a "fast" model for initial convergence and a "quality" model for deeper search. Training results show that configuration selection accuracy reaches 90 % with a monotonic decrease in loss, confirming stability and absence of overfitting. An intelligent fitness monitoring mechanism enables automatic switching between algorithms according to solution dynamics. The proposed architecture demonstrates high adaptability and scalability, requiring no manual retuning when problem dimensionality or number of criteria changes. These results pave the way for integration into autonomous resource management systems in logistics, manufacturing, telecommunications, and other domains

Key words: multi criteria optimization, evolutionary algorithms, artificial intelligence, machine learning, neural networks

References

1. Baranov D.A. "Methods for comparative analysis of evolutionary design methods in software for solving multicriteria optimization problems", *Modeling, Optimization and Information Technology*, 2025 no. 13(2), available at: <https://moitvivi.ru/ru/journal/pdf?id=1854> DOI: 10.26102/2310-6018/2025.49.2.008
2. Wirsansky E. "Hands-On Genetic Algorithms with Python", Packt publishing, 2020, 334 p.
3. Saimon D. "Evolutionary Optimization Algorithms", Wiley, 2013, 784 p.
4. Belykh M.A., Baranov D.A. "Solving the travelling salesman problem with a variable ant algorithm", *Information Technology Modeling and Control*, 2024, pp. 116-119.
5. Baranov D.A. "Modification of the simulated annealing algorithm for solving a multi-criteria transport optimization problem", *Digital Systems and Models: Theory and Practice of Design, Development and Usage*, 2025, pp. 757-761.
6. Chawla N.V., Bowyer K.W., Hall L.O. et al. "SMOTE: Synthetic Minority Over-sampling Technique", *Journal of Artificial Intelligence Research*, 2002, no. 16, pp. 321-357.
7. SMOTE in Python: A guide to balanced datasets - Train in Data's Blog, available at: <https://www.blog.trainindata.com/sMOTE-in-python-a-guide-to-balanced-datasets/> (date of access: 10.07.2025).
8. BFGS Method or One of the Most Effective Optimization Methods. Example of Implementation in Python / Habr, available at: <https://habr.com/ru/articles/333356/> (date of access: 30.07.2025).

Submitted 03.08.2025; revised 20.10.2025

Information about the authors

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

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

КОМПЛЕКСНЫЙ МЕТОД ОЦЕНКИ ВОЗДЕЙСТВИЯ КУМУЛЯТИВНОГО ЗАРЯДА НА СТЕНКИ СКВАЖИНЫ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ УДАРНОЙ ВОЛНЫ ПРИ ПОМОЩИ ВЕКТОРА УМОВА

Н.Н. Федоров¹, Е.А. Пафилов², Н.А. Архипова³

¹АО «Научно-производственное объединение дальней радиолокации им. академика А.Л. Минца», г. Москва, Россия

²Филиал Военной академии материально-технического обеспечения, г. Пенза, Россия

³МИРЭА - Российский технологический университет, г. Москва, Россия

Аннотация: в последние десятилетия как в России, так и за рубежом активно развиваются отрасли промышленности, связанные с проектированием, производством и эксплуатацией техники, работающей в условиях ударного нагружения. Такими отраслями, в первую очередь, являются оборонная и горнодобывающая отрасли промышленности. Применение кумулятивных зарядов в горном деле востребовано в таких технических процессах, как проведение контурного взрывания при ведении буровзрывных работ. Вместе с тем оценка воздействия указанных кумулятивных зарядов на окружающий массив горных пород требует проведения предварительного моделирования распределения энергии взрыва и давления на стенки скважин или шпуров. В связи с этим представлен оригинальный метод оценки воздействия кумулятивного заряда на стенки скважины или поверхности массива горных пород, основанный на понятии вектора плотности потока энергии или вектора Умова. Приводится теоретическое обоснование данного метода, описание алгоритма его реализации, а также приводятся результаты работы написанных программ ЭВМ: построения профилей оболочки кумулятивной полости при схлопывании, а также построения диаграмм направленности давления и плотности потока энергии на стенках скважины по указанному методу. Приведенные материалы представляют ценность для специалистов горнодобывающей и оборонной отраслей промышленности

Ключевые слова: закон сохранения энергии, плотность потока энергии, вектор Умова, кумулятивный эффект, кумулятивный заряд, диаграмма направленности

Благодарности: коллектив авторов выражает благодарность Тимошенко Александру Васильевичу за поддержку и конструктивное обсуждение данной работы

Введение

В последние десятилетия у нас в стране и за рубежом активно развиваются отрасли промышленности, связанные с проектированием, производством и эксплуатацией техники, работающей в условиях ударного нагружения. Такими отраслями, в первую очередь, являются оборонная и горнодобывающая отрасли промышленности.

Данное обстоятельство объясняется тем, что именно в этих отраслях функционирование техники, а также отдельных устройств носит взрывной, ударный характер.

Так, например, в оборонной отрасли промышленности большинство устройств, предназначенных для борьбы с бронезащищенными целями, имеют ударный принцип действия. К таким устройствам, в частности, относятся кумулятивные заряды (КЗ) и заряды с полусферическими облицовками, авиационные и глубинные бомбы, торпеды, фугасы, гранаты и т.д.

В горнодобывающей промышленности устройства с ударным принципом действия применяются в основном для технологического

разрушения горных пород, а также при формировании геометрии горных выработок.

При дальнейшей разработке месторождений крутопадающих залежей, таких как алмазоносные кимберлитовые трубки на юге Якутии, открытым способом всё актуальнее становится проблема сохранения устойчивости уступов и как следствие бортов карьера в течение всего срока существования карьера. Одним из основных и самых эффективных средств снижения сейсмического воздействия на законтурный массив горных пород является проведение контурного взрывания [1]. В этом случае сейсмический экран образуется в результате взрыва зарядов контурных шпуров (скважин), набуренных с определенным шагом, после взрыва которых образуется так называемая щель предварительного откола, чаще всего заполненная раздробленным материалом [2].

При этом существует актуальная задача разработки способов снижения сейсмического воздействия на законтурный массив горных пород при проведении самого контурного взрывания. Одним из возможных способов видится применение зарядов с кумулятивным эффектом для перераспределения энергии взрыва с аккумуляцией её по определённым направле-

ниям плоскости отрыва (щели предварительно-го откола).

Постоянно растущие требования к характеристикам зарядов приводят к необходимости проведения большого количества различного рода исследований, направленных на обеспечение надежного и эффективного функционирования этих изделий.

Значительные средства в ходе выполнения такого рода исследований затрачиваются на проведение натурных испытаний. Проблема сокращения объемов испытаний весьма актуальна и важна. Её решение возможно, во-первых, путём строгого научного обоснования объёма и норм по каждому виду испытаний без ущерба для качества и без увеличения риска для потребителя; во-вторых, путём внедрения методов математического моделирования процессов, протекающих при функционировании изделий (устройств).

Методы математического моделирования основных физических процессов функционирования устройств, работающих в условиях ударного нагружения, наряду с оценкой эффективности их действия в настоящее время получили широкое развитие на предприятиях, занятых проектированием и производством такого рода изделий. Такое широкое распространение методов математического моделирования связано не только с относительно небольшими материальными затратами, но и, главным образом, с возможностью получения параметров, недоступных для регистрации при проведении натурных испытаний. Также следует заметить, что применение методов математического моделирования в сочетании с современными средствами вычислительной техники позволяют не только решать широкий круг задач по улучшению характеристик существующих устройств, но и корректно прогнозировать параметры вновь разрабатываемых изделий, а, следовательно, экономить значительные средства на начальном этапе проектирования [3].

Вместе с тем, существующие в настоящее время методы математического моделирования не позволяют в полной мере определять параметры функционирования устройств, работающих в условиях ударного нагружения. Это объясняется тем, что большинство методов ориентированы на решение узкого круга прикладных задач, связанных с ударным нагружением, и реализованы в виде законченных программно-вычислительных комплексов. Как следствие, их обобщение на другие задачи данного направления крайне затруднительно. Также следует отметить, что большинство пакетов программ произведено за рубежом и не ориентированы на

отечественного производителя, а некоторые запрещены к продаже в Российской Федерации.

Учитывая все вышеперечисленное, представляется актуальным:

- развитие существующих математических методов, описывающих высокоскоростное деформирование и разрушение материала;

- создание на основе этих моделей алгоритмов, методик и пакетов программ, ориентированных на отечественного производителя;

- последующие исследования в области анализа существующих и разработки новых, более эффективных устройств, работающих в условиях ударного нагружения.

В данной работе при расчёте воздействия кумулятивного заряда на поверхность скважины (границу породы/скважина) и построения диаграммы направленности или распределения давления и плотности энергии был предложен и применён метод, основанный на понятии вектора плотности потока энергии или вектора Умова.

Теоретические основы метода

Существует два основных подхода к расчёту функционирования кумулятивных зарядов.

Первый подход, получивший название «инженерный расчет» (инженерный метод), основан на аналитических зависимостях, полученных из законов сохранения массы, импульса и энергии, а также ряде приближенных соотношений, аппроксимирующих экспериментальные данные. В частности, первые зависимости для определения параметров функционирования КЗ были получены из гидродинамической теории кумуляции, созданной М.А. Лаврентьевым.

При этом по мере развития представлений о процессе функционирования КЗ инженерные методы постоянно совершенствуются [4]. Этому подходу посвящено значительное количество работ [5].

Второй подход расчета заключается в численном интегрировании системы дифференциальных уравнений, описывающей формирование высокоскоростных ударников и их взаимодействие с преградами (численный метод). Данный подход обычно основан на совместном решении нескольких взаимосвязанных систем уравнений, описывающих напряженно – деформированное состояние элементов конструкций зарядов (взрывчатое вещество, облицовка, корпус и т.д.). Развитие вычислительной техники обеспечило значительный прогресс в использовании данных методов, сделав их одним из эффективных средств исследования задач механики сплошной среды и задач кумуляции,

в частности. В настоящее время, как у нас в стране, так и за рубежом, разработано достаточное количество численных методов решения задач кумуляции.

В работах С.И. Петкова [6, 7] предложен оригинальный упрощающий подход к определению вышеуказанных характеристик. Он основан на предположении о том, что изменение скорости схлопывания элемента кумулятивной облицовки определяется хронологией заполнения поперечного сечения кумулятивного узла продуктами детонации.

Данный подход позволил реализовать на практике заветную мечту конструкторов КБ – построить машинно-ориентированный алгоритм и соответствующее программное обеспечение для решения обратной задачи, правда, методом перебора вариантов (аналитическое решение обратной задачи удалось получить только в рамках гипотез о плоскостности фронта детонационной волны и постоянстве скорости обжатия).

В данной работе предлагается оригинальный метод определения начального давления на поверхность скважины (границу породы/скважина) и построения диаграммы направленности или распределения начального давления и плотности энергии на массив пород вокруг скважины от азимутального угла для заряда с кумулятивной выемкой, схожий с методом С.И. Петкова [6].

Предлагаемый метод основывается на принятой авторами модели, согласно которой при схлопывании кумулятивной оболочки по закону сохранения энергии (ЗСЭ) потоки энергии ударной волны, первоначально выделившейся при инициировании заряда, проходящие в каждый момент через поверхности схлопывания кумулятивной оболочки, равны.

Суть разработанного метода заключается в том, что в принятой модели можно перейти к понятию плотности потока энергии, характеризующийся вектором Умова \vec{J}_i (в i -й момент времени), направленным по направлению переноса энергии, то есть по нормали к поверхности кумулятивной выемки или по направлению схлопывания кумулятивной оболочки, в каждой точке поверхности схлопывания, что математически можно записать как $\vec{J}_i \uparrow \vec{S}_i \uparrow \vec{\nu}_i$, и по величине равный потоку энергии взрыва через поверхность единичной площади [8], то есть скалярному отношению потока энергии через указанную поверхность к площади этой поверхности.

Тогда по вышенаписанному, если в условиях данной постановки пренебречь рассеиванием энергии, а также переходом энергии в те-

пловую форму, из закона сохранения энергии следует то, что поток энергии через поверхности схлопывания кумулятивной оболочки (поверхности) есть величина постоянная и равная начальному потоку энергии ударной волны при инициировании заряда.

Математически это можно записать согласно формуле (1):

$$\Phi = \int \vec{J}_0 \cdot d\vec{S}_0 = \int \vec{J}_i \cdot d\vec{S}_i = const; \quad (1)$$

или, если принять во внимание то, что в нашей постановке модели $\vec{J}_i \uparrow \vec{S}_i$, то поэтому в скалярной форме выражение (1) можно записать согласно формуле (2):

$$\Phi = \int J_0 \cdot dS_0 = \int J_i \cdot dS_i = const. \quad (2)$$

Учитывая, что по условию модели плотность потока энергии для каждой поверхности схлопывания одинаково в каждой точке, то указанное условие можно переписать по формуле (3):

$$\Phi = \int J_0 \cdot dS_0 = J_0 \cdot \int dS_0 = J_i \cdot \int dS_i = const. \quad (3)$$

А если также принять во внимание, что $\int dS_i = S_i$, то условие переписывается в виде формулы (4):

$$\Phi = J_0 \cdot S_0 = J_i \cdot S_i = const. \quad (4)$$

Тогда плотность потока энергии в каждой точке каждой промежуточной поверхности схлопывания кумулятивной оболочки, через которую проходит ударная волна взрыва, можно определить по формуле (5):

$$J_i = J_0 \cdot \frac{S_0}{S_i}, \quad (5)$$

где J_0 – плотность потока энергии при инициировании заряда,

S_0 – изначальная площадь поверхности кумулятивной выемки,

S_i – площадь поверхности схлопывания, через которую проходит ударная волна в i -й момент времени.

Если давление на каждой i -ой поверхности схлопывания пропорционально квадратному корню плотности потока энергии цилиндрической волны $P_i \sim \sqrt{J_i}$, так как давление на фронте волны пропорционально плотности импульса, а указанный импульс пропорционален квадратному корню плотности потока энергии, то его это давление можно определить идентично плотности потока энергии по формуле (6):

$$P_i = P_0 \cdot \sqrt{\frac{S_0}{S_i}}, \quad (6)$$

где P_0 – начальное давление при инициировании.

Таким образом, в отличие от традиционного метода, основанного на гидродинамической теории кумуляции, предложенный в работе метод, который основан на понятии вектора плотности потока энергии (или вектора Умова), нагляден и вычислительно проще, потому что не требует решения системы дифференциальных уравнений. При этом данный метод обладает достаточной точностью для решения задач, связанных с расчётом эффективности перераспределения (кумуляции) энергии контурного заряда в массиве горных пород, что делает его применение востребованным в горной отрасли.

Описание работы алгоритма

В общем случае работа алгоритма при расчёте воздействия кумулятивного заряда по указанному методу сводится к нескольким шагам:

1. Начальное состояние определяется начальной энергией E_0 и начальным давлением P_0 взрыва, принятыми равными/одинаковыми для всей границы заряд/среда (поверхности заряда).
2. С определённым интервалом строятся поверхности положения фронта ударной волны или поверхности (линии на профиле) схлопывания кумулятивной оболочки (оболочка схлопывается по нормали для каждого этапа).
3. Для каждого i -го этапа рассчитывается площадь фронта волны S_i (при цилиндрической форме кумулятивной выемки длина профиля/сечения кумулятивной оболочки L_i).
4. Определяются линии (точки на профиле) пересечения поверхности фронта ударной волны с поверхностью границы массива пород для каждого момента схлопывания кумулятивной оболочки – плотность энергии ударной волны на этой линии принимается равной плотности энергии на данной поверхности схлопывания J_i (рис. 1).

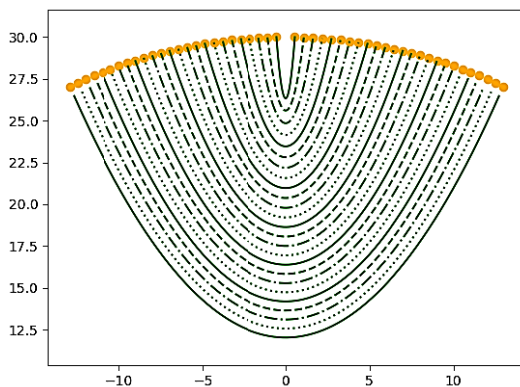


Рис. 1. Профильное сечение промежуточных положений поверхностей кумулятивной оболочки при схлопывании

5. Плотность потока энергии J_i и давление P_i на указанной линии пересечения i -й поверхности схлопывания кумулятивной оболочки с поверхностью границы массива горных пород рассчитывается как $J_i = J_0 \cdot \frac{S_0}{S_i}$ и $P_i = P_0 \cdot \frac{S_0}{S_i}$ соответственно (при цилиндрической форме выемки можно перейти к удельным величинам, поделив их на длину/высоту H цилиндрической поверхности $J_i = J_0 \cdot \frac{L_0}{L_i}$ и $P_i = P_0 \cdot \frac{L_0}{L_i}$, где L_0 и L_i – начальная длина профиля/сечения кумулятивной оболочки и длина профиля/сечения i -ой поверхности фронта ударной волны при схлопывании соответственно), то есть плотность потока энергии и давление взрыва для каждого состояния схлопывания можно считать обратно пропорциональными площади поверхности фронта волны.

6. На базе этого строится диаграмма направленности энергии ударной волны на границе массива пород, где угол ϕ указывает на линию пересечения i -й поверхности с границей массива горных пород (то есть поверхность скважины), а плотность потока энергии и давление равны соответственно определённым плотности потока энергии и давлению этой поверхности (рис. 2).

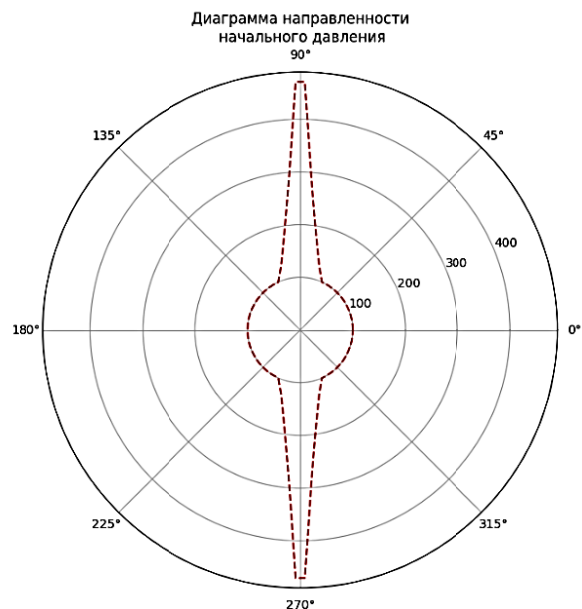


Рис. 2. Диаграмма направленности плотности потока энергии на границе скважины

Результаты

В результате работы разработан метод расчёта схлопывания кумулятивной оболочки и построения диаграмм направленности распределе-

ния энергии и давления взрыва при инициировании заряда с кумулятивной полостью на основе закона сохранения энергии и вектора плотности потока энергии Умова, к которому написаны две программы для ЭВМ, а именно программа построения кривых сечений поверхностей схлопывания кумулятивной оболочки и программа построения диаграммы направленности распределения энергии взрыва и давления по направлениям относительно диаметральной плоскости, проходящей через центр заряда перпендикулярно плоскости симметрии кумулятивной полости, позволившие соответственно смоделировать схлопывание оболочки кумулятивного заряда и оценить распределение воздействия взрыва на стенки скважины, что может служить основой для дальнейших расчётов воздействия заряда на окружающий массив горных пород.

Обсуждение

Приведённый в работе разработанный авторский метод, основанный на понятии вектора плотности потока энергии (или вектора Умова), нагляден и вычислительно проще традиционных методов оценки воздействия кумулятивного заряда на преграду (в данном случае стенки скважины), которые основаны на гидродинамической теории кумуляции, так как не требует решения системы дифференциальных уравнений. При этом данный метод обладает достаточной точностью для решения комплекса задач, связанных с ведением взрывных работ на добычных объектах горной промышленности, таких как оценка воздействия заряда на стенки скважины и окружающий массив горных пород при проведении контурного взрывания, что делает его применение востребованным в промышленности. Кроме того, приведённый метод имеет потенциал к совершенствованию и усложнению для повышения точности прогнозирования.

Заключение

Разработан оригинальный авторский метод оценки воздействия кумулятивного заряда на стенки скважины по результатам прогнозирования параметров ударной волны при помощи вектора Умова, описание которого приведено в статье.

При помощи разработанного метода получена диаграмма направленности плотности потока энергии на границе скважины при подрыве кумулятивного заряда.

Сформированы направления применения разработанного метода в промышленности.

Литература

1. Яковлев А.В., Шимкив Е.С. Проблемы постановки вопросов в предельное положение // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2021. № 5-1. С. 105-116.
2. Оника С.Г., Стасевич В.И., Ковалёва И.М. Разрушение горных пород взрывом // Электронный учебно-методический комплекс, Минск, 2016. 113 с.
3. Математическое моделирование функционирования взрывных устройств / А.А. Акимов, М.С. Воротилин, И.Н. Кирюшкин, С.А. Климов, Е.В. Сидоров, А.Н. Чуков. Тула: Изд-во Репро-Текст, 2007. 269 с.
4. Гецов И.Й. Влияние термодинамических процессов в материале кумулятивной оболочки на параметры схлопывания // Научни трудове на Русенския Университет. Т. 45. Сер. 2.1 «Машиностроителни технологии и механика». Република България. Русе: Съюз на учениците. 2006. С. 155-160.
5. Гецов И.Й. Комплексный анализ напряженно-деформированного и теплового состояния кумулятивной струи // Хемус-2000. Пловдив: 2008. С.175-180.
6. Некоторые вопросы проектирования кумулятивных узлов / С.П. Петков, В.Л. Баранов, Х.И. Христов, К.А. Бояджиев. Тула-Сопот: 2006. 116 с.
7. Волновое разрушение упруго-вязкопластического материала с первоначальными дефектами структуры / В.Л. Баранов, К.Р. Великов, И.Й. Гецов [и др.] // Известия на Съюза на учениците - Русе. Сер. «Технически науки». Русе: 2001. № 3. С 57-62.
8. Соловьянова И.П., Шабунин С.Н. Теория волновых процессов. Акустические волны. Екатеринбург, 2004. 14 с.

Поступила 13.11.2025; принята к публикации 27.11.2025

Информация об авторах

Федоров Николай Николаевич – техник, АО «Научно-производственное объединение дальней радиолокации им. академика А.Л. Минца» (127083, Россия, г. Москва, ул. 8 Марта, д. 10, стр. 1), e-mail: niknfedorov@yandex.ru

Пафиков Евгений Анатольевич – д-р техн. наук, профессор кафедры производства и эксплуатации боеприпасов, Филиал Военной академии материально-технического обеспечения (440005, Россия, Пензенская обл., г. Пенза-5), e-mail: evgeniy_pafikov@mail.ru

Архипова Наталья Анатольевна – канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры физики и технической механики, МИРЭА – Российский технологический университет (119454, Россия, г. Москва, пр-кт Вернадского, д. 78), e-mail: arkipova_n@mirea.ru, ORCID: <https://orcid.org/my-orcid?orcid=0009-0008-9568-7912>

COMPREHENSIVE METHOD FOR ASSESSING THE IMPACT OF A SHAPED CHARGE ON THE WELLBORE WALLS BASED ON THE PREDICTION OF SHOCK WAVE PARAMETERS USING THE UMOV VECTOR

N.N. Fedodrov¹, E.A. Pafikov², N.A. Arkhipova³

¹Scientific and Production Association for Long-Range Radar named after Academician A.L. Mints, Moscow, Russia

²Branch of the Military Academy of Logistics, Penza, Russia

³MIREA - Russian Technological University, Moscow, Russia

Abstract: in recent decades, both in Russia and abroad, industries related to the design, production and operation of equipment operating under impact loading conditions have been actively developing. Such industries are primarily the defense and mining industries. The use of cumulative charges in mining is in demand in such technical processes as contour blasting during drilling and blasting operations. At the same time, assessing the impact of these cumulative charges on the surrounding rock mass requires preliminary modeling of the distribution of explosion energy and pressure on the walls of boreholes or boreholes. In this regard, this article presents an original method for assessing the impact of a cumulative charge on the walls of a borehole or the surface of a rock mass based on the concept of the energy flux density vector or Umov vector. The theoretical substantiation of this method, description of the algorithm of its implementation, and also the results of the work of the written computer programs are given: construction of profiles of the shell of the cumulative cavity during collapse, as well as construction of diagrams of the direction of pressure and energy flux density on the walls of the well according to the specified method. The materials of the article are valuable for specialists of the mining and defense industries

Key words: law of conservation of energy, energy flux density, Umov vector, cumulative effect, cumulative charge, and directional diagrams

Acknowledgements: the team of authors expresses gratitude to Alexander Vasilievich Timoshenko for his support and constructive discussion of this work

References

1. Yakovlev A.V., Shimkiv E.S. "Problems of creating benches in the limit position", *Mining Information and Analytical Bulletin (Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten')*, 2021, no. 5-1, pp. 105-116.
2. Onika S.G., Stasevich V.I., Kovaleva I.M. "Destruction of rocks by explosion" ("Razrushenie gornykh porod vzryvom"), Electronic Educational and Methodological Complex, Minsk, 2016, 113 p.
3. Akimov A.A., Vorotilin M.S., Kiryushkin I.N., Klimov S.A., Sidorov E.V., Chukov A.N. "Mathematical modeling of the functioning of explosive devices" ("Matematicheskoe modelirovanie funktsionirovaniya vzryvnykh ustroystv"), Tula: Repro-Tekst, 2007, 269 p.
4. Getsov I.Y. "The influence of thermodynamic processes in the cumulative lining material on the collapse parameters", in the book *Teach labor at Ruse University*, vol. 45, series 2.1 "Mechanical engineering technologies and mechanics", Republic of Bulgaria, Ruse: S"yuz na uchenite, 2006, pp. 155-160.
5. Getsov I.Y. "Complex analysis of stress-strain and thermal state of a cumulative jet", in the book *Hemus-2000*, Plovdiv, 2008, pp. 175-180.
6. Petkov S.P., Baranov V.L., Khristov H.I., Boyadzhiev K.A. "Some issues of designing cumulative units" ("Nekotorye voprosy proyektirovaniya kumulyativnykh uzlov"), Tula: Sopot, 2006, 116 p.
7. Baranov V.L., Velikov K.R., Getsov I.Y., Petkov S.P., Poltev P.A., Chivikov Z.Ch. "Wave failure of elastic-viscoplastic material with initial structural defects", in the book *News on the University of Ruse*, Series "Technical Sciences", Ruse, 2001, no. 3, pp. 57-62.
8. Solovianova I.P., Shabunin S.N. "Theory of wave processes. Acoustic waves" ("Teoriya volnovykh protsessov. Akusticheskiye volny"), study guide, Ekaterinburg, 2004, 14 p.

Submitted 13.11.2025; revised 27.11.2025

Information about the authors

Nikolay N. Fedorov, technician, Joint Stock Company Scientific and Production Association for Long-Range Radar named after Academician A.L. Mints (10, 8 Marta Str., Moscow 127083, Russia), e-mail: niknfedorov@yandex.ru

Evgeniy A. Pafikov, Dr. Sc. (Technical), Associate Professor, Branch of the Military Academy of Logistics (Penza-5 440005, Russia), e-mail: evgeniy_pafikov@mail.ru

Natal'ya A. Arkhipova, Cand. Sc. (Physics and Mathematics), Associate Professor, MIREA - Russian Technological University (78 Vernadsky Avenue, Moscow 119454 Russia), e-mail: arkipova_n@mirea.ru, ORCID: <https://orcid.org/my-orcid?orcid=0009-0008-9568-7912>

ДИНАМИЧЕСКАЯ ВЯЗКОСТЬ НАНОЖИДКОСТЕЙ С ПОЛИДИСПЕРСНЫМИ НАНОЧАСТИЦАМИ

А.В. Рязских, И.Г. Дроздов, В.И. Рязских

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

Аннотация: представлен подход для интерпретации экспериментальных данных по динамической вязкости наножидкостей на водной основе с учетом полидисперсности наночастиц. Существующие теоретические представления о динамической вязкости наножидкостей не дают полной информации о ее зависимости от степени полидисперсности наночастиц. Это связано с тем, что одностадийный и двухстадийный способы генерации наночастиц в настоящее время не могут быть проконтролированы с помощью аппаратно-измерительных средств в виду их малого характерного масштаба. Кроме того, имеют место быть такие осложняющие факторы, как броуновская диффузия, миграционный поток, термофорез, диффузиофорез и седиментация. На сегодняшний момент экспериментальные данные по динамической вязкости жидкостных наносистем не отображают гранулометрический состав наночастиц, а вместо него указывается медианная составляющая. Предложено степень полидисперсности наночастиц описать классической функцией распределения зависимости концентрации от размеров элементов дисперсной фазы и идентифицировать сопряженную связь с аналогичной счетной функцией их распределения. Это позволило на основе эмпирического соотношения, обобщающего большой массив экспериментальных данных, получить модифицированное выражение для прогнозирования динамической вязкости наножидкостей с последующим специальным нормированием по монодисперсному случаю и осреднением на интервале размеров. В предположении распределения наночастиц по размерам, в соответствии с Гауссовским законом, показано, что с увеличением дисперсии динамическая вязкость наножидкостей уменьшается и, следовательно, возможно через управление гранулометрическим составом наночастиц уменьшить потери энергии на транспортирование в различных технических и технологических системах

Ключевые слова: наножидкость, динамическая вязкость, наночастицы, полидисперсность, функция плотности распределения

Введение

Вязкость наножидкостей определяет мощность перекачки теплоносителя, перепад давления и прямо влияет на теплообмен [1]. В этой связи необходима информация о влиянии размера наночастиц, температуры, объемной концентрации дисперсной фазы и др. на величину вязкости наножидкостей. Эйнштейн впервые предложил соотношение для вязкости разбавленных суспензий [2]

$$\mu_{nf} = \mu_f (1 + 2,5\varphi),$$

где μ_{nf} , μ_f – вязкость суспензии и базовой жидкости; φ – объемная доля монодисперсных сферических частиц. Однако эта зависимость в явном виде не учитывает размер дисперсной фазы. Более развернутая информация о теоретико-эмпирических соотношениях представлено в [3].

Вязкость наножидкостей определяется наномасштабом монодисперсных частиц [4]: при концентрации наночастиц больше 4 % вязкость с большими по размеру частицами выше, но при этом диапазон гранулометрического состава был смещен вправо от критической границы в 100 нм, что было подтверждено экспериментально в [5]. Для докритического диапа-

зона размеров частиц, на примере наножидкости SiO_2/H_2O , оказалось, что вязкость наножидкостей снижается с увеличением размера наночастиц [6]. Аналогичные выводы были сделаны относительно других наножидкостей [7]. Попытка объяснения этого противоречия была дана в [8]: поведение наножидкостей обуславливается возникновением более высокого сопротивления на границе раздела фаз из-за наличия большей площади поверхности наночастиц меньшего размера. Более того в [9] экспериментально показано, что вязкость наножидкостей не зависит от диаметра наночастиц.

Существующие технологии генерации наночастиц пока не позволяют управлять их гранулометрическим составом [10], что приводит к проблеме определения взаимосвязи полидисперсности наночастиц и вязкости наножидкостей [11]: при этом, чем больше диапазон разброса от среднечисленного размера, тем компактнее в базовой жидкости локализуются нановключения, т.е. полидисперсность формирует лучшие условия для перемещения дисперсионной фазы, а это в свою очередь уменьшает внутренне трение в гетерогенной среде. Тем не менее этот вопрос остается дискуссионным из-за отсутствия экспериментальных данных.

В данной работе делается попытка разработать модельные представления обработки

имеющихся экспериментальных данных относительно широкого спектра наночастиц путем модификации регрессионного соотношения, в котором структурно присутствует локация, учитывающая степень полидисперсности.

Модель

Формулировка априорной гипотезы масштабирования нановключений в наножидкости имеет следующий вид

$$f_{\Phi}(l) = d\varphi(l)/\Phi dl, \quad (1)$$

где $\varphi(l)$ – долевое присутствие нановключений размером l ; $d\varphi(l)$ – долевое присутствие нановключений фракции dl ; Φ – удельная интегративная компонента нановключений в представительном объеме V .

Классическая формулировка размерной нормированной функции, характеризующей численное присутствие нановключений в наножидкости есть [12]

$$f_N(l) = dn(l)/Ndl, \quad (2)$$

где $n(l)$ – количественная характеристика наночастиц размера l ; $dn(l)$ – численный интегратор фракции dl ; N – суммарное количество нановключений в характерном объеме V базовой жидкости. Связь между долевым присутствием нановключений размера l и численным интегратором фракции dl такова

$$d\varphi(l) = dn(l)k_V l^3 / V,$$

где k_V учитывает форму нановключений. Т.к. $V_p = V\Phi$ и $V_p = k_V \bar{l}^3 / V$, где

$$\bar{l} = \int_0^{\infty} l f_N(l) dl,$$

то из (1) и (2) следует

$$f(l) = \frac{V\Phi}{k_V l N} f(l)$$

или

$$f_{\Phi}(l) = \left(\frac{l}{\bar{l}}\right)^3 f_N(l). \quad (3)$$

Соотношение (3) в безразмерном виде с помощью относительных переменных

$$L = (l/\bar{l}), \quad F_N(L) = \bar{l} f_N(l), \quad F_{\Phi}(L) = \bar{l} f_{\Phi}(l)$$

с предварительной нормировкой таково

$$F_{\Phi}(L) = L^3 f F_N(L) / \int_0^{\infty} L^3 f F_N(L) dL. \quad (4)$$

Если выбрана эмпирическая зависимость

$$M = \mu_{nf} / \mu_f = M(\varphi, t, \bar{l}),$$

где t – температура, то ее можно представить следующим образом

$$M = M[\varphi(\Phi, L), t, \bar{l}], \quad (5)$$

где $\varphi(\Phi, L) = k\Phi F_{\Phi}(L)$, k – нормировочная константа, определяемая из условия монодисперсности наночастиц. Итоговое выражение для динамической вязкости записывается, как

$$\bar{M}(\Phi, t, \bar{l}) = \frac{1}{L_{\max} - L_{\min}} \cdot \int_{L_{\min}}^{L_{\max}} M[\varphi(\Phi, L), t, \bar{l}] dL. \quad (6)$$

Анализ

Удельная Гауссовская функция распределения имеет вид [13]

$$F_N(L) = \frac{1}{\bar{\sigma}\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(L-1)^2}{2\bar{\sigma}^2}\right], \quad (7)$$

где $\bar{\sigma} = \sigma/\bar{l}$, σ – среднеквадратическое отклонение от \bar{l} . Рис. 1 демонстрирует ситуацию, когда взвесь наночастиц приближенно можно считать монодисперсной, т.е. при $\bar{\sigma} \leq 0.03$.

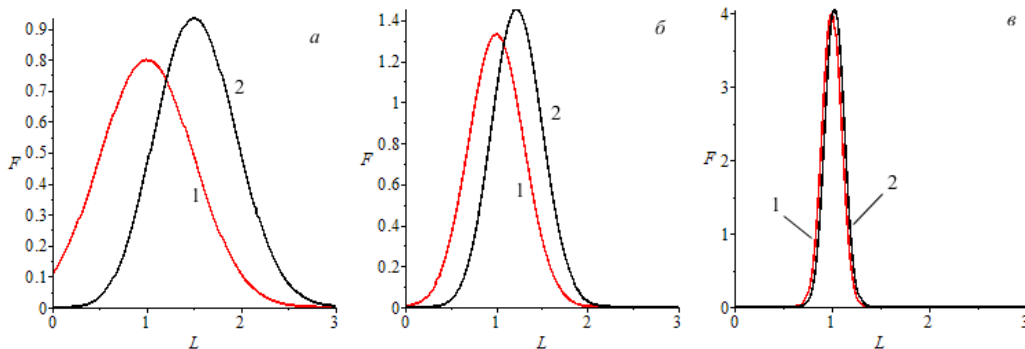


Рис. 1. Влияние параметра $\bar{\sigma}$ на вид F_N (кривая 1) и F_{Φ} (кривая 2): а – 0,5; б – 0,3; в – 0,1

Воспользуемся массивом опытных данных [14], который был положен в основу валидации обобщенной эмпирической регрессионной модели, корректной для наножидкостей на водной основе, с докритическим средним размером и с концентрацией 0,04 Об. долей

$$M = \left(1 + \frac{\varphi}{100}\right)^{11,3} \left(1 + \frac{t}{100}\right)^{-0,038} \left(1 + \frac{\bar{l}}{100}\right)^{-0,061}. \quad (8)$$

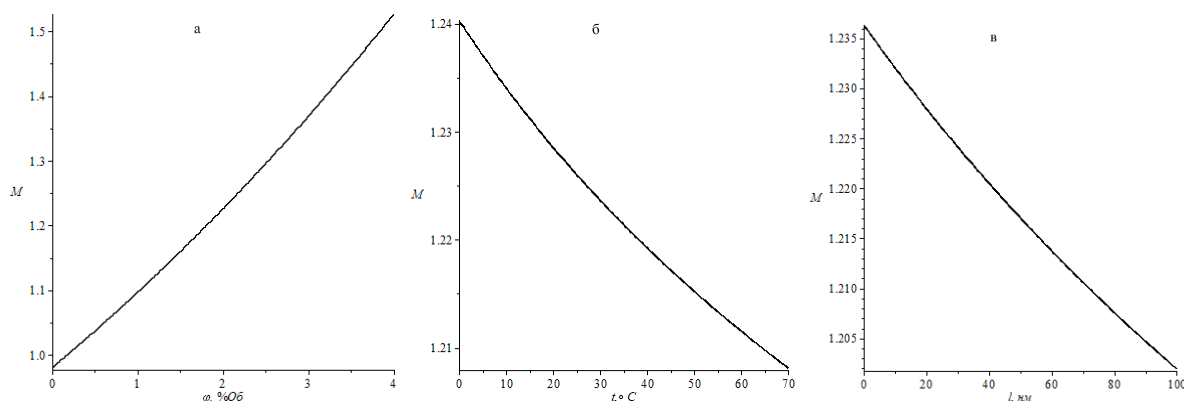


Рис. 2. Оценка влияния изменения параметров в (8): а – $t = 25^\circ\text{C}$; $\bar{l} = 25\text{ нм}$; б – $\varphi = 2\%\text{Об}$; $\bar{l} = 25\text{ нм}$; в – $\varphi = 2\%\text{Об}$; $t = 25^\circ\text{C}$

Считая нановзвесь монодисперсной, найдено, что $k = 1,77$. Результаты вычислений по предложенному модельному соотношению (6) с безразмерной счетной функцией распределения наночастиц (7) для различных значений $\bar{\sigma}$ приведены на рис. 3, из которого следует, что полидисперсность снижает динамическую вязкость, подтверждая оценку в [11]. Однако этому результату можно дать иное объяснение.

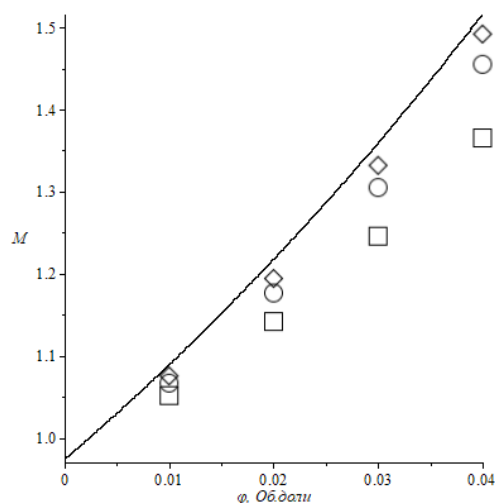


Рис. 3. Сравнение обобщенных экспериментальных данных (сплошная кривая) с расчетами по модели (6) при различных $\bar{\sigma}$: \square – 0,3; \circ – 0,2; \diamond – 0,03

В качестве исходных данных были приняты изотермический режим ($t = 25^\circ\text{C}$) и средний размер нановзвеси $\bar{l} = 50\text{ нм}$. Следует отметить, что выбор t и \bar{l} из указанного диапазона незначительно влияет на точность прогнозирования M (рис. 2).

Для этого рассмотрим нормированную функцию плотности распределения наночастиц по площади их поверхности от размера

$$f_s(l) = \frac{ds(l)}{Sdl},$$

где $ds(l)$ – межфазная площадь нановключений размера l ;

S – суммарная площадь поверхности дисперсной фазы в характерном объеме наножидкости.

Учитывая, что $ds(l) = k_s l^2 dn(l)$ и $S = k_s \bar{l}^2 N$, где k_s характеризует форму межфазной границы, и

$$f_N(l) = \left(\frac{\bar{l}}{l}\right)^2 \frac{ds(l)}{Sdl}$$

или

$$F_S(L) = L^2 F_N(L), \quad (9)$$

где $F_S(L) = \bar{l} f_S(l)$.

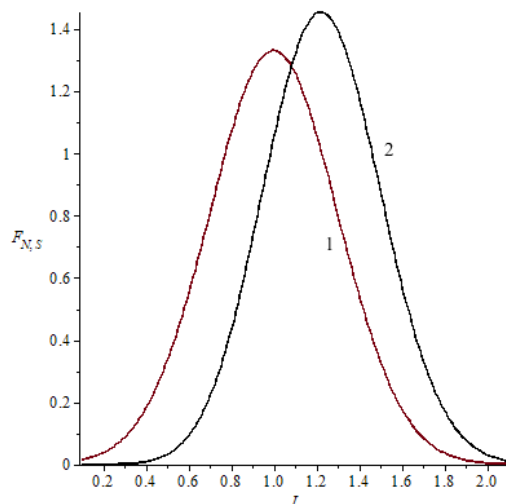


Рис. 4. Взаимная дислокация функций плотности распределения при $\bar{\sigma} = 0,03$: 1 – $F_N(L)$; 2 – $F_S(L)$

Если считать дрейф фаз в потоке наножидкости соответствующим ламинарному режиму обтекания, то согласно [15] коэффициент гидравлического сопротивления обратнопропорционален размеру наночастицы. Для $\bar{\sigma} = 0,3$ (рис. 4) видно, что средний размер для $F_S(L)$ больше, чем у $F_N(L)$, а это означает, что вязкостное трение фаз уменьшается, т.е. полидисперсность наночастиц снижает вязкость.

Заключение

Показано, что полидисперсность наночастиц в наножидкостях снижает ее динамическую вязкость, что позволяет, управляя гранулометрическим составом наночастиц, уменьшить потери энергии на транспортирование в различных предметно-ориентированных технических и технологических системах.

Поступила 18.09.2025; принята к публикации 20.10.2025

Информация об авторах

Ряжских Александр Викторович – канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры прикладной математики и механики, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: ryazhskihav@bk.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9823-3165>

Дроздов Игорь Геннадьевич – д-р техн. наук, профессор кафедры ракетных двигателей, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: dig@cchgeu.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5779-4727>

Ряжских Виктор Иванович – д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой прикладной математики и механики, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: ryazhskih_vi@mail.ru ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2834-3000>

Литература

1. Mahbulul I.M., Saidur R., Amalina M.A. Latest developments on the viscosity of nanofluids // *Int. J. Heat Mass Trans.* 2012. Vol. 55(4). pp. 874-885.
2. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика. В 10т. Т. VI. Гидродинамика. М.: Наука, 1986. 737 с.
3. A brief review on viscosity of nanofluids / P.C. Mishra [et al.] // *Int. Nano Lett.* 2014. Vol. 4. pp. 109-120.
4. Temperature and particle – size dependent viscosity data for water-based nanofluids – hysteresis phenomenon / C.T. Nguyen [et al.] // *Int. J. Heat Fluid Flow.* 2007. Vol. 28(6). pp. 1492-1506.
5. Heat transfer and flow behavior of aqueous suspensions of TiO₂ nanoparticles (nanofluids) flowing upward through a vertical pipe / Y. He [et al.] // *Int. J. Heat Mass Transfer.* 2007. Vol. 50(11). pp. 2272-2281.
6. Experimental investigation of viscosity and specific heat of silicon dioxide nanofluids / P.K. Namburu [et al.] // *Micro Nano Lett. IET.* 2007. Vol. 2(3). pp. 67-71.
7. CuO in water nanofluid influence of particle size and polydispersity on volumetric behaviour and viscosity / M.J. Pastoriza-Gallego [et al.] // *Fluid Phase Equilib.* 2011. Vol. 300(1). pp.188-196.
8. Agarwal D.K., Aravind V., Kumar S.S. Synthesis and characterization of kerosene-alumina nanofluids // *Appl. Therm. Eng.* 2013. Vol. 60(1). pp. 275-284.
9. Measurements of nanofluid viscosity and its implications for thermal applications / R. Prasher [et al.] // *Appl. Phys. Lett.* 2006. Vol. 89(13). pp.133108.
10. Zhu H., Lin Y., Yin Y. A novel one step chemical method for preparation of espper nanofluids // *Colloid J. and Interface Science.* 2004. Vol. 277. pp. 190-193.
11. Nanofluids for heat transfer enhancement a review / E.K. Goharshadi [et al.] // *Phys. Chem. Res.* 2009. Vol. 1(1). pp. 1-33.
12. Коузов П.А. Основы анализа дисперсного состава промышленных пылей и измельченных материалов. Л.: Химия, 1987. 264 с.
13. Influence of temperature and synthesis time on shape and size distribution of Fe₃O₄ nanoparticles obtained by ageing method / A.G. Muradova [et al.] // *Colloids Surf.* 2016. A509. pp. 229-234.
14. Correlations for thermal conductivity and viscosity of water based nanofluids / W.H. Azmi [et al.] // *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* 2012. Vol. 36. pp. 012029.
15. Симаков Н.Н. Расчет обтекания и сопротивления шара в ламинарном и сильнотурбулентном потоках // *ЖТФ.* Т. 83. Вып. 4. С. 16-20.

DYNAMIC VISCOSITY OF NANOLIQUIDS WITH POLYDISPERSE NANOPARTICLES

A.V. Ryazhskikh, I.G. Drozdov, V.I. Ryazhskikh

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract: an approach to interpreting experimental data on the dynamic viscosity of water-based nanofluids taking into account the polydispersity of nanoparticles is presented. Existing theoretical concepts of the dynamic viscosity of nanofluids do not provide complete information on its dependence on the degree of polydispersity of nanoparticles. This is due to the fact that single-stage and two-stage methods of nanoparticle generation cannot currently be controlled using instrumentation due to their small characteristic scale. In addition, there are such complicating factors as Brownian diffusion, migration flow, thermophoresis, diffusiophoresis, and sedimentation. To date, experimental data on the dynamic viscosity of liquid nanosystems do not reflect the granulometric composition of the nano-part, but instead indicate the median component. It is proposed to describe the degree of polydispersity of nanoparticles by the classical distribution function of the dependence of concentration on the size of dispersed phase elements and to identify a conjugate relationship with a similar counting function of their distribution. This made it possible to obtain a modified expression for predicting the dynamic viscosity of nanofluids based on an empirical relationship generalizing a large array of experimental data, followed by special normalization for the monodisperse case and averaging over a size range. Assuming that the distribution of nanoparticles by size is in accordance with Gaussian laws, it is shown that with increasing dispersion, the dynamic viscosity of nanofluids decreases and, therefore, it is possible to reduce energy losses for transportation in various technical and technological systems by controlling the granulometric composition of nanoparticles

Key words: nanofluid, dynamic viscosity, nanoparticles, polydispersity, density distribution function

References

1. Mahbubul I.M., Saidur R., Amalina M.A. "Latest developments on the viscosity of nanofluids", *Int. J. Heat Mass Trans.*, 2012, vol. 55(4), pp. 874-885.
2. Landau L.D., Lifshchic E.M. "Theoretical Physics. Hydrodynamics" ("Teoreticheskaya fizika. Gidrodinamika"), Moscow: Nauka, 1986, 737 p.
3. Mishra P.C., Mukherjee S., Nayak S.K., Randa A.A. "A brief review on viscosity of nanofluids", *Int. Nano Lett.*, 2014, vol. 4, pp. 109-120.
4. Nguyen C.T. et al. "Temperature and particle –size dependent viscosity data for water-based nanofluids –hysteresis phenomenon", *Int. J. Heat Fluid Flow*, 2007, vol. 28(6), pp. 1492-1506.
5. He Y. et al. "Heat transfer and flow behavior of aqueous suspensions of TiO₂ nanoparticles (nanofluids) flowing upward through a vertical pipe", *Int. J. Heat Mass Transfer*, 2007, vol. 50(11), pp. 2272-2281.
6. Namburu P.K. et al. "Experimental investigation of viscosity and specific heat of silicon dioxide nanofluids", *Micro Nano Lett. IET*, 2007, vol. 2(3), pp. 67-71.
7. Pastoriza-Gallego M.J. et al. "CuO in water nanofluid influence of particle size and polydispersity on volumetric behaviour and viscosity", *Fluid Phase Equilib.*, 2011, vol. 300(1), pp.188-196.
8. Agarwal D.K., Aravind V., Kumar S.S. "Synthesis and characterization of kerosene-alumina nanofluids", *Appl. Therm. Eng.*, 2013, vol. 60(1), pp. 275-284.
9. Prasher R. et al. "Measurements of nanofluid viscosity and its implications for thermal applications", *Appl. Phys. Lett.*, 2006, vol. 89(13), 133108.
10. Zhu H., Lin Y., Yin Y. "A novel one step chemical method for preparation of Espper nanofluids", *Colloid J. and Interface Science*, 2004, vol. 277, pp. 190-193.
11. Goharshadi E.K. et al. "Nanofluids for heat transfer enhancement a review", *Phys. Chem. Res.*, 2009, vol. 1(1), pp. 1-33.
12. Kouzov P.A. "Fundamentals of analysis of the dispersed composition of industrial dusts and crushed materials" ("Osnovy analiza dispersnogo sostava promyshlennykh pyley i izmel'chennykh materialov"), Leningrad: Khimiya, 1987, 264 p.
13. Muradova A.G., Zyatseva M.P., Sharpaev A.I., Yurtov E.V. "Influence of temperature and synthesis time on shape and size distribution of Fe₃O₄ nanoparticles obtained by ageing method", *Colloids Surf.*, 2016, A509, pp.229-234.
14. Azmi W.H., Sharma K.V., Mamaf R., Alias A.B.S., Misnon I.I. "Correlations for thermal conductivity and viscosity of water based nanofluids", *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, 2012, vol. 36, 012029.
15. Simakov N.N. "Raschet obtekaniya i soprotivleniya shara v laminarnom i sil'noturbulentnom potokah", *ZHTEF*, vol. 83, no.4, pp. 16-20.

Submitted 18.09.2025; revised 20.10.2025

Information about the authors

Aleksandr V. Ryazhskikh, Cand. Sc. (Physics and Mathematics), Associate Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: ryazhskihav@bk.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9823-3165>.

Igor' G. Drozdov, Dr. Sc. (Technical), Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: dig@cchgeu.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5779-4727>

Viktor I. Ryazhskikh, Dr. Sc. (Technical), Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: ryazhskih_vi@mail.ru ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2834-3000>

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЗАВИСИМОСТИ ПОГРЕШНОСТИ ПЕЧАТИ ОТ РАЗМЕРОВ И УГЛА НАКЛОНА ИЗДЕЛИЯ

Н.А. Вехтева, Ю.В. Литовка

Тамбовский государственный технический университет, г. Тамбов, Россия

Аннотация: рассматривается влияние размеров геометрических элементов и пространственной ориентации (угол наклона к платформе построения) цилиндрических изделий на точность аддитивной печати методом FDM (Fused Deposition Modeling – моделирование послойным наплавлением). Актуальность исследования обусловлена растущим использованием трёхмерной печати в различных отраслях, в том числе в мелкосерийном производстве, где форма изделий постоянно меняется. Экспериментально получены количественные значения абсолютных и относительных отклонений размеров от заданной формы цилиндрических изделий с диапазоном диаметров от 3 до 13 мм с шагом 2 мм и высот от 5 до 30 мм с шагом 5 мм при углах наклона от 0° до 90° с шагом 15°, при использовании материала PETG (полиэтилен-гликоль) на трёхмерном принтере Elegoo Neptune 4. Для получения промежуточных значений отклонений и искажений формы в пределах диапазона измеренных экспериментальных данных разработана математическая модель, основанная на последовательной монотонной кубической интерполяции по алгоритму Фритча–Карлсона. Полученные результаты могут быть использованы для оптимизации точности печати и улучшения качества продукции в области трёхмерной печати

Ключевые слова: аддитивная трёхмерная печать, математическая модель, оптимизация трёхмерной печати, точность изготовления, экспериментальный анализ

Введение

Аддитивные технологии – это процессы, используемые для создания трёхмерных объектов путем последовательного добавления слоев материала один поверх другого. Область аддитивных технологий и 3D-печати демонстрирует быстрый рост интереса к ним как среди профессионалов, так и среди любителей. С появлением новых методов и материалов для печати, а также с увеличением доступности 3D-принтеров, вопросы, касающиеся надежности и достоверности печати, становятся всё более актуальными.

Изучение способов повышения точности печати зачастую связаны с модификацией конструкции устройства печати [1-2], выбором различных материалов [3], с изменением настроек параметров печати, таких как степень заполнения, число проходов построения оболочки [4-5], толщина слоя [6] и другие, а также с исследованием формы и расположения дополнительных поддерживающих элементов.

Получение новых улучшенных методов повышения точности печати поможет улучшить аддитивное производство изделий. В качестве гипотезы в проводимых исследованиях выступает следующая: увеличить точность печати изделий с помощью аддитивной технологии можно за счет изменения пространственной ориентации трёхмерного цифрового чертежа.

Это достигается путем анализа геометрической формы чертежа и учета полученных значений отклонений от исходных размеров конкретных элементов изделия, обладающего заданной геометрической формой.

Подобные исследования проведены в статье А.В. Голунова [7], где автор исследует влияние поддерживающих конструкций, требуемых при определенных наклонах изделия на точность печати. В статье И.В. Горатова и других авторов [8] приводятся измерения точности и шероховатости поверхности малогабаритных деталей круглого и квадратного сечения за счет изменения той же характеристики. Также существуют и другие работы, в которых представлено влияние пространственной ориентации трёхмерного цифрового чертежа на точность печати, однако количество измерений, проведенных в них, недостаточно для их использования в оптимизации печати.

Постановка задачи

Целью данной работы является построение математической модели зависимости погрешности печати от размеров и угла наклона изделия экспериментальным методом. Для этого необходимо экспериментально получить значения отклонений размеров готового изделия от его исходных размеров и выявить зависимости между этими отклонениями и пространствен-

ной ориентацией (наклоном) элемента (основания или поверхности цилиндра) изделия относительно платформы построения. Дополнительной целью является исследование влияния формы изделия на величину отклонения размера и на величину искажения формы (пластическая деформация вдоль измеряемой характеристики изделия).

Инструменты и методика измерений

Для эксперимента были спроектированы трехмерные цифровые чертежи цилиндров. Всего в САПР (система автоматизированного проектирования) Компас3D было создано 36 трехмерных чертежей изделий с диаметром от 3 мм до 13 мм (шаг 2 мм) и длиной от 5 мм до 30 мм (шаг 5 мм) для каждого диаметра.

В качестве устройства печати был использован трехмерный принтер Elegoo Neptune 4, основные характеристики которого представлены в табл. 1.

Таблица 1

Основные характеристики оборудования печати

Характеристика	Значение
Технология печати	FDM / FFF
Корпус принтера	Открытый
Диаметр нити	1.75 мм
Температура экструдера	300°C
Температура стола	110°C
Область печати	225x225x265 мм
Скорость печати / построения	до 500 мм/сек
Толщина слоя	0.1 - 0.4 мм
Точность по оси XY	± 0.1 мм
Точность по оси Z	± 0.1 мм
Сопло	0.4 мм
Поддерживаемые материалы	PLA, ABS, TPU, PETG, Nylon
Поддерживаемые форматы файлов	.STL, .OBJ
Рабочая температура среды	5°C~40°C

Для преобразования трехмерного цифрового чертежа в инструкции для устройства печати использовалось программное обеспечение OrcaSlicer 2.0. С его помощью производился поворот трехмерного цифрового чертежа, автоматическая расстановка поддержек и формирование G-кода.

Материал печати – Elegoo Generic PETG (Полиэтилентерефталатгликоль, ПЭТГ) – про-

зрачный аморфный материал. Устойчив к разбавленным кислотам и щелочам, растворам солей, мылам, маслам, спиртам, алифатическим углеводородам. Во всех экспериментальных печатях был использован красный PETG диаметром 1.75 мм, плотностью 1.27 г/см³.

Настройки печати и подготовки были установлены одинаково для всех изделий (табл. 2).

Каждый трехмерный цифровой чертеж проходил через семь преобразований угла наклона от 0° до 90° с шагом 15° относительно поверхности построения устройства печати.

Данный наклон равен наклону основания цилиндра, а для измерения наклона боковой поверхности угол вычитали из 90°. Так, например, при наклоне изделия на 30°, наклон основания равен также 30°, а наклон цилиндрической поверхности – 60°.

Таблица 2

Характеристики настроек подготовки чертежа к печати

Характеристика	Значение
Высота слоя	0,2 мм
Плотность заполнения	15%
Количество периметров на каждом слое	3
Шаблон заполнения поверхности оболочки	Монотонная линия
Шаблон заполнения	Перекрестная решетка
Скорость печати внешних периметров	120 мм/с
Скорость печати заполнения	200мм/с
Скорость печати поддержек	60мм/с
Поддержка	Автоматическая
Пороговый угол поддержки	30°
Шаблон поддержки	Прямолинейный
Температура сопла	240°c
Температура стола	80°c

Настройка чертежей (наклон по осям) осуществлялась за счет функций выбранного слайсера. Для расстановки поддержек использовались внутренние шаблоны программы, которые расставляли их автоматически.

Для измерений использовался цифровой штангенциркуль ADA A00380 с точностью ±0,03 мм и разрешением 0,01 мм. Для хранения и обработки данных использовалось программное обеспечение Microsoft Excel 2021 и PyCharm 2024.3.

Получение значений отклонений размеров напечатанного изделия от его трехмерного циф-

рового чертежа происходило с помощью нахождения и измерения наименьшего и наибольшего диаметального и линейного размеров. Измерения производились по всей длине и окружности цилиндра несколько раз, пока не было найдено наименьшее или наибольшее значение. Размер искажения формы – отклонение от цилиндричности, равно разнице полученных значений максимального и минимального размера как диаметра, так и длины цилиндра.

Анализ результатов измерений

Для определения погрешности измерений образцы были напечатаны шесть раз в одинаковых условиях. С учетом погрешности прибора в 0,03 мм и абсолютной погрешности отсчета в 0,005 мм, полная погрешность с доверительной вероятностью 95 % не превышает $\pm 0,06$ мм, а для линейных размеров – $\pm 0,115$ мм. Данный интервал отклонений не будет отображаться в дальнейшем на графиках, но будет учтен при составлении выводов. Относительная погрешность измерений не превышает 5 %, что является приемлемым уровнем точности.

В результате получилось 8 таблиц, состоящих из диаграмм сравнения максимальных отклонений при различных размерах. Далее будут разобраны результаты каждого сравнения по отдельности.

В первой таблице приводится сравнение отклонений диаметального размера (строки таблицы) в миллиметрах для каждого угла наклона (поля таблицы) в зависимости от линейного размера (рис. 1). При визуальном рассмотрении, при увеличении диаметального и линейных размеров растут и отклонения в большинстве результатов.

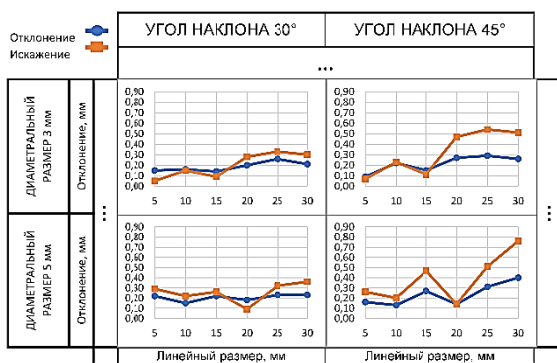


Рис. 1. Фрагмент таблицы сопоставления графиков зависимостей линейного размера и абсолютных отклонений для заданных диаметальных размеров по углам наклона

График искажений по форме практически повторяет график отклонений, но не для каждого варианта сравнения, например, для диаметальных размеров 3 мм и 5 мм при наклоне в 45° есть пересечение графиков для линейных размеров 15 мм и 25 мм, в других случаях присутствуют происходить скачки значений. С увеличением угла наклона растет значение искажения формы изделия. При этом выявить какую-то постоянную зависимость не предоставляется возможным.

Для сравнения отклонений и искажений по углам наклона в зависимости от выбранного диаметального размера (строки таблицы) для выбранного линейного размера (поля таблицы) была составлена таблица, представленная на рис. 2.

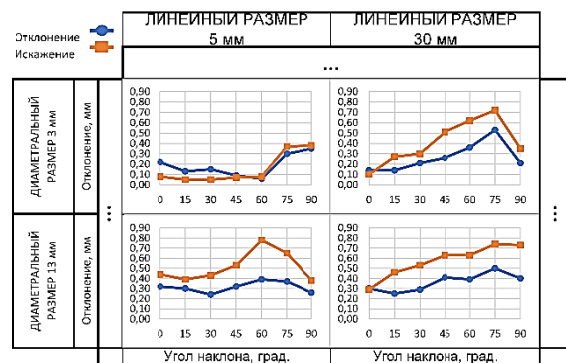


Рис. 2. Фрагмент таблицы сопоставления графиков зависимостей угла наклона и абсолютных отклонений заданных диаметальных размеров по линейным размерам

В третьей и четвертой таблице приводятся те же данные, но отклонения и искажения являются относительной величиной. Как показано на рис. 3, с увеличением линейного размера относительная погрешность увеличивается для малых диаметров, и практически не изменяется для размеров больше чем 7 мм при любых углах наклона.

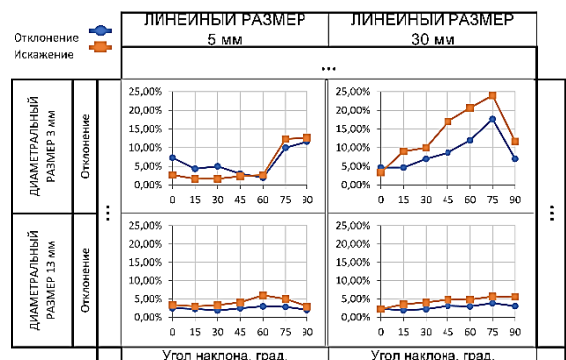


Рис. 3. Фрагмент таблицы сопоставления графиков зависимостей угла наклона и относительных отклонений для заданных диаметальных размеров по линейным размерам

Из этого следует, что при выборе угла наклона следует учитывать, как заданы допуски печати в техническом задании на печать, в процентах или миллиметрах, а также учитывать абсолютную погрешность измерений.

Если необходимо сохранить исходные размеры в пределах заданного процента от общей формы, то при диаметрах свыше 11 мм нет смысла учитывать линейный размер, как если бы допуск задавался в миллиметрах. В таком случае, при вычислении угла наклона, в котором достигаются минимальное значение отклонения или искажение формы, можно взять усредненные или максимальные значения для всех известных линейных размеров.

Следующая группа таблиц относится к отклонениям линейных размеров и представлена в том же виде, что и для диаметральных размеров.

На рис. 4 представлено сравнение максимальных отклонений линейного размера (строки таблицы) в миллиметрах для каждого угла наклона (поля таблицы) в зависимости от диаметрального размера.

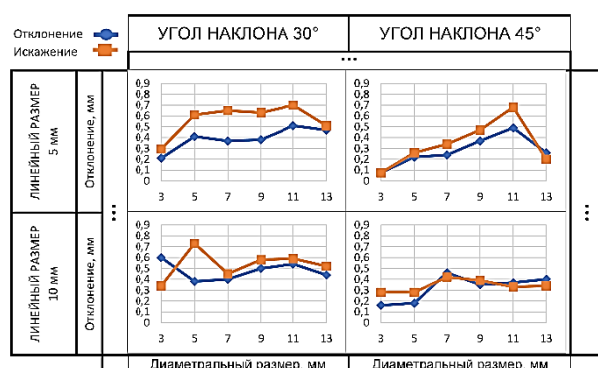


Рис. 4. Сопоставления графиков зависимостей диаметрального размера и абсолютных отклонений для заданных линейных размеров по углам наклона

В остальных таблицах приведены данные по линейным размерам: для каждого фиксированного диаметра показано, как абсолютное отклонение меняется в зависимости от угла наклона, а также приведены относительные погрешности, рассчитанные как отношение этих отклонений к номинальному размеру.

Наилучшие результаты, вне зависимости от диаметральных размеров по значениям отклонения и искажения, достигаются при 0° и 90° наклона. При другом значении наклона увеличение отклонений растет с увеличением диаметрального размера. Значение искажений линейных размеров никак не связано с диаметраль-

ными размерами, но достаточно близко с значениями отклонений в большинстве случаев.

При появлении нескольких одинаковых значений минимальных отклонений для разных углов наклона следует отдавать предпочтения тем, что совпадают с наклоном, при котором достигается минимальное искажение формы, если не заданы предпочтения в техническом задании.

По результатам сопоставления графиков зависимостей диаметрального размера и относительных отклонений для заданных линейных размеров по углам наклона сделан вывод: чем больше линейный размер, тем меньше процент отклонений и искажения. Начиная с линейного размера 20 мм величина отклонений, и искажений составляют меньше 3 % от изначальной формы.

Метод выбора наилучших углов наклона будет схож с методом для диаметральных размеров для заданных допусков технического задания.

Интерполяция полученных измерений

В связи с затратами ресурсов и времени проведение экспериментального анализа всех возможных размеров при различных углах наклона неэффективно.

По внешнему виду полученных графиков можно сказать об их характере, что они не линейны и не монотонны. В связи с этим для получения аналитической зависимости было решено использовать методы интерполяции.

В качестве исследуемых были выбраны наиболее популярные и подходящие методы интерполяции:

- квадратичная интерполяция;
- кубическая интерполяция;
- кубическая сплайн интерполяция;
- монотонная кубическая интерполяция.

В качестве исследуемых значений была взята выборка отклонений диаметрального размера при различных углах наклона для цилиндра с диаметром 11 мм и длиной 20 мм. Результаты интерполяций для интервала $30-45^\circ$ представлены в математической записи:

- квадратичная интерполяция

$$y(x) = -0.02(x - 30) + 0.47;$$
- кубическая интерполяция

$$y(x) = 0.001(x - 30)^2 + 0.012(x - 30) + 0.27;$$
- кубическая сплайн интерполяция

$$y(x) = -0.0003(x - 30)^3 +$$

$$0.007(x - 30)^2 - 0.004(x - 30) + 0.27;$$

- монотонная кубическая интерполяция

$$y(x) = 0.003(x - 30)^2 - 0.016(x - 30) + 0.274;$$

и проиллюстрированы на рис. 5.

Монотонная кубическая интерполяция продемонстрировала наибольшую стабильность, так как значения отклонений в первых трех и последних двух точках практически совпадают, и прогнозировать нелинейность между ними (как при использовании квадратичной, кубической интерполяции и сплайна) нецелесообразно.

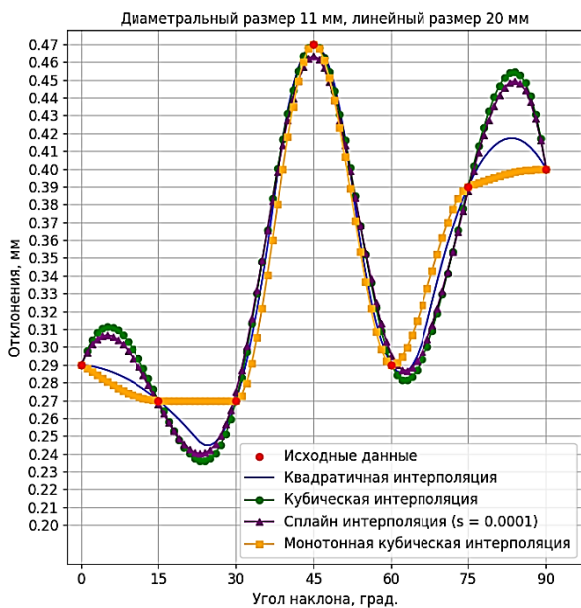


Рис. 5. Сравнение значений полученных в результате использования различных методов интерполяции

Для получения промежуточных значений отклонений (и искажений формы) был предложен следующий подход, заключающийся в последовательном применении монотонной кубической интерполяции для получения значений отклонений z для заданных координат x и y , представляющих собой, соответственно, диаметральный и линейный размеры (или наоборот). Далее, этот подход применяется для интерполяции значений, полученных при различных углах наклона.

Пусть задана матрица значений отклонений в виде точек $(x_1, x_2, x_3; y_1, y_2, y_3; z)$, где x_i – значения диаметрального размера, y_i – значения линейного размера, а z – соответствующие значения отклонений. Тогда задача состоит в построении гладкой функции $Z(x, y)$, интерполирующей отклонение z для произвольной точки (x, y) в области, ограниченной заданными зна-

чениями x_i и y_i (выбираются из диапазона измеренных значений, к которому принадлежит произвольная точка).

Сначала, для каждого фиксированного значения $y = y_i$, выполняется монотонная кубическая интерполяция по переменной x . Это позволяет получить функции $Z_i(x)$, интерполирующие зависимость отклонения от диаметрального размера x для каждого линейного размера y_i . Каждая $Z_i(x)$ строится, как описано ранее:

$$Z_i(x) = a_i(x - x_i)^3 + b_i(x - x_i)^2 + c_i(x - x_i) + d_i, \quad x \in [x_i, x_i + 1],$$

где коэффициенты a_i, b_i, c_i, d_i определяются для каждого y_i с использованием алгоритма, обеспечивающего монотонность интерполяции (например, алгоритм Фритча-Карлсона [9]).

Далее, для заданного значения x , для каждого y_i находится соответствующее значение $Z_i(x)$. Эти значения рассматриваются как дискретные значения отклонений, соответствующие линейным размерам y_i . Затем выполняется монотонная кубическая интерполяция по переменной y , используя полученные значения $Z_i(x)$. Таким образом, строится функция $Z(y)$, аналогичная $Z(x)$, интерполирующая зависимость отклонения от линейного размера y для фиксированного диаметрального размера x .

В результате, для любой точки (x, y) в области, ограниченной заданными значениями x_i и y_i , можно оценить значение отклонения z , вычислив сначала $Z_i(x)$ для всех y_i , а затем применив интерполяцию по y для получения $Z(y)$. Таким образом, $Z(y)$ представляет собой искомую оценку отклонения z для точки (x, y) .

Интерполяция зависимости отклонений от угла наклона остается аналогичной описанной в предыдущем ответе, но теперь в качестве входных данных для каждого угла наклона R_i используются не дискретные значения отклонений, а функции $Z(x, y, R_i)$, полученные в результате двумерной интерполяции отклонений для заданного угла. Далее, для фиксированных значений x и y , выполняется интерполяция значений $Z(x, y, R_i)$ по углу R , чтобы получить функцию $Z(R)$, интерполирующую зависимость отклонения от угла наклона для заданных размеров x и y .

Проведя расчеты по предложенному подходу для размеров цилиндра – диаметр 4 мм, длина 18 мм, получаем следующий результат вычислений представленный ниже.

Выбранные интервалы диаметральных размеров (x) 3-5 мм и 5-7 мм. Выбранные ин-

тервалы линейных размеров (y) 15-20 мм и 20-25 мм.

Полученная формула расчета интерполяции на интервале $x \in [3 \dots 5]$ и $y \in [15 \dots 20]$:

1. Интерполяция по x для фиксированного y и R . Для каждого угла R (0, 15, 30, 45, 60, 75, 90) и каждого значения y (15 и 20 мм), применяем алгоритм Фритча-Карлсона по x . Например, $R=0^\circ$, $y=15$ мм, $x_0 = 3$ мм, $x_1 = 5$ мм, $x_2 = 7$ мм, $z_0 = 0.21$ мм, $z_1 = 0.19$ мм, $z_2 = 0.19$ мм, тогда для определения коэффициентов для функции $Z(x)$:

$$1. d_0 = \frac{z_1 - z_0}{x_1 - x_0} = -0.01; d_1 = \frac{z_2 - z_1}{x_2 - x_1} = 0;$$

2. $s_0 = d_0 = -0.01$ – производная на краю интервала; $s_1 = d_1 = 0$

$$3. a_0 = \frac{s_1 + s_0 - 2d_0}{(x_1 - x_0)^2} = \frac{0 - 0.01 + 2 \cdot 0.01}{(5 - 3)^2} = 0.0025;$$

$$4. b_0 = \frac{(3d_0 - 2s_0 - s_1)}{x_1 - x_0} = \frac{(-3 \cdot 0.01 + 2 \cdot 0.01 - 0)}{5 - 3} =$$

$-0.0025;$

$$5. c_0 = s_0 = -0.01;$$

$$6. d_0 = z_0 = 0.21;$$

$$7. Z_0(4) = a_i(4 - x_i)^3 + b_i(4 - x_i)^2 + c_i(4 - x_i) + d_i = 0.0025(4 - 3)^3 - 0.0025(4 - 3)^2 - 0.01(4 - 3) + 0.21 = 0.2;$$

Все этапы повторяем для остальных R и для значений при $y=20$. В результате получаем $Z(4, 15, R)$ и $Z(4, 20, R)$.

Для получения интерполяции при значении $y=18$ повторяем алгоритм. Например, $R=0^\circ$, $x=4$ мм, $y_0 = 15$ мм, $y_1 = 20$ мм, $z_0 = 0.20$ мм, $z_1 = 0.18$ мм:

$$1. d_0 = \frac{0.18 - 0.2}{20 - 15} = 0.004; s_0 = s_1 = -0.004;$$

$$2. a_0 = b_0 = 0; c_0 = -0.004; d_0 = 0.2;$$

$$3. Z_0(18) = 0(18 - 15)^3 + 0(18 - 15)^2 - 0.004(18 - 15) + 0.2 = 0.188$$

Все этапы повторяем для остальных R , в результате получаем $Z(4, 18, R)$. Промежуточный результат представлен в табл. 3.

Таблица 3

Полученные значения $Z(4, 18, R)$

$R, ^\circ$	$Z, \text{мм}$	$R, ^\circ$	$Z, \text{мм}$
0	0.188	60	0.294
15	0.199	75	0.289
30	0.186	90	0.219
45	0.207		

В конце выполняем интерполяцию по R по полученным $Z(4, 18, R)$ с шагом 1° . Визуализация результата представлена на рис. 6. Наименьшее значение отклонения наблюдается при угле наклона 45° , а наибольшее – при 75° .

Упрощенный алгоритм двумерной интерполяции выглядит следующим образом: Для каждого угла R :

- для каждого фиксированного значения y_i : интерполировать $Z(x, y_i, R)$ по $x \rightarrow Z_i(x)$;
- для заданного значения x : вычислить $Z_i(x)$ для всех $y_i \rightarrow$ затем интерполировать полученные данные по $y \rightarrow Z(x, y, R)$ для произвольной пары (x, y) ;
- затем для фиксированных x, y : интерполировать $Z(x, y, R)$ по R , для оценки отклонения при любом промежуточном угле наклона.

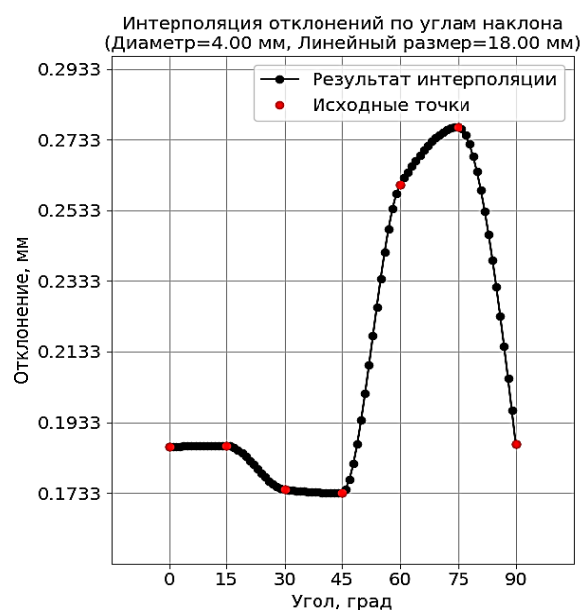


Рис. 6. Результаты монотонной кубической интерполяции по углам наклона

Предложенный двухэтапный подход позволяет эффективно оценивать отклонения и искажения формы цилиндрических объектов без необходимости проведения полного экспериментального анализа.

Заключение

В ходе эксперимента получены количественные данные абсолютных и относительных геометрических погрешностей трехмерной печати цилиндров длиной 5–30 мм и диаметром 3–13 мм при углах наклона к плоскости построения от 0° до 90° .

Установлено, что с ростом габаритов изделия абсолютные отклонения реальных размеров от номинальных возрастают, а относительные – снижаются. Это обосновывает необходимость внедрения в технические задания адаптивной системы допусков, учитывающей длину, диаметр и их соотношение.

Выявлено, что углы наклона 0° и 90° обеспечивают высокую точность печати боковой поверхности цилиндра, однако оптимальный угол, при котором сохраняется постоянный диаметр поперечного сечения, зависит от размеров детали и не является универсальным.

Предложенный метод последовательной интерполяции промежуточных значений геометрических отклонений и искажений формы, основанный на монотонной кубической интерполяции по алгоритму Фритча–Карлсона, позволяет определять оптимальную пространственную ориентацию изделия для обеспечения заданной точности.

Полученные результаты справедливы для печати из PETG на принтере Elegoo Neptune 4 при указанных в работе параметрах; для других материалов, геометрий и устройств необходимы дополнительные эксперименты.

В дальнейшем планируется расширить экспериментальную базу и разработать программное обеспечение для автоматической оптимизации угла наклона, что позволит повысить точность FDM-печати, эффективность аддитивного производства и его доступность.

Литература

1. Измайлов Д.В., Дрыгин Д.А., Ежова К.В. Анализ дефектов поверхности изделия при 3D-печати по их изображениям с использованием методов машинного обучения // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2020. Т. 20. № 4. С. 552-559.
2. Осколков А.А., Безукладников И.И., Трушников Д.Н. Управление температурой в процессе трёхмерной печати на основе изменений электрических параметров нагреваемого сопла // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2020. Т. 16. № 5. С. 19-25.
3. Чердниченко Н.И., Петров П.А. Определение зависимости параметров трехмерной печати от композиции фотополимерного материала // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. 2022. Т. 9. № 1. С. 3-8.
4. Савицкий В.В., Голубев А.Н., Быковский Д.И. Исследование влияния параметров 3D-печати на размерную точность изделий // Вестник Витебского государственного технологического университета. 2018. № 2 (35). С. 52-61.
5. Голубев А.Н., Быковский Д.И. Исследование точности 3D-печати на тестовых моделях // Материалы докладов 50-й Международной научно-технической конференции преподавателей и студентов, посвященной Году науки: в 2 т. / Витебский государственный технический университет. Витебск, 2017. Т. 2. С. 329-331.
6. Зверовщиков А.Е., Шелахаев Д.А., Нестеров С.А. Исследование точности размеров, обеспечиваемых технологией 3D-печати // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2019. № 1 (49). С. 66-78.
7. Анализ факторов, оказывающих влияние на нарушение геометрии изделий в процессе аддитивного построения / А.В. Голунов [и др.] // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2024. № 1. С. 557-561.
8. Осипов А.А. Содержание и особенности системы управления эффективностью инвестиционного процесса в строительстве // Инновационная траектория развития современной науки: становление, проблемы, прогнозы: сб. ст. Междунар. науч.-практ. конф., Петрозаводск, 09 августа 2021 года. Петрозаводск: Международный центр научного партнерства «Новая Наука», 2021. С. 58-62.
9. Сазонова С.А., Николенко С.Д., Осипов А.А. Моделирование технологических приемов по улучшению условий труда на строительном объекте // Моделирование систем и процессов. 2020. Т. 13. № 4. С. 71-83.
10. Чеснокова Е.А., Хатунцева Э.О. Анализ строительной отрасли на основе исследования результатов её развития // Современные тенденции строительства и эксплуатации объектов недвижимости: сб. науч. ст. по материалам науч.-практ. конф., Воронеж, 02 декабря 2016 года. Воронеж: Воронежский государственный технический университет, 2017. С. 156-161.
11. Богданов В.В., Волков Ю.С. Условия формосохранения при интерполяции кубическими сплайнами // Математические труды. 2019. Т. 22. № 1. С. 19-67.

Поступила 11.09.2025; принята к публикации 10.11.2025

Информация об авторах

Вехтева Надежда Андреевна – аспирант, Тамбовский государственный технический университет (392000 Россия, г. Тамбов, ул. Советская, д. 106/5), e-mail: magicanloner@gmail.com, ORCID 0000-0002-9578-1190

Литовка Юрий Владимирович – д-р техн. наук, профессор, Тамбовский государственный технический университет (392000 Россия, г. Тамбов, ул. Советская, д. 106/5), e-mail: polychem@list.ru

MATHEMATICAL MODEL OF THE DEPENDENCE OF PRINTING ERROR ON THE DIMENSIONS AND ANGLE OF THE PRODUCT

N.A. Vekheteva, Yu.V. Litovka

Tambov State Technical University, Tambov, Russia

Abstract: the influence of the dimensions of geometric elements and the spatial orientation (tilt angle to the build platform) of cylindrical products on the accuracy of additive printing using the FDM (Fused Deposition Modeling) method is considered. The relevance of the study is due to the growing use of 3D printing in various industries, including small-scale production, where the shape of products is constantly changing. Quantitative values of absolute and relative deviations of sizes from a given shape were experimentally obtained for cylindrical products with a diameter range from 3 to 13 mm with a step of 2 mm and heights from 5 to 30 mm with a step of 5 mm at tilt angles from 0° to 90° with a step of 15°, using PETG (polyethylene glycol) material on an Elegoo Neptune 4 3D printer. To obtain intermediate values of deviations and shape distortions within the range of measured experimental data, a mathematical model based on sequential monotonic cubic interpolation using the Fritch-Carlson algorithm was developed. The obtained results can be used to optimize printing accuracy and improve product quality in the field of 3D printing

Key words: additive 3D printing, 3D printing optimization, mathematical model, manufacturing accuracy, experimental analysis

References

1. Izmaylov D.V., Drygin D.A., Ezhova K.V. "Analysis of product surface defects during 3D printing from their images using machine learning methods", *Scientific and Technical Bulletin of Information Technologies, Mechanics and Optics (Nauchno-tekhnicheskiy vestnik informatsionnykh tekhnologiy, mekhaniki i optiki)*, 2020, vol. 20, no. 4, pp. 552-559.
2. Oskolkov A.A., Bezukladnikov I.I., Trushnikov D.N. "Temperature control in the process of three-dimensional printing based on changes in the electrical parameters of the heated nozzle", *Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2020, vol. 16, no. 5, p. 19-25.
3. Cherednichenko N.I., Petrov P.A. "Determination of the dependence of three-dimensional printing parameters on the composition of photopolymer material", *Mechanical Engineering: Online Electronic Scientific Journal (Mashinostroenie)*, 2022, vol. 9, no. 1, pp. 3-8.
4. Savitsky V.V., Golubev A.N., Bykovsky D.I. "Study of the influence of 3D printing parameters on the dimensional accuracy of products", *Bulletin of Vitebsk State Technological University (Vestnik Vitebskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta)*, 2018, no. 2 (35), pp. 52-61.
5. Golubev A.N., Bykovsky D.I. "Study of the accuracy of 3D printing on test models", *Proc. of the 50th Int. Sci. and Technical Conf. of Teachers and Students, dedicated to the Year of Science (Materialy dokladov 50-y Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii prepodavateley i studentov, posvyashchennoy Godu nauki)*, Vitebsk State Technical University, 2017, vol. 2, p. 329-331.
6. Zverovshchikov A.E., Shelakhaev D.A., Nesterov S.A. "Study of dimensional accuracy provided by 3D printing technology", *Bulletin of Higher Educational Institutions. Volga Region. Technical Sciences (Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskiye nauki)*, 2019, no. 1 (49), p. 66-78.
7. Golunov A.V. et al. "Analysis of factors influencing violation of product geometry in the process of additive construction", *Bulletin of Tula State University. Technical Sciences (Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskiye nauki)*, 2024, no. 1, p. 557-561.
8. Osipov A.A. "Contents and features of the investment process efficiency management system in construction", *Proc. of the Int. Sci. and Prac. Conf.: Innovative Trajectory of Modern Science Development: Formation, Problems, Forecasts (Innovatsionnaya trayektoriya razvitiya sovremennoy nauki: stanovleniye, problemy, prognozy)*, Petrozavodsk, August 09, 2021, pp. 58-62.
9. Sazonova S.A., Nikolenko S.D., Osipov A.A. "Modeling of technological methods to improve working conditions at a construction site", *Modeling of Systems and Processes (Modelirovanie sistem i protsessov)*, 2020, vol. 13, no. 4, pp. 71-83.
10. Chesnokova E.A., Khatuntseva E.O. "Analysis of the construction industry based on the study of the results of its development", *Proc. of the Sci. and Prac. Conf.: Modern Trends in the Construction and Operation of Real Estate (Sovremennye tendentsii stroitel'stva i ekspluatatsii ob'ektov nedvizhimosti)*, Voronezh, December 02, 2016, pp. 156-161.
11. Bogdanov V.V., Volkov Yu.S. "Conditions of shape preservation in interpolation by cubic splines", *Mathematical Works (Matematicheskie trudy)*, 2019, vol. 22, no. 1, pp. 19-67.

Submitted 11.09.2025; revised 10.11.2025

Information about the authors

Nadezhda A. Vekhteva, graduate student, Tambov State Technical University (106/5 Sovetskaya str., Tambov 392000, Russia), e-mail: magicanloner@gmail.com, ORCID 0000-0002-9578-1190

Yuriy V. Litovka, Dr. Sc. (Technical), Professor, Tambov State Technical University (106/5 Sovetskaya str., Tambov 392000, Russia), e-mail: polychem@list.ru

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНОГО КОЛИЧЕСТВА КЛАСТЕРОВ ПРИ ИДЕНТИФИКАЦИИ ОКРЕСТНОСТНЫХ МОДЕЛЕЙ

И.А. Седых, К.Н. Макаров

Липецкий государственный технический университет, г. Липецк, Россия

Аннотация: рассматривается частный случай окрестностной модели «вход-выход» с одним узлом, двумя входами и одним выходом. На синтетических данных выполнена идентификация и тестирование квадратичной модели. Входные данные генерировались по закону равномерного распределения. Для данной модели проведен анализ влияния выбора количества кластеров на результаты идентификации и прогноза. Для исследования был выбран широко известный метод нечеткой кластеризации – нечетких С-средних. Для определения оптимального количества кластеров рассмотрено несколько методов оценки качества нечеткой кластеризации, а именно: индексы минимизации Xie-Beni, Kwon, Tang-Sun-Sun, рассматривающие внутрикластерную схожесть, и индекс максимизации Fuzzy Simplified Silhouette, анализирующий межкластерное различие. Для сравнения влияния количества кластеров на результаты идентификации и прогноза окрестностной модели параметры идентификации находились до и после нечеткой кластеризации для различного количества кластеров. Представлены графики значений выходов тестовой выборки и выходов, полученных по модели, без кластеризации и при различном количестве кластеров, а также графики ошибок прогноза до и после кластеризации. Для выполнения расчетов была реализована программа на языке программирования Python

Ключевые слова: кластерный анализ, нечеткая кластеризация, алгоритм нечетких С-средних, индекс Xie-Beni, индекс Fuzzy Simplified Silhouette, индекс Kwon, индекс Tang-Sun-Sun, идентификация, окрестностная модель

Введение

Окрестностный подход является развитием теории математического моделирования дискретных распределенных систем. Разработаны методы их параметрической идентификации и смешанного управления. При этом входы, состояния и выходы, а также параметры моделей могут быть как действительными, так и комплексными числами [1].

В работе проводится нечеткая кластеризация окрестностной модели. Кластерный анализ позволяет объединять объекты в кластеры на основе схожести некоторых признаков, свойственных каждому объекту какого-либо множества [2]. Объединение происходит с помощью вычисления расстояния между этими объектами [3]. Нечеткие методы кластеризации позволяют одному и тому же объекту принадлежать одновременно нескольким (или даже всем) кластерам, но с различной степенью принадлежности.

Для оценки качества и компактности кластеров используются четыре индекса качества кластеризации: индексы Xie-Beni, Fuzzy Simplified Silhouette, Kwon, Tang-Sun-Sun [4-5].

В работе выполняется исследование влияния выбора оптимального количества кластеров на результаты идентификации и прогноза, полу-

ченного по модели. Проводится оценка кластеризации для разного количества кластеров, идентификация модели до и после кластеризации.

Все расчеты были выполнены в программе, реализованной на языке программирования Python.

Исходные данные

Рассмотрим окрестностную модель (ОМ) вида «вход-выход», которую можно описать как $NS = (N, V, Y, F)$, где:

$N = (A, O)$ – это структура окрестностной модели, где $A = \{a_1, \dots, a_n\}$ – множество узлов, O – множество окрестностных связей;

$V, Y \in R^n$ – векторы входов и выходов ОМ в текущий момент времени;

F – функция пересчета выходов.

Общий вид функции F для узла a_i окрестностной модели описывается формулой:

$$Y_i = F_i(V_i), \quad (1)$$

$$Y_i = (y_{i_1} \dots y_{i_{r_i}})^T \in R^{r_i}, V_i = (v_{i_1} \dots v_{i_{p_i}})^T \in R^{p_i},$$

где r_i – количество окрестностных связей по выходам, p_i – количество окрестностных связей по входам для узла a_i , $i = 1, \dots, n$.

Общий вид системы представлен формулой:

$$\begin{cases} y_{i_1} = f_{i_1}(v_{i_1}, \dots, v_{i_{p_i}}); \\ \dots \\ y_{i_{r_i}} = f_{i_{r_i}}(v_{i_1}, \dots, v_{i_{p_i}}). \end{cases} \quad (2)$$

В работе рассматривается квадратичная окрестностная модель с одним узлом (рис. 1).

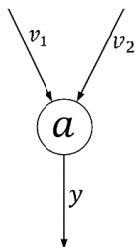


Рис. 1. Окрестностная модель

Частный случай системы (2) общего вида для рассматриваемой модели представлен формулой:

$$y = f(v_1, v_2). \quad (3)$$

В квадратичном случае формула (3) имеет вид:

$$y = a + b \cdot v_1 + c \cdot v_2 + d_{11} \cdot v_1^2 + d_{22} \cdot v_2^2 + d_{12} \cdot v_1 \cdot v_2, \quad (4)$$

где a, b, c, d – параметры модели.

Исследование проводилось на синтетических данных. Объем выборки составляет 10000 строк, фрагмент выборки представлен в табл. 1. Входные данные (v_1, v_2) распределены равномерно, а выходные данные y вычислялись по формуле

$$y = (\sin(v_1))^2 \cdot \log_{10} v_2 + 0.05. \quad (5)$$

Таблица 1
Фрагмент выборки исходных данных

v_1	v_2	y
0,598	9,292	3,568
3,092	4,317	0,516
1,839	7,348	8,554
3,235	4,906	0,560
2,545	5,088	2,727
5,179	8,268	7,818
8,311	2,487	3,686
2,145	8,680	7,115
6,795	1,304	0,777
...		

Данные были разделены на обучающую и тестовую выборки, в отношении 80 % на 20 % соответственно.

Определение оптимального количества кластеров

В работе использовался один из наиболее известных методов кластеризации – метод нечетких С-средних [6]. К недостаткам метода можно отнести необходимость задания количества кластеров C . На практике не всегда известно, на какое оптимальное количество кластеров нужно разделить данные [7]. Задание неправильного C может привести к перекрывающимся кластерам или к случаю, когда точки слишком удалены от центров кластеров [8-10]. Часто используемым подходом к выбору оптимального C является перебор различного количества кластеров и последующий выбор конкретного количества, которое обеспечивает наилучший результат в соответствии с определенным критерием качества.

В статье рассмотрены четыре индекса оценки качества кластеризации: Xie-Beni, Fuzzy Simplified Silhouette, Kwon, Tang-Sun-Sun.

В индексе Xie-Beni компактность и обособленность кластеров измеряются с использованием внутрикластерных отклонений и межкластерного расстояния [11]:

$$V_{XB} = \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^C (u_{ij})^m \|x_i - v_j\|^2}{N \cdot \min_{l \neq s} \|v_l - v_s\|^2}.$$

Меньшие значения индекса указывают на компактные и хорошо разделенные кластеры [12].

Значение силуэта является мерой того, насколько объект похож на свой собственный кластер по сравнению с другими кластерами. Индекс силуэта анализирует расстояния от каждой точки данных до ее собственного кластера и ближайшего соседнего кластера:

$$S_i = \frac{b_{pi} - a_{pi}}{\max\{a_{pi}, b_{pi}\}},$$

где a_{pi} — расстояние между объектом x_i и ближайшим кластером-прототипом v_p , к которому x_i принадлежит наибольшей степени принадлежности, а b_{pi} — расстояние между объектом x_i и вторым ближайшим кластером-прототипом.

Индекс Fuzzy Simplified Silhouette представляет собой нечеткую версию упрощенного силуэта [13]:

$$V_{FSS} = \frac{\sum_{i=1}^N (u_{pi} - u_{qi})^\alpha \cdot S_i}{\sum_{i=1}^N (u_{pi} - u_{qi})^\alpha},$$

где u_{pi} и u_{qi} — первый и второй по величине элементы i -ой строки матрицы нечеткого разбиения, соответственно,

$\alpha \geq 0$ — весовой коэффициент, определяемый пользователем.

Чем больше значение индекса, тем более четко выделены кластеры, и они представляют собой компактные, плотно сгруппированные облака точек.

Индекс Kwon представляет собой модификацию Xie-Beni и определяется как [14]:

$$V_K = \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^C (u_{ij})^m \|x_i - v_j\|^2 + \frac{1}{C} \cdot \sum_{j=1}^C \|v_j - \bar{x}\|^2}{\min_{l \neq s} \|v_l - v_s\|^2},$$

$$\text{где } \bar{x} = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N x_i.$$

Аналогично индексу Kwon, индекс Tang-Sun-Sun является модификацией индекса Xie-Beni [15]:

$$V_{TSS} = \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^C (u_{ij})^m \|x_i - v_j\|^2 + \frac{1}{C \cdot (C-1)} \cdot \sum_{j=1}^C \sum_{l \neq j}^C \|v_j - v_l\|^2}{\min_{l \neq s} \|v_l - v_s\|^2 + \frac{1}{C}},$$

где V_{TSS} — это показатель минимизации.

В работе проводилась оценка качества кластеризации для разного количества кластеров от двух до десяти. В табл. 2 представлены результаты.

Таблица 2

Результаты оценки качества кластеризации

Кол-во кластеров	Xie-Beni	Fuzzy Simplified Silhouette	Kwon	Tang-Sun-Sun
2	0,276	0,577	2767,073	2701,334
3	0,119	0,623	1196,173	1180,915
4	0,083	0,646	829,503	820,234
5	0,145	0,610	1454,343	1425,661
6	0,107	0,634	1071,278	1054,032
7	0,118	0,630	1191,861	1169,682
8	0,085	0,632	861,326	847,827
9	0,074	0,641	741,679	730,504
10	0,102	0,637	1029,890	1009,102

Как видно из табл. 2, в случае девяти кластеров получены оптимальные значения для индексов минимизации, то есть получаются компактные и хорошо разделенные кластеры. Самый неудовлетворительный результат получен при двух кластерах. В случае с индексом Fuzzy Simplified Silhouette наилучший результат получен при разделении выборки на четыре кластера.

Сравнение результатов кластеризации

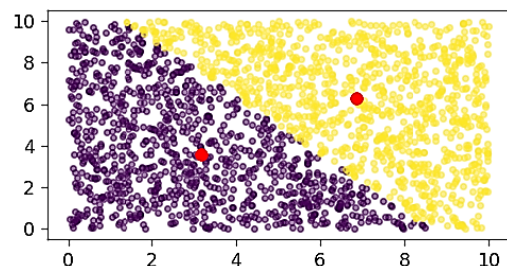
По обучающей выборке найдены центры кластеров, на основании которых выполнена кластеризация тестовой выборки. Для сравнительного анализа в работе количество кластеров выбрано на основе оценки качества кластеризации: наилучшее по индексам минимизации (девять), наихудшее (два) и наилучшее по индексу максимизации (четыре). В табл. 3 показаны центры кластеров, полученные при разбиении выборки на кластеры.

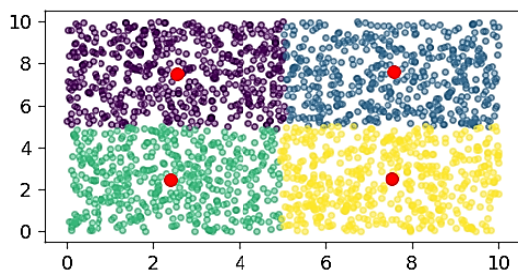
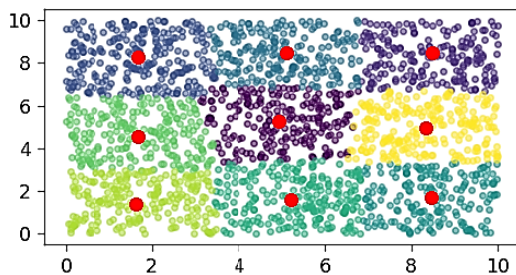
Таблица 3

Центры кластеров

Количество кластеров					
2		4		9	
3,163	3,600	2,568	7,514	4,955	5,253
6,870	6,304	7,590	7,595	8,483	8,473
		2,396	2,451	1,685	8,296
		7,533	2,492	5,134	8,482
				8,457	1,714
				5,217	1,616
				1,676	4,563
				1,634	1,395
				8,338	4,955

На рис. 2-4 представлены результаты кластеризации тестовой выборки с разным количеством кластеров.

Рис. 2. Результаты кластеризации с $C = 2$

Рис. 3. Результаты кластеризации с $C = 4$ Рис. 4. Результаты кластеризации с $C = 9$

Идентификация окрестностной модели

Идентификация объектов – это построение оптимальных математических моделей по реализациям их входных и выходных данных. В конечном итоге задача сводится к оценке степени идентичности модели реальному объекту.

В работе рассматривается квадратичная окрестностная модель (4). Для ее идентификации необходимо для узла a решить переопре-

деленную систему линейных уравнений: $L \cdot A = Y$, где

$$A \in R^6, L = \begin{bmatrix} 1 & v_1^1 & v_2^1 & (v_1^1)^2 & (v_1^1)^2 & v_1^1 \cdot v_2^1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & v_1^M & v_2^1 & (v_1^M)^2 & (v_1^M)^2 & v_1^M \cdot v_2^M \end{bmatrix},$$

$$Y = \begin{bmatrix} y^1 \\ \vdots \\ y^M \end{bmatrix}, M - \text{объем выборки.}$$

Матрицу параметров A находим по формуле

$$A = L^+ \cdot Y, \quad (6)$$

где $L^+ = (L^T \cdot L)^{-1} \cdot L^T$ – псевдообратная матрица L .

Для поиска ошибок идентификации необходимо получить модельные значения функции пересчета состояния \hat{Y} по формуле (7) для найденных параметров A и сравнить с исходными данными Y . Для нахождения среднеквадратичной ошибки (MSE) используется формула (8).

$$\hat{Y} = L \cdot A, \quad (7)$$

$$\text{MSE} = \frac{1}{M} \cdot \sum_{j=1}^M |y_j - \hat{y}_j|^2. \quad (8)$$

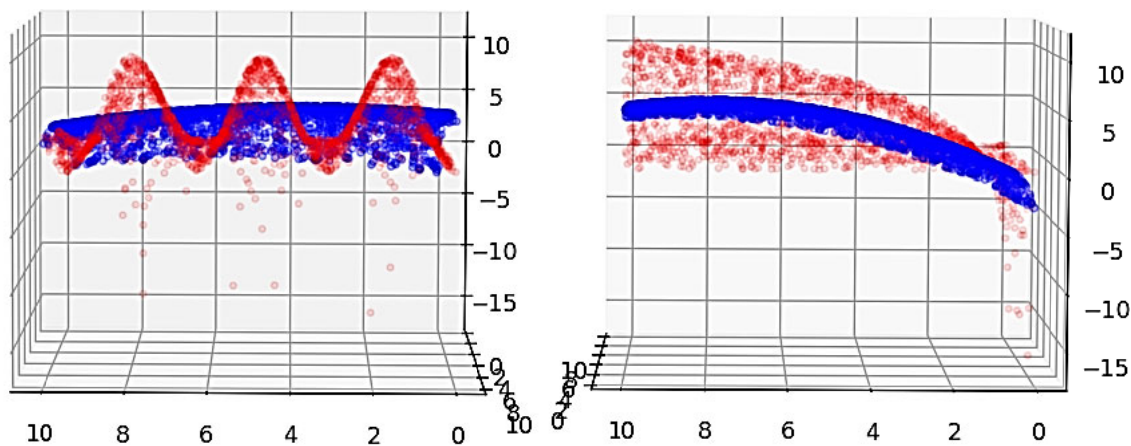
В работе проводилась идентификация до и после кластеризации. По обучающей выборке находились параметры модели и на основе них был выполнен прогноз для тестовой выборки и рассчитаны ошибки прогноза.

В табл. 4 приведены ошибки прогноза до и после кластеризации при разном количестве кластеров.

Таблица 4

Ошибки прогноза				
Наименование ошибки	До кластеризации	После кластеризации		
		2 кластера	4 кластера	9 кластеров
MSE	6,661	6,346	5,881	2,308

Ниже представлены графики значений Y и \hat{Y} для тестовой выборки до и после кластеризации (рис. 5-8), а также графики ошибок прогноза до и после кластеризации (рис. 9).

Рис. 5. График Y и \hat{Y} для тестовой выборки до кластеризации

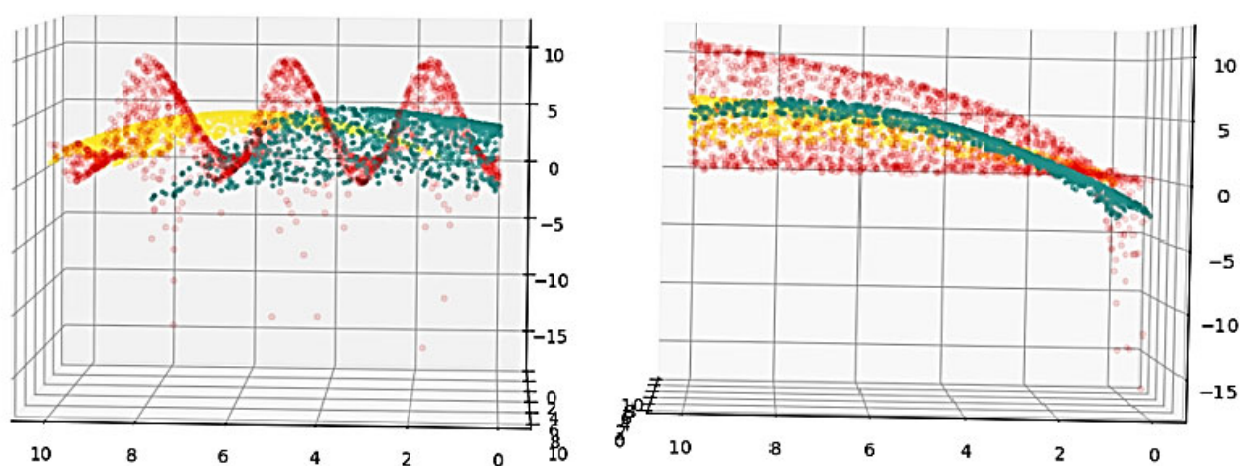


Рис. 6. График Y и \hat{Y} для тестовой выборки при двух кластерах

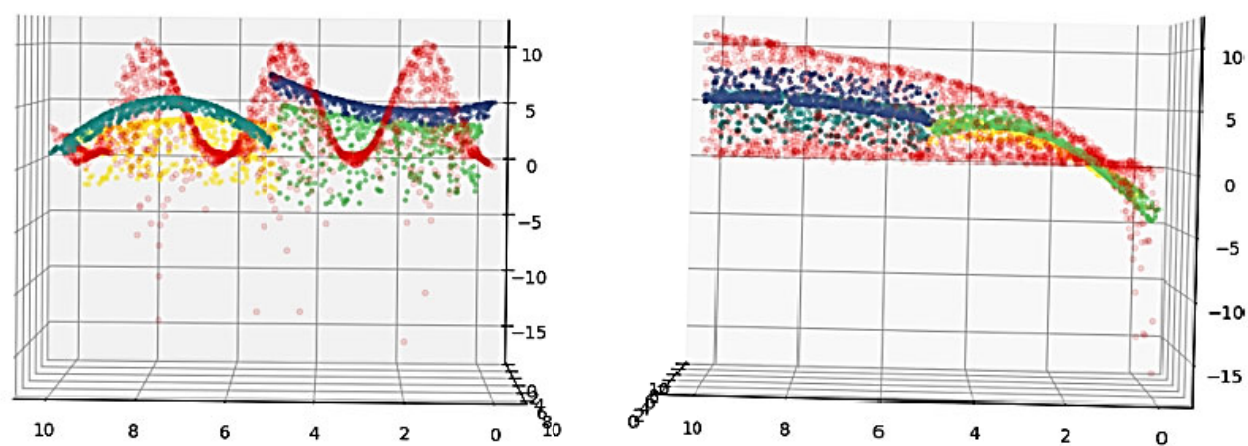


Рис. 7. График Y и \hat{Y} для тестовой выборки при четырех кластерах

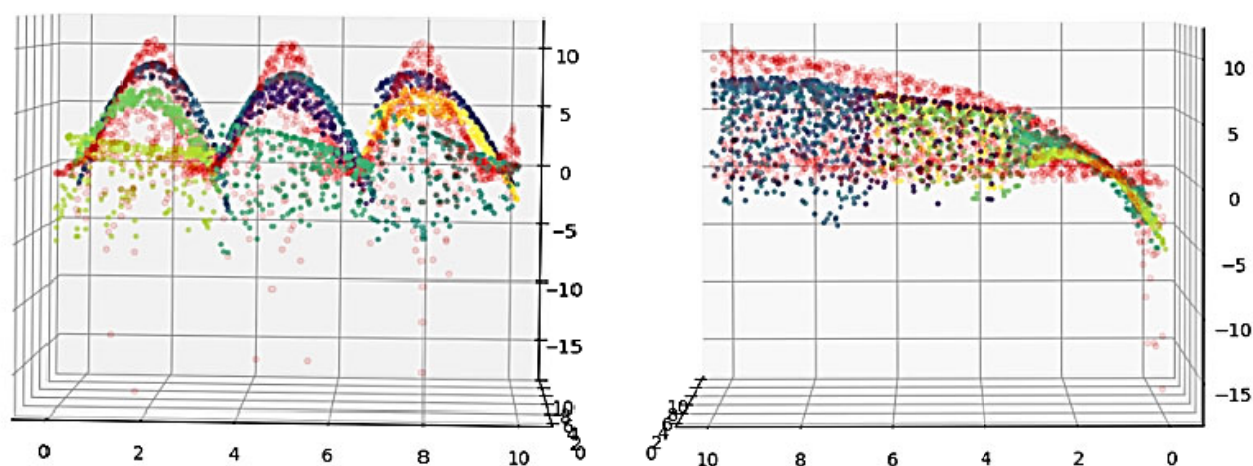


Рис. 8. График Y и \hat{Y} для тестовой выборки при девяти кластерах

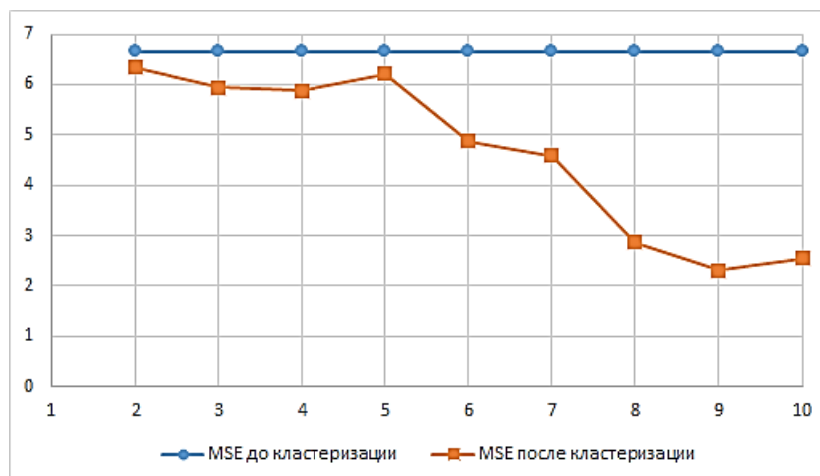


Рис. 9. График MSE прогноза при разном количестве кластеров

Из рис. 5-9 видно, что для рассматриваемой выборки оптимальным является четыре кластера, что и было получено в результате исследования качества кластеризации по индексу Fuzzy Simplified Silhouette. Ошибка MSE прогноза при этом составила 5,881. Время выполнения расчетов 28,04 секунды.

Конечно, можно выбрать для построения модели и девять кластеров, как показывают индексы минимизации. При этом ошибка MSE прогноза уменьшается приблизительно в 2,5 раза и составила 2,308, что является существенным в некоторых исследованиях. Однако разбиение на большее количество кластеров требует дополнительных вычислительных и временных ресурсов. Здесь время выполнения расчетов составило 285,38 секунд. Поэтому при определении оптимального количества кластеров при решении задачи идентификации следует учитывать допустимую точность прогноза и времени вычислений.

Заключение

В исследовании с помощью методов оценки качества нечеткой кластеризации на основе нечетких С-средних и в результате идентификации окрестностной модели на кластеризованных данных определено оптимальное количество кластеров для рассматриваемой выборки.

Идентификация данных с нечеткой кластеризацией может быть использована в задачах, где требуется нечеткое распознавание, гибкая классификация с учетом неопределенности данных и анализа сложных, перекрывающихся шаблонов. Одной из областей применения является биометрия и безопасность, в

частности, распознавание лиц с нечеткими признаками.

Литература

1. Седых И.А., Макаров К.Н. Идентификация квадратичных комплекснозначных динамических окрестностных моделей на кластеризованных данных и без кластеризации // Управление большими системами. Выпуск 111. М.: ИПУ РАН, 2024. С. 66-80.
2. Седых И.А., Макаров К.Н. Нечеткая кластеризация комплекснозначных данных // Вести учебных заведений Черноземья. 2023. Т. 19. № 2 (72). С. 46-57.
3. Седых И.А., Макаров К.Н. Кластеризация комплексных данных методом k-средних // Вестник Липецкого государственного технического университета. 2022. № 2 (48). С. 5-11.
4. Vendramin L., Naldi M.C., Campello R.J.G.B. Fuzzy Clustering Algorithms and Validity Indices for Distributed Data // Partitional Clustering Algorithms / Ed. by M. Celebi. — Springer, Cham, 2015. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-319-09259-1_5 (дата обращения: 11.11.2025).
5. Xie X.J., Wang Y., Zhong L. A New Fuzzy Clustering Validity Index with Strong Robustness // Fuzzy Information & Engineering and Operations Research & Management / Ed. by B.Y. Cao, H. Nasseri. Advances in Intelligent Systems and Computing, vol. 211. Springer, Berlin, Heidelberg, 2014. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-642-38667-1_31 (дата обращения: 11.11.2025).
6. Kenger O.N., Ozceylan E. A Comparative Analysis of Fuzzy C-Means, K-Means, and K-Medoids Clustering Algorithms for Analysis Countries' COVID-19 Risk // Intelligent and Fuzzy Techniques for Emerging Conditions and Digital Transformation / Ed. by C. Kahraman, S. Cebi, S. Cevik Onar, B. Oztaysi, A.C. Tolga, I.U. Sari. INFUS 2021. Lecture Notes in Networks and Systems, vol. 307. Springer, Cham, 2022. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-030-85626-7_4 (дата обращения: 11.11.2025).
7. Liu Xy., Fan Jc., Chen Zw. Improved fuzzy C-means algorithm based on density peak // Int. J. Mach. Learn. & Cyber. 2020. Vol. 11. P. 545-552. URL: <https://doi.org/10.1007/s13042-019-00993-8> (дата обращения: 11.11.2025).
8. Sardar T.H., Ansari Z. MapReduce-based Fuzzy C-means Algorithm for Distributed Document Clustering //

J. Inst. Eng. India Ser. B. 2022. Vol. 103. P. 131–142. URL: <https://doi.org/10.1007/s40031-021-00651-0> (дата обращения: 11.11.2025).

9. Xu D., Tian Y. A Comprehensive Survey of Clustering Algorithms // Ann. Data. Sci. 2015. Vol. 2. P. 165–193. URL: <https://doi.org/10.1007/s40745-015-0040-1> (дата обращения: 11.11.2025).

10. A novel hybrid multi-verse optimizer with K-means for text documents clustering / A.K. Abasi, A.T. Khader [et al.] // Neural Comput & Applic. 2020. Vol. 32. P. 17703–17729. URL: <https://doi.org/10.1007/s00521-020-04945-0> (дата обращения: 11.11.2025).

11. Muranishi M., Honda K., Notsu A. Xie-Beni-Type Fuzzy Cluster Validation in Fuzzy Co-clustering of Documents and Keywords // Soft Computing in Artificial Intelligence / Ed. by Y. Cho, E. Matson. Advances in Intelligent Systems and Computing, vol. 270. Springer, Cham, 2014. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-319-05515-2_4 (дата обращения: 11.11.2025).

12. Br Sitepu K.A., Sitompul O.S., Situmorang Z. Analysis of Fuzzy C-Means and Analytical Hierarchy Process

(AHP) Models Using Xie-Beni Index // 2019 International Conference of Computer Science and Information Technology (ICoSNiKOM), 2019. pp. 1–6.

13. Starczewski A., Przybyszewski K. Improvement of the Simplified Silhouette Validity Index // Artificial Intelligence and Soft Computing / Ed. by L. Rutkowski, R. Scherer, M. Korytkowski, W. Pedrycz, R. Tadeusiewicz, J. Zurada. ICAISC 2018. Lecture Notes in Computer Science, vol. 10842. — Springer, Cham, 2018. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-319-91262-2_39 (дата обращения: 11.11.2025).

14. Kwon S.H., Kim J., Son S.H. Improved cluster validity index for fuzzy clustering // Electronics Letters. 2021. Vol. 57. No. 21. pp. 792–794.

15. Rustam, Gunawan A.Y., Kresnowati M.T.A.P. Data dimensionality reduction technique for clustering problem of metabolomics data // Heliyon. 2022. Vol. 8. № 6. Art. e09715. DOI: 10.1016/j.heliyon.2022.e09715. PMID: 35721675. PMCID: PMC9201019.

Поступила 28.04.2025; принята к публикации 10.11.2025

Информация об авторах

Седых Ирина Александровна – д-р техн. наук, профессор кафедры автоматизированных систем управления, Липецкий государственный технический университет (398055, Россия, г. Липецк, ул. Московская, д. 30), e-mail: sedykh-irina@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0012-8103>

Макаров Кирилл Николаевич – аспирант кафедры автоматизированных систем управления, Липецкий государственный технический университет (398055, Россия, г. Липецк, ул. Московская, д. 30), e-mail: kirik0-1@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-9556-7910>

DETERMINING THE OPTIMAL NUMBER OF CLUSTERS WHEN IDENTIFYING NEIGHBORHOOD MODELS

I.A. Sedykh, K.N. Makarov

Lipetsk State Technical University, Lipetsk, Russia

Abstract: in this paper, we consider a special case of an input-output neighborhood model with one node, two inputs, and one output. Identification and testing of the quadratic model was performed on synthetic data. The input data was generated according to the law of uniform distribution. For this model, the analysis of the influence of the choice of the number of clusters on the results of identification and forecasting is carried out. The well-known fuzzy clustering method, fuzzy C-means, was chosen for the study. To determine the optimal number of clusters, several methods for assessing the quality of fuzzy clustering have been considered, namely: the Xie-Beni, Kwon, and Tang-Sun-Sun minimization indices, which consider intracluster similarity, and the Fuzzy Simplified Silhouette maximization index, which considers intercluster difference. To compare the effect of the number of clusters on the results of identification and prediction of the neighborhood model, the identification parameters were determined before and after fuzzy clustering for a different number of clusters. Graphs of the outputs of the test sample and outputs obtained from the model, without clustering and with a different number of clusters, as well as graphs of forecast errors before and after clustering are presented. A program in the Python programming language was implemented to perform the calculations

Key words: cluster analysis, fuzzy clustering, fuzzy C-means algorithm, Xie-Beni index, Fuzzy Simplified Silhouette Index, Kwon index, Tang-Sun-Sun index, identification, neighborhood model

References

1. Sedykh I.A., Makarov K.N. “Identification of quadratic complex-valued dynamic neighborhood models on clustered data and without clustering”, *Management of Large Systems (Upravleniye bol'shimi sistemami)*, issue 111, Moscow: IPU RAS, 2024. pp. 66–80.

2. Sedykh I.A., Makarov K.N. “Fuzzy clustering of complex-valued data”, *News of Educational Institutions of the Chernozem Region (Vesti uchebnykh zavedeniy Chernozem'ya)*, 2023, vol. 19, no. 2 (72), pp. 46–57.

3. Sedykh I.A., Makarov K.N. "Clusterization of complex data by the k-means method", *Bulletin of Lipetsk State Technical University (Vestnik Lipetskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2022, no. 2 (48), pp. 5-11.
4. Vendramin L., Naldi M.C., Campello R.J.G.B. "Fuzzy clustering algorithms and validity indices for distributed data", *Partitional Clustering Algorithms*, Springer, Cham, 2015, available at: https://doi.org/10.1007/978-3-319-09259-1_5.
5. Xie X.J., Wang Y., Zhong L. "A new fuzzy clustering validity index with strong robustness", *Fuzzy Information & Engineering and Operations Research & Management. Advances in Intelligent Systems and Computing*, 2014, vol. 211, Springer, Berlin, Heidelberg, available at: https://doi.org/10.1007/978-3-642-38667-1_31.
6. Kenger O.N., Cebi S., Cevik Onar S., Oztaysi B., Tolga A.C., Sari I.U., Ozceylan E. "A comparative analysis of fuzzy C-means, K-means, and K-medoids clustering algorithms for analysis countries' COVID-19 risk", *Intelligent and Fuzzy Techniques for Emerging Conditions and Digital Transformation, INFUS 2021. Lecture Notes in Networks and Systems*, 2022, vol. 307, Springer, Cham, 2022, available at: https://doi.org/10.1007/978-3-030-85626-7_4.
7. Liu Xy., Fan Jc., Chen Zw. "Improved fuzzy C-means algorithm based on density peak", *Int. J. Mach. Learn. & Cyber.*, 2020, vol. 11, pp. 545–552, available at: <https://doi.org/10.1007/s13042-019-00993-8>.
8. Sardar T.H., Ansari Z. "MapReduce-based fuzzy C-means algorithm for distributed document clustering", *J. Inst. Eng. India Ser. B.*, 2022, vol. 103, pp. 131–142, available at: <https://doi.org/10.1007/s40031-021-00651-0>.
9. Xu D., Tian Y. "A comprehensive survey of clustering algorithms", *Ann. Data. Sci.*, 2015, vol. 2, pp. 165–193, available at: <https://doi.org/10.1007/s40745-015-0040-1>.
10. Abasi A.K., Khader A.T., Al-Betar M.A. et al. "A novel hybrid multi-verse optimizer with K-means for text documents clustering", *Neural Comput. & Applic.*, 2020, vol. 32, pp. 17703–17729, available at: <https://doi.org/10.1007/s00521-020-04945-0>.
11. Muranishi M., Honda K., Notsu A. "Xie-Beni-Type fuzzy cluster validation in fuzzy co-clustering of documents and keywords", *Soft Computing in Artificial Intelligence, Advances in Intelligent Systems and Computing*, 2014, vol. 270, Springer, Cham, available at: https://doi.org/10.1007/978-3-319-05515-2_4.
12. Br Sitepu K.A., Sitompul O.S., Situmorang Z. "Analysis of fuzzy C-means and analytical hierarchy process (AHP) models using Xie-Beni index", *2019 International Conference of Computer Science and Information Technology (ICoSNiKOM)*, pp.1-6, 2019.
13. Starczewski A., Przybyszewski K. "Improvement of the simplified silhouette validity index", *Artificial Intelligence and Soft Computing, ICAISC 2018. Lecture Notes in Computer Science*, 2018, vol. 10842, Springer, Cham, available at: https://doi.org/10.1007/978-3-319-91262-2_39.
14. Kwon S.H., Kim J., Son S.H. "Improved cluster validity index for fuzzy clustering," *Electronics Letters*, 2021, vol. 57, no. 21, pp. 792–794.
15. Rustam, Gunawan A.Y., Kresnowati M.T.A.P. "Data dimensionality reduction technique for clustering problem of metabolomics data", *Heliyon*, 2022, vol. 8, no.6, art. e09715.

Submitted 28.04.2025; revised 10.11.2025

Information about the authors

Irina A. Sedykh, Dr. Sc. (Technical), Associate Professor, Lipetsk State Technical University (30 Moskovskaya St., Lipetsk, 398055, Russia), e-mail: sedykh-irina@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0012-8103>

Kirill N. Makarov, graduate student Lipetsk State Technical University (30 Moskovskaya St., Lipetsk, 398055, Russia), e-mail: kirik0-1@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-9556-7910>

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ УПРАВЛЕНИЯ ПОДСИСТЕМОЙ АККУМУЛЯТОРНЫХ БАТАРЕЙ В СОСТАВЕ АВТОНОМНОЙ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

А.К. Тищенко¹, Р.Ю. Кузьменко¹, Е.М. Васильев²

¹АО «Орбита», г. Воронеж, Россия,

²Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

Аннотация: решается задача построения инженерной модели функционирования аккумуляторных батарей, пригодной для её практического использования при исследовании процессов управления в автономных системах электроснабжения. В качестве конкретного объекта исследования выбрана батарея с перспективными герметичными никель-водородными аккумуляторами, не требующими прямого обслуживания в процессе эксплуатации. Показано, что теплоэнергетическая часть общей модели функционирования такой батареи может быть представлена неоднородным дифференциальным уравнением первого порядка с нелинейной правой частью, определяемой внутренним тепловыделением аккумуляторов при заряде и разряде. Для аппроксимации отмеченной нелинейности предложена функция квадратичного вида, на основе экспериментальных данных идентифицированы её параметры, и приведено численное решение дифференциального уравнения. Для электроэнергетической части модели использована базовая алгебраическая модель Нернста, в которую введены слагаемые, отражающие омические потери напряжения в аккумуляторе, а также сомножитель степенного вида, определяющий нелинейное влияние степени заряженности аккумулятора на его напряжение. Взаимосвязь тепловой и электрической частей модели реализована путём включения тока в тепловую часть модели и температуры – в электрическую часть. На построенной модели проведено исследование процессов управления аккумуляторной батареей в номинальном режиме поочередного заряда и разряда, в циклическом режиме с недостаточным зарядом и в режиме длительного хранения заряда в охлаждённом состоянии батареи. Представлены результаты указанных исследований, подтверждающие адекватность предложенных моделей

Ключевые слова: автономные системы электроснабжения, подсистема аккумуляторных батарей, никель-водородный аккумулятор, управление циклическими зарядами и разрядами аккумулятора

Введение

Потребность в надёжно функционирующих автономных системах электроснабжения обусловлена возрастающей сложностью пространственно и хронологически длительно обособленных объектов и мобильных средств, требующих для выполнения своих функций бесперебойного обеспечения электрической энергией значительной мощности [1].

Независимо от природы первичного источника энергии (например, атомная, солнечная или тепловая), необходимым условием бесперебойного обеспечения является наличие подсистемы электрохимических аккумуляторных батарей, которая является в настоящее время неотъемлемой частью автономных систем электроснабжения [2, 3].

Циклический принцип действия аккумуляторных батарей, предусматривающий многократное повторение процессов заряда и разряда во взаимодействии с первичным источником энергии требует разработки алгоритмов управления этими процессами, что в свою очередь предполагает создание соответствующих моде-

лей, описывающих состояние батарей в различных режимах указанного взаимодействия [4, 5].

Наиболее актуально потребность в таком управлении ощущается в системах электроснабжения космических аппаратов, в которых длительное и непрерывное функционирование батарей характеризуется десятками тысяч циклов заряда и разряда, приводящих к быстрой деградации аккумуляторов при отсутствии надлежащего управления [6, 7, 8].

Широко известным видом аккумуляторных батарей, удовлетворяющих требованиям эксплуатации в космосе, являются никель-водородные батареи, отличающиеся высокой надёжностью и относительно низкими затратами на изготовление и эксплуатацию [9]. Необходимость исследований по моделированию и разработке алгоритмов управления процессами в этих батареях отмечается, в частности, в работах [7, 10].

Модели функционирования никель-водородных батарей рассмотренные, например, в статье [11], используют статические регрессионные зависимости, связывающие напряжение на аккумуляторе и мощность тепловых потерь в нём с токами заряда и разряда, температурой и степенью заряженности.

В работе [12] предложены распределенные тепловые модели аккумуляторной батареи, требующие использования программного комплекса Comsol Multiphysics.

Предлагаемая статья посвящена развитию результатов, полученных в упомянутых выше работах, и содержит решение следующих задач:

1) составление удобной для инженерной практики динамической модели никель-водородной аккумуляторной батареи как объекта управления;

2) использование модели для исследования переходных и установившихся процессов в подсистеме аккумуляторных батарей в различных режимах её циклического заряда-разряда и режима хранения энергии.

Теплоэнергетическая модель батареи

Будем рассматривать батарею как эквивалентную гомогенную физическую систему массой m (кг), обладающей удельной теплоёмкостью c (Дж/(кг·К)) при постоянном объёме.

Тогда для изменения температуры T внутренней среды батареи на значение dT путём теплопередачи потребуется сообщить ей количество теплоты dQ :

$$dQ = cm \cdot dT. \quad (1)$$

Указанное количество dQ теплоты определяется двумя составляющими: изменением внутренней энергии $dQ_{\text{внутр}}$ в результате выделения или поглощения теплоты в ходе электрохимических преобразований в аккумуляторах батареи, и изменением $dQ_{\text{ср}}$ в результате передачи тепла от батареи во внешнюю среду – охлаждающую плиту, температуру $T_{\text{ср}}$ которой примем постоянной.

В соответствии с законом сохранения энергии:

$$dQ = dQ_{\text{внутр}} - dQ_{\text{ср}}. \quad (2)$$

В то же время по закону Ньютона-Рихмана для теплопередачи имеем:

$$dQ_{\text{ср}} = kS(T - T_{\text{ср}}) \cdot dt, \quad (3)$$

где k – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·К);

S – эквивалентная площадь условной теплопроводной поверхности, через которую осуществляется теплообмен батареи с внешней средой, м²;

dt – рассматриваемый интервал времени, на котором осуществляется теплообмен, с.

Подставляя (1) и (3) в (2) получим:

$$cm \cdot dT = dQ_{\text{внутр}} - kS(T - T_{\text{ср}}) \cdot dt, \quad (4)$$

или, в дифференциальной форме:

$$\frac{cm}{kS} \cdot \frac{dT(t)}{dt} + T(t) = \frac{1}{kS} \cdot \frac{dQ_{\text{внутр}}(t)}{dt} + T_{\text{ср}}. \quad (5)$$

Отметим, что первое слагаемое в правой части дифференциального уравнения (5) содержит мощность $W_{\text{внутр}}(t)$ внутреннего тепловыделения:

$$\frac{1}{kS} \cdot \frac{dQ_{\text{внутр}}(t)}{dt} = \frac{1}{kS} \cdot W_{\text{внутр}}(t), \quad (6)$$

и имеет размерность температуры.

Введём обозначения:

$$\frac{cm}{kS} = T_i; \quad \frac{1}{kS} \cdot \frac{dQ_{\text{внутр}}(t)}{dt} = T_{\text{внеш}}(t), \quad (7)$$

где T_i – постоянная времени тепловых процессов, с;

$T_{\text{внеш}}(t)$ – нестационарная температура внешнего источника теплоты, к которому приведён внутренний источник теплоты.

В результате подстановки (7) в (6) и дополнительного обозначения:

$$T_{\text{внеш}}(t, I) + T_{\text{ср}} = T_{\text{эв}}(t, I), \quad (8)$$

получим простое для идентификации параметров и численного решения дифференциальное уравнение первого порядка:

$$T_i \cdot \frac{dT(t)}{dt} + T(t) = T_{\text{эв}}(t). \quad (9)$$

В частности, для батареи из 72-х последовательно соединённых 1,5-вольтовых никель-водородных аккумуляторов правая часть уравнения (9) в режиме заряда током I_3 аппроксимируется нелинейной функцией:

$$T_{\text{эв},i} = T_{\text{эв},i-1} [1 + (z_1 + T_{\text{эв},i-1}) \cdot \alpha(I_{3,i-1}) \cdot z_2], \quad (10)$$

в которой множитель $\alpha(I_3)$ имеет вид квадратичной функции от тока I_3 заряда:

$$\alpha(I_{3,i-1}) = z_3 I_{3,i-1} + z_4 I_{3,i-1}^2. \quad (11)$$

Параметры z_1, z_2, z_3, z_4 – постоянные коэффициенты.

Для режима разряда выражения, аналогичные (10) и (11), имеют вид (12), (13) и содержат величину тока I_p разряда:

$$T_{\text{эв},i} = T_{\text{эв},i-1} [1 + (r_1 + T_{\text{эв},i-1}) \cdot \beta(I_{p,i-1}) \cdot r_2], \quad (12)$$

$$\beta(I_{p,i-1}) = r_3 I_{p,i-1} - r_4 I_{p,i-1}^2, \quad (13)$$

где r_1, r_2, r_3, r_4 постоянные параметры.

При решении дифференциального уравнения (9) переходы между режимами заряда и разряда осуществляются подстановкой в (9) выражений (10) или (12) соответственно.

Результаты решения уравнения (9) для отдельно рассматриваемых режимов заряда и разряда показаны на рис. 1.

Графики на рис. 1 соответствуют параметрам $z_1 = 70$ °C; $z_2 = 2 \cdot 10^{-6}$ 1/°C; $z_3 = 0,025$ 1/A; $z_4 = 0,0017$ 1/A²; $r_1 = 2750$ °C; $r_2 = 1,77 \cdot 10^{-7}$ 1/°C; $r_3 = 0,067$ 1/A; $r_4 = 0,001$ 1/A².

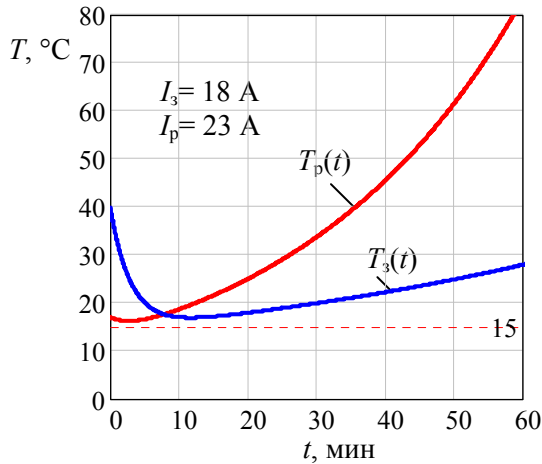


Рис. 1. Изменение температуры батареи в процессе заряда ($T_3(t)$) и разряда ($T_p(t)$)

Использовались граничные условия: $T_3(0) = 17$ °C; $I_3(t) = 18$ A; $T_p(0) = 40$ °C; $I_p(t) = 23$ A; $T_i = 180$ с; заряженность (ёмкость) G батареи в начале процесса заряда $G(0) = 13$ А·ч, в начале процесса разряда $G(0) = 27$ А·ч. Номинальная ёмкость батареи $G_{ном} = 41$ А·ч.

Электроэнергетическая модель батареи

Для построения зарядно-разрядной характеристики $U(G)$ изменения напряжения U батареи от её заряженности G воспользуемся базовой электроэнергетической моделью для одного аккумулятора, представленной в работе [13]:

$$U_{ак} = E + \frac{R \cdot (T + 273)}{\phi_1 F} \cdot \ln P + R_{ак} I, \quad (14)$$

где E – ЭДС электрохимической пары «никель-водород», $E = 1,5$ В;

R – универсальная газовая постоянная, $R = 8,314$ Дж/(моль·К);

T – температура внутренней среды аккумулятора, °C;

ϕ_1 – постоянный коэффициент;

F – постоянная Фарадея, $F = 96485$ Кл/моль;

P – давление в аккумуляторе, кг/см²;

$R_{ак}$ – внутреннее сопротивление аккумулятора, Ом;

I – ток, протекающий через аккумулятор (положительный при заряде, отрицательный при разряде), А.

Введём в модель (14) поправочные элементы, определяемые экспериментально, и учитывающие нелинейное влияние на напряжение заряженности G батареи, а также постоянную составляющую ϕ_3 :

$$U_{ак} = E + \frac{R \cdot (T + 273)}{\phi_1 F} \cdot \left(\frac{G}{G_{ном}} \right)^{\phi_2} \cdot \ln P + R_{ак} I - \phi_3, \quad (15)$$

Взаимосвязь между переменными в (15), а также между тепловыми (9) и электрическими (15) процессами в аккумуляторе с достаточной для практики точностью определим выражениями

$$R_{ак} = \gamma_1 (1 - \gamma_2 T); \quad (16)$$

$$P = \sigma G, \quad (17)$$

с постоянными коэффициентами $\gamma_1 = 6,5 \cdot 10^{-3}$ Ом, $\gamma_2 = 1 \cdot 10^{-4}$ 1/°C; $\sigma = 1,55$ (кг/м²)/(А·ч).

Текущая ёмкость G аккумулятора в (15) в момент времени t вычисляется с учётом тока I_{cp} саморазряда:

$$G(t) = G(0) + \int_0^t (\eta I - I_{cp}) dt. \quad (18)$$

При численном интегрировании с шагом h (в секундах) выражение (18) приобретает вид:

$$G_i = G_{i-1} + \frac{h}{60 \cdot 60} \cdot (\eta I_{i-1} - I_{cp}). \quad (19)$$

Коэффициент $\eta = [0; 1]$, характеризующий эффективность зарядно-разрядного процесса зависит от текущей заряженности аккумулятора и его температуры.

Экспериментально для рабочих диапазонов аккумулятора определены зависимости η_z для заряда и η_p для разряда:

$$\eta_z = 1 - z_5 \left(\frac{G}{G_{ном}} + z_6 T - z_7 \right), \quad (20)$$

$$\eta_p = r_5 \left(1 + e^{-r_6 \frac{G}{G_{ном}}} \right) - r_7 T. \quad (21)$$

Поскольку рассматриваемый вариант батареи содержит 72 последовательно соединённых аккумулятора, то полное напряжение U батареи принято равным $U = 72 U_{ак}$.

Исследование работы батареи в различных режимах

Для полного представления процессов в аккумуляторной подсистеме электроснабжения

с никель-водородными батареями рассмотрим три наиболее характерных режима её работы:

1) номинальный режим непрерывного попеременного заряда и разряда;

2) режим недостаточного заряда, при котором в процессе заряда батарея получает меньше электрической энергии, чем отдаёт её в процессе разряда;

3) режим длительного (дежурного) хранения заряда, в течение которого батарея не отдаёт ток в нагрузку, и подключается к системе электроснабжения только при необходимости.

На рис. 2 представлен фрагмент непрерывного циклического процесса заряда и разряда с соответствующими токами $I_3 = 18$ А, $I_p = 23$ А.

Длительность интервала заряда составляет 56 мин, длительность разряда 36 мин. При выбранных токах заряда и разряда указанные длительности этих процессов изменяют заряженность $G(t)$ батареи в пределах 12...27 А·ч, что при номинальной ёмкости $G_{\text{ном}} = 41$ А·ч, соответствует щадящему режиму её эксплуатации.

Максимальный заряд батареи ограничен давлением $P_{\text{макс}} = 42$ кг/м², при достижении которого при $t = 50$ мин заряд прекращается, и до начала разряда ($t = 56$ мин) батарея не отдаёт ток в нагрузку и находится в режиме саморазряда.

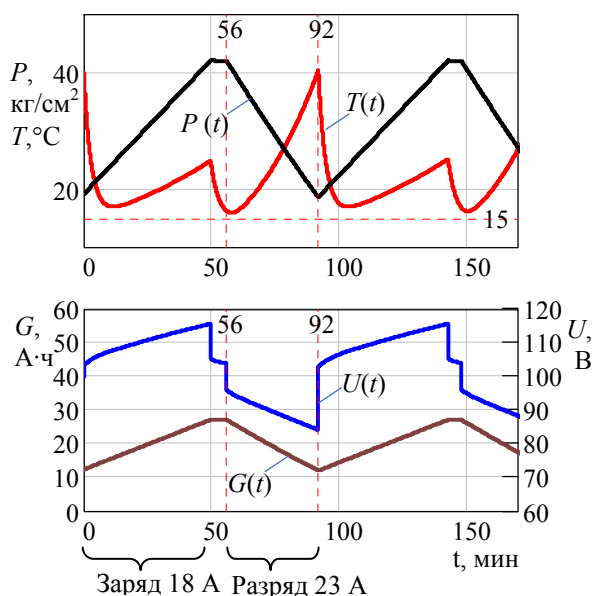


Рис. 2. Переходные процессы в батарее в режиме периодического заряда и разряда

Переходы между режимами заряда и разряда сопровождаются значительными скачками напряжения, парирование которых осуществляет аппаратура регулирования и контроля системы.

На рис. 3 показаны переходные процессы в подсистеме аккумуляторных батарей в режиме недостаточного заряда: $I_3 = 10$ А, $I_p = 30$ А.

Для рис. 3 можно отметить, что за время $t = 56$ мин заряда батарея из-за малого тока $I_3 = 10$ А не успевает зарядиться до давления $P_{\text{макс}} = 42$ кг/м². Поэтому переход от режима заряда к режиму разряда происходит непосредственно, без промежуточного состояния батареи в режиме с саморазрядом. При этом ограничением на степень разряда является уровень напряжения $U_{\text{мин}} = 72$ В.

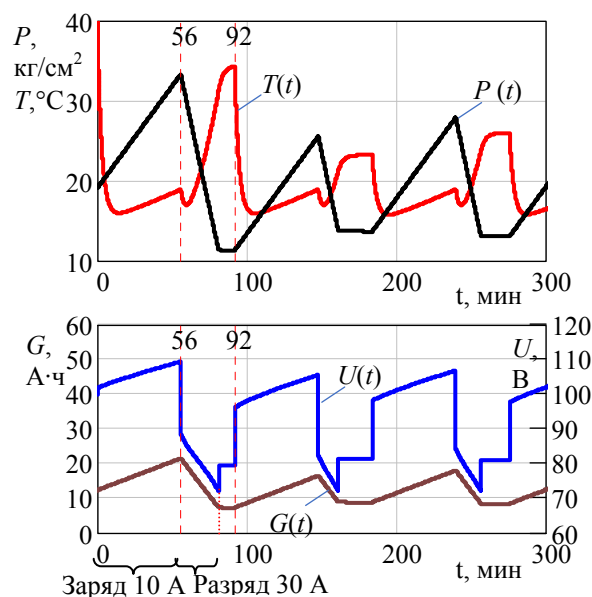


Рис. 3. Переходные процессы в батарее в режиме недостаточного заряда

При падении напряжения до уровня $U_{\text{мин}}$ разряд батареи принудительно прекращается с сохранением остаточного напряжения около 80 В, и батарея вступает в работу только при очередном интервале заряда. В результате подсистема аккумуляторных батарей в состоянии отдавать ток в нагрузку только часть интервала разряда (по рис. 3 в интервале $t = [56; 80]$ мин, т.е. примерно 67 % от интервала разряда).

Результаты моделирования в режиме хранения заряда представлены на рис. 4.

В этом режиме аккумулятор отключен от нагрузки, и после полного заряда переходит в состояние саморазряда с током $I_{\text{ср}} = 0,15$ А. В течение примерно 20-ти часов давление в аккумуляторе постепенно снижается до уровня уставки 38 В, и происходит повторный заряд батареи до давления $P_{\text{макс}} = 42$ кг/м². После этого батарея вновь переводится в режим хранения и состояние саморазряда.

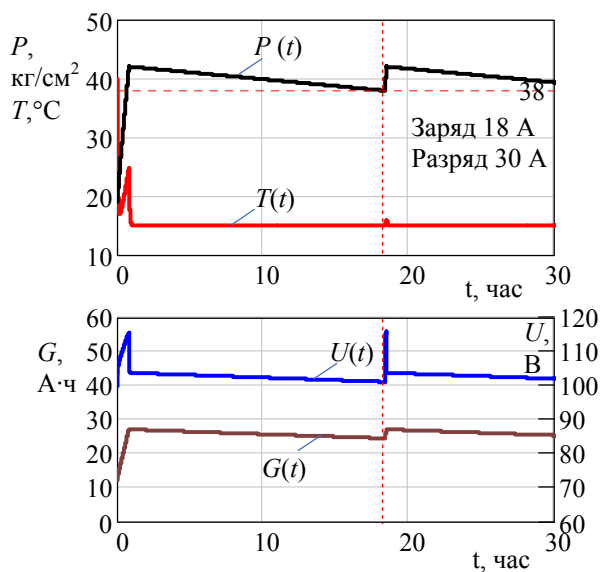


Рис. 4. Переходные процессы в батарее в режиме хранения заряда

Заключение

1. Высокая степень неопределённости текущего состояния компонентов аккумуляторных батарей (электродов, активности электролита и т.п.) приводит к необходимости создания инженерных моделей этих батарей, т.е. модификации классических соотношений для тепловых и электрических процессов в них с точностью до постоянных составляющих и множителей с показателями степени, определяемыми экспериментально.

2. В соответствии с указанным обстоятельством в известную модель теплообмена аккумулятора с внешней средой введены элементы, отражающие нелинейную зависимость тепловыделения в нём от текущего значения тока в режимах заряда и разряда. Дополнительно в электроэнергетическую модель батареи по Нернсту включён сомножитель, определяющий изменение интенсивности заряда и разряда аккумуляторов в зависимости от значения их относительной заряженности.

3. Исследование переходных процессов на полученных моделях подтверждает их способность адекватного воспроизведения реальных процессов управления подсистемой аккумуляторных батарей в различных режимах её работы.

Литература

1. Global energy review 2025 / International Energy Agency. France: IEA, 2025. 41 p.
2. Подвальный С.Л., Васильев Е.М. Системы многоальтернативного управления. Эволюционный подход. Старый Оскол: Изд-во ТНТ, 2023. 380 с.
3. Тищенко А.К., Васильев Е.М., Тищенко А.О. Многоальтернативное управление критическими режимами системы электроснабжения космической станции // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2015. Т. 11. № 2. С. 101-106.
4. Лесных А.Н., Ловчиков А.Н., Лукьяненко М.В. Методы моделирования и синтеза систем электропитания космических аппаратов. Красноярск: Издательство Сибирского государственного аэрокосмического университета им. акад. М.Ф. Решетнева, 2015. 120 с.
5. Энергобаланс научно-энергетического модуля при его автономном полете и интеграции в российский сегмент международной космической станции / Ю.С. Елизаров [и др.] // Космическая техника и технологии. 2019. № 4. С. 38-44.
6. Savenkov V.V., Tishchenko A.K., Volokitin V.N. Control and regulation equipment of electric power system for a prospective piloted transport system. Siberian Journal of Science and Technology. 2019. Vol. 20. No. 2. P. 236–242.
7. Ковтун В.С. Методика когнитивно-синергетического наблюдения и проактивного управления энергоёмкостью никель-водородных аккумуляторных батарей геостационарного космического аппарата // Космическая техника и технологии. 2022. № 1. С. 109-124.
8. Сахнов М.Ю. Управление режимом работы никель-водородных аккумуляторных батарей с большим количеством аккумуляторов в составе геостационарных космических аппаратов // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета имени акад. М.Ф. Решетнева. 2010. № 2. С. 137-141.
9. Проектирование системы энергоснабжения научно-энергетического модуля для российского сегмента Международной космической станции / А.Г. Бидеев [и др.] // Космическая техника и технологии. 2015. № 2. С. 64-74.
10. Jiang T., Chen W., Nickel hydrogen gas batteries: From aerospace to grid-scale energy storage applications // Current Opinion in Electrochemistry. 2021. Vol. 30. 100859.
11. Лукьяненко М.В. Энергетическая модель никель-водородных аккумуляторов // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета имени акад. М.Ф. Решетнева. 2005. № 4. С. 67-71.
12. Сахнов М. Ю., Лелеков А.Т., Галочкин С.А. Распределенная энерготепловая модель никель-водородной аккумуляторной батареи 40НВ-70 // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета имени акад. М.Ф. Решетнева. 2010. № 4. С. 114-120.
13. Ценер Б.И., Лызов Н.Ю. Металл-водородные электрохимические системы. Теория и практика. Л.: Химия, 1989. 282 с.

Поступила 06.08.2025; принята к публикации 06.10.2025

Информация об авторах

Тищенко Анатолий Константинович – канд. техн. наук, начальник отдела, АО «Орбита» (394038, Россия, г. Воронеж, ул. Пеше-Стрелецкая, 88), e-mail: vgtu-aits@yandex.ru, тел.: +7 (473) 243-77-20

Кузьменко Роман Юрьевич – начальник сектора, АО «Орбита» (394038, Россия, г. Воронеж, ул. Пеше-Стрелецкая, 88), e-mail: vgtu-aits@yandex.ru, тел.: +7 (473) 243-77-20

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

MODELING AND STUDYING CONTROL PROCESSES OF A BATTERY SUBSYSTEM AS PART OF AN AUTONOMOUS POWER SUPPLY SYSTEM

A.K. Tishchenko¹, R.Yu. Kuz'menko¹, E.M. Vasil'ev²

¹JSC «Orbita», Voronezh, Russia,

²Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract: the problem of constructing an engineering model of battery operation suitable for its practical use in studying control processes in autonomous power supply systems is solved. A battery with promising sealed nickel-hydrogen batteries that do not require direct maintenance during operation is selected as a specific object of study. It is shown that the heat-and-power part of the general model of such a battery operation can be represented by a first-order inhomogeneous differential equation with a nonlinear right-hand side determined by the internal heat release of the batteries during charging and discharging. To approximate the noted nonlinearity, a quadratic function is proposed, its parameters are identified based on experimental data, and a numerical solution of the differential equation is given. For the electric power part of the model, the basic Nernst algebraic model is used, which includes terms reflecting Ohmic voltage losses in the battery, as well as a power-law factor determining the nonlinear effect of the battery charge state on its voltage. The relationship between the thermal and electrical parts of the model is implemented by including current in the thermal part of the model, and temperature in the electrical part. The constructed model was used to study the processes of control the storage battery in the nominal mode of alternate charge and discharge, in the cyclic mode with insufficient charge and in the mode of long-term charge storage in the cooled state of the battery. The results of these studies are presented, confirming the adequacy of the proposed models

Key words: autonomous power supply systems, battery subsystem, nickel-hydrogen battery, control of cyclic charges and discharges of the battery

References

1. International Energy Agency "Global energy review 2025", France: IEA, 2025, 41 p.
2. Podval'ny S.L., Vasil'ev E.M. "Multialternative control systems. Evolutionary approach" ("Sistemy mnogoal'ternativnogo upravleniya. Evolyutsionnyy podkhod"), Stary Oskol: TNT, 2023, 380 p.
3. Tishchenko A.K., Vasil'ev E.M., Tishchenko A.O. "Multi-alternative control of critical modes of a space station's power supply system", *Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2015, vol. 11, no. 2, pp. 101-106.
4. Lesnykh A.N., Lovchikov A.N., Lukyanenko M.V. "Methods of modeling and synthesis of spacecraft power supply systems" ("Metody modelirovaniya i sinteza sistem elektropitaniya kosmicheskikh apparatov"), Krasnoyarsk, Siberian State Aerospace University named after academician M.F. Reshetnev, 2015, 120 p.
5. Elizarov Yu.S., Kuznetsov A.V., Abdulkhalikov R.M., Bideev A.G., Khamits I.I. "Energy balance of the scientific and power module during its autonomous flight and integration into the Russian segment of the international space station", *Space Equipment and Technologies (Kosmicheskaya tekhnika i tekhnologii)*, 2019, no. 4, pp. 38-44.
6. Savenkov V.V., Tishchenko A.K., Volokitin V.N. "Control and regulation equipment of electric power system for a prospective piloted transport system", *Siberian Journal of Science and Technology*, 2019, vol. 20, no. 2, pp. 236-242
7. Kovtun V.S. "Methodology of cognitive-synergetic observation and proactive control of the energy capacity of nickel-hydrogen batteries of a geostationary spacecraft", *Space Equipment and Technologies (Kosmicheskaya tekhnika i tekhnologii)*, 2022, no. 1, pp. 109-124.
8. Sakhnov M.Yu. "Control of the operating mode of nickel-hydrogen batteries with a large number of batteries as part of geostationary spacecraft", *Bulletin of Siberian State Aerospace University named after Academician M.F. Reshetnev (Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta imeni akad. M.F. Reshetneva)*, 2010, no. 2, pp. 137-141.
9. Bideev A.G., Semin A.Yu., Kuznetsov A.V., Akhmedov M.R. "Design of the power supply system of the scientific and energy module for the Russian segment of the International Space Station", *Space Equipment and Technologies (Kosmicheskaya tekhnika i tekhnologii)*, 2015, no. 2, pp. 64-74.
10. Jiang T., Chen W. "Nickel hydrogen gas batteries: From aerospace to grid-scale energy storage applications", *Current Opinion in Electrochemistry*, 2021, vol. 30, 100859.
11. Lukyanenko M.V. "Energy model of nickel-hydrogen batteries", *Bulletin of Siberian State Aerospace University named after Academician M.F. Reshetnev (Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta imeni akad. M.F. Reshetneva)*, 2005, no. 4, pp. 67-71.
12. Sakhnov M.Yu., Lelekov A.T., Galochkin S.A. "Distributed energy and heat model of the nickel-hydrogen storage battery 40NV-70", *Bulletin of Siberian State Aerospace University named after Academician M.F. Reshetnev (Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta imeni akad. M.F. Reshetneva)*, 2010, no. 4, pp. 114-120.
13. Center B.I., Lyzlov N.Yu. "Metal-hydrogen electrochemical systems. Theory and practice" ("Metall-vodorodnye elektrokhimicheskie sistemy. Teoriya i praktika"), Leningrad: Khimiya, 1989, 282 p.

Submitted 06.08.2025; revised 06.10.2025

Information about the authors

Anatoliy K. Tishchenko, Cand. Sc. (Technical), JSC «Orbita» (88 Peshe-Streletskaya str., Voronezh 394038, Russia), e-mail: vgtu-aits@yandex.ru, tel. (473) 243-77-20

Roman Yu. Kuz'menko, Orbita JSC (88 Peshe-Streletskaya str., Voronezh 394038, Russia), e-mail: vgtu-aits@yandex.ru, tel.: +7 (473) 243-77-20

Eugeny M. Vasil'ev, Dr. Sc. (Technical), Professor, Voronezh State Technical University (84, 20-letiya Octyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: vgtu-aits@yandex.ru, tel.: +7 (473) 243-77-20, ORCID 0000-0002-9008-5364

СТОХАСТИЧЕСКИЙ ПОИСК КРАТЧАЙШИХ ПУТЕЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПАРАМЕТРОВ УПРАВЛЕНИЯ ПОТОКАМИ ДАННЫХ НА ОСНОВЕ ПРОТОКОЛА ДИНАМИЧЕСКОЙ МАРШРУТИЗАЦИИ ДЛЯ МОБИЛЬНЫХ AD-НОС СЕТЕЙ

Али Иед Хуссейн, Н.А. Рындин

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

Аннотация: представлен стохастический подход к управлению потоками данных в мобильных AD-НОС сетях (MANET), направленный на повышение энергоэффективности и устойчивости маршрутизации в условиях динамически изменяющейся топологии сети. В основу предложенного метода положено использование скрытых марковских моделей (НММ), позволяющих формировать вероятностные зависимости между состояниями узлов и их энергетическими характеристиками. Разработана взаимосвязанная эргодическая модель, в которой алгоритм Витерби применяется для декодирования скрытых состояний и выбора оптимального маршрута передачи данных, а алгоритм Баума–Уэлча обеспечивает адаптивную оптимизацию параметров модели на основе наблюдаемых уровней энергопотребления. Моделирование, выполненное с использованием сетевого симулятора NS2 (версия 2.35), показало снижение среднего энергопотребления сети на 19,05 % по сравнению с базовым протоколом AODV, а также уменьшение накладных расходов и повышение стабильности передачи данных. Полученные результаты подтверждают целесообразность применения стохастических моделей для построения интеллектуальных алгоритмов маршрутизации, обеспечивающих баланс между качеством обслуживания и энергозатратами. Разработанный метод может быть использован при проектировании энергоэффективных протоколов управления потоками данных в сетях MANET и WSN, функционирующих в распределённых и ресурсно-ограниченных средах

Ключевые слова: управление потоками, потоки данных, кратчайший путь, вероятностная маршрутизация, сети AD-НОС, протокол динамической маршрутизации, алгоритм Витерби

Введение

Статья продолжает исследование [1], посвященное разработке вероятностного метода управления потоками данных на основе скрытой марковской модели. Сохранена нумерация разделов и иных объектов.

4.4. Стохастическое решение о маршруте

В этом разделе описывается, как обычные параметры управления потоками данных AODV (протокол динамической маршрутизации для мобильных AD-НОС сетей (MANET)) используются для стохастического поиска кратчайших путей [2]. На этом этапе система использует численное значение эмпирического расчета для определения наилучшей скрытой последовательности в соответствии с исходной моделью.

Декодирование производится с использованием алгоритма Витерби, и предлагаемая система оценивает, требуется ли шаг обучения с использованием метода Баума–Уэлча для оптимизации модели.

4.4.1. Предложенная полностью связанная модель

Чтобы определить нашу стохастическую модель, мы запускаем последовательность Y в момент времени $T=10$ для наблюдаемых символов. Каждый символ Y_t представляет значение энергии, которое, вероятно, наблюдается на пути в это время.

Предположим, что мы наблюдаем следующую короткую последовательность (11) уровней (12):

$$Y=v_1, v_2, v_3, v_3, v_2, v_1, v_1, v_2, v_3, v_1, \quad (11)$$

$$Y=L, M, H, H, M, L, L, M, H, L. \quad (12)$$

Последовательность Y представляет собой выбранные случайным образом символы наблюдения, где каждый символ определяет уровень энергий в системе [3]. Вероятность наблюдения последовательности, заданной моделью λ , оценивается в Прямом алгоритме. Каждый символ v_k иллюстрирует энергетический уровень, на котором может находиться каждое состояние:

$$V=v_1=Low(L); v_2=Medium(M); v_3=High(H).$$

На рис. 3 коэффициенты перехода между состояниями не равны нулю; именно поэтому

предложенная НММ является взаимосвязанной эргодической моделью. Коэффициенты a_{ij} представляют собой переходы между состояниями. Выбор скрытых состояний не является фиксированным и может быть скорректирован в соответствии с потребностями системы и соответствовать количеству начальных кратчайших путей.

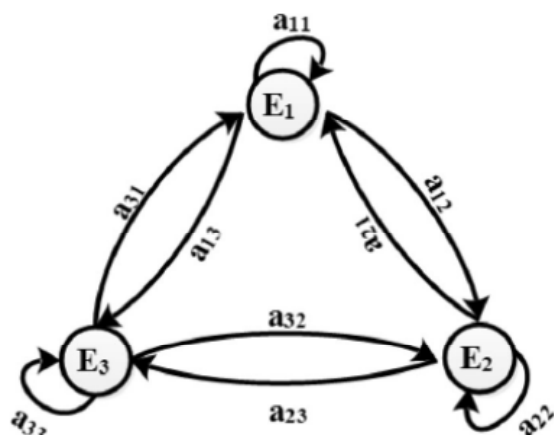


Рис. 3. Эргодический полностью связанный граф НММ, используемый в протоколе стохастической управления потоками данных

Алгоритм Витерби используется для поиска оптимальной скрытой последовательности. Учитывая последовательность наблюдений и модель НММ, алгоритм возвращает путь к состоянию через НММ, который присваивает последовательности наблюдений максимальное правдоподобие. Мы используем следующее обозначение: $P(X, Y/\lambda)$.

Определим величину $\delta_t(j)$ для $j=1\dots N$, для $t=1\dots T$, $\delta_t(j)$ - это максимальная вероятность, учитывая количество k параметров, того, чтобы пройти через последовательность состояний $X_{1\rightarrow t}$, которая заканчивается в E_j в момент времени t , и наблюдать последовательность $Y_{1\rightarrow t}$:

$$\delta_t(j) = \max_{1 \rightarrow t \rightarrow 1} P(X_{1 \rightarrow t \rightarrow 1}, X_t = E_j, Y_{1 \rightarrow t} / \lambda) \quad (13)$$

Из состояния E_j в момент времени t и состояния E_i в момент времени t_1 при $t=2\dots T$, $\delta_t(j)$ - максимальная вероятность того, что пути заканчиваются в состоянии E_j .

Методом индукции получаем:

$$\delta_{t+1}(j) = \max_{E_i} (a_{ij} \delta_t(i)) \cdot b_{E_j}(Y_{t+1}). \quad (14)$$

Таким образом, определение максимального аргумента $\arg \max_{E_j} \delta_t(j)$ похоже на получение

$$\arg \max_{E_j} a_{ij} \cdot \delta_{t-1}(j). \quad (15)$$

Таким образом, принимая аргумент для максимума $\delta_t(j)$ для всех $t=1,2,\dots,10$ и $j=1\dots N$, мы получаем оптимальную последовательность состояний:

$$\psi_t(E_i) = \arg \max_{E_j} \delta_t(j). \quad (16)$$

Для любых $t \in [1, T]$ и $j \in [1, N]$ переменные δ_t и ψ_t используются для оценки наилучшего скрытого пути с использованием подхода Витерби. Пороговая вероятность для процесса обнаружения была установлена равной 0,4 (рис. 1 [1]).

4.4.2 Обучение стохастической модели управления потоками данных

Обучение осуществляется после первой оценки декодирования Витерби. Оно основано на исходных параметрах стохастической модели управления потоками данных, установленных на основе реальных характеристик сети и эмпирических формул. Алгоритм Баума-Уэлча используется для обучения исходной модели в соответствии с последовательностью наблюдаемых изменений энергий во время работы сети. От этапа обучения к этапу повышается вероятность модели и точность решения о управлении потоками данных.

Следующее предположение должно быть проверено после каждого этап обучения.

$$P(Y||\lambda_i) > P(Y||\lambda_{i+1}). \quad (17)$$

В уравнении (17) $P(Y||\lambda_i)$ — это вероятность исходной последовательности, а $P(Y||\lambda_{i+1})$ — это вероятность после обучающего набора, заданного нашей исходной стохастической моделью управления потоками данных. После определенного количества итераций стохастическая модель управления потоками данных должна достичь стабильности.

4.4.3. Процесс принятия решения об управления потоками данных

Для создания процесса принятия решения необходим набор вычислений. В этих вычислениях использовались алгоритмы прямого и обратного хода, как показано в [4], для получения вероятностей всех возможных скрытых путей управления потоками данных, которые могли бы генерировать последовательность наблюдений Y .

Учитывая наблюдаемую последовательность $Y_{1 \rightarrow t} = Y_1, \dots, Y_t$, получим вероятности того, что первый $Y_{1 \rightarrow t}$ завершится состоянием E_i , для $i=1 \dots T-1$. Рассмотрим прямые переменные α_i , определенные по формулам:

$$\alpha_t(i) = \Pi_{E_i} \cdot b_{E_i}(Y_t), \quad (18)$$

$$\alpha_{t+1}(j) = b_j(Y_{t+1}) \cdot \sum_{i=1}^N \alpha_t(i) \cdot a_{ij}. \quad (19)$$

Каждый элемент α_i в уравнениях (18), (19) представляет собой вероятность использования энергии пути после просмотра первого наблюдения t .

Например, мы использовали процесс завершения в прямом/обратном алгоритме для оценки вероятности наблюдения наилучшей последовательности с помощью уравнения (20):

$$P(Y/\lambda) = \sum_{i=1}^{N=10} \alpha_T(i). \quad (20)$$

В каждый момент времени t мы наблюдаем уровень энергопотребления, обозначенный символом v_k . Это означает, что уровень энергопотребления системы может зависеть от вероятности.

Процесс завершения (20) используется для определения решения об управлении потоками данных, как показано в следующей таблице. В табл. 2 решение об управлении потоками данных основано на уравнениях (20) и (21). От тренировки к тренировке вероятность этого повышается, а вместе с ней и эффективность решения о маршруте. В данном случае решение о маршруте достигает порогового значения после четырех тренировок. В другом случае количество тренировок может отличаться.

Предварительная оценка помогает определить вероятность управления потоками данных с использованием наилучшего кратчайшего пути с минимальными затратами энергии. Ко-

эффициент принятия решения об управлении потоками данных вычисляется на основе следующей формулы:

$$P(Y|\lambda) \times \varepsilon, \quad (21)$$

где ε — постоянный параметр, эквивалентный начальной энергии в каждом узле в начале моделирования. Он умножается на вероятность перехода от одной тренировки к другой для оптимизации параметров НММ. Результаты моделирования для этой работы представлены в следующем разделе.

Таблица 2

Решение о декодировании оптимальных значений скрытой последовательности

Обучение	Вероятность	Решение о маршруте
1	1.32e-09	1.32e-6
2	3.92e-05	0.039
3	2.24e-04	0.22
4	4.59e-04	0.5

5. Анализ результатов моделирования

5.1. Настройка параметров

Сетевой симулятор версии 2 (NS2) используется для реализации системного сетевого трафика для нашего стохастического алгоритма управления потоками данных [5]. NS2 - это хорошо известный объектно-ориентированный сетевой симулятор с высокой степенью параметризации, используемый научным сообществом, который позволяет экспериментировать со многими вариациями параметров сети и наблюдать относительные характеристики исследуемой системы. Его версия ns-2.35 была реализована в среде Ubuntu 14.04 LTS. Возможности моделирования приведены в табл. 3.

Таблица 3

Параметры моделирования

Параметр	Значение
Протоколы управления потоками данных	AODV/предлагаемые
Модель мобильности	равномерная
Размер сети	100 на 200 м
Начальная энергия	100 Дж
Мощность передачи Tx	0,05 Вт
Мощность приема Rx	0,024 Вт
Скорость	1 Мб/с
Количество узлов	10
Время	100 с

5.2. Оценка вероятности управления потоками данных

Во время реализации сети узлы используют определенный уровень энергии для обмена данными и участвуют в процедуре управления потоками данных. Сводная информация о потреблении типовых узлов приведена в табл. 4.

В табл. 4 представлено иллюстративное представление значений энергии для пяти узлов. В начале моделирования узлы имеют одинаковый начальный уровень энергии для запуска моделирования.

Таблица 4

Потребление энергии узлами-образцами	
Идентификатор узла	2
4	6
8	10
Энергия (Дж)	29,98
29,82	28,71
30,45	27,91

Входные значения модели НММ рассчитываются в соответствии с этими значениями энергий, чтобы иметь реалистичный прогноз при принятии окончательного решения о выборе кратчайшего пути.

В табл. 5 приведены данные об общем потреблении энергии на каждом k кратчайших путях от узла N_1 , который является источником, и узла N_{10} , который является пунктом назначения.

Таблица 5

Потребление энергии между исходным и конечным узлами

Параметр управления потоками данных	Значение
Источник	N_1
Пункт назначения	N_{10}
Путь 1	1,2,4,5,7,9,10
$E^{\min 1}$	196,895 Дж
Путь 2	1,2,4,5,7,8,10
$E^{\min 2}$	197,339 Дж
Путь 3	1,2,4,5,6,8,10
$E^{\min 3}$	198,246 Дж

В табл. 6 указаны такие характеристики управления потоками данных, как минимальное потребление энергии путями, затраты и узлы, входящие в каждый путь. Мы выбираем ограниченное количество путей и их потребление для расшифровки скрытой последовательности и, при необходимости, обучаем систему для оптимизации выходных данных.

Моделирование сгенерировало вычисленные скрытые состояния, как показано ниже, для случайной последовательности шагов наблюдения за общее время, $T=10$. Таким образом, мы выводим из этого вычисления наилучшую последовательность скрытых состояний

$$\Delta = E_1, E_2, E_3, E_3, E_1, E_1, E_1, E_2, E_3, E_1$$

$$P(Y||\lambda) = 3.92e^{-05},$$

которая определяется начальными параметрами. Алгоритм Витерби обеспечивает для нашей вероятностной системы уровень энергии E_1 , соответствующий низкому уровню в момент времени t при минимальной энергии. Мы можем использовать соответствующий путь для увеличения срока службы сети. В качестве альтернативы, согласно подходу Витерби, нашим вероятным резервным маршрутом может быть E_3 , чтобы избежать нехватки энергии и проблем с управлением потоками данных.

Таблица 6

Особенности управления потоками данных путей

Path _k	Узлы	$E^{\min k}$	Стоимость _k
1	1,2,4,5,7,9,10	196,895 Дж	2,56
2	1,2,4,5,7,8,10	197,339 Дж	2,76
3	1,2,4,5,6,8,10	198,246 Дж	2,82

Условные обозначения: $E^{\min k}$ – минимальная энергия Path_k

Повторная оценка параметров с помощью алгоритма Баума-Уэлча, использованного в предыдущем процессе обратного отслеживания Витерби, стабилизирует систему на оптимальном скрытом пути:

$$\Delta = E_1, E_2, E_3, E_3, E_3, E_1, E_1, E_1, E_2, E_3, E_1$$

$$P(Y||\lambda) = 2.24e^{-045}.$$

То же самое наблюдается в скрытой последовательности. Только вероятность получения начальной последовательности, заданной моделью, значительно повышается. Начальный маршрут - E_1 с пятью повторениями, а резервный - E_3 с тремя повторениями. Оценивается наилучшая общая вероятность управления потоками данных (BRP) использования энергоресурса в течение определенного времени. На рис. 4 показано вероятное поведение системы при использовании энергии в начале управления потоками данных. Вероятность высока, учитывая временной ряд Y_T и модель k .

На рис. 4 показана тенденция изменения

маршрута на четырех этапах обучения. Начиная с этапа 1, обозначенного пунктирной линией, высокая вероятность составляет около 0,6 %. Вероятность на этапе 2, обозначенном пунктирной линией, значительно снижается. А с этапа 3 по этап 4 общее снижение энергопотребления составляет почти 0,4 %. Динамика между наблюдениями при $t=0$ и $t=1$ показывает, что вероятность управления потоками данных в начале процесса высока. По истечении первой единицы времени это значение уменьшается до определенного системного порога. Кривая продолжает сходиться. В момент времени $t=2$ траектория соответствует траектории 1, выбранной модулем принятия решений, и ее вес составляет $cost=7$ хопов при низкой энергии около 196,895 Дж. На данном этапе это наименьшее значение по сравнению с другими траекториями.

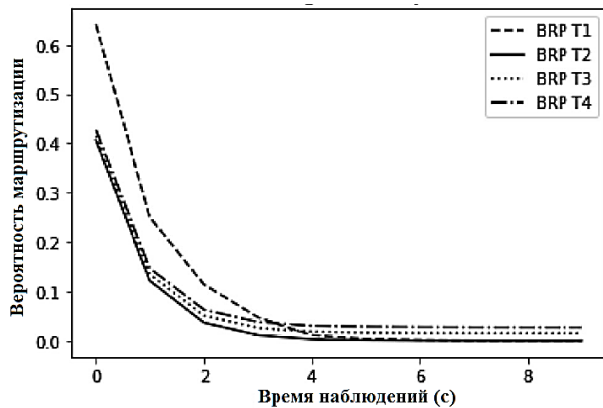
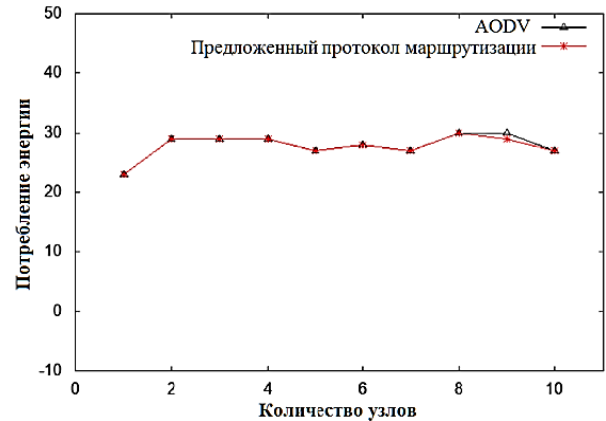


Рис. 4. Сравнение тенденций наилучшей вероятности управления потоками данных (BRP) между четырьмя этапами обучения

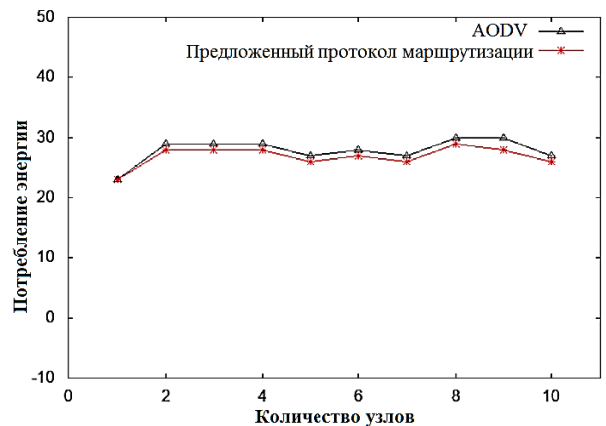
5.3. Сравнение производительности

Проводится сравнение с традиционными протоколами управления потоками данных, такими как ad hoc on-demand distance vector routing protocol (AODV), для оценки эффективности предлагаемого протокола управления потоками данных на базе НММВ. Представлены значения энергозатрат после каждой серии тренировок и проведено среднее сравнение между этим подходом и обычным.

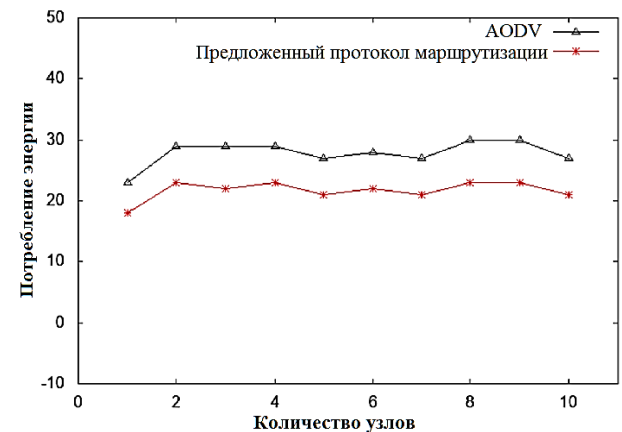
От тренировки к тренировке (табл. 5, рис. 5) потребление энергии в системе меняется. После этапа стабилизации достигается пороговое значение, и потребление энергии в системе значительно снижается.



а) потребление энергии на первом шаге

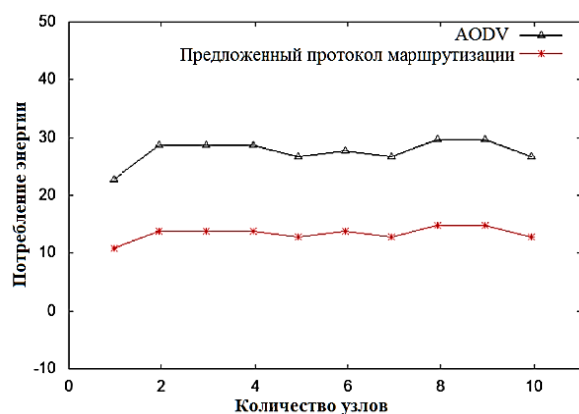


б) потребление энергии на втором шаге



в) потребление энергии на третьем шаге

Рис. 5. Сравнение поведения системы после нескольких циклов оптимизации



г) потребление энергии на четвертом шаге

Рис. 5. Сравнение поведения системы после нескольких циклов оптимизации (окончание)

На рис. 5 сравнивается поведение системы после нескольких циклов оптимизации: а) сравнивается начальное потребление энергии в системе со значениями после первого цикла и решения о управления потоками данных. Потребление близко к обычной вероятности управления потоками данных; б) система сравнивает потребление энергии после второго тренировочного цикла; в) сравнение с первоначальным потреблением энергии в системе и значениями после тридцатого тренировочного цикла. Снижение хорошо заметно; г) сравнивается потребление энергии после стабилизационного цикла. Энергия потребления явно снижается. Результаты ясно показывают, что предлагаемый метод, основанный на стохастическом методе, снижает общее потребление энергии.

Кроме того, на рис. 6 показано среднее значение энергопотребления системы после всего обучения. Конечное энергопотребление в предлагаемой системе ниже, чем в исходном протоколе управления потоками данных.

На рис. 6 мы ясно видим, что предлагаемая система значительно снижает энергопотребление. Среднее потребление энергии AODV составляет 285,46 Дж. В противном случае, после четырех тренировок в нашей системе среднее потребление составляет 231,07 Дж. Это значение соответствует снижению энергопотребления в системе с предложенной стохастической моделью на 19,05 %.

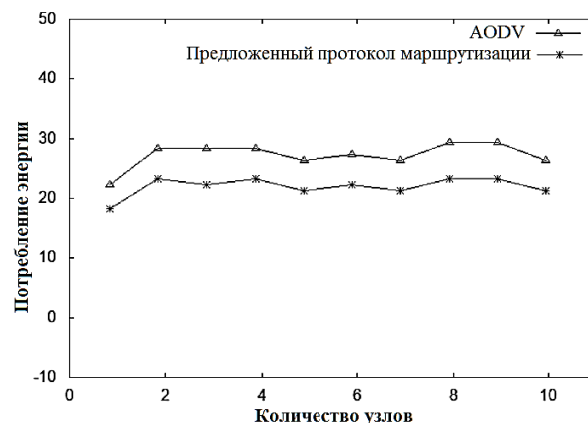


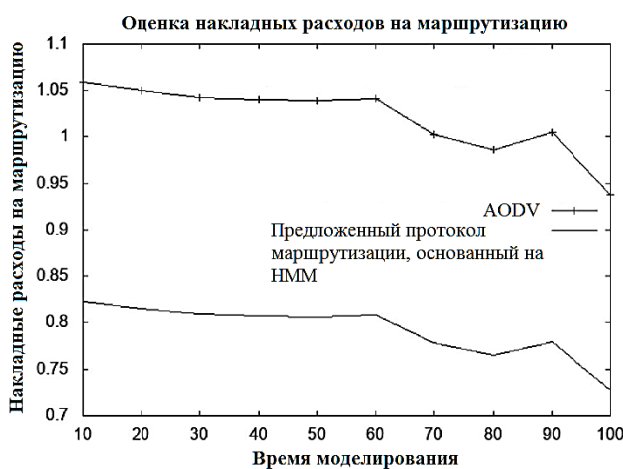
Рис. 6. Среднее потребление энергии системой

Кроме того, мы также оцениваем нагрузку на сеть. Это относится к контролю информации, отправляемой на тот адрес, который фактически получен каждым узлом сети. Он также определяет время обработки, необходимое для передачи данных узлом, и включает другие параметры, такие как поддержка канала, обнаружение сети и узла, задержка переадресации и время ожидания. Издержки управления потоками данных позволяют получить отношение общего количества отправленных пакетов к общему количеству доставленных пакетов.

На рис. 7 сравниваются затраты на управление потоками данных между AODV и предлагаемым протоколом. Результаты ясно показывают, что протокол управления потоками данных на основе НММ обладает лучшими характеристиками. Это связано с тем, что предлагаемая модель определяет процесс управления потоками данных как стохастическую переменную и оценивает вероятность выбора маршрута с оптимальными параметрами.



а) накладные расходы на управление



б) накладные расходы на маршрутизацию

Рис. 7. Сравнение параметра управления потоками данных с накладными расходами в сети

На рис. 7 продемонстрировано сравнение параметра управления потоками данных с накладными расходами в сети: а) накладные расходы на управление сокращаются примерно в то же время, что и для двух протоколов управления потоками данных. Значение параметра управления потоками данных, основанного на HMM, соответствует исходному протоколу управления потоками данных; б) сравнение с нормализованным протоколом управления потоками данных. Исходный протокол управления потоками данных приобретает все большее значение по сравнению с протоколом управления потоками данных на основе HMM.

5.4. Обсуждение

Предлагаемый способ направлен на повышение энергопотребления в сети WSN. Например, если в период инициализации достигается

пороговое значение, мы вычисляем и декодируем соответствующую скрытую последовательность, используя метод Витерби, который вычисляет вероятность кратчайшего пути с учетом модели λ и принимает решение о маршруте. Напротив, если система не может достичь порогового значения по истечении времени инициализации, выполняется этап обучения с использованием метода Баума-Уэлча, который является частным случаем алгоритма максимизации математического ожидания (ЕМ) для улучшения решения о маршруте в нашей исходной стохастической модели управления потоками данных λ .

Максимальные вероятности перехода в скрытые низкоэнергетические состояния в каждый момент времени t , а также общее энергопотребление, оцениваемое как вероятность принятия наилучших решений об управлении потоками данных, зависят от производительности системы в этот момент времени. Конкретно, в начале процесса у нас есть высокая вероятность реализации управления потоками данных с более высоким значением энергопотребления в системе. Поскольку эта вероятность значительно превышает пороговое значение системы, нам необходимо установить аварийный сигнал для управления и мониторинга каждого объекта управления потоками данных, участвующего в процессе. По прошествии времени вероятность становится меньше начального порогового значения. Можно настроить генерацию аварийных сигналов, чтобы избежать неконтролируемой активности узлов.

С помощью нашей системы мы можем прогнозировать и предотвращать чрезмерное потребление энергии. Вполне вероятно, что если на пути у нас больше узлов, чем на других, то этот узел будет потреблять больше энергии в процессе управления потоками данных. Начальное время процесса управления потоками данных показывает высокую вероятность высокого энергопотребления. Но в течение этого времени наша система регулирует использование энергии и оптимизирует срок службы сети. Мы понимаем, что при инициализации предложенной схемы стохастической управления потоками данных мы наблюдаем высокую загрузку ресурсов, которая со временем снижается.

В табл. 7 представлена максимальная вероятность получения наиболее оптимальной последовательности скрытых состояний с учетом случайной серии наблюдений (Y_t) в момент времени $t=10$ после четырех этапов обучения.

Чтобы сгенерировать последовательность символов $O(10) = Y_i$, более вероятно начать сначала с состояния $t_1 = E_1$, затем $t_2 = E_2$ и закончить в момент времени $T=10$ в состоянии $t_{10} = E_1$. Максимальная вероятность может показаться очень малой, но это нормально. Существует множество возможных последовательностей скрытых состояний, которые могут быть сгенерированы в количестве порядка M^T [6], эквивалентном 3^{10} в нашем конкретном случае.

Таблица 7
Максимальная оценка управления потоками данных

Скрытая последовательность	Вероятность
E1,E2,E3,E3,E3,E1,E1,E1,E2,E3,E3	$4.59e^{-04}$

Заключение

1. В работе представлен стохастический подход к управлению потоками данных в мобильных AD-HOC сетях (MANET), основанный на использовании скрытых марковских моделей (HMM) для определения оптимальных маршрутов передачи данных. Разработана взаимосвязанная эргодическая модель, в которой алгоритм Витерби применяется для декодирования скрытых состояний и выбора кратчайшего пути с минимальным энергопотреблением, а алгоритм Баума–Уэлча используется для оптимизации параметров модели и уточнения вероятностных переходов.

2. Результаты моделирования, выполненного в среде NS2 (версия 2.35), показали, что предложенный метод обеспечивает снижение среднего энергопотребления сети примерно на

19,05 % по сравнению с базовым протоколом AODV. При этом наблюдается повышение стабильности маршрутизации и уменьшение накладных расходов на управление потоками данных. Проведённый анализ подтвердил эффективность стохастической модели в условиях динамически изменяющейся топологии сети и ограниченных энергетических ресурсов узлов.

3. Полученные результаты свидетельствуют о перспективности применения стохастических методов в задачах энергоэффективной маршрутизации и могут быть использованы при дальнейшем развитии протоколов управления потоками данных в MANET и WSN-сетях.

Литература

1. Husein A.E., Ryndin N.A. Development of a probabilistic method for managing data flows based on a hidden Markov model// Modern informatization problems in simulation and social technologies (MIP-2025'SCT): Proc. of the XXX-th Int. Open Science Conf. Yelm, WA, USA: Science Book Publishing House, 2025. pp. 54-64.
2. Liu S, Srivastava R, Koksai CE, Sinha P. Pushback: a hidden markov model based scheme for energy efficient data transmission in sensor networks // Ad Hoc Netw. 2009. 7(5):973–986.
3. Kumar R., Mukherjee J.C. On-demand vehicle-assisted charging in wireless rechargeable sensor networks // Ad Hoc Netw. 2021. 112. pp. 102389.
4. Rabiner L.R. A tutorial on hidden markov models and selected applications in speech recognition // Proc IEEE. 1989. 77(2):257–286.
5. Issariyakul T., Hossain E. Introduction to network simulator 2 (ns2) // Introduction to network simulator NS2. Springer, Berlin. 2009. pp 1–18.
6. Fernandes C. Chaînes de Markov triplets et segmentation non supervisée' images, PhD thesis, Université du Québec à Montréal. 2023. 140 p.

Поступила 25.06.2025; принята к публикации 10.11.2025

Информация об авторах

Хуссейн Али Иед – аспирант, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: eng.alihussein1993@gmail.com

Рындин Никита Александрович – д-р техн. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: nikita.ryndin@gmail.com

STOCHASTIC SHORTEST PATH SEARCH USING FLOW CONTROL PARAMETERS BASED ON DYNAMIC ROUTING PROTOCOL FOR MOBILE AD-HOC NETWORKS

A.E. Husein, N.A. Ryndin

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract: this paper presents a stochastic approach to data flow management in mobile ad hoc networks (MANETs), aimed at improving energy efficiency and routing stability under dynamically changing network topologies. The proposed method is based on hidden Markov models (HMM), which describe probabilistic dependencies between node states and their

energy characteristics. An interconnected ergodic model has been developed, where the Viterbi algorithm is employed to decode hidden states and determine the optimal data transmission route with minimal energy consumption, while the Baum–Welch algorithm provides adaptive optimization of model parameters based on the observed energy levels of network nodes. The simulation, performed using the NS2 network simulator (version 2.35), demonstrated a reduction in the network’s average energy consumption by 19.05% compared with the baseline AODV protocol, along with decreased routing overhead and improved data delivery stability. The obtained results confirm the effectiveness of stochastic modeling in constructing intelligent routing algorithms that balance quality of service and energy efficiency. The developed method can be applied to the design of energy-efficient data flow management protocols for MANET and WSN environments operating under distributed and resource-constrained conditions

Key words: flow management, data flows, shortest path, probabilistic routing, AD-HOC networks, dynamic routing protocol, Viterbi algorithm

References

1. Husein A.E., Ryndin N.A. “Development of a probabilistic method for managing data flows based on a hidden Markov model”, *Proc. of the XXX-th Int. Open Science Conf.: Modern Informatization Problems in Simulation and Social Technologies (MIP-2025’SCT)*, Yelm, WA, USA: Science Book Publishing House, 2025, pp. 54-64.
2. Liu S, Srivastava R, Koksall CE, Sinha P “Pushback: a hidden Markov model based scheme for energy efficient data transmission in sensor networks”, *Ad Hoc Netw*, 2009, no. 7(5), pp. 973-986.
3. Rohit Kumar, Joy Chandra Mukherjee “On-demand vehicle-assisted charging in wireless rechargeable sensor networks”, *Ad Hoc Netw*, 2021, no. 112, pp. 102389.
4. Rabiner L.R. “A tutorial on hidden markov models and selected applications in speech recognition”, *Proc IEEE*, 1989, no. 77(2), pp. 257-286.
5. Issariyakul T., Hossain E. “Introduction to network simulator 2 (ns2). Introduction to network simulator NS2”, Springer, Berlin, 2009, pp. 1-18.
6. Clément F. “Chaînes de Markov triplets et segmentation non supervisée’ images”, PhD thesis, Université du Québec à Montréal., 2023, 140 p., available at: <https://theses.hal.science/tel-03952646v1>.

Submitted 25.06.2025; revised 10.11.2025

Information about the authors

Ali Eid Husein, graduate Student, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: eng.alihusein1993@gmail.com

Nikita A. Ryndin, Dr. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: nikita.ryndin@gmail.com

ОПТИМИЗАЦИЯ ПЛИС-АРХИТЕКТУР ДЛЯ НЕЙРОСЕТЕВОГО ДЕКОДИРОВАНИЯ БЛОКОВЫХ КОДОВ

М.В. Хорошайлова

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

Аннотация: исследуются методы оптимизации архитектур программируемых логических интегральных схем (ПЛИС) для эффективной реализации нейросетевых декодеров блоковых кодов, включая коды с низкой плотностью проверок на четность (LDPC), полярные и Боуза — Чоудхури — Хоквингема (БЧХ) коды. Основное внимание уделяется аппаратным модификациям, позволяющим достичь оптимального баланса между точностью декодирования и вычислительной эффективностью. Разработаны и проанализированы специализированные архитектурные решения для ПЛИС, включающие модифицированные схемы таблиц поиска (LUT) с адаптивной битовой глубиной, аппаратные ускорители для операций проверки узлов в режиме реального времени. Разработанные решения особенно актуальны для итеративных алгоритмов декодирования (Min-Sum) применительно к LDPC-кодам, где требуется интенсивная обработка мягких решений. Экспериментальные результаты показывают увеличение пропускной способности декодера на 30 % по сравнению с традиционными реализациями, снижение энергопотребления на 20 % при сохранении корректирующей способности, возможность динамической адаптации параметров декодирования для различных типов блоковых кодов. Предложенные архитектурные решения демонстрируют особую эффективность при обработке длинных кодовых слов ($n > 1000$), характерных для современных систем связи 5G/6G и систем хранения данных

Ключевые слова: блоковые коды, нейросетевое декодирование, оптимизация ПЛИС, адаптивная архитектура, аппаратное ускорение

Благодарности: работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания (№ FZGM-2025-0002)

Введение

Современные системы связи 5G/6G и системы хранения данных предъявляют повышенные требования к эффективности декодирования блоковых кодов, таких как LDPC, полярные и БЧХ-коды. Традиционные алгоритмы декодирования сталкиваются с фундаментальными ограничениями при работе с длинными кодовыми словами и в условиях низкого отношения сигнал/шум. Нейросетевые подходы к декодированию демонстрируют перспективные результаты, превосходя по точности классические методы, однако их широкое внедрение сдерживается высокой вычислительной сложностью и значительными требованиями к аппаратным ресурсам [1, 2].

В данной статье представлена оптимизация архитектур программируемых логических интегральных схем (ПЛИС) для эффективной реализации нейросетевых декодеров блоковых кодов. Основное внимание уделено модификациям логических блоков, позволяющим значительно повысить плотность выполнения опе-

раций умножения с фиксированной запятой (4-9 бит) и операциям блока умножения-сложения (MAC), реализуемых в программируемая логическая структура (soft fabric), при минимальных затратах площади и задержки.

Ускорение глубокого обучения на ПЛИС

Несмотря на высокую гибкость и реконфигурируемость ПЛИС, реализация специализированных операций декодирования для LDPC, полярных и БЧХ-кодов остается ресурсоемкой задачей. Особые сложности возникают при реализации итеративных алгоритмов проверки узлов для LDPC-кодов, схем последовательного исключения для полярных кодов, алгебраических операций декодирования БЧХ-кодов.

Для эффективного использования ресурсов ПЛИС разрабатываются специализированные версии алгоритмов декодирования, а именно вантованные версии Min-Sum алгоритма для LDPC, аппроксимированные схемы SC-декодирования для полярных кодов, оптимизированные реализации алгоритма Берле-кэмп-Мессе для БЧХ.

В качестве базовой платформы для реализации алгоритмов декодирования выбрана ПЛИС Intel Stratix 10, обладающая высокой вычислительной плотностью и оптимизированной архитектурой для выполнения специализированных операций. Ключевым элементом этой ПЛИС является модуль адаптивной логики (ALM), который обеспечивает гибкость при реализации как логических, так и арифметических операций, критически важных для декодирования кодов.

На рис. 1 представлена структура ALM, включающая 6-разрядный LUT, конфигурируемый в виде двух 5-разрядных LUT, 2 бита упрочненной арифметики (два сумматора) с выделенными цепями переноса, 8 входов (A-H) и 4 выхода (O1-O4).

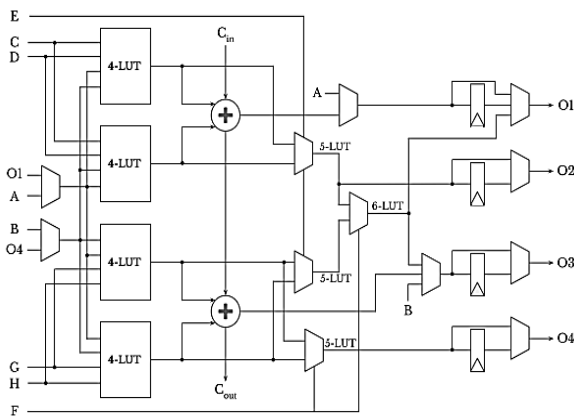


Рис. 1. Упрощенная архитектура ALM Stratix 10

ALM поддерживает два основных режима работы:

- Обычный режим, позволяющий реализовать одну логическую функцию с 6 входами и две функции с 5 входами (или меньше), использующие не более 8 различных входов (например, два независимых 4-разрядных LUT или два 5-разрядных LUT с двумя общими входами).
- Арифметический режим, который оптимизирован для выполнения операций сложения: четыре 4-разрядных LUT подаются на входы двух сумматоров и поддерживается логика предварительного сложения при использовании ≤ 6 входных сигналов.

При реализации умножения в контексте кодов с низкой плотностью проверок на четность (LDPC), полярных и БЧХ-кодов, когда отображение умножается с использованием адаптивных логических модулей (ALM), после начального этапа сложения частичных произ-

ведений (первый каскад сложения) дальнейшее сокращение разрядов выполняется исключительно с помощью цепочек сумматоров. В такой конфигурации LUT (таблицы поиска) используются лишь для передачи входных данных на жестко заложенные сумматоры, что приводит к неэффективному расходованию ресурсов ALM. Это особенно критично для декодеров LDPC и полярных кодов, где высокая плотность вычислений требует оптимизации использования кристалла [3].

Для решения этой проблемы предлагается модифицированная архитектура ALM, показанная на рис. 2, в которой добавлен второй уровень цепочки переноса.

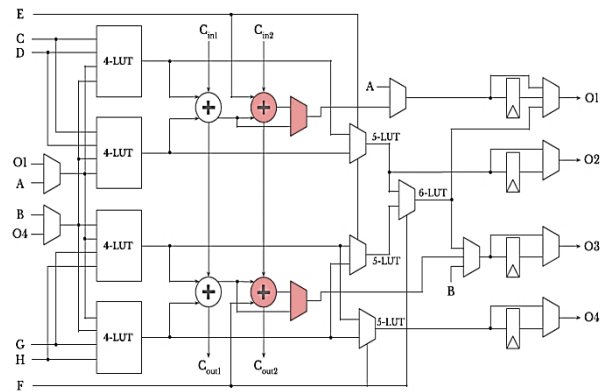


Рис. 2. Модифицированная архитектура ALM с дополнительными цепочками для переноса

Это позволяет задействовать два дополнительных сумматора (выделены цветом на рисунке), подключенных к выходам первой цепочки переноса и ранее неиспользуемым входам ALM (E и F) в арифметическом режиме. Благодаря этому второй уровень сумматоров может выполнять дополнительный этап сокращения внутри тех же ALM, исключая необходимость задействования дополнительных модулей и простаивающих LUT, как в стандартной архитектуре Stratix 10. Блок-схема для модифицированной архитектуры ALM показана на рис. 3, алгоритм описан ниже.

Входными данными выступают два набора частичных произведений (PP_1 , PP_2), полученных при умножении (например, в декодере LDPC/полярных/БЧХ-кодов). Входы ALM (A, B, C, D, E, F), где E и F ранее не использовались в арифметическом режиме.

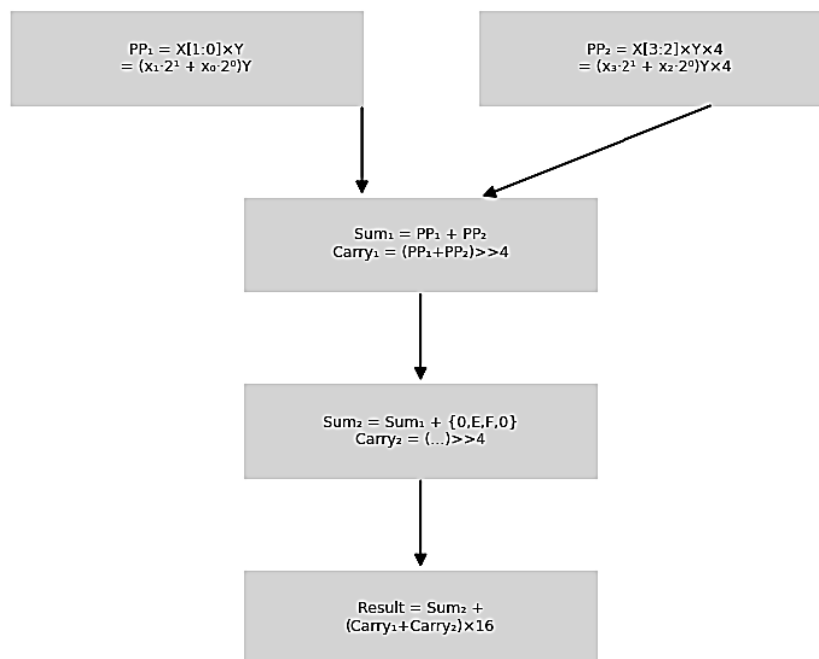


Рис. 3. Алгоритм / Блок-схема для модифицированной архитектуры ALM

Алгоритм работы:

1. Первое сокращение частичных произведений (1-й уровень сумматоров):

-PP₁ подаются на входы (A, B, C, D) ALM.

-LUT используются только для передачи данных (не участвуют в вычислениях).

-Первая цепочка сумматоров складывает PP₁, формируя промежуточную сумму (Sum₁) и перенос (Carry₁).

2. Второе сокращение частичных произведений (2-й уровень сумматоров):

-PP₂ подаются на ранее неиспользуемые входы (E, F).

-Sum₁ и Carry₁ с первого уровня подаются на новые сумматоры.

-Вторая цепочка переноса выполняет сложение:

Sum₂ = Sum₁ + PP₂ (с использованием дополнительных сумматоров).

Carry₂ обрабатывается внутри того же ALM.

3. Финальное сложение:

-Результаты Sum₂ и Carry₂ объединяются в последнем ALM.

-Выход — итоговое произведение с сокращённой разрядностью.

Моделирования преимуществ модифицированной ALM-архитектуры показаны на рис. 4.

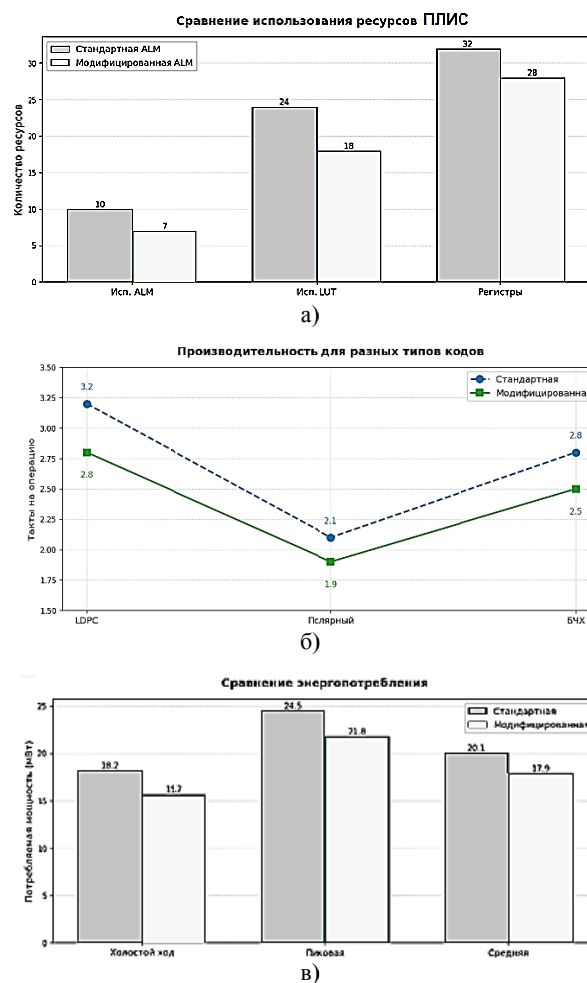


Рис. 4. Преимущества модифицированной ALM-архитектуры

На основании построенных графиков можно сделать следующие выводы о преимуществах модифицированной ALM-архитектуры с двумя уровнями сумматоров:

- эффективность использования ресурсов ПЛИС, показанная на рис. 4, а, обусловлена снижением использования ALM на 30 % (с 10 до 7 единиц), экономией LUT на 25 % (с 24 до 18), оптимизацией регистров на 12,5 % (с 32 до 28);
- производительность, приведенная на рис. 4, б, характеризуется ускорением обработки LDPC-кодов на 12,5 % (с 3.2 до 2.8 тактов на операцию), улучшением скорости для полярных кодов на 9,5 % (с 2.1 до 1.9 тактов), приростом эффективности БЧХ-декодеров на 10,7 % (с 2.8 до 2.5 тактов);
- энергопотребление показано на рис. 4, в, свидетельствует о снижении мощности в режиме холостого хода на 13,7 % (с 18.2 до 15.7 мВт), экономия при пиковой нагрузке на 11 % (с 24.5 до 21.8 мВт), уменьшение среднего потребления на 10,9 % (с 20.1 до 17.9 мВт).

Оптимизация MAC-операций для ПЛИС

Оптимизация архитектур программируемых логических интегральных схем (ПЛИС)

для задач нейросетевого декодирования блоковых кодов требует комплексного подхода, особенно когда речь идет об операциях умножения-сложения (MAC). Эти операции являются вычислительным ядром многих алгоритмов обработки сигналов и декодирования, включая LDPC, полярные и БЧХ-коды [4, 5].

Ключевым аспектом оптимизации является баланс между тремя критически важными параметрами: площадью кристалла (логическими ресурсами), задержкой обработки и энергопотреблением. Для достижения оптимальных результатов применяются несколько стратегий. Параллельная обработка данных позволяет значительно ускорить вычисления за счет одновременного выполнения нескольких MAC-операций [6]. Это особенно эффективно для LDPC-кодов, где проверочная матрица может быть разделена на независимые блоки. Конвейеризация операций разбивает процесс вычислений на последовательные этапы, что обеспечивает постоянный поток данных и повышает тактовую частоту системы.

Блок-схема конвейера MAC-операций приведена на рис. 5.

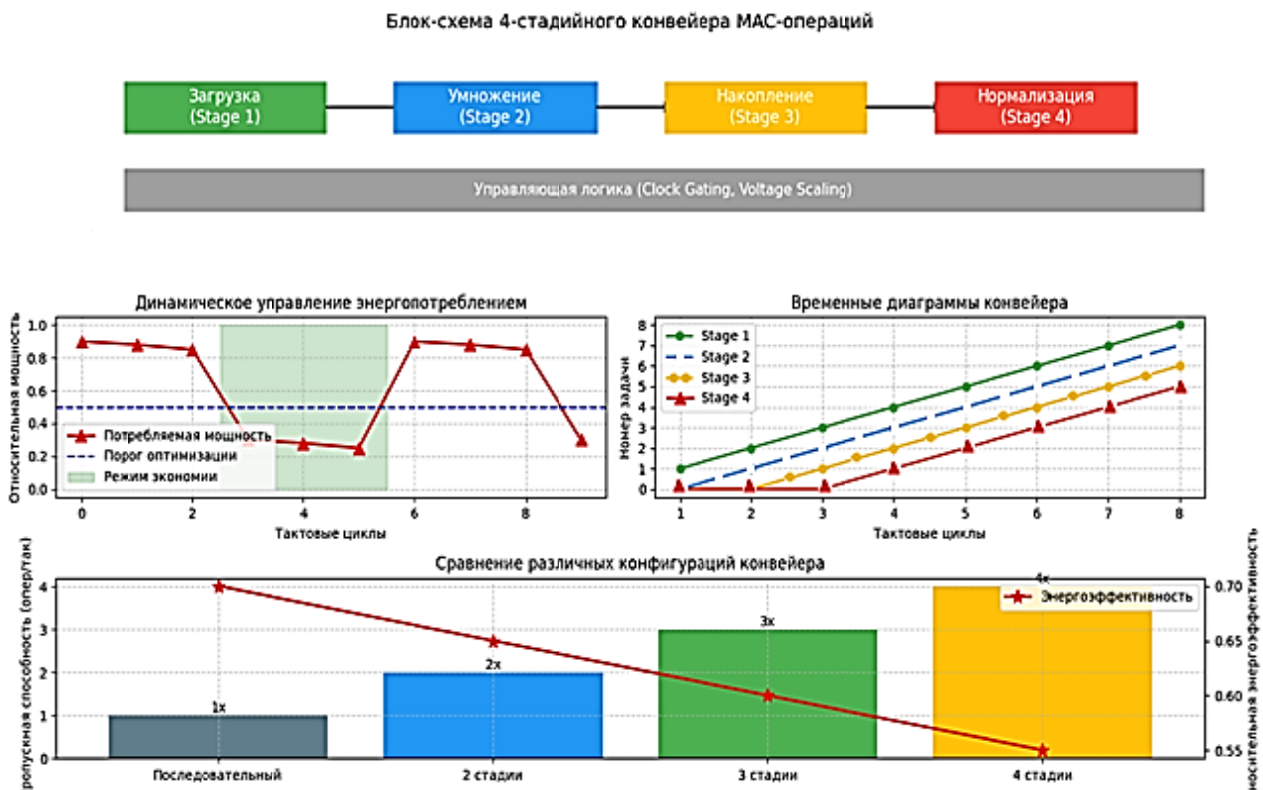


Рис. 5. Блок-схема конвейера MAC-операций

Блок-схема конвейера MAC-операций содержит четыре блока, представляющие стадии конвейера: Загрузка данных (Stage 1), умножение (Stage 2), накопление (Stage 3), нормализация (Stage 4).

Серый блок снизу показывает управляющую логику с функциями Clock Gating (отключение тактирования неактивных стадий) и Voltage Scaling (динамическое масштабирование напряжения).

Оптимизация энергопотребления представлена на графике колебаниями мощности в разных режимах работы. Пунктирная линия на графике динамического управления энергопотреблением - порог для активации энергосбережения. Серая область - режим экономии энергии (отключение неиспользуемых стадий).

Временные диаграммы демонстрируют параллельное выполнение 8 задач в конвейере. Каждая линия показывает прогресс задач через

стадии конвейера. На 4-м такте конвейер полностью заполнен (все стадии работают).

Сравнение конфигураций приведено на нижнем графике. Столбцы показывают рост пропускной способности с увеличением стадий. Линия энергоэффективности определяет ее изменение (чем выше - тем лучше), 4-стадийный конвейер дает 4х ускорение при приемлемых энергозатратах.

Использование фиксированной точки вместо чисел с плавающей запятой сокращает требуемые ресурсы. Например, переход с 32-битных float на 8-битные fixed-point значения может уменьшить использование DSP-блоков в 4 раза при приемлемой потере точности. Совместное использование ресурсов между различными слоями декодера позволяет более эффективно распределять доступные аппаратные блоки.

График на рис. 6 показывает сравнение различных реализаций MAC-блоков.

Оптимизация MAC-операций для ПЛИС

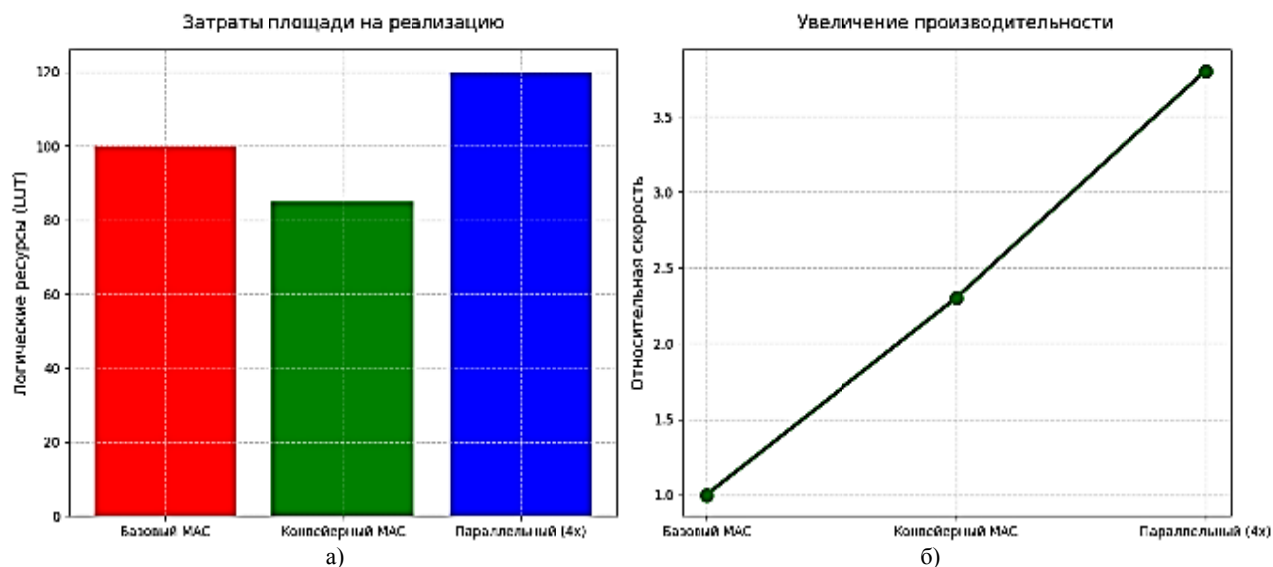


Рис. 6. Оптимизация MAC-операций для ПЛИС

На диаграмме рис. 6, а отображены затраты площади кристалла для базовой, конвейерной и параллельной архитектур. Видно, что конвейерная реализация обеспечивает экономию ресурсов, в то время как параллельная

версия, несмотря на увеличение площади, дает значительный прирост производительности, что отражено на рис. 6, б.

Сравнение архитектур для разных типов кодов представлено на рис. 7.

Сравнение оптимизированных архитектур для разных кодов

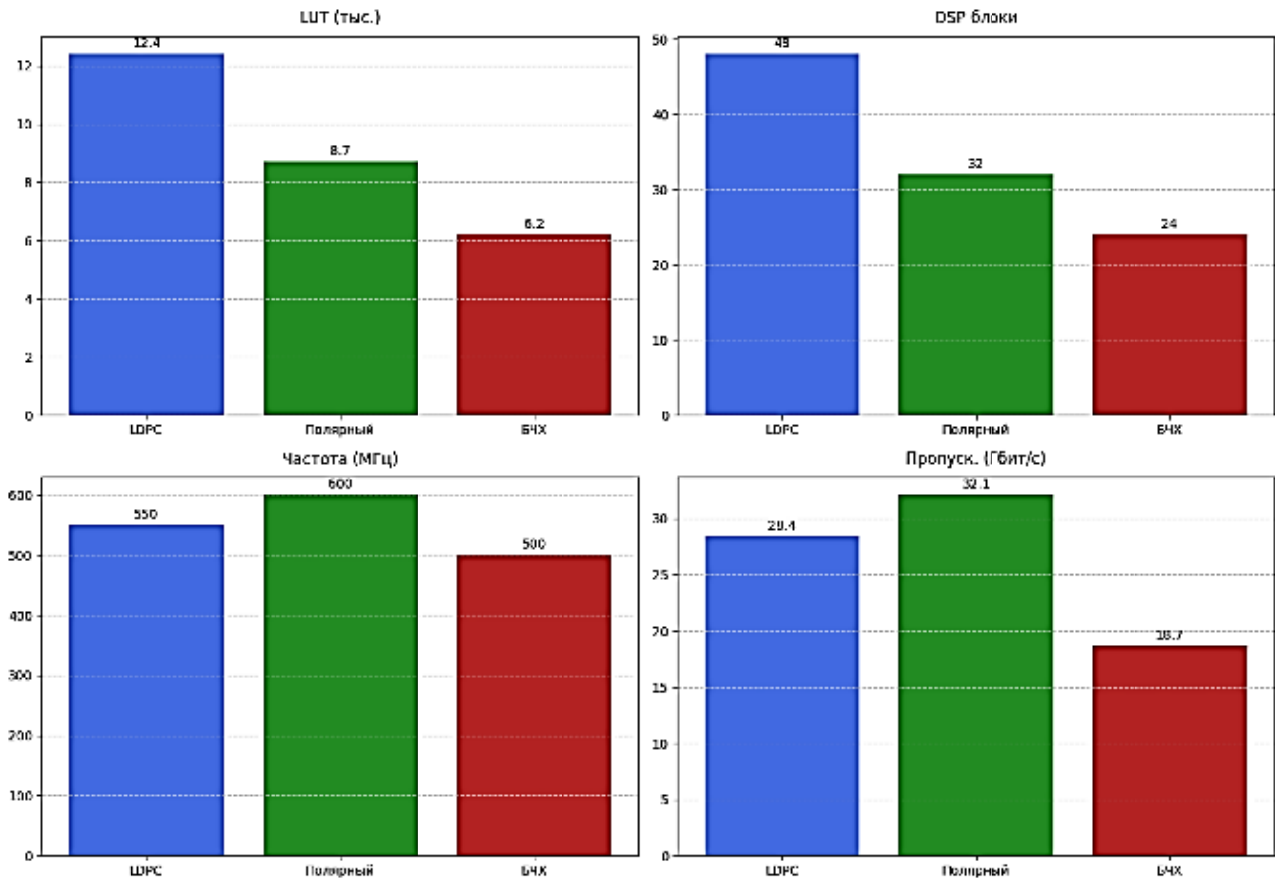


Рис. 7. Сравнение оптимизированных архитектур для разных кодов

Особый интерес вызывает анализ использования DSP-блоков, где БЧХ-код демонстрирует наиболее эффективное применение благодаря табличным методам. Полярный код показывает лучшие результаты по тактовой частоте, что объясняется его регулярной структурой,

а LDPC лидирует по пропускной способности благодаря массовому параллелизму [7].

График конвейерной обработки MAC-операций, показанный на рис. 8, детализирует временные характеристики каждого этапа вычислений.

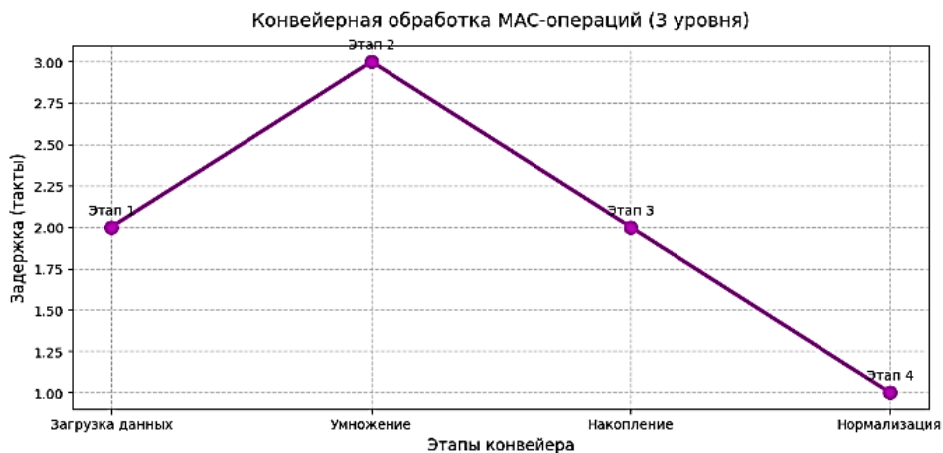


Рис. 8. Конвейерная обработка MAC-операций (3 уровня)

Ясно видно, как разбиение процесса на стадии загрузки данных, умножения, накопления и нормализации позволяет поддерживать высокий темп обработки. Особое внимание уделено этапу умножения, который занимает наибольшее количество тактов и поэтому яв-

ляется основным кандидатом для дальнейшей оптимизации.

Заключительная визуализация посвящена гибридной архитектуре нейросетевого декодера, показанная на рис. 9.

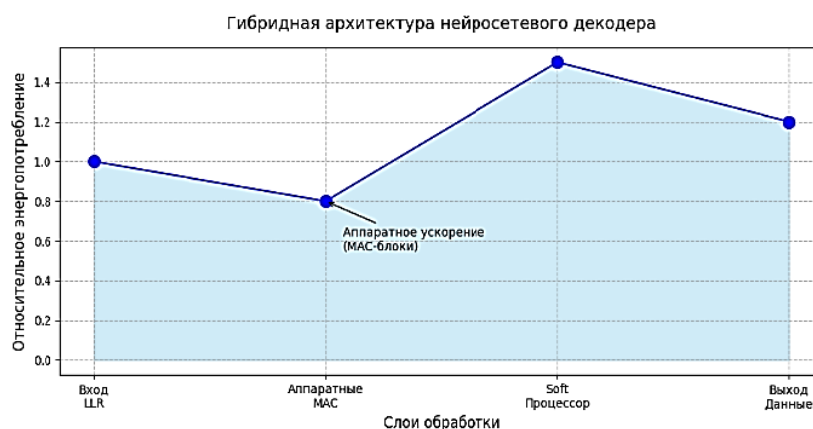


Рис. 9. Гибридная архитектура нейросетевого декодера

Заполненная область графика отображает энергопотребление на различных стадиях обработки. Аппаратные МАС-блоки показывают наименьшее энергопотребление, что подчеркивает их эффективность для массовых вычислений. Пик потребления приходится на этап работы soft-процессора, где выполняются более сложные вычисления, не поддающиеся эффективной аппаратной реализации.

Заключение

Проведенное исследование продемонстрировало значительный потенциал оптимизации ПЛИС-архитектур для нейросетевого декодирования блочных кодов. Разработанные подходы к модификации адаптивных логических модулей (ALM) и оптимизации МАС-операций позволили достичь существенного улучшения ключевых показателей эффективности. Предложенная архитектура с двухуровневыми цепочками переноса в ALM обеспечила снижение использования логических ресурсов на 25-30 % и повышение производительности на 9-12 % для различных типов кодов, что подтверждено результатами моделирования.

Особого внимания заслуживает разработанная методика конвейеризации МАС-операций, которая позволила значительно увеличить пропускную способность декодеров при сохранении приемлемого уровня энергопотребления. Гибридная архитектура, соче-

тающая аппаратные МАС-блоки и программируемые soft-процессоры, показала свою эффективность для обработки длинных кодовых слов, характерных для современных систем связи 5G/6G.

Литература

1. Reduced-Complexity Decoding of LDPC Codes / J. Chen [et al.] // IEEE Transactions on Communications. 2005. 53(8). pp. 1288-1299.
2. Башкиров А.В., Хорошайлова М.В., Демихова А.С. Методика оптимизации хранения данных на базе флэш-памяти с учетом анализа порогового напряжения // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2024. Т. 20. № 4. С. 74-81.
3. Marchand C., Boutillon E. NB-LDPC check node with pre-sorted input // 9th International Symposium on Turbo Codes and Iterative Information Processing (ISTC). 2016. Sept. pp. 196-200.
4. A novel architecture for elementary-check-node processing in nonbinary ldpc decoders / O. Abassi [et al.] // IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs. Feb 2017. Vol. 64. No. 2. pp. 136-140.
5. Kim S., Park I.-C. Efficient FPGA Implementation of 5G NR LDPC Decoder // IEEE Transactions on Circuits and Systems I. 2019. 66(8). pp. 3129-3142.
6. Хорошайлова М.В., Кузнецов А.В., Демихова А.С. Методика определения типов шифрования линейны блочных кодов // Радиотехника. 2024. Т. 88. № 7. С. 40-44.
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.

Информация об авторах

Хорошайлова Марина Владимировна – канд. техн. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: pmv2205@mail.ru, ORCID: orcid.org/0000-0001-9167-9538

OPTIMIZATION OF FPGA ARCHITECTURES FOR NEURAL NETWORK DECODING BLOCK CODES

M.V. Khoroshaylova

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract: this paper explores methods for optimizing programmable gate array (FPGA) architectures for the efficient implementation of neural network decoders for block codes, including low-density parity-check (LDPC), polar, and Bose-Chaudhuri-Hocquenghem (BCH) codes. The focus is on hardware modifications that enable achieving an optimal balance between decoding accuracy and computational efficiency. Specialized architectural solutions for FPGAs are developed and analyzed, including modified lookup table (LUT) schemes with adaptive bit depth and hardware accelerators for real-time node checking operations. The developed solutions are particularly relevant for iterative decoding algorithms (Min-Sum) applied to LDPC codes, which require intensive soft-decision processing. Experimental results demonstrate a 30% increase in decoder throughput compared to traditional implementations, a 20% reduction in power consumption while maintaining correction capability, and the ability to dynamically adapt decoding parameters for different types of block codes. The proposed architectural solutions demonstrate particular efficiency when processing long codewords ($n > 1000$), typical of modern 5G/6G communication systems and data storage systems

Key words: block codes, neural network decoding, FPGA optimization, adaptive architecture, hardware acceleration

Acknowledgements: the work was carried out with the financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the framework of the state assignment (no FZGM-2025-0002)

References

1. Chen J., Dholakia A., Eleftheriou E., Fossorier M.P.C., Hu X.-Y. "Reduced-complexity decoding of LDPC codes", *IEEE Transactions on Communications*, 2005, no. 53(8), pp. 1288–1299.
2. Bashkirov A.V., Khoroshaylova M.V., Demikhova A.S. "Methodology for optimizing flash memory-based data storage based on threshold voltage analysis", *Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2024, vol. 20, no. 4, pp. 74–81.
3. Marchand C., Boutillon E. "NB-LDPC check node with pre-sorted input", *2016 9th International Symposium on Turbo Codes and Iterative Information Processing (ISTC)*, Sept 2016, pp. 196–200.
4. Abassi L. et al. "A novel architecture for elementary-check-node processing in nonbinary LDPC decoders", *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, Feb 2017, vol. 64, no. 2, pp. 136–140.
5. Kim S., Park, I.-C. "Efficient FPGA implementation of 5G NR LDPC decoder", *IEEE Transactions on Circuits and Systems I*, 2019, no. 66(8), pp. 3129–3142.
6. Khoroshaylova M.V., Kuznetsov A.V., Demikhova A.S. "Methodology for determining types of linear block code encryption", *Radio Engineering*, 2024, vol. 88, no. 7, pp. 40–44.
7. Khoroshaylova M.V. "FPGA-based channel coding architecture for a 5G wireless network using high-level synthesis", *Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2018, vol. 14, no. 2, pp. 99–105.

Submitted 26.06.2025; revised 06.10.2025

Information about the author

Marina V. Khoroshaylova, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: pmv2205@mail.ru, orcid.org/0000-0001-9167-9538

АНТЕННАЯ РЕШЕТКА НА ОСНОВЕ ПАРАБОЛИЧЕСКИХ АНТЕННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

И.А. Баранников¹, Е.А. Ищенко¹, Ю.Г. Пастернак¹, Д.К. Проскурин¹, С.М. Фёдоров^{1,2}¹Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия²Международный институт компьютерных технологий, г. Воронеж, Россия

Аннотация: рассматривается разработанная антенная решетка на основе параболических антенных элементов и уникальность разработанной конструкции. Уникальность приведённого технического решения состоит в том, что разработанная система является антенной решеткой с очень большим электрическим периодом, и, несмотря на период расположения элементов, существенно больший длины волны, характеризуется уровнем боковых лепестков в горизонтальной плоскости не хуже -13.2 дБ, что соответствует синфазному и равноамплитудному раскрытию. Рассматривается непосредственно конструкция решётки, проводится компьютерное моделирование с целью получения характеристик антенной решетки. Решетка реализована на основе четырех сегментов зеркальной параболической антенны. Для облучения антенной решетки используется волноводный синфазный и равноамплитудный делитель мощности и вращающиеся облучатели рупорного типа, выполняющие также функцию механических поляризаторов. В ходе выполнения компьютерного моделирования получена диаграмма направленности разработанной антенной решетки. Ширина полученной диаграммы направленности системы также соответствует синфазному и равноамплитудному раскрытию. На частоте 14.5 ГГц коэффициент направленного действия соответствует величине 34.58 изотропных дБ. Ширина главного лепестка по уровню половинной мощности составила величину 2.9 градуса. Уровень боковых лепестков при этом соответствует величине -14.9 дБ. Удалось разработать недорогую зеркальную систему с хорошими характеристиками

Ключевые слова: зеркальная антенна, антенная решётка, управляемая поляризация

Благодарности: работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания (проект № FZGM-2025-0004)

Введение

Спутниковая связь довольно важна в настоящее время. Для неё характерен переход в высокочастотные миллиметровые диапазоны. Всё больше разнообразных прототипов антенных систем для связи в миллиметровом диапазоне разрабатывается и совершенствуется повсеместно. Традиционно для мобильных терминалов спутниковой связи применяется система на основе линзовой структуры, либо же на основе зеркальных антенн или их элементов. В настоящей статье будет рассмотрен пример разработанного прототипа синфазной антенной решётки из усеченных параболических антенн.

Зеркальная антенная решётка существенно легче, дешевле в изготовлении и технологичнее линзовой решётки. При использовании зеркальной антенны на мобильных терминалах обычно необходимо применение радиопрозрачных укрытий, которые являются и защитой, и обтекателем антенны. Но применение радиопрозрачных обтекателей увеличивает массогабаритные показатели системы. Существуют разработки, подразумевающие использование купольных линзовых антенн, в которых

поверхность линзы является своеобразным куполом для расположенной под ней облучающей антенной решётки. Линза преломляет лучи облучателя, находящегося под ней, и одновременно защищает антенную решётку от механических воздействий. Но производство схожих линзовых структур является довольно дорогостоящим, менее технологичным, чем производство зеркальных антенн. Также конструкция линзовой структуры имеет большую массу, чем зеркальной антенной решётки.

Пример купольной линзовой антенны в контексте использования её на мобильных терминалах для обеспечения спутниковой связи миллиметрового диапазона рассматривается в работе [1]. Как преломляющие поверхности обычно применяют параболические, сферические и другие поверхности вращения. Получившийся коэффициент усиления тороидальной линзовой антенны составляет около 17...17,5 дБ для $\epsilon = 2,3$ и около 19 дБ для $\epsilon = 2,6$. При определенном подборе значений диэлектрической проницаемости величина коэффициента усиления может достигать до 21 дБ. При малых значениях диэлектрической проницаемости материала увеличение сектора сканирования излучающей решётки вплоть до полусферы может быть затруднительным, а слиш-

ком большие значения диэлектрической проницаемости повлекут сильные переотражения от поверхностей линзы и обязательность принятия мер по их нивелированию. К недостаткам купольных линзовых антенн относится также то, что расширение сектора сканирования излучающей решётки соответствует понижению коэффициента усиления антенны. При этом во время излучения в секторе углов, прилегающих к зениту (в направлении нормали к плоскости решётки), спад уровня коэффициента усиления соответствует 10...15 дБ и более (но чтобы частично скомпенсировать падение коэффициента усиления в такой области углов, в некоторой небольшой мере повысить его и одновременно уменьшить вес антенны, купольная линза может изготавливаться усеченной). Ко всему этому, как было сказано выше, производство линзовых структур является значительно более дорогостоящим, чем производство зеркальных решёток и менее технологичным. Также линзовые структуры обычно обладают большей массой, чем зеркальные. И, также, исходя из указанных расчётных данных в вышеупомянутой статье, в итоге не удастся добиться довольно высокого уровня коэффициента усиления такой антенной системы.

Высокоскоростные терминалы спутниковой связи мобильного базирования должны быть доступными по цене большинству, по этой причине актуальным является разработка недорогих и простых антенных систем, а не только ФАР (фазированных антенных решёток), АФАР (активных фазированных антенных решёток) и других дорогостоящих антенных систем. Важное отличие зеркальных от линзовых систем заключается в том, что зеркальная антенная решётка намного легче, дешевле и технологичнее линзовой.

Конструкция антенной системы

Далее будет рассмотрена разработанная антенная решетка на основе параболических антенных элементов. Решетка реализована на основе четырех сегментов зеркальной параболической антенны. Зеркальными антеннами называют антенны, у которых поле в раскрытии формируется в результате отражения электромагнитной волны от металлической поверхности специального рефлектора (зеркала) [2]. Зеркальные параболические антенны – это наиболее распространенные остронаправленные антенны. Их частое применение в разных областях связи можно пояснить простотой их

конструкции, возможностью получения различных диаграмм направленности, большим уровнем коэффициента полезного действия, малой шумовой температурой и достойными диапазонными характеристиками [3]. Внешний вид разработанной антенной системы представлен на рис. 1.

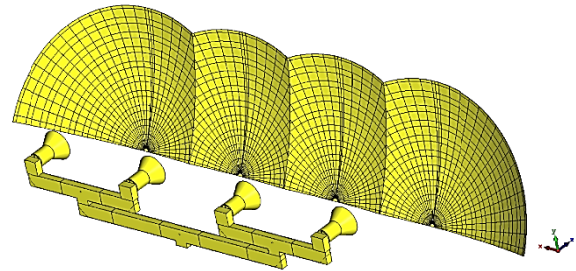


Рис. 1. Внешний вид разработанной антенной системы

Из рис. 1 можно наблюдать основные составные части конструкции антенной системы: облучатели рупоры, круглые и прямоугольные волноводы, делители мощности, и непосредственно саму отражательную антенную решётку, выполненную из четырёх усеченных сегментов параболических антенн. Предполагаемая область применения – в высокоскоростных терминалах спутниковой связи мобильного базирования. Антенна располагается на крыше автомобиля, или – локомотива, или – летательного аппарата, или судна. Необходимо размещение её под радиопрозрачным обтекателем. Так как антенная система размещается на крыше транспортного средства, то она должна быть небольшой высоты и вытянутой по горизонтали, для реализации достаточно высоких значений коэффициента усиления.

В приведённой конфигурации антенной системы реализованы механические поляризаторы – рупоры с отрезками круглых волноводов синхронно вращаются от электропривода, плоскость линейной поляризации при этом также плавно вращается. Поляризаторы к тому же могут использоваться и других видов – например, на основе ферритов, или p-i-n диодов.

Уникальность приведённого технического решения состоит в том, что это есть антенная решетка с очень большим электрическим периодом, и, несмотря на период расположения элементов, существенно больший длины волны, характеризуется уровнем боковых лепестков в горизонтальной плоскости не хуже -13.2 дБ, что соответствует синфазному и равноамплитудному раскрытию. Ширина диаграммы направленности системы также соответствует синфазному и равноамплитудному раскрытию.

Этот результат достигается благодаря тому, что области параболических сегментов, расположенные вблизи их границы, облучаются двумя облучателями, в результате чего существенно сужается неравномерность диаграммы направленности в горизонтальной плоскости.

Для облучения антенной решетки используется волноводный синфазный и равноамплитудный делитель мощности и вращающиеся облучатели рупорного типа, выполняющие также функцию механических поляризаторов. Разрез облучателя представлен на рис. 2.

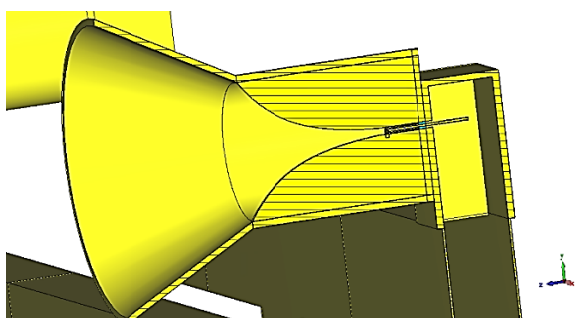


Рис. 2. Облучатель в разрезе

Приведенный на рис. 2 вращающийся облучатель выполняет функцию механического поляризатора, возбуждаемого штырем, погруженным в прямоугольный волновод.

Характеристики разработанной антенной системы

Было проведено компьютерное моделирование представленной антенной системы с помощью программы CST STUDIO. Результаты моделирования трёхмерной диаграммы направленности на частоте 14.5 ГГц представлены на рис. 3.

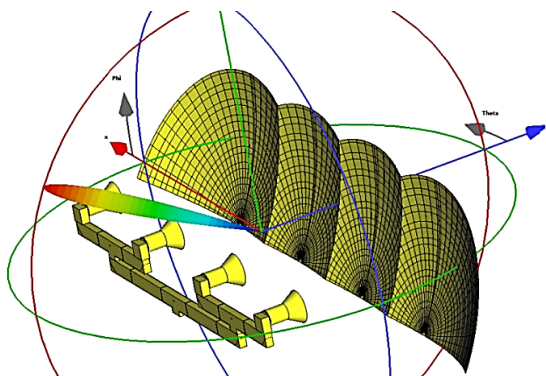


Рис. 3. Трёхмерная диаграмма направленности антенной системы на частоте 14.5 ГГц

На частоте 14.5 ГГц коэффициент направленного действия системы соответствует величине 34.58 изотропных дБ. Проекция диаграммы

направленности на плоскость (Theta = 150) представлена на рис. 4.

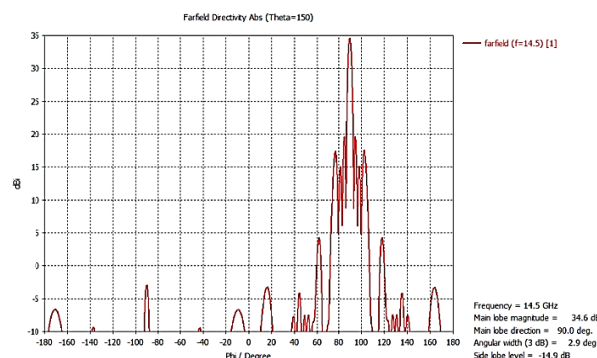


Рис. 4. Проекция диаграммы направленности на плоскость

Из проекции диаграммы направленности на плоскость на рис. 4 (угол Theta=150) можно увидеть, что ширина главного лепестка по уровню половинной мощности составила величину 2.9 градуса. Уровень боковых лепестков при этом соответствует величине -14.9 дБ.

Заключение

В данной работе была рассмотрена и исследована разработанная антенная решетка на основе параболических антенных элементов. Уникальность рассмотренной разработанной конфигурации в том, что это антенная решетка с очень большим электрическим периодом, но и при таком периоде размещения элементов, существенно превышающем длину волны, реализуется уровень боковых лепестков в горизонтальной плоскости не хуже -13.2 дБ, что говорит о синфазном и равноамплитудном раскрыве. Ширина диаграммы направленности системы также соответствует синфазному и равноамплитудному раскрыву. Удаётся добиться такого результата с помощью того, что области параболических сегментов, расположенные вблизи их границы, облучаются двумя облучателями, и из-за этого значительно сужается неравномерность диаграммы направленности в горизонтальной плоскости. Из результатов компьютерного моделирования было получено, что на частоте 14.5 ГГц коэффициент направленного действия соответствует величине 34.58 изотропных дБ. Ширина главного лепестка по уровню половинной мощности составила величину 2.9 градуса. Уровень боковых лепестков при этом соответствует величине -14.9 дБ. Можно сказать то, что удалось разработать недорогую зеркальную систему с очень достойными характеристиками, что подтверждают результаты компьютерного моделирования.

Литература

1. Гибридные диэлектрические линзовые антенны средств связи сантиметрового и миллиметрового диапазонов. Обзор / Е.В. Захаров [и др.] // Журнал радиоэлектроники, 2020. № 2. С. 3-12.

2. Обзор зеркальных параболических антенн / А.Г. Анисимов [и др.] // Надежность и качество: труды Международного симпозиума, 2017. Т. 1. С. 166-167.

3. Чистюхин В.В. Антенно-фидерные устройства: учеб. пособие. М.: МИЭТ, 2010. 116 с.

Поступила 05.09.2025; принята к публикации 11.11.2025

Информация об авторах

Баранников Илья Андреевич – аспирант, ассистент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: 8thbar@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3093-0455>

Ищенко Евгений Алексеевич – аспирант, инженер, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: kursk1998@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5270-0792>

Пастернак Юрий Геннадьевич – д-р техн. наук, профессор, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, д. 84), e-mail: pasternakyg@mail.ru

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

Фёдоров Сергей Михайлович – канд. техн. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84); Международный институт компьютерных технологий (394026, Россия, г. Воронеж, ул. Солнечная, д. 29 б), e-mail: fedorov_sm@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9027-6163>

ANTENNA ARRAY BASED ON PARABOLIC ANTENNA ELEMENTS

I.A. Barannikov¹, E.A. Ishchenko¹, Yu.G. Pasternak¹, D.K. Proskurin¹, S.M. Fedorov^{1,2}

¹Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

²International Institute of Computer Technologies, Voronezh, Russia

Abstract: this paper examines the developed antenna array based on parabolic antenna elements and the uniqueness of the developed design. The uniqueness of the presented technical solution lies in the fact that the developed system is an antenna array with a very long electrical period. Despite the period of the element arrangement, which is significantly greater than the wavelength, it is characterized by a sidelobe level in the horizontal plane no worse than -13.2 dB, which corresponds to an in-phase and equal-amplitude aperture. We examined the array design itself, and performed computer modeling to obtain the antenna array characteristics. We implemented the array based on four segments of a reflector parabolic antenna. To irradiate the antenna array, we used a waveguide in-phase and equal-amplitude power divider and rotating horn-type feeds, which also act as mechanical polarizers. During the computer modeling, we obtained the radiation pattern of the developed antenna array. The width of the resulting radiation pattern of the system also corresponds to an in-phase and equal-amplitude aperture. At 14.5 GHz, the directivity is 34.58 isotropic dB. The main lobe width at half power is 2.9 degrees. The side lobe level is -14.9 dB. We were able to develop a low-cost mirror system with good performance

Key words: reflector antenna, antenna array, controlled polarization

Acknowledgments: the work was carried out with the financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the framework of the state assignment (project no. FZGM-2025-0004)

References

1. Zakharov E.V. et al. "Hybrid dielectric lens antennas for centimeter- and millimeter-wave communication equipment", review, *Journal of Radio Electronics (Zhurnal radioelektroniki)*, 2020, no. 2, pp. 3-12.
2. Anisimov A.G. et al. "Review of reflector parabolic antennas", *Proc. of the Int. Symposium "Reliability and Quality" (Nadezhnost' i kachestvo)*, 2017, vol. 1, pp. 166-167.
3. Chistyukhin V.V. "Antenna-feeder devices" ("Antenno-fidernye ustroystva"), Moscow: MIET, 2010, 116 p.

Submitted 05.09.2025; revised 11.11.2025

Information about the authors

Ilya A. Barannikov, graduate student, assistant, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), tel.: +7(473)243-77-29, e-mail: 8thbar@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3093-0455>

Evgeniy A. Ishchenko, graduate student, 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. (Physics and Mathematics), Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: pasternakyg@mail.ru

Dmitriy K. Proskurin, Cand. Sc. (Physics and Mathematics), Associate Professor, Rector, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: rector@cchgeu.ru

Sergey 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>

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИАГРАММЫ НАПРАВЛЕННОСТИ ЭКВИДИСТАНТНОЙ МИКРОФОННОЙ РЕШЁТКИ

А.И. Сукачев, Р.А. Верлин, Е.А. Сукачева, А.В. Башкиров

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

Аннотация: представлена методика численного моделирования диаграммы направленности эквидистантной микрофонной решётки с учетом акустико-механического взаимодействия. Исследовано влияние механических деформаций несущей платы на пространственные характеристики массива при воздействии плоской акустической волны частотой 500 Гц. Разработана модель, включающая плату размером $260 \times 260 \times 2$ мм из материала FR-4 с 36 микрофонами, расположенными с шагом 50 мм. Проведено сравнительное моделирование для двух случаев: упругая плата и абсолютно жесткая конструкция. Показано, что максимальная деформация платы составляет $2,5993 \times 10^{-9}$ м, а средняя относительная погрешность синфазных сумм сигналов между моделями не превышает 0,0358 %. Для построения диаграммы направленности использован алгоритм синфазного суммирования сигналов с последующей нормировкой и переводом в логарифмический масштаб. Результаты демонстрируют, что для данной конфигурации и частотного диапазона влияние механических деформаций на пространственные характеристики решетки является пренебрежимо малым. Полученные результаты позволяют конкретизировать границы применимости упрощенных моделей и разрабатывать эффективные алгоритмы пространственной обработки сигналов без учета деформаций несущей конструкции. Предложенная методика может быть использована для оптимизации конструкций микрофонных решеток на этапе проектирования

Ключевые слова: диаграмма направленности, микрофонная решётка, акустическое взаимодействие, деформация платы, эквидистантная решётка, акустическое давление, синфазное суммирование

Благодарности: работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № FZGM-2025-0002)

Введение

Эквидистантные микрофонные решётки являются ключевым элементом в системах пространственной обработки звука, где их эффективность определяется диаграммой направленности (ДН) — угловой зависимостью чувствительности к акустическим волнам.

В настоящее время ДН таких решёток традиционно моделируется в предположении абсолютной жесткости несущей конструкции [1]. При этом влияние акустико-механического взаимодействия, заключающегося в возникновении упругих деформаций платы под действием звукового давления, в большинстве работ игнорируется, что может приводить к погрешности прогнозирования пространственных характеристик.

Целью данной работы является разработка методики моделирования ДН эквидистантной микрофонной решётки, учитывающей акустико-механическое взаимодействие. Практическая значимость исследования заключается в возможности оценки влияния деформаций конструкции на направленные свойства массива и

последующей оптимизации геометрии решёток для конкретных прикладных задач без проведения натурных экспериментов.

Математическая модель

Для описания взаимодействия акустического поля с упругой конструкцией решётки использовалась связанная задача акустики и структурной механики.

Акустическая часть модели описывается трёхмерным волновым уравнением [2]:

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2}, \quad (1)$$

где p — акустическое давление;

c — скорость звука;

x — координата в направлении распространения волны;

t — время распространения волны.

Для гармонических колебаний с определенной частотой уравнение (1) преобразуется к уравнению Гельмгольца [2]:

$$\nabla^2 p + k^2 p = 0, \quad (2)$$

где k — волновое число;

∇ — оператор Лапласа.

Переход от трёхмерного волнового уравнения к уравнению Гельмгольца представляет собой фундаментальную математическую процедуру, основанную на методе разделения переменных и применяемую для анализа гармонических акустических процессов.

Ключевая идея заключается в представлении комплексной амплитуды давления в виде произведения двух функций: одной, зависящей только от пространственных координат, и другой — описывающей гармоническую временную зависимость.

Механическая часть модели описывает деформации платы под действием акустического давления уравнениями теории упругости [3]:

$$\nabla \sigma + F = \rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}, \quad (3)$$

где σ — тензор напряжений;

F — вектор объёмных сил;

ρ — плотность материала;

u — вектор перемещений;

∇ — дивергенция тензора.

Связь между задачами обеспечивается через граничные условия на поверхности платы, где акустическое давление p создает распределенную нагрузку.

Расчет диаграммы направленности выполняется методом синфазного суммирования:

$$P_o(\theta, \varphi) = \sum_{i=1}^N p_i e^{j(\omega t - k \cdot r_i)}. \quad (4)$$

Основная часть

Для разработки данного метода была использована модель платы с 36 микрофонами [4]. Сама плата имеет размеры 260 на 260 мм с толщиной 2 мм. Расстояние между центрами микрофонов составляет 50 мм. Следует отметить, что материалом платы является FR-4 (рис. 1).

Для точных результатов моделирования была создана воздушная полость вокруг платы (рис. 2). Внутри нее проходит плоская падающая волна («Incident Wave Source») [5], ее амплитуда составляет 1 Па и также с параметрическим углом падения волны относительно платы (рис. 3). Моделирование проходило на частоте 500 Гц.

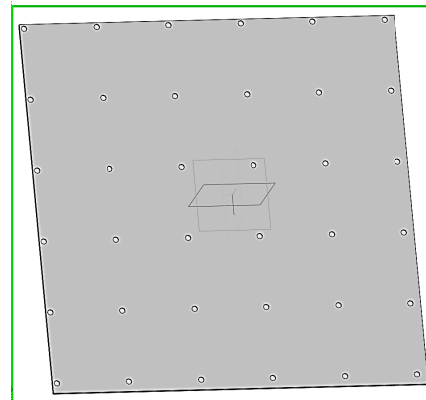


Рис. 1. 3D-модель платы

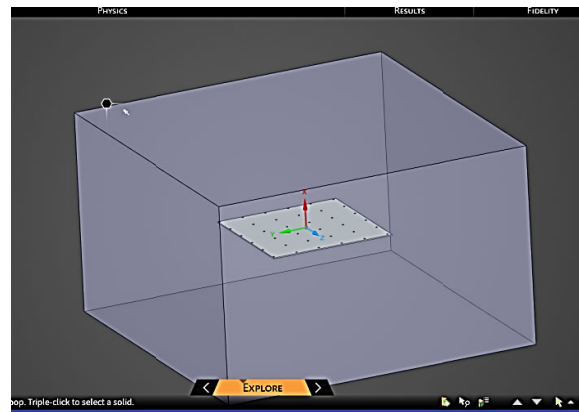


Рис. 2. Графическая модель воздушной полости вокруг платы

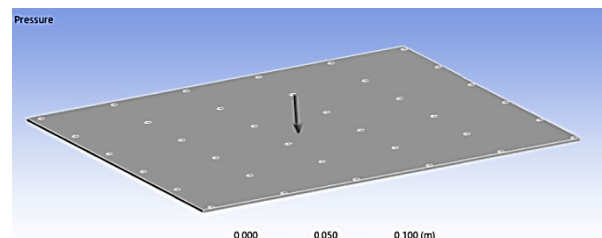


Рис. 3. Направление плоской падающей волны

Деформация платы

Результаты моделирования показали механические деформации платы под воздействием акустического давления (рис. 4). Максимальное значение деформации составило $2,5993 \times 10^{-9}$ м.

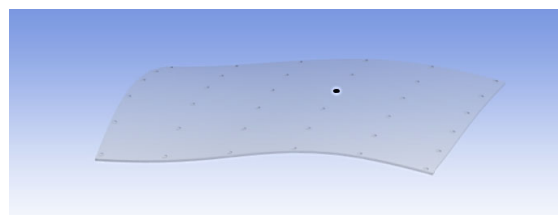


Рис. 4. Модель механической деформации платы под воздействием акустического давления

Наблюдаемый изгиб платы представляет собой сложный механический отклик на распределенное акустическое давление и обусловлен совокупностью нескольких физических факторов. Прежде всего, акустическая волна, падающая на поверхность платы, создает пространственно-неоднородное давление. Это переменное давление действует как распределенная нагрузка, вызывая изгибные деформации. Однако в отличие от статической нагрузки, динамический характер акустического воздействия приводит к возбуждению определенных мод колебаний, соответствующих собственным частотам пластины.

Геометрия платы и условия закрепления играют определяющую роль в формировании картины деформаций. Центральная часть платы, являющаяся наиболее удаленной от краев, демонстрирует максимальную амплитуду прогиба (рис. 5). При этом распределение деформаций существенно зависит от соотношения между характерным размером платы и длиной акустической волны. Когда эти параметры становятся соизмеримыми, возникает сложная интерференционная картина, усиливающая деформацию в определенных областях.

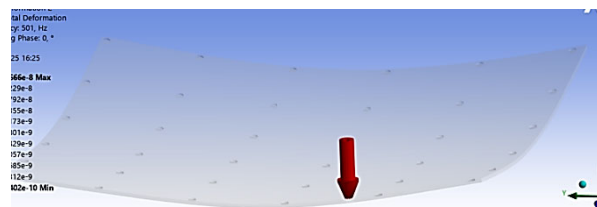


Рис. 5. Максимальная амплитуда прогиба на центральной части платы

Для оценки влияния деформаций на пространственные характеристики решётки проведено сравнительное моделирование двух конфигураций: упругая плата (полная связанная задача); абсолютно жёсткая плата (граничное условие твёрдой стенки).

Сравнение проведено в диапазоне углов падения волны от 77° до 90° . Результаты сравнения синфазных сумм сигналов представлены в табл. 1.

Таблица 1

Сравнения синфазных сумм сигналов на двух платах

Угол наклона	$P_{\text{упр.}}, \text{Па}$	$P_{\text{жест.}}, \text{Па}$	Погрешность, %
77	38,7938	38,8076	0,0356
78	38,8694	38,8833	0,0357
79	38,9378	38,9517	0,0357
80	38,9988	39,0127	0,0357
81	39,0521	39,0660	0,0358
82	39,0977	39,1117	0,0358
83	39,1356	39,1496	0,0358
84	39,1657	39,1798	0,0359
85	39,1882	39,2023	0,0359
86	39,2029	39,2170	0,0360
87	39,2097	39,2238	0,0360
88	39,2086	39,2227	0,0360
89	39,1996	39,2137	0,0360
90	39,1829	39,1970	0,0360
Среднее			0,0358

Относительная погрешность рассчитывалась по формуле:

$$\delta = \frac{|P_{\text{упр}} - P_{\text{жест}}|}{P_{\text{жест}}} \times 100 \%. \quad (5)$$

Средняя погрешность в исследованном диапазоне углов составила 0,0358 %, что на три порядка меньше типичной погрешности акустических измерений (1-5 %).

Отсюда следует, что механические деформации платы под действием акустического давления частотой 500 Гц не оказывают значимого влияния на диаграмму направленности решётки. Полученные результаты позволяют пренебречь учётом деформаций при проектировании аналогичных микрофонных систем в данном частотном диапазоне.

Построение ДН

Для построения ДН под каждым углом направления прихода волны нами регистрировалось акустическое давление на каждом микрофоне (рис. 6).

Units	degree	degree	Pa	Pa	Pa	Pa	Pa	Pa	Pa	Pa	Pa	Pa	Pa
DP 0 (Current)	90	325	1,02885437	0,92577	0,91446	0,92363	0,92401	0,91545	0,92073	0,79205	0,76156		
DP 1	90	326	1,029826164	0,92931	0,92009	0,92973	0,93013	0,92113	0,92468	0,80126	0,77175		
DP 2	90	327	1,030799866	0,93286	0,92581	0,93593	0,93634	0,9269	0,92865	0,81042	0,78196		
DP 3	90	328	1,03177464	0,9364	0,93161	0,94222	0,94265	0,93276	0,93265	0,81951	0,79217		
DP 4	90	329	1,032749534	0,93994	0,93749	0,9486	0,94905	0,93869	0,93665	0,82853	0,80239		
DP 5	90	330	1,033723712	0,94346	0,94345	0,95506	0,95553	0,9447	0,94066	0,83745	0,81259		
DP 6	90	331	1,03469646	0,94697	0,94946	0,9616	0,96208	0,95078	0,94468	0,84628	0,82276		
DP 7	90	332	1,035666704	0,9505	0,95554	0,9682	0,96869	0,95691	0,9487	0,855	0,83289		
DP 8	90	333	1,03663373	0,95405	0,96167	0,97485	0,97536	0,96309	0,95271	0,86359	0,84297		
DP 9	90	334	1,037596464	0,95757	0,96784	0,98156	0,98209	0,96932	0,95671	0,87204	0,85298		
DP 10	90	335	1,038554072	0,96107	0,97405	0,98831	0,98886	0,97559	0,9607	0,88035	0,86291		
DP 11	90	336	1,039523005	0,96463	0,98029	0,9951	0,99566	0,98189	0,96466	0,8885	0,87275		
DP 12	90	337	1,04050684	0,96817	0,98655	1,00192	1,00249	0,98822	0,96865	0,89648	0,88248		
DP 13	90	338	1,041483164	0,97169	0,99283	1,00875	1,00935	0,99456	0,9727	0,90428	0,89209		
DP 14	90	339	1,042450666	0,97527	0,99912	1,0156	1,01621	1,00091	0,97673	0,91188	0,90157		
DP 15	90	340	1,043408632	0,97881	1,00541	1,02246	1,02308	1,00726	0,98072	0,91928	0,9109		
DP 16	90	341	1,044355869	0,98229	1,01169	1,02931	1,02995	1,01361	0,98467	0,92647	0,92007		
DP 17	90	342	1,045291424	0,98583	1,01796	1,03614	1,0368	1,01994	0,98862	0,93343	0,92907		
DP 18	90	343	1,046214461	0,98931	1,02421	1,04296	1,04363	1,02625	0,99253	0,94016	0,93789		
DP 19	90	345	1,048018336	0,99609	1,03663	1,0565	1,0572	1,03878	1,00026	0,95292	0,95492		
DP 20	90	346	1,048897386	0,99943	1,04279	1,06321	1,06392	1,045	1,00403	0,95897	0,96311		

Рис. 6. Таблица значений давления акустической волны на каждом микрофоне на определенном угле

В дальнейшем построение графика всей микрофонной решётки строилось путем син-фазного суммирования этих сигналов. После полного моделирования все значения переводилось из Па в Дб с помощью формулы:

$$20 \cdot \log_{10} \frac{P_{\text{вход}}}{P_{\text{выход}}}, \quad (6)$$

где $P_{\text{вход}} - 1 \text{ Па}$;

$P_{\text{выход}}$ – суммарное значение всех микрофонов на определенном угле.

По итогу была построена ДН в полярной и декартовой системе координат, которая представлена на рис. 7-8.

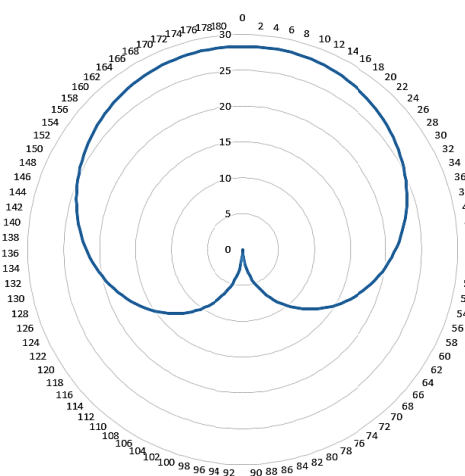


Рис. 7. ДН решётки в полярной системе координат

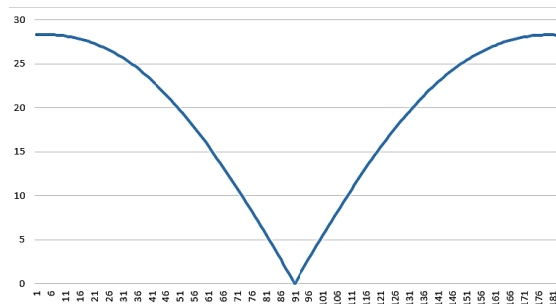


Рис. 8. ДН решётки в декартовой системе координат

Заключение

Разработанная методика позволяет с высокой точностью прогнозировать акустические характеристики системы на этапе проектирования, что существенно сокращает временные и финансовые затраты на изготовление физических прототипов.

Ключевым результатом работы стала количественная оценка влияния акустико-механического взаимодействия на пространственные характеристики массива. Установлено, что для исследованной конфигурации (частота 500 Гц, материал FR-4) механические деформации платы не оказывают значимого влияния на ДН — средняя погрешность между моделями с упругой и абсолютно жесткой платой составила 0,0358 %.

Полученные результаты позволяют конкретизировать границы применимости упрощенных моделей и разрабатывать эффективные алгоритмы пространственной обработки сигнала.

лов без учета деформаций несущей конструкции в заданном частотном диапазоне.

Предложенный подход открывает перспективы для дальнейшей оптимизации конструкций микрофонных решеток и разработки компенсационных алгоритмов для случаев, когда учет механических деформаций становится необходимым. Применение данной методики позволяет перейти к целенаправленному проектированию акустических систем с заданными характеристиками направленности.

Литература

1. Димуhamетов А.Р. Моделирование диаграммы направленности микрофонной решетки с использованием методов пространственной обработки сигналов [Электронный ресурс] // Научные труды КФУ. Казань: КФУ, 2021. - URL: https://kpfu.ru/portal/docs/F726408161/Dimuhametov_artur.pdf (дата обращения: 01.11.2025).

2. Волновые процессы: методические указания для самостоятельной работы бакалавров физики [Электронный ресурс] / сост.: Н.А. Тупицкая, А.Ю. Егорова. Санкт-Петербургский горный университет, 2019. 33 с. - URL: https://spmi.ru/sites/default/files/imci_images/univer/svedenia_jb_organizacii/metred_obshchie/-bakalavr_fizika.-volnovye-processy_k_sr.pdf (дата обращения: 01.11.2025).

3. Основы теории волновых процессов: учебное пособие [Электронный ресурс] / сост.: А.Г. Князева. Томск: Томский политехнический университет, 2020. 98 с. - URL: <https://portal.tpu.ru/SHARED/a/AGKNYAZEVA/Tab1/posobie.pdf> (дата обращения: 01.11.2025).

4. Программно-аппаратный комплекс обнаружения и идентификации беспилотных летательных аппаратов / В.Д. Мартынюк, Д.А. Рыбников, А.И. Сукачев, Е.А. Сукачева // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2024. Т. 20. № 3. С. 97-102.

5. ANSYS: руководство по работе в программном комплексе [Электронный ресурс] / Башкирский государственный аграрный университет. Уфа: БГАУ, 2020. 399 с. - URL: https://vestnik.bsau.ru/netcat_files/File/CIT/manuals/ANSYS.pdf (дата обращения: 21.10.2025).

Поступила 15.09.2025; принята к публикации 11.11.2025

Информация об авторах

Сукачев Александр Игоревич – старший преподаватель, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: mag.dip@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0238-5579>.

Верлин Роман Андреевич – студент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: romanverlin@yandex.ru

Сукачева Елена Александровна – ассистент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: mag.dip@yandex.ru.

Башкиров Алексей Викторович – д-р техн. наук, доцент, проректор по науке и инновациям, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: fabi7@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0939-722X>

SIMULATION OF THE RADIATION PATTERN OF AN EQUIDISTANT MICROPHONE ARRAY

A.I. Sukachev, R.A. Verlin, E.A. Sukacheva, A.V. Bashkirov

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract: the article presents a technique for numerical modeling of the radiation pattern of an equidistant microphone array, taking into account the acoustic-mechanical interaction. We investigated the effect of mechanical deformations of the carrier board on the spatial characteristics of the array under the influence of a plane acoustic wave with a frequency of 500 Hz. We developed a model that includes a 260×260×2 mm board made of FR-4 material with 36 microphones arranged in 50 mm increments. We carried out comparative modeling for two cases: an elastic board and an absolutely rigid structure. We show that the maximum deformation of the board is 2.5993×10^{-9} m, and the average relative error of the common-mode sums of signals between the models does not exceed 0.0358%. To construct the radiation pattern, we used an algorithm for common-mode summation of signals, followed by normalization and conversion to a logarithmic scale. The results demonstrate that for a given configuration and frequency range, the effect of mechanical deformations on the spatial characteristics of the lattice is negligible. The results obtained make it possible to specify the limits of applicability of simplified models and develop effective algorithms for spatial signal processing without taking into account deformations of the supporting structure. The proposed technique can be used to optimize microphone array designs at the design stage

Key words: radiation pattern, microphone array, acoustic interaction, board deformation, equidistant array, acoustic pressure, common-mode summation

Acknowledgments: this work was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (project no. FZGM-2025-0002)

References

1. Dimukhametov A.R. "Modeling of the radiation pattern of a microphone array using spatial signal processing methods", *Scientific papers of KFU (Nauchnye trudy KFU)*, 2021, available at: https://kpfu.ru/portal/docs/F726408161/Dimukhametov_artur.pdf (date of access: 11.01.2025).
2. "Wave processes: methodological guidelines for independent work of bachelors of physics", Saint Petersburg Mining University, 2019, 33 p., available at: https://spmi.ru/sites/default/files/imci_images/univer/svedenia_jb_organizacii/metred_obshchie/-bakalavr_fizika.-volnovye-processy_k_sr.pdf (date of access: 11.01.2025).
3. "Fundamentals of the theory of wave processes", Tomsk Polytechnic University, 2020, 98 p., available at: <https://portal.tpu.ru/SHARED/a/AGKNYAZEVA/Tab1/posobie.pdf> (date of access: 11.01.2025).
4. Martynyuk V.D., Rybnikov D.A., Sukachev A.I., Sukacheva E.A. "Hardware and software system for detection and identification of unmanned aerial vehicles", *Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2024, vol. 20, no. 3, pp. 97-102.
5. "ANSYS: a guide to working in the software package", Bashkir State Agrarian University, 2020, 399 p., available at: https://vestnik.bsau.ru/netcat_files/File/CIT/manuals/ANSYS.pdf (date of access: 11.01.2025).

Submitted 15.09.2025; revised 11.11.2025

Information about the authors

Aleksandr I. Sukachev, Assistant Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: mag.dip@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0238-5579>

Roman A. Verlin, student, Voronezh State Technical University (84 20-letya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: romanverlin@yandex.ru

Elena A. Sukacheva, Assistant, Voronezh State Technical University (84 20-letya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: mag.dip@yandex.ru

Aleksey V. Bashkirov, Dr. Sc. (Technical), Associate Professor, Vice-Rector for Science and Innovation, Voronezh State Technical University (84 20-letya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: fab7@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0939-722X>

АВТОМАТИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ ТЕРРИТОРИАЛЬНО-РАСПРЕДЕЛЕННОЙ СИСТЕМЫ РАДИОКОНТРОЛЯ

М.В. Жутиков¹, С.В. Баркалов¹, Д.А. Алексеев¹, А.Б. Токарев^{1,2}

¹АО «ИРКОС», г. Воронеж, Россия

²Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

Аннотация: диагностика состояния технических средств, входящих в территориально-распределенную автоматизированную систему радиоконтроля, является необходимым аспектом обеспечения бесперебойной работы системы. Рассматривается разработка структуры и алгоритмов функционирования подсистемы диагностики технических средств автоматизированной системы радиоконтроля. На основе сочетания «децентрализованного» и «централизованного» подходов разработаны структура и алгоритмы функционирования подсистемы автоматической диагностики. Эти подходы предполагают сбор диагностических данных с оборудования ЭВМ-контроллером на удаленной станции радиоконтроля и передачу их на центральный диагностический сервер для хранения и обработки. Полученная информация анализируется на предмет ее влияния на работоспособность системы на стороне сервера, при необходимости на событийной основе информируется персонал системы. Обосновано использование свободно распространяемого программного обеспечения с открытым исходным кодом – Zabbix, предложены методы интеграции систем радиоконтроля и диагностики, исследованы особенности оценки технического состояния радиоаппаратуры, построенной по модульному принципу, в рамках динамически изменяемой структуры системы радиоконтроля. Разработанная структура и алгоритмы функционирования подсистемы диагностики технических средств автоматизированной системы радиоконтроля внедрены в программное обеспечение специального математического обеспечения АРМАДА (СМО-АРМАДА), используемое в настоящее время в качестве управляющего программного обеспечения автоматизированной системы радиоконтроля, действующей на национальном уровне

Ключевые слова: диагностика, Simple Network Management Protocol (SNMP), автоматизированная система, радиоконтроль, программное обеспечение Zabbix, технические средства радиоконтроля

Введение

Развитие современных технологий в настоящее время позволило автоматизировать все основные процессы радиоконтроля и создать на основе применения дистанционно управляемых цифровых радиоприемных устройств и пеленгаторов территориально-распределённые системы, которые способны выполнять задачи радиоконтроля на национальном уровне как в интересах радиочастотной службы, так и в сфере обеспечения государственной безопасности [1, 2]. При этом нельзя не подчеркнуть значимость контроля состояния самих технических средств (далее – ТС) автоматизированной системы радиоконтроля (далее – АСР), таких как цифровые радиоприемные устройства, автоматические радиопеленгаторы, опорно-поворотные устройства, блоки электропитания и передачи данных и т.п., так как именно от их исправности зависит выполнение системой основных функций радиоконтроля. Диагностика состояния технических средств, входящих в состав системы, является важной частью работы АСР.

Одним из возможных вариантов анализа состояния АСР, рассматриваемых на примере специального математического обеспечения АРМАДА (далее – СМО-АРМАДА), является подсистема самодиагностики, которая в реальном времени ведет контроль за состоянием технических средств отдельно взятой удаленной станции радиоконтроля через работающее на ЭВМ-контроллере аппаратуры приложение диагностики. Для получения диагностических сведений с аппаратуры операторам локальных и удалённых (работающих в сети АСР) автоматизированных рабочих мест необходимо подключиться при помощи браузера к соответствующему web-серверу ЭВМ-контроллера. Такой подход к организации подсистемы диагностики рассматривался в работах [3, 4]. Подсистема имеет децентрализованную организацию, и позволяет контролировать состояние радиоаппаратуры как при автономной работе станции, так и при её работе в составе распределённой АСР.

В то же время «децентрализованная» подсистема не предоставляет функционал одно-временного мониторинга всего парка действующего оборудования АСР. Так, например, оператору Центра Управления АСР, развернутой на национальном уровне, для анализа со-

стояния всей системы радиоконтроля необходимо подключиться к web-серверу диагностики каждой из станций, а после, переключаясь между вкладками браузера (их количество пропорционально количеству радиоконтрольного оборудования), в ручном режиме производить диагностику. Помимо этого, оценка и анализ собранной телеметрии за время наблюдения недостаточно удобны из-за отсутствия возможности отображения детальной истории значений по каждому отдельному параметру.

Другим возможным подходом к организации подсистемы является использование «централизованного» варианта диагностики технических средств радиоконтроля, который основан на мониторинге оборудования посредством единого сервера диагностики, расположенного в Центре Управления АСР. Такой подход предпочтителен, если в системе развернуты дистанционно управляемые станции радиоконтроля, которые в своей локальной подсети не имеют компьютеров рабочих мест операторов, а работу технических средств радиоконтроля организует Центр управления.

Целью настоящей работы является разработка подсистемы диагностики, основанной

на комбинированном подходе, объединяющем «децентрализованный» и «централизованный» принципы построения. Данный подход позволяет минимизировать недостатки «децентрализованной» подсистемы и предоставляет ей дополнительные функциональные возможности «централизованной» подсистемы, рассмотренные далее.

Диагностика ТС радиоконтроля с использованием центрального сервера

«Централизованный» подход предполагает осуществление мониторинга технических средств радиоконтроля центральным сервером диагностики в автоматическом режиме посредством подключения к ЭВМ-контроллерам каждой станции, агрегируя все данные диагностики в Центре Управления. При использовании данного подхода для получения диагностических данных операторы, как Центра Управления, так и станций радиоконтроля, могут подключаться к центральному серверу диагностики, где сосредоточена вся необходимая информация. Данный подход продемонстрирован на схеме рис. 1.

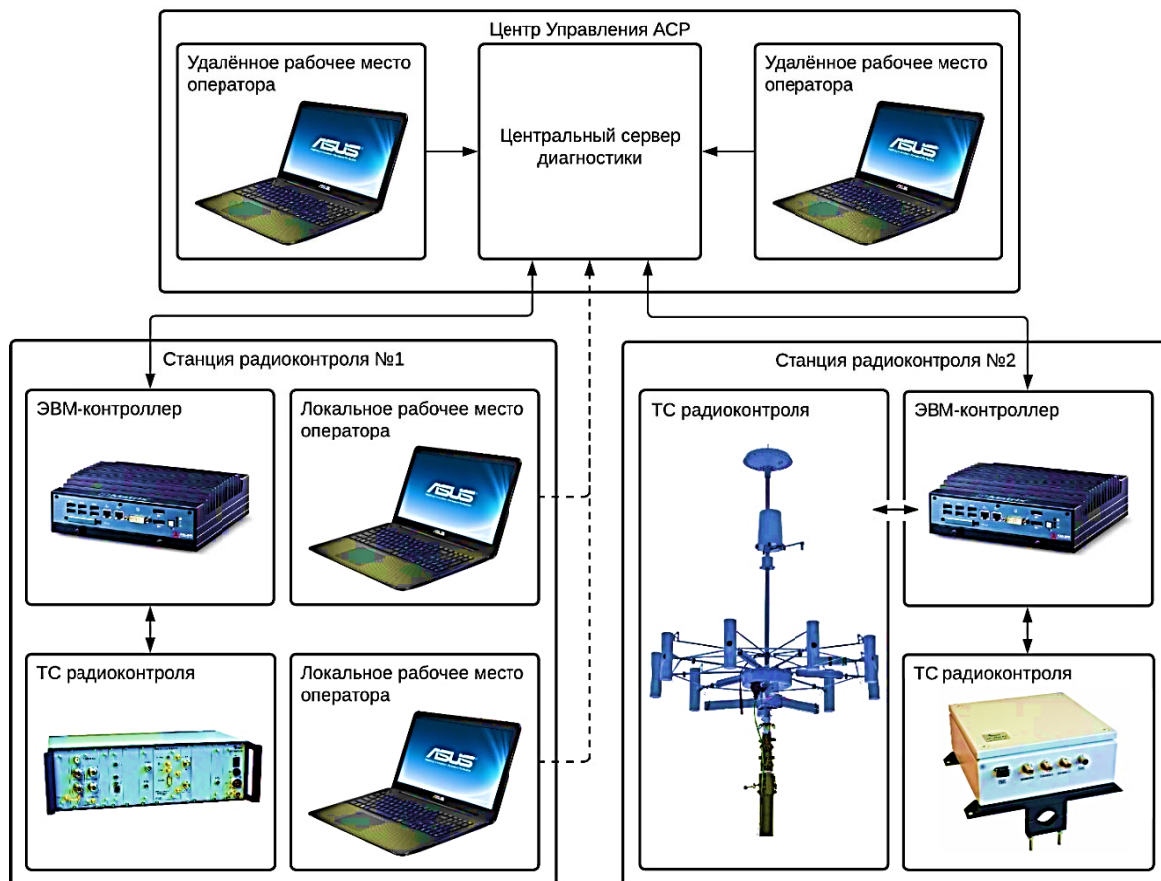


Рис. 1. Схема диагностики радиоконтрольного оборудования через центральный сервер диагностики

На рис. 1 представлен пример системы радиоконтроля, которая состоит из двух станций и Центра Управления, в состав которой входят [3, 5]:

1. Технические средства радиоконтроля, предназначенные для выполнения задач радиоконтроля, в том числе:

- выполнения панорамного анализа спектра в режиме реального времени;
- осуществления контроля радиоканалов;
- осуществления записи радиосигналов для последующего анализа;
- измерения напряжённости поля источников радиоизлучения;
- пеленгования и определения местоположения источников радиоизлучения.

2. ЭВМ-контроллеры аппаратуры, предназначенные для взаимодействия с техническими средствами радиоконтроля через драйвер аппаратуры с последующим предоставлением доступа к управлению ими через систему АСР.

3. Автоматизированные рабочие места (далее – АРМ) операторов для подключения к системе АСР, посредством которой происходит управление сетью технических средств радиоконтроля через соответствующие ЭВМ-контроллеры.

Алгоритм диагностики технических средств радиоконтроля:

1. Центральный сервер диагностики в автоматическом режиме собирает телеметрию со всей аппаратуры, подключенной в сеть АСР, подключаясь к ней через соответствующие ЭВМ-контроллеры.

2. ЭВМ-контроллеры аппаратуры, подключаясь к ТС радиоконтроля «напрямую» (в локальной подсети станции), предоставляют диагностическую информацию удалённому центральному серверу диагностики по запросам в сети АСР.

3. Центральный сервер диагностики обрабатывает и формализует полученную информацию, предоставляя её пользователям подсистемы посредством web-интерфейса.

4. Пользователи (операторы АРМ АСР) подключаются к центральному серверу диагностики для получения требуемой информации.

Такой подход даёт возможность проведения диагностики из «единой точки», объединив все средства радиоконтроля под управлением координирующей подсистемы с доступом из любого узла АСР через web-интерфейс центрального сервера. Его достоинствами являются:

- оперативное получение диагностической информации по всему парку радиоаппаратуры;
- удобство проведения анализа и сравнения параметров различных устройств, так как они находятся в единой базе;
- отсутствие необходимости изменять свойства элементов телеметрии (таких как пороговые значения, время опроса, единицы измерения и другие) на каждом отдельном узле;
- возможность осуществления централизованного хранения данных;
- доступность просмотра ранее полученной истории изменений параметров при отсутствии связи с диагностируемым узлом.

Анализируя предложенный подход и сравнивая его с «децентрализованным» подходом к диагностике, можно сделать вывод, что при их совместном использовании повышается эффективность и отказоустойчивость подсистемы диагностики.

Основные проблемы диагностики оборудования радиоконтроля

Техническими средствами радиоконтроля АСР являются радиотехнические средства, в том числе аппаратура связи и передачи данных.

При проектировании и разработке структуры технических средств обычно применяется модульный метод, который позволяет получать устройства с разными характеристиками путём комбинирования и связи различных блоков в едином устройстве [5, 6]. При этом объектами диагностики в каждом устройстве радиоконтроля являются модули из его состава, каждый из которых должен возвращать необходимые параметры, в том числе:

- токи и напряжения в контрольных точках каждого модуля;
- температуры компонентов модулей и окружающей среды;
- время наработки;
- другие технические параметры.

Регулярное измерение параметров каждого модуля ТС радиоконтроля позволяет спрогнозировать возможную неисправность аппаратуры и произвести превентивную замену блока, а в случае выхода блока из строя об этом будет в реальном времени известно персоналу, который произведет его оперативную замену.

Сложность диагностики модулей аппаратуры заключается в том, что каждый модуль возвращает свой индивидуальный набор параметров, который может различаться как между

разными модулями аппаратуры, так и в пределах разных исполнений одного и того же модуля. Аппаратура радиоконтроля также от устройства к устройству содержит разные модули, что дает возможность гибкой разработки устройств под требуемое техническое задание [5]. Представленные особенности не позволяют разработать фиксированный алгоритм для диагностики всего парка используемых технических средств.

Динамическая генерация структуры объектов диагностики

Для диагностики модульной радиоаппаратуры, учитывая отсутствие заранее известной структуры оборудования и списка возвращаемых параметров от модулей, целесообразно использовать динамическую генерацию структуры объектов, что даёт возможность производить диагностику технических средств радиоконтроля сложной произвольной структуры.

В СМО-АРМАДА в качестве основы для управления диагностикой технических средств радиоконтроля используется протокол SNMP (Simple Network Management Protocol), как наиболее распространенный протокол для диагностики сетевых устройств, работающих в стеке протоколов TCP/IP [7].

Реализация механизма динамической генерации объектов диагностики в рамках протокола SNMP возможна с использованием так называемых SNMP Extension Agent (SNMP агентов расширения), которые исполняют роль прослойки-коннекторов между основным SNMP-

агентом (SNMP-мастером или SNMP-службой в операционных системах Windows) и объектами диагностики (модулями радиоаппаратуры) и позволяют выполнять необходимые запросы к драйверу аппаратуры с последующим предоставлением диагностических данных по требованию [8].

Алгоритм работы агента расширения:

1. Обращение к драйверу аппаратуры для получения списка модулей и списка параметров диагностики каждого из модулей.

2. Формирование пространства доступных параметров для чтения и управления в базе данных MIB (Management Information Base) путём последовательного линейного присвоения Object Identifier ветви каждому доступному параметру.

3. Формирование файла-описания структуры *.mib на основе динамически сформированной базы данных MIB, что означает автоматическое генерирование текстового имени параметра каждому доступному числовому идентификатору. Для упрощения дальнейшей работы присваиваемое текстовое имя параметра содержит следующую информацию (формируется также за счёт данных от драйвера аппаратуры):

- числовой номер модуля аппаратуры;
- числовой номер типа параметра (например, входное напряжение, токи и другие);
- строка адреса модуля.

Пример динамической генерации файла-описания структуры базы данных MIB представлен в табл. 1.

Таблица 1

Динамическое формирование структуры базы MIB

ircosRoot0x4x00	.1.3.6.1.4.1.44664.1.5.1.1.1.0	Температура платы «Т7»
ircosRoot0x66x00	.1.3.6.1.4.1.44664.1.5.1.1.2.0	Входное напряжение платы «Т7»
ircosRoot0x60x00	.1.3.6.1.4.1.44664.1.5.1.1.3.0	Потребляемый платой «Т7» ток

Дальнейшая работа заключается в отправке SNMP-запроса на IP-адрес удалённого ЭВМ-контроллера аппаратуры (используя SNMP менеджер в Центре Управления АСР). Такой запрос возможно осуществить двумя доступными способами: по OID (Object Identifier) требуемого параметра и по текстовому наименованию параметра.

Обращение по OID в рамках динамического генерирования структуры объектов диагностики на узле возможно лишь при условии, что SNMP менеджеру в Центре Управления точно и однозначно известно, какой параметр в текущий момент находится «за данным» идентифи-

катором. При очередной инициализации SNMP агента расширения или смене аппаратуры (как и модуля аппаратуры) на узле, данный OID может быть присвоен другому блоку, о чем Центр Управления не будет уведомлён – это вызовет некорректное отображение параметров в Центре Управления и сбой подсистемы диагностики.

Обращение по текстовому имени через файл-описание структуры возможен лишь в том случае, когда запрос производится к тому узлу радиоконтроля, где был сформирован этот файл – в противном случае (например, если файл структуры-описания базы данных MIB

был сформирован для одного радиоприёмного устройства, а обращение производится ко второму устройству с другой структурой) это приведёт к неправильному разыменованию параметра, что также приведёт к ошибке отображения параметров.

Существует два возможных пути решения данной проблемы:

- осуществлять постоянный обмен файлами-описания базы данных MIB между удалённым оборудованием и Центром Управления АСП с последующей постоянной подменой этих файлов при выполнении SNMP-запроса методом «точка-точка»;

- осуществлять разыменование параметров на удалённом оборудовании и предоставлять Центру Управления лишь таблицу связи «Имя ↔ OID» с привязкой к определённому IP-адресу.

Оба подхода являются приемлемыми, однако, использование таблицы соответствия позволяет быстрее актуализировать данные связи за счёт передачи наиболее важной информации двумя полями одной таблицы без каких-либо задержек.

Для реализации второго подхода в СМО-АРМАДА существует утилита «Translator», при обращении к которой Центр Управления получает соответствие имени анализируемого параметра и его OID, назначенный динамически в пределах узла. Схема такого взаимодействия представлена на рис. 2.

Алгоритм взаимодействия с утилитой «Translator»:

1. Центр Управления обращается по IP-адресу ЭВМ-контроллера аппаратуры к утилите «Translator» для получения таблицы связи статических имён параметров и динамически назначенных OID на узле.

2. Утилита формирует таблицу связей в формате, удобном для передачи.

3. Центр Управления формирует из полученной таблицы SNMP-запросы, необходимые для диагностики радиоаппаратуры.

Представленный механизм позволяет исключить неопределённость динамического назначения OID, так как Центр Управления будет формировать SNMP-запросы с использованием не встроенного разыменования через *.mib файл, а с использованием разыменования через данные от Транслятора, причем индивидуально для каждого узла.

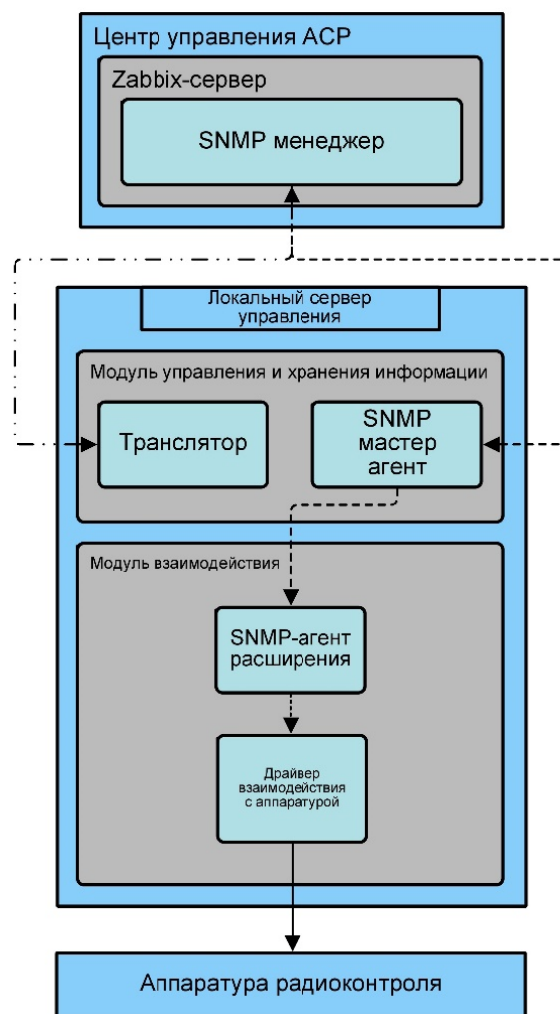


Рис. 2. Функциональная схема взаимодействия по протоколу SNMP TC и Центра Управления

Реализация диагностики ТС радиоконтроля через Центральный сервер диагностики при динамически изменяемой структуре оборудования

Для диагностики технических средств радиоконтроля, структура которых может динамически изменяться (путём замены устройств и модулей), центральный сервер диагностики должен обеспечивать выполнение следующих задач:

1. Автоматически обнаруживать территориально-распределённое радиоприёмное оборудование в сети АСП.

2. Организовывать связь подсистемы диагностики и утилиты «Translator» на уровне приложений (при условии связи Центра Управления и удалённой аппаратуры в сети АСП).

3. Интегрировать команды управления утилитой «Translator» в подсистему диагностики с их автоматическим вызовом через задан-

ный интервал времени для поддержки актуальности таблицы соответствия на стороне Центра Управления АСР.

4. В автоматическом режиме создавать элементы данных SNMP по полученной таблице соответствия.

5. Через полученные элементы данных диагностировать сеть распределённой аппаратуры радиоконтроля, отслеживая и контролируя выход получаемых значений за допустимые границы.

С учётом сложности архитектуры сети радиоконтроля, а также сложности интеграции с существующим радиоконтрольным оборудованием и программным обеспечением для него, разработка нового кроссплатформенного web-сервера является ресурсоёмкой задачей. Вследствие этого было принято решение использования стороннего свободно-распространяемого программного обеспечения с открытым исходным кодом для осуществления возможности «бесшовной» интеграции систем диагностики и АСР.

Одной из наиболее популярных свободно распространяемых систем для распределённого мониторинга и диагностики ИТ-систем любых масштабов является ПО Zabbix [9].

Zabbix – программное обеспечение уровня предприятия с открытым исходным кодом, позволяющее выполнять мониторинг от производительности и доступности серверов и сетевого оборудования до веб-приложений и базы данных. Основными преимуществами данной системы являются:

1. Идентичность сетевых архитектур АСР и Zabbix.
2. Масштабируемость подсистемы диагностики на большое число узлов.
3. Шифрование передаваемого по сети трафика.
4. Поддержка стороннего ПО для расширения возможности мониторинга и диагностики [9].

Подсистема диагностики может предоставить персоналу АСР следующие возможности:

1. Диагностика распределённой системы радиоконтроля в реальном времени.
2. Графическое отображение получаемых данных.
3. Автоматический контроль состояния АСР при помощи заданных границ каждому из параметров.
4. Оповещение о нештатной ситуации.

5. Простой процесс подключения новых станций радиоконтроля к подсистеме диагностики.

Программное обеспечение Zabbix имеет в своём составе штатную возможность расширения функционала за счёт использования так называемых пользовательских параметров на стороне Zabbix-агента. Пользовательский параметр – конструкция в файле конфигурации агента, позволяющая добавить собственный ключ и действие для удалённого исполнения по протоколу HTTP [9].

Пользовательские параметры имеют следующий синтаксис:

UserParameter =< ключ >, < команда >

Создание пользовательского параметра в Zabbix-агенте позволяет ссылаться на уникальный ключ из Zabbix-сервера. При обращении к узлу по ключу, Zabbix-агент выполняет соответствующую удалённую команду. Удалённой командой в данном случае является обращение к транслятору для получения таблицы соответствия.

Для передачи таблицы соответствия между Zabbix-сервером и Zabbix-агентом в подсистеме диагностики СМО-АРМАДА используется формат JSON (JavaScript Object Notation), который в последнее время стал наиболее популярным форматом для обмена данными между серверами и клиентами [10].

Помимо таблицы соответствия «Имя ⇔ OID» в подсистему диагностики также можно передавать следующие параметры:

- понятные конечному пользователю имена элементов данных и их развёрнутое описание;
- единицы измерения полученных значений;
- тэг объекта диагностики для группирования параметров.

Чтобы учесть вышеизложенные требования, в трансляторе содержится база данных, которая для каждого элемента данных содержит представленные параметры.

Получив структуру оборудования радиоконтроля на ЭВМ-контроллере аппаратуры через разработанный транслятор и настроив взаимосвязь транслятора и Zabbix-агента на узле сети, необходимо выполнить обработку пришедших данных на Zabbix-сервере.

Zabbix-сервер имеет встроенный SNMP-менеджер для опроса полученных соответствий «Имя ⇔ OID», поэтому необходимо лишь создать соответствующий элемент данных. Однако заранее неизвестно, какие элементы данных должны быть созданы на определённом узле

сети, так как к ЭВМ-контроллеру аппаратуры может быть подключена различная аппаратура радиоконтроля, поэтому «прямое» добавление наблюдаемого параметра не считается верным подходом.

Для разрешения возникшей ситуации и гибкого добавления диагностируемых параметров в Zabbix-сервере предусмотрены так называемые правила обнаружения, разделяемые на два типа:

– обнаружение сети – обнаружение узлов сети Zabbix;

– низкоуровневое обнаружение – обнаружение на основе определённых элементов данных других элементов данных, триггеров и графиков [9].

На основе представленных типов предложены два алгоритма, которые позволяют осуществлять автоматизированную диагностику ТС радиоконтроля в описываемой системе:

1. Алгоритм поиска технических средств радиоконтроля в сети АСР (рис. 3).

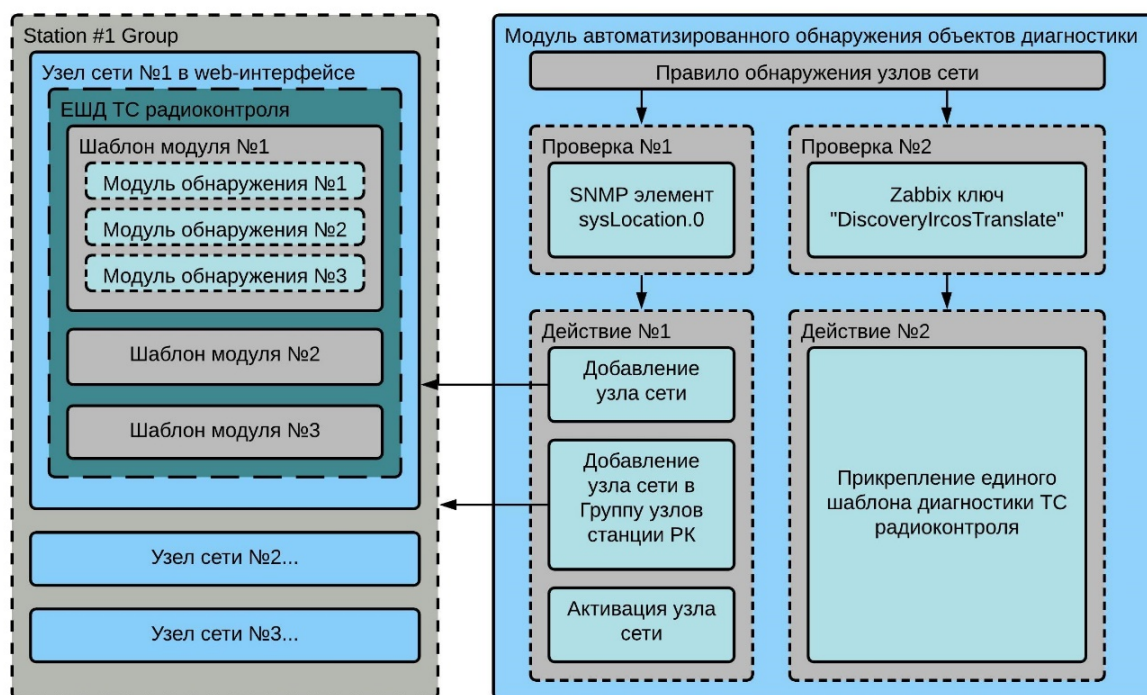


Рис. 3. Алгоритм обнаружения технических средств радиоконтроля

Данный алгоритм работает следующим образом:

- при вводе в эксплуатацию новой станции радиоконтроля на ЭВМ-контроллер аппаратуры устанавливается утилита «Translator» из состава СМО-АРМАДА;
- станцию подключают к внутренней сети АСР;
- сервер диагностики в непрерывном режиме сканирует всю сеть АСР и находит новую станцию радиоконтроля, в частности находит ЭВМ-контроллер радиоприёмной аппаратуры;
- сервер диагностики производит проверку (проверка №1, рис. 3), по которой определяет принадлежность найденной станции радиоконтроля и добавляет ЭВМ-контроллер аппаратуры в подсистему диагностики (действие №1, рис. 3) для выполнения дальнейших действий.

2. Алгоритм обнаружения диагностируемых параметров модулей радиоконтрольного оборудования (рис. 4).

Данный алгоритм работает следующим образом:

- после того, как ЭВМ-контроллер добавлен в подсистему диагностики, модуль сети проверяет наличие на узле драйвера взаимодействия с аппаратурой и работу SNMP-службы (проверка №2, рис. 3). Если все критерии выполняются, то модуль сети присоединяет единый шаблон диагностики (ЕШД) ТС радиоконтроля (действие №2, рис. 3);
- добавленный к узлу сети шаблон содержит модули обнаружения параметров объектов диагностики, которые начинают обращаться через механизм Zabbix-get к транслятору для получения структуры аппаратуры радиоконтроля;

- по полученной структуре каждый модуль обнаружения через прототипы элементов данных и прототипы триггеров формирует реальные элементы данных и триггеры к ним;
- элементы данных обращаются через SNMP-менеджер Центра Управления к ЭВМ-

контроллерам аппаратуры для получения требуемых значений параметров;

- полученные значения становятся доступны для отображения в web-интерфейсе Zabbix-сервера, а также для автоматического контроля соответствующими триггерами.

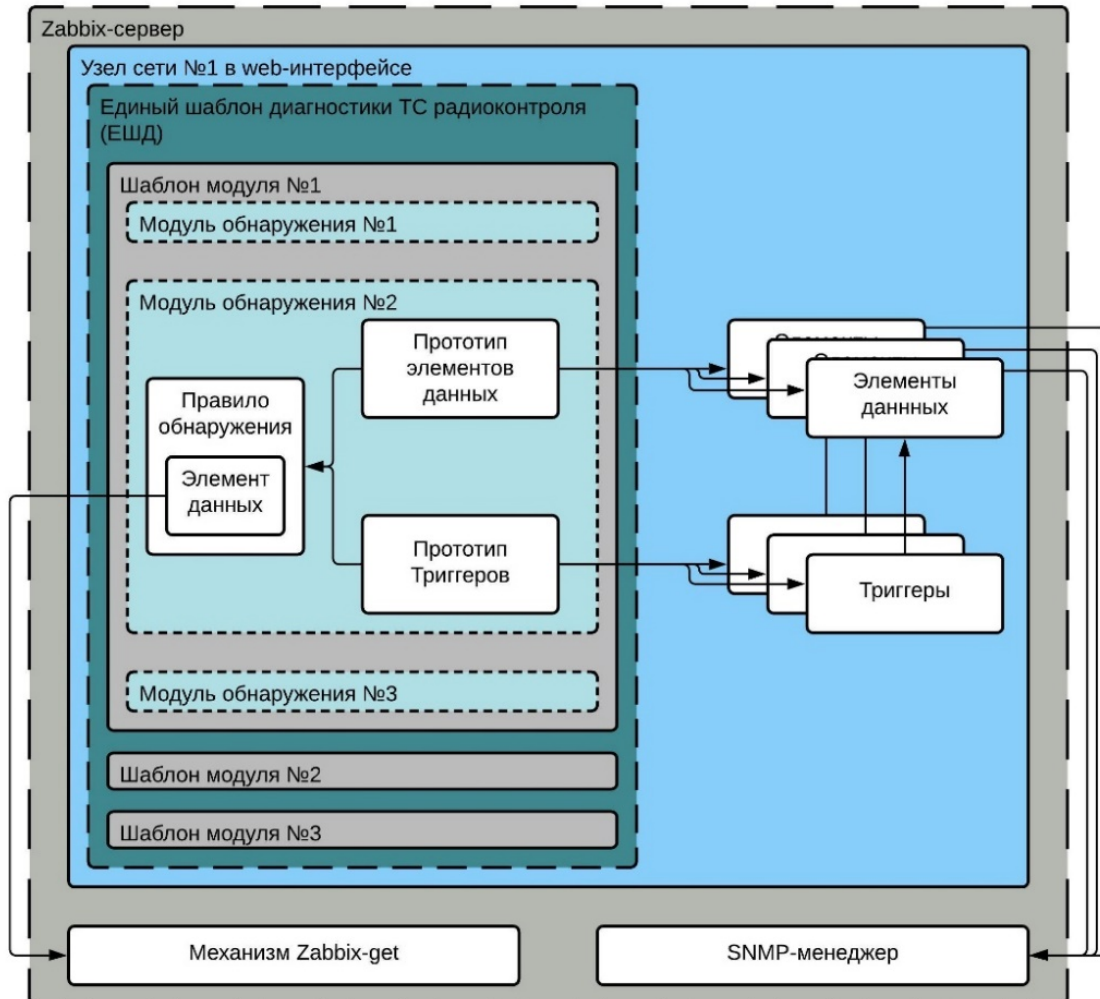


Рис. 4. Алгоритм обнаружения параметров модулей радиоконтрольного оборудования

Рассмотрим, как выполняется диагностика технических средств радиоконтроля через web-интерфейс системы Zabbix на примере диагностики цифрового радиоприёмного устройства АРГАМАК-ИС. Внешний вид радиоприёмного устройства представлен на рис. 5 [11].

ЦРПУ АРГАМАК-ИС предназначен для визуального наблюдения и измерения параметров спектров радиосигналов в частотном диапазоне от 0,009 до 8000 МГц в составе комплексов радиоконтроля [11].

На рис. 6 показан пример обнаруженных элементов данных подключенного радиоприёмного устройства АРГАМАК-ИС.



Рис. 5. ЦРПУ АРГАМАК-ИС

▼ Local Server Station	IRCOS Module - BMPU (10 элементов данных)		
<input type="checkbox"/>	BMPU.InVolt: Input voltage	29.11.2020 12:31:03	32130 мВ
<input type="checkbox"/>	BMPU.InVolt: Input voltage - Channel-1	29.11.2020 12:31:03	29727 мВ
<input type="checkbox"/>	BMPU.InVolt: Input voltage - Channel-2	29.11.2020 12:31:03	32055 мВ
<input type="checkbox"/>	BMPU.InVolt: Input voltage to converter - Channel-1	29.11.2020 12:31:03	29130 мВ
<input type="checkbox"/>	BMPU.InVolt: Input voltage to converter - Channel-2	29.11.2020 12:31:03	28553 мВ
<input type="checkbox"/>	BMPU.OutCurrent: Load current - Channel-1	29.11.2020 12:31:03	593 мА
<input type="checkbox"/>	BMPU.OutCurrent: Load current - Channel-2	29.11.2020 12:31:03	1179 мА
<input type="checkbox"/>	BMPU.OutVolt: Output voltage - Channel-1	29.11.2020 12:31:03	11955 мВ
<input type="checkbox"/>	BMPU.OutVolt: Output voltage - Channel-2	29.11.2020 12:31:03	11960 мВ
<input type="checkbox"/>	BMPU.Temp: MCU temperature	29.11.2020 12:31:03	44 °C
► Local Server Station	IRCOS Module - Commutator IS (5 элементов данных)		
► Local Server Station	IRCOS Module - Main (4 элемента данных)		
► Local Server Station	IRCOS Module - T7 (8 элементов данных)		

Рис. 6. Диагностика радиоприёмного устройства АРГАМАК-ИС

Как видим, подсистемой диагностики были обнаружены следующие модули ЦРПУ:

- модуль цифровой обработки сигналов (модуль «Т7»);
- модуль ввода питания (модуль «BMPU»);
- модуль коммутации (модуль «Commutator IS»);
- кросс-модуль (модуль «Main»).

Каждый из обнаруженных модулей возвращает список параметров и их последние значения. Так, например, модуль ввода питания возвращает такие параметры как:

- входное напряжение модуля – 32.13 В;

- входное напряжение первого канала – 29.7 В;
- ток нагрузки по выходу второго канала – 1179 мА;
- температура модуля – 44 °C и другие.

Zabbix-сервер в автоматическом режиме строит графики истории изменения параметров от времени по полученным значениям от элементов данных. На рис. 7 представлены графические зависимости полученных параметров для модуля цифровой обработки сигналов.

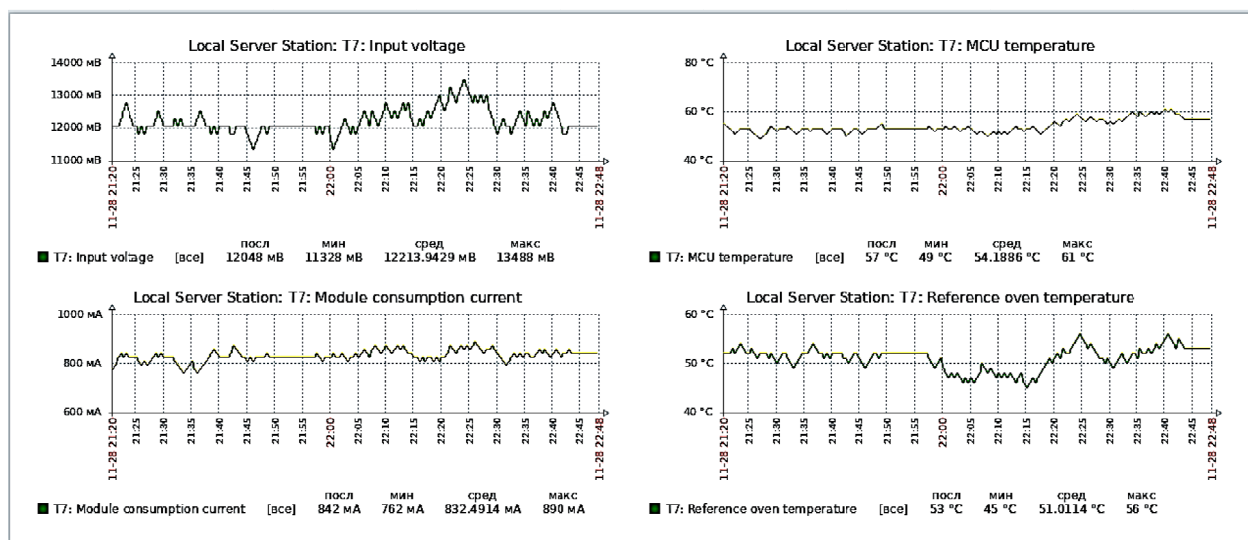


Рис. 7. Диагностика модуля цифровой обработки сигналов радиоприёмного устройства АРГАМАК-ИС

На данном рисунке показан «комплексный экран» диагностики платы «Т7», на котором отображены графики четырёх параметров:

- входное напряжение платы (левый верхний график);

- температура платы (правый верхний график);
- потребляемый платой ток (левый нижний график);
- температура термостатированного опорного генератора (правый нижний график).

Каждый из представленных на комплексном экране графиков можно рассмотреть подробнее – достаточно выбрать требуемый график при помощи курсора. Графики можно масштабировать по времени, задавать произвольные интервалы времени просмотра, что позволяет выполнять их технический анализ и прогнозирование для поиска возможных неисправностей модулей.

Web-интерфейс, хотя и позволяет производить диагностику оборудования в реальном времени, однако постоянное наблюдение за Панелью в интерфейсе подсистемы при работе оператора АСР не является его основной задачей, так как это не позволяет концентрировать внимание на радиоконтрольных задачах.

Основным функционалом, позволяющим уведомлять пользователей сети Zabbix о возникающих проблемах, является функция «Оповещение» – система Zabbix позволяет указать, кто и когда должен быть оповещен при наступлении определенной нештатной ситуации, в том числе позволяет настроить различные типы оповещений для различных степеней опасности и пользователей [9].

Таковыми вариантами оповещений могут быть:

- отправка SMS-уведомлений о выходе из строя радиоконтрольного оборудования и его модулей;
- отправка уведомлений на электронную почту при прогнозировании возможной неисправности аппаратуры с течением времени;
- вывод уведомлений на экране автоматизированного рабочего места оператора при помощи получения сообщений в мессенджере;
- другие способы оповещений через использование внешних утилит и API сторонних систем.

Такого рода уведомления позволяют уменьшить нагрузку на операторов, оповещая их только в случае необходимости принятия решений.

Заключение

На основе предложенного комбинированного подхода к диагностике технических

средств радиоконтроля была реализована и внедрена в программное обеспечение СМО-АРМАДА подсистема диагностики. Она позволяла:

- осуществлять диагностику территориально-распределённых технических средств радиоконтроля из Центра Управления АСР;
- получать данные о состоянии аппаратуры радиоконтроля в реальном времени;
- строить графические зависимости по каждому параметру с целью детальной оценки и прогнозирования неисправностей аппаратуры;
- при необходимости осуществлять индивидуальную настройку подсистемы под каждый объект диагностики;
- автоматически подключать новые узлы сети и технические средства радиоконтроля;
- извещать операторов о неисправностях ТС радиоконтроля в реальном времени с привязкой к IP-адресу ЭВМ-контроллера аппаратуры.

Эксплуатация подсистемы в автоматизированной территориально-распределённой системе радиоконтроля, работающей на национальном уровне, подтвердила её эффективность, удобство использования, надёжность, повысила оперативность оповещения операторов о нештатных операциях и увеличила скорость диагностики каждого технического средства, входящего в систему.

Литература

1. МСЭ-R SM.2256-1. Измерения и оценка занятости спектра. 2016. – URL: https://www.itu.int/dms_pub/itu-r/opb/rep/R-REP-SM.2256-1-2016-PDF-E.pdf (дата обращения: 30.05.2025).
2. МСЭ-R SM.2039. Развитие методов контроля за использованием спектра. 2013. – URL: <https://www.itu.int/rec/R-REC-SM.2039-0-201308-I/en> (дата обращения: 30.05.2025).
3. Рембовский А.М., Ашихмин А.В., Козьмин В.А. Автоматизированные системы радиоконтроля и их компоненты; под ред. А. М. Рембовского. М.: Горячая линия – Телеком, 2017. 424 с.
4. Система самодиагностики оборудования автоматизированной системы радиомониторинга АРМАДА / Д.Н. Бочаров [и др.] // Спецтехника и связь. 2016. № 4. С. 85-89.
5. Рембовский А.М., Ашихмин А.В., Козьмин В.А. Радиомониторинг – задачи, методы, средства; под ред. А.М. Рембовского. 4-е изд., испр. М.: Горячая линия – Телеком, 2015. 640 с.
6. Rembovsky A.M., Ashikhmin A.V., Kozmin V.A., Smolskiy S.M. Radio Monitoring Automated Systems and Their Components. Signals and Communication technology. Springer. 2018. 467 p.
7. RFC1157. A Simple Network Management Protocol (SNMP). 1990. – URL: <https://tools.ietf.org/html/rfc1157> (дата обращения: 30.05.2025).

8. Документация разработчика приложений для Windows. – URL: <https://docs.microsoft.com/ru-ru/windows/win32/snmp/snmp-functions> (дата обращения: 30.05.2025).

9. Andrea Dalle Vacche Mastering Zabbix: Learn how to monitor your large IT environments using Zabbix with this one-stop, comprehensive guide to the Zabbix world. Packt Publishing Ltd, 2015. 412 с.

10. RFC7159. The JavaScript Object Notation (JSON) Data Interchange Format. 2014. – URL: <https://tools.ietf.org/html/rfc7159> (дата обращения: 30.05.2025).

11. Каталог компании ИРКОС: Автоматизированные и технические средства радиоконтроля. М.: АО «ИРКОС», 2019. 123 с.

Поступила 18.06.2025; принята к публикации 10.07.2025

Информация об авторах

Жупиков Максим Васильевич – инженер-программист, АО «ИРКОС» (394049, Россия, г. Воронеж, Рабочий пр-т, 101Б), e-mail: jupikovmv@ircos.vrn.ru

Баркалов Сергей Вячеславович – ведущий инженер-программист, АО «ИРКОС» (394049, Россия, г. Воронеж, Рабочий пр-т, 101Б), e-mail: barkalovsv@ircos.vrn.ru

Алексеев Дмитрий Александрович – заместитель директора, АО «ИРКОС» (394049, Россия, г. Воронеж, Рабочий пр-т, 101Б), e-mail: alekseevda@ircos.vrn.ru

Токарев Антон Борисович – д-р техн. наук, профессор кафедры радиотехники, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84); старший научный сотрудник, АО «ИРКОС» (394049, Россия, г. Воронеж, Рабочий пр-т, 101Б) e-mail: tokarevab@ircos.vrn.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2621-4336>

AUTOMATIC DIAGNOSTICS OF TECHNICAL EQUIPMENT OF GEOGRAPHICALLY DISTRIBUTED AUTOMATED RADIO MONITORING SYSTEM

M.V. Zhupikov¹, S.V. Barkalov¹, D.A. Alekseev¹, A.B. Tokarev^{1,2}

¹JSC «IRCOS», Moscow, Russia

²Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract: diagnostics of the technical equipment included in a geographically distributed automated radio monitoring system is a necessary aspect of ensuring the smooth operation of the system. This paper considers the development of a structure and operating algorithms for a diagnostic subsystem for technical equipment within an automated radio monitoring system. We developed the structure and operating algorithms for the automatic diagnostic subsystem based on a combination of "decentralized" and "centralized" approaches. These approaches involve collecting diagnostic data from equipment by a computer controller at a remote radio monitoring station and transmitting it to a central diagnostic server for storage and processing. We analyzed the obtained information for its impact on system operability on the server side, and, if necessary, system personnel are informed on an event-based basis. We used freely distributed open-source Zabbix software, we proposed methods for integrating radio monitoring and diagnostic systems, and investigated the specifics of assessing the technical condition of radio equipment built on a modular principle within the dynamically changing structure of the radio monitoring system. We implemented the developed structure and algorithms for the functioning of the diagnostic subsystem of technical means of the automated radio monitoring system in the software of the special mathematical support ARMADA (SMO-ARMADA), currently used as the control software of the automated radio monitoring system operating at the national level

Key words: diagnostics, SNMP, automated system, radio monitoring, Zabbix software, technical equipment of radio monitoring

References

1. ITU-R SM.2256-1. Spectrum occupancy measurement and evaluation, 2016, available at: https://www.itu.int/dms_pub/itu-r/opb/rep/R-REP-SM.2256-1-2016-PDF-E.pdf (date of access: 30 May 2025).
2. ITU-R SM.2039. Spectrum monitoring evolution, 2013, available at: https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/sm/R-REC-SM.2039-0-201308-1!PDF-E.pdf (date of access: 30 May 2025).
3. Rembovskiy A.M., Ashikhmin A.V., Koz'min V.A. "Automated radio monitoring systems and their components" ("Avtomatizirovannye sistemy radiokontrolya i ikh komponenty"), Moscow: Goryachaya liniya – Telekom, 2017, 424 p.
4. Bocharov D.N. et al. "System of self-diagnostics of equipment of the automated system for radiomonitoring ARMADA", *Specialized Machinery and Communication*, 2016, no. 4, pp. 85-89.
5. Rembovskiy A.M., Ashikhmin A.V., Koz'min V.A. "Radio monitoring: problems, methods, tools" ("Radiomonitoring: zadachi, metody, sredstva"), Moscow: Goryachaya liniya – Telekom, 2015, 640 p.
6. Rembovskiy A.M., Ashikhmin A.V., Koz'min V.A., Smolskiy S.M. "Radio monitoring automated systems and their components. Signals and communication technology", Springer, 2018, 467 p.
7. RFC1157. A Simple Network Management Protocol (SNMP), 1990, available at: <https://tools.ietf.org/html/rfc1157> (date of access: 30 May 2025).

8. Windows app developer documentation, available at: <https://docs.microsoft.com/en-us/windows/win32/snmp/snmp-functions> (date of access: 30 May 2025).
9. Andrea Dalle Vacche “Mastering Zabbix: Learn how to monitor your large IT environments using Zabbix with this one-stop, comprehensive guide to the Zabbix world”, Packt Publishing Ltd, 2015, 412 p.
10. RFC7159. The JavaScript Object Notation (JSON) Data Interchange Format, 2014, available at: <https://tools.ietf.org/html/rfc7159> (date of access: 30 May 2025).
11. IRCOS company catalog: Automated and technical equipment of radio monitoring, Moscow: IRCOS, 2019, 123 p.

Submitted 18.06.2025; revised 10.07.2025

Information about the authors

Maksim V. Zhupikov, Software Engineer JC «IRCOS» (101B Rabochiy pr., Voronezh 394049, Russia), e-mail: jupikovmv@ircoc.vrn.ru

Sergey V. Barkalov, Senior Software Engineer JC «IRCOS» (101B Rabochiy pr., Voronezh 394049, Russia), e-mail: barkalovsv@ircoc.vrn.ru

Dmitriy A. Alekseyev, Deputy Director JC «IRCOS» (101B Rabochiy pr., Voronezh 394049, Russia), e-mail: alekseevda@ircoc.vrn.ru

Anton B. Tokarev, Dr. Sc. (Technical), Associate Professor, Professor, Department of Radio Engineering, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia); Senior Staff Scientist, JSC “IRCOS” (101B Rabochiy pr., Voronezh 394049, Russia), e-mail: TokarevAB@ircoc.vrn.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2621-4336>

АНТЕННАЯ РЕШЕТКА НА ОСНОВЕ СЕГМЕНТО-ПАРАБОЛИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ С ПЛАВНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ ЛИНЕЙНОЙ ПОЛЯРИЗАЦИЕЙ

И.А. Баранников¹, Е.А. Ищенко¹, Ю.Г. Пастернак¹, Д.К. Проскурин¹, С.М. Фёдоров^{1,2}

¹Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

²Международный институт компьютерных технологий, г. Воронеж, Россия

Аннотация: рассматривается разработанная антенная решетка на основе сегменто-параболических элементов с плавным управлением линейной поляризации. Разработанная система обладает двумя ортогональными линейными поляризациями (одна – на прием, другая – на передачу). Антенная решетка реализуется на основе двух соприкасающихся зеркальных параболических сегментов. Использование именно такой конфигурации объясняется тем, что антенная решетка даёт выигрыш по коэффициенту усиления и выигрыш в плане сужения луча диаграммы направленности. В конструкции решетки используется два дроссельно-фланцевых облучателя. Между дроссельно-фланцевыми облучателями и переходами от волноводов на коаксиальные разъемы 50 Ом располагаются 3 дБ синфазные делители мощности, реализуемые на печатных платах. В конструкции используются механически управляемые синхронно вращающиеся части, необходимые для реализации плавного управления двумя ортогональными поляризациями. Рассматривается конструкция антенной системы, проводится компьютерное моделирование с целью получения характеристик антенны. По итогам компьютерного моделирования КНД (коэффициент направленного действия) облучателя на частоте 14.5 ГГц составил 10.82 дБи. На частоте 14.3 ГГц КНД антенной системы составил 29.98 дБи, ширина главного лепестка диаграммы направленности по уровню половинной мощности составила 4.7 градуса. Уровень боковых лепестков системы при этом составил -14.1 дБ

Ключевые слова: антенная решетка, зеркальная антенна, ортогональная линейная поляризация

Благодарности: работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания (проект № FZGM-2025-0004)

Введение

В настоящее время применение антенных решеток в области радиосвязи распространилось довольно широко в силу их эффективности использования во многих сферах. Антенная решетка – это более сложная антенна, которая может состоять из разнообразнейших элементов, расположенных и ориентированных в пространстве по какой-либо закономерности, либо же квазислучайно. Отдельное внимание в контексте данной статьи стоит уделить отражательным антенным решеткам. В составе отражательной антенной решетки используется поверхность, которая может быть либо плоской, либо изогнутой. Например, элементом отражательной решетки может служить сегмент параболической антенны. Данная поверхность специально предназначена для отражения радиоволн с целью формирования необходимой формы диаграммы направленности. Применение таких отражательных антенных решеток обычно оказывается эффективнее использования единичных параболических отражательных антенн. Использование

антенных решеток даёт выигрыш в отношении коэффициента усиления и сужение диаграммы направленности. Но использование решеток должно быть оправдано их пользой в отношении энергоэффективности, эффективности излучения и экономическим фактором, так как производство антенной решетки из нескольких антенн обычно является более дорогостоящим, чем одной такой антенны.

Рассмотрим пример антенной решетки из работы [1]. В данной работе представлена отражательная антенная решетка для сетей дуплексной спутниковой связи. Элементом решетки является так называемый мальтийский крест. Использование такого элемента подразумевает возможность разработки антенной решетки с круговой или двумя ортогональными линейными поляризациями. Основой решетки предстаёт листовая вспененный поливинилхлорид с толщиной слоя 8 мм. Топология макета решетки изготовлена на металлизированном лавсане, применяя методику химического травления слоя. Подложка произведена из вспененного полиэтилена. На частоте 14 ГГц наблюдается значительное несоответствие расчётной и измеренной ширины диаграммы направленности и уровня боковых лепестков. Расчётная

ШДН (ширина диаграммы направленности) на данной частоте соответствует 5,5 градусов, в то время как реально измеренная 10,8 градусов. Расчётный УБЛ (уровень боковых лепестков) на частоте 14 ГГц соответствует -21 дБ, в то время как реально измеренный -9 дБ. Наблюдается значительный уход от рабочей частоты в более низкочастотную область в силу влияния неточности маски для химического травления и неполный учет диэлектрических свойств материалов. При разработке подобных высокочастотных антенных решёток следует учитывать сложность реальной физической высокочастотной реализации макета проекта и тонкости технологического процесса производства. Стоит отметить, что у всех печатных антенн будут наблюдаться проблемы с потерями в диэлектрике.

Теперь рассмотрим отражательную зеркальную антенну отдельно. Зеркальные параболические антенны (ЗПА) – это наиболее повсеместно распространенные остронаправленные антенны. Их частое использование в разнообразнейших системах связи можно пояснить простотой их конструкции, возможностью получения различных диаграмм направленности, большим уровнем коэффициента полезного действия, малой шумовой температурой, достойными диапазонными характеристиками и т.п. В радиолокации использование ЗПА даёт возможность добиться равносигнальной зоны, позволяет реализовать единовременное формирование нескольких диаграмм направленности одним общим зеркалом. Определённые виды зеркальных антенн дают возможность реализовать достаточно быстрое качание луча в угловом секторе [2]. В статье [3] приводится пример планарной печатной зеркальной антенны. Реально измеренные характеристики антенны: ширина луча 2.7 градуса; КНД 36.6 дБ, КУ (коэффициент усиления) 33 дБ; уровень боковых лепестков с одной стороны 17 дБ, уровень боковых лепестков с другой стороны 15.5 дБ. Измерения проводились в полосе частот 24.5...26 ГГц. Значения реально измеренных параметров имеют некоторое отличие от результатов математического моделирования, это может быть связано с тем, что печатные антенны, как было сказано выше, имеют проблемы с потерями в диэлектрике.

Конструкция антенной системы

В данной статье будет рассмотрена антенная решётка на основе сегменто-параболических элементов с плавным управле-

нием линейной поляризацией. Разработанная система обладает двумя ортогональными линейными поляризациями (одна – на прием, другая – на передачу). Антенная решётка реализуется на основе двух частей зеркальных антенн, а именно – на основе двух соприкасающихся зеркальных параболических сегментов. Использование именно такой конфигурации объясняется тем, что антенная решётка даёт выигрыш по коэффициенту усиления и выигрыш в плане сужения луча диаграммы направленности. Внешний вид рассматриваемой системы представлен на рис. 1.

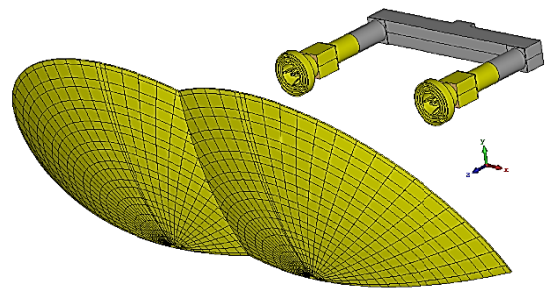


Рис. 1. Внешний вид разработанной антенной системы

Из рисунка можно увидеть, что конструкция антенны включает в себя непосредственно решётку из двух зеркальных параболических сегментов и излучающую конструкцию, включающую в себя делители мощности, волноводные элементы, элементы антенны Вивальди и два дроссельно-фланцевых облучателя.

Ширина антенны – 570 мм (по оси x), высота – 198.5 мм (по оси y), глубина – 373.6 мм (по оси z). Серым цветом на рисунке выделены неподвижные части конструкции делителя мощности и облучателей, желтым цветом – синхронно вращающиеся части.

Механически управляемые синхронно вращающиеся части необходимы для реализации указанного плавного управления двумя ортогональными поляризациями. Между дроссельно-фланцевыми облучателями и переходами от волноводов 19×9.5 мм на коаксиальные разъемы 50 Ом располагаются 3 дБ синфазные делители мощности, реализуемые на печатных платах. На рис. 2 располагается сам дроссельно-фланцевый облучатель.

Из рис. 2 можно наблюдать, что в дроссельно-фланцевом облучателе располагается четыре облучателя типа Вивальди, при этом параллельные облучатели запитываются синфазно и равноамплитудно. Элементы Вивальди в данном случае функционируют попарно.

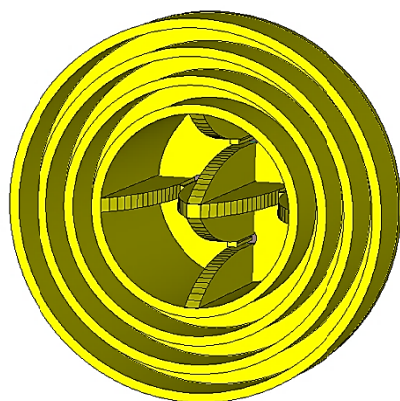


Рис. 2. Дрессельно-фланцевый облучатель с двумя ортогональными поляризациями

Волноводный делитель мощности разделяет поступающую к нему энергию на две равные части. Далее по ходу волны следует переход с прямоугольного волновода на круглый волновод. В прямоугольном волноводном элементе, располагающимся ближе к дрессельно-фланцевому облучателю, находится элемент Вивальди, являющийся плавным широкополосным экспоненциальным переходом, который преобразует электромагнитную волну, пришедшую из волновода, в электрический ток. Далее через коаксиальный кабель и систему переходов энергия поступает непосредственно на дрессельно-фланцевый облучатель. Дрессельно-фланцевый облучатель излучает энергию уже непосредственно на антенную решётку, состоящую из двух зеркальных параболических сегментов. Каждый элемент решётки в виде сегмента параболической зеркальной антенны отражает приходящую волну, сужает диаграмму направленности и сосредотачивает мощность излучения в определённом направлении.

Характеристики разработанной антенной системы

Было проведено компьютерное моделирование представленной антенной системы с помощью программы CST STUDIO, перейдём к рассмотрению полученных результатов. На рис. 3 располагаются характеристики облучателя на частоте 14.5 ГГц.

КНД облучателя на частоте 14.5 ГГц составил величину 10.82 изотропных дБ. На рис. 4 располагается трёхмерная диаграмма направленности всей антенной системы, а на

рис. 5 располагается проекция ДН на плоскость (угол Theta = 150).

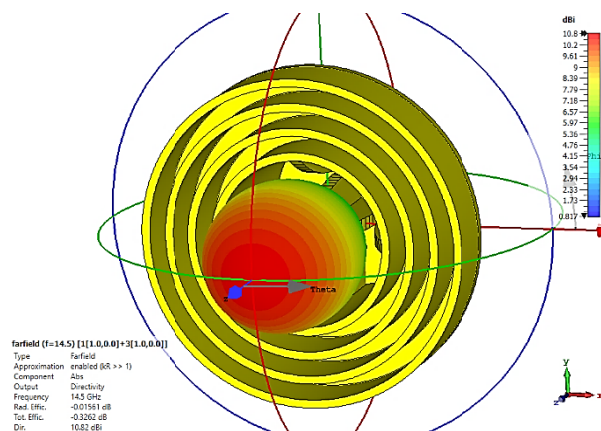


Рис. 3. Характеристики облучателя (вертикальная поляризация, запитаны синфазно и равноамплитудно верхний и нижний щелевые излучатели)

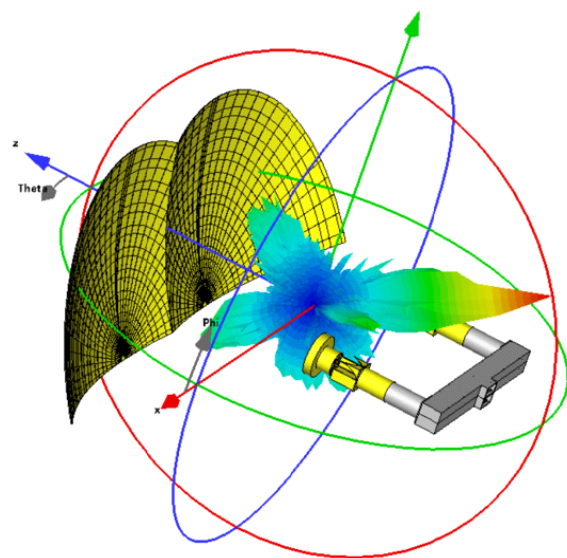


Рис. 4. ДН системы на частоте 14.3 ГГц

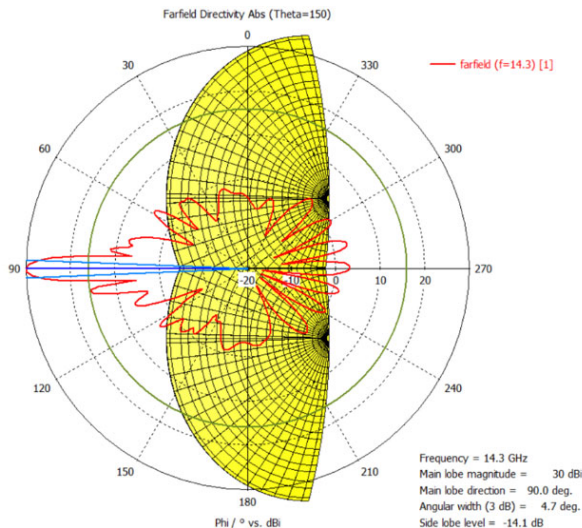


Рис. 5. Проекция ДН системы на плоскость на частоте 14.3 ГГц (Theta = 150)

На частоте 14.3 ГГц КНД системы составил 29.98 изотропных дБ, проекция на плоскость (Theta = 150) показала, что ширина главного лепестка по уровню половинной мощности составила величину 4.7 градуса. Уровень боковых лепестков при этом составил величину -14.1 дБ.

Заключение

Таким образом, в данной работе была рассмотрена и исследована разработанная антенная решетка на основе сегментопараболических элементов с плавным управлением линейной поляризации. Разработанная система обладает двумя ортогональными ли-

нейными поляризациями (одна – на прием, другая – на передачу). Преимущество такой конфигурации системы заключается в возможности непосредственного управления двумя имеющимися ортогональными поляризациями с помощью синхронного поворота по оси подвижных частей конструкции. В системе было использовано два дроссельно-фланцевых облучателя, по итогам машинного моделирования КНД облучателя на частоте 14.5 ГГц составил 10.82 изотропных дБ. На частоте 14.3 ГГц КНД всей антенной системы составил величину 29.98 изотропных дБ, а проекция на плоскость (Theta = 150) показала, что ширина главного лепестка диаграммы направленности по уровню половинной мощности составила величину 4.7 градуса. Уровень боковых лепестков системы при этом составил величину -14.1 дБ. С помощью использования данной конфигурации системы удалось добиться главных целей разработки - было получено достаточно высокое значение КНД и довольно узкая ширина главного лепестка.

Литература

1. Литинская Е.А., Поленга С.В., Саломатов Ю.П. Разработка и исследование отражательной антенной решетки для сетей дуплексной спутниковой связи // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. №. 2-1 (24). 2011. С. 214-218.
2. Чистюхин В.В. Антенно-фидерные устройства: учеб. пособие. М.: МИЭТ, 2010.
3. Плоская печатная зеркальная антенна / М.Д. Парнес [и др.] // Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника, 2005. С. 56-59.

Поступила 05.09.2025; принята к публикации 11.11.2025

Информация об авторах

Баранников Илья Андреевич – аспирант, ассистент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: 8thbar@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3093-0455>
Ищенко Евгений Алексеевич – аспирант, инженер, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: kurski1998@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
Проскурин Дмитрий Константинович – канд. физ.-мат. наук, доцент, ректор, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: rector@cchgeu.ru
Фёдоров Сергей Михайлович – канд. техн. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84); Международный институт компьютерных технологий (394026, Россия, г. Воронеж, ул. Солнечная, д. 29 б), e-mail: fedorov_sm@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9027-6163>

ANTENNA ARRAY BASED ON SEGMENT-PARABOLIC ELEMENTS WITH SMOOTH CONTROL OF LINEAR POLARIZATION

I.A. Barannikov¹, E.A. Ishchenko¹, Yu.G. Pasternak¹, D.K. Proskurin¹, S.M. Fedorov^{1,2}

¹Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

²International Institute of Computer Technologies, Voronezh, Russia

Abstract: this paper discusses a developed antenna array based on segmented-parabolic elements with smooth control of linear polarization. The developed system has two orthogonal linear polarizations (one for reception, the other for transmission). We implemented the antenna array based on two touching mirror parabolic segments. We explained the use of this particular configuration by the antenna array's gain and beam narrowing advantages. The array design utilizes two choke-flange feeders. Between the choke-flange feeders and the transitions from the waveguides to 50-ohm coaxial connectors, 3-dB common-mode power dividers implemented on printed circuit boards are located. The design utilizes mechanically controlled synchronously rotating parts, necessary for smooth control of the two orthogonal polarizations. We discussed the antenna system design, and performed computer modeling to obtain the antenna's characteristics. Computer simulations showed that the directivity gain (DP) of the feed at 14.5 GHz was 10.82 dBi. At 14.3 GHz, the antenna system's DP was 29.98 dBi, with a half-power beamwidth of 4.7 degrees. The system's sidelobe level was -14.1 dB

Key words: antenna array, reflector antenna, orthogonal linear polarization

Acknowledgments: the work was carried out with the financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the framework of the state assignment (project no. FZGM-2025-0004)

References

1. Litinskaya E.A., Polenga S.V., Salomatova Yu.P. "Development and study of a reflective antenna array for duplex satellite communication networks", *Reports of Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics (Doklady Tomskogo gosudarstvennogo universiteta sistem upravleniya i radioelektroniki)*, 2011, no. 2-1 (24), pp. 214-218.
2. Chistyukhin V.V. "Antenna-feeder devices" ("Antenno-fidernye ustroystva"), Moscow: MIET, 2010, 116 p.
3. Parnes M.D., Korol'kov V.D., Gashinova M.S., Kolmakov I.A., Kolmakov Ya.A., Vendik O.G. "Planar printed reflector antenna", *News of Higher Educational Institutions of Russia. Radioelectronics (Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy Rossii. Radioelektronika)*, 2005, pp. 56-59.

Submitted 05.09.2025; revised 11.11.2025

Information about the authors

Il'ya A. Barannikov, graduate student, assistant, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), tel.: +7(473)243-77-29, e-mail: 8thbar@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3093-0455>

Evgeniy A. Ishchenko, graduate student, 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, D. Sc. (Physics and Mathematics), Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: pasternakyg@mail.ru

Dmitriy K. Proskurin, Cand. Sc. (Physics and Mathematics), Associate Professor, Rector, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: rector@cchgeu.ru

Sergey M. Fedorov, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia); Associate Professor, 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>

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ПОЛИМЕРНЫХ ПОКРЫТИЙ НА ЧАСТОТНЫЙ ДИАПАЗОН АНТЕННО-ФИДЕРНЫХ УСТРОЙСТВ

М.А. Ромащенко, Д.В. Васильченко, Е.А. Ищенко, С.Н. Паршин, Г.П. Золкин

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

Аннотация: рассматриваются особенности использования антенно-фидерных устройств с полимерными покрытиями на беспилотных летательных аппаратах. Проведено исследование влияния полимерных покрытий на электродинамические характеристики антенно-фидерных устройств, применяемых в частотных диапазонах 915 и 1200 МГц. Выполнено экспериментальное измерение влияния полимерных покрытий с использованием гликоль-модифицированного полиэтилентерефталата (PETG), ударопрочного полистирола (HIPS), полилактида (PLA) и акрилонитрилбутадиенстирола (ABS). Были определены значения зависимости резонансных частот и коэффициент отражения антенных систем с нанесенным полимерным покрытием. Установлено, что увеличение диэлектрической проницаемости приводит к снижению резонансной частоты и увеличению коэффициента отражения. Эффективность излучения определяется совокупностью диэлектрических потерь и геометрических параметров полимерных покрытий. В частотном диапазоне 915 МГц стабильность параметров обеспечивают полимерные покрытия из ударопрочного полистирола (HIPS). Применение полимерного покрытия из гликоль-модифицированного полиэтилентерефталата (PETG) приводит к смещению резонансной частоты антенно-фидерного устройства. При частоте 1200 МГц устойчивое согласование обеспечивает полимерное покрытие из ударопрочного полистирола (HIPS) и белого полилактида (PLA). Применение гликоль-модифицированного полиэтилентерефталата (PETG) приводит к росту отражения и к увеличению параметра S_{11} . Полученные результаты могут быть использованы при проектировании антенно-фидерных устройств с учётом влияния диэлектрических свойств полимерных покрытий

Ключевые слова: аддитивная технология, полимерное покрытие, коэффициент стоячей волны, антенно-фидерное устройство

Благодарности: работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания «Молодежная лаборатория» (№ FZGM-2024-0003)

Введение

Беспилотные летательные аппараты (БПЛА) нашли применение в гражданском секторе для выполнения широкого спектра задач — от мониторинга сельскохозяйственных угодий и инспекции инфраструктурных объектов до контроля состояния транспортных дорог. Одним из основных технических требований к таким системам является обеспечение надёжной радиосвязи с учетом особенностей используемых приёмо-передающих антенно-фидерных устройств (АФУ). Размещение АФУ должно обеспечивать надёжное электромагнитное согласование с элементами конструкции, а также устойчивость к воздействию внешней среды. При этом БПЛА характеризуются ограниченным внутренним объёмом, общими цепями питания и заземления, что усложняет компоновку радиоэлектронных модулей. Также при размещении АФУ необходимо учитывать конструктивные ограничения,

включая место размещения и материал окружающих элементов [1, 2].

Постановка задачи

Для изготовления рам БПЛА применяют композитный материал Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP). Данный материал обеспечивает высокую удельную прочность при относительно небольшой массе. Однако из-за электропроводной структуры в нем возникают наведённые поверхностные токи, приводящие к искажению диаграмм направленности и ухудшению радиотехнических характеристик АФУ. Для минимизации паразитных эффектов АФУ помещаются в изолирующие материалы, препятствующие их взаимодействию с токопроводящими элементами. Полимерное покрытие предотвращает непосредственный контакт антенны с токопроводящей конструкцией, а также позволяет обеспечить защиту от механических воздействий, вибрационных нагрузок и иных внешних факторов. Одновременно такое покрытие фиксирует положение антенны, исключая её смещение в процессе эксплуатации.

Механические свойства покрытия, получаемого с помощью аддитивных технологий, зависят от используемого материала и могут различаться в зависимости от производителя, цвета, партии и даже катушки в рамках одной партии. При этом количество примесей и микроструктурные особенности материала покрытия также могут отличаться, что дополнительно влияет на его диэлектрические свойства [3].

При использовании для антенны полимерного покрытия эффективная диэлектрическая проницаемость окружающей среды ($\varepsilon_{эфф}$) возрастает, что приводит к снижению скорости распространения электромагнитной волны ($v = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon_{эфф}}}$), где c — скорость распро-

странения света в вакууме. Соответственно, уменьшается значение длины волны в среде:

$$\lambda = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\varepsilon_{эфф}}}, \text{ где } \lambda_0 \text{ — длина волны в вакууме.}$$

В результате чего из-за дополнительной ёмкостной нагрузки резонансная частота антенны смещается в область меньших частот. Для антенны с диэлектрическим покрытием и без него для вычисления резонансной частоты используется выражение [4]:

$$f_{рез} = \frac{c}{2L_{эфф}\sqrt{\varepsilon_{эфф}}}, \quad (1)$$

где $L_{эфф}$ — эффективная длина антенны. Таким образом, увеличение $\varepsilon_{эфф}$ приводит к снижению резонансной частоты $f_{рез}$ на фактор $\frac{1}{\sqrt{\varepsilon_{эфф}}}$ по сравнению со значением без полимерного покрытия.

Диэлектрическое покрытие изменяет входной импеданс антенны Z_L , воздействуя как на активную, так и на реактивную его составляющую. В общем случае Z_L определяется как $Z_L = \widehat{R}_L + jX_L$, зависит от геометрии антенны и окружающей среды. Наличие слоя с высоким уровнем диэлектрической проницаемости окружающей среды увеличивает ёмкостную нагрузку, что изменяет реактивную составляющую X_L и смещает резонансное состояние (условие $X_L = 0$). В этом случае коэффициент отражения рассчитывается на ос-

нове волнового сопротивления линии передачи и волнового сопротивления нагрузки следующим образом [5]:

$$\Gamma = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0}, \quad (2)$$

где $Z_0 \approx 120\pi$ — волновое сопротивление свободного пространства.

Если предположить, что среды 1 и 2 (диэлектрики) имеют одинаковую величину относительной магнитной проницаемости, то коэффициент отражения на первой границе можно рассчитать по уравнению [6]:

$$\Gamma = \frac{\sqrt{\varepsilon_r} - 1}{\sqrt{\varepsilon_r} + 1}. \quad (3)$$

Наличие диэлектрического покрытия изменяет входное сопротивление антенны, что приводит к изменению входного коэффициента отражения $|\Gamma|$. Коэффициент стоячей волны по напряжению (КСВН) связан с величиной коэффициента отражения Γ соотношением [5]:

$$КСВН = \frac{1 + |\Gamma|}{1 - |\Gamma|}. \quad (4)$$

Увеличение модуля коэффициента отражения $|\Gamma|$ приводит к ухудшению параметра S_{11} , где часть электромагнитной волны рассеивается в покрытии, что снижает коэффициент полезного действия η и коэффициент усиления АФУ в направлении $G(\theta, \varphi)$.

Таким образом, следует определить степень влияния полимерного покрытия на электродинамические характеристики АФУ, включая коэффициент отражения S_{11} , резонансную частоту и форму диаграммы направленности. При этом степень влияния покрытия на антенну определяется диэлектрическими параметрами материала (относительной диэлектрической проницаемости ε_r , тангенс угла диэлектрических потерь $\tan \delta$), а также толщиной покрытия, его формой, однородностью структуры и наличием примесей.

Методы решения и результаты

Для оценки влияния полимерных покрытий был проведён эксперимент с использованием антенн дипольного типа, рассчитанных на работу в диапазонах частот 915 МГц и 1200 МГц. Длина каждого плеча дипольной антенны для диапазона 915 МГц составляет 82 мм, общая длина — 164 мм. Для диапазона 1200 МГц длина плеча составляет 62,5 мм, общая длина антенны — 125 мм. В качестве материала для полимерных покрытий были использованы: гликоль модифицированный полиэтилентерефталат (PETG), ударопрочный полистирол (HIPS), полилактид (PLA) и акрилонитрил-бутадиенстирол (ABS). Полимерные покрытия были выполнены в форме цилиндра с толщиной стенки 1,5 мм и высотой, обеспечивающей полное покрытие плеча дипольной антенны.

Процесс измерения электродинамических параметров АФУ предоставлен на рис. 1. Для проведения эксперимента был выбран БПЛА с размерами 210 мм × 210 мм × 70 мм и массой 0,9 кг. Дипольная антенна, помещённая в полимерное покрытие, устанавливалась на луч БПЛА. Антенна располагалась таким образом, чтобы её ось была параллельна направлению полёта, а поверхность покрытия находилась на удалении не менее 30 мм от ближайших металлических и силовых элементов.



Рис. 1. Процесс измерения электродинамических параметров АФУ

Измерения проводились на антенне, подключённой к коаксиальному тракту с волновым сопротивлением 50 Ом. Измерения выполнялись на векторном анализаторе цепей Rohde Schwarz ZNH4.

Табл. 1 содержит результаты измерения уровня сигнала. Согласно полученным данным наличие полимерного покрытия действительно влияет на уровень сигнала, излучаемого антенной. В диапазоне 915 МГц испытываемые материалы обеспечили уровень сигнала в преде-

лах –22,4...–29,7 дБ. В диапазоне 1200 МГц значения в пределах –26,4...–29,7 дБ.

Таблица 1

Результаты измерения уровня сигнала на частотах 915 МГц и 1200 МГц

Полимерные покрытия	915 МГц, дБ	1200 МГц, дБ
Без полимерного покрытия	–29,7	–29,7
HIPS, без пигмента	–29,5	–29,1
PETG, чёрный пигмент (наполнитель углерод)	–24,1	–27,1
PLA, белый пигмент (наполнитель TiO ₂)	–28,3	–28,7
PLA, голубой пигмент (наполнитель CuPc)	–22,4	–26,4
PLA, чёрный пигмент (наполнитель углерод)	–28,6	–27,8

Для каждого полимерного покрытия проводились экспериментальные измерения с целью определения резонансной частоты антенны и входного коэффициента отражения S_{11} . Резонансная частота определялась как частота, при которой коэффициент отражения S_{11} достигал минимального значения, что соответствует максимальной эффективности передачи энергии. Расхождения в значениях для образцов PLA с белым и чёрным пигментами обусловлены неполной заливкой измеряемых образцов, в результате чего между слоями образуются воздушные зазоры [7]. В табл. 2 и 3 представлены резонансные частоты, зафиксированные при применении полимерных покрытий, а также соответствующие значения коэффициента отражения.

Таблица 2

Влияние полимерных покрытий на рабочие характеристики антенны диапазона 915 МГц

Полимерное покрытие	Резонансная частота, МГц	S_{11} , дБ
Без полимерного покрытия	915	–29,7
HIPS, без пигмента	917	–29,5
PETG, чёрный пигмент (наполнитель углерод)	899	–24,1
PLA, белый пигмент (наполнитель TiO ₂)	901	–28,3
PLA, голубой пигмент (наполнитель фталлоцианин Cu)	905	–22,4
PLA, чёрный пигмент (наполнитель углерод)	892	–28,6

Таблица 3

Влияние полимерных покрытий на рабочие характеристики антенны диапазона 1200 МГц

Полимерное покрытие	Резонансная частота, МГц	S_{11} , дБ
Без полимерного покрытия	1200	-29,7
HIPS, без пигмента	1201	-29,1
PETG, чёрный пигмент (наполнитель углерод)	1291	-27,1
PLA, белый пигмент (наполнитель TiO_2)	1202	-28,7
PLA, голубой пигмент (наполнитель фталлоцианин Cu)	1214	-26,4
PLA, чёрный пигмент (наполнитель углерод)	1271	-27,8

В частотном диапазоне 915 МГц резонансная частота при полимерном покрытии PLA с чёрным пигментом (углеродным наполнителем) составила 892 МГц, а при покрытии HIPS – 917 МГц. Одновременно коэффициент отражения увеличился, однако у PLA с чёрным пигментом он остался близким к значению без полимерного покрытия. Это вызвано высоким уровнем электропроводности углеродного наполнителя.

В частотном диапазоне 1200 МГц наблюдается смещение резонансной частоты: PLA (белый пигмент) – 1291 МГц, PLA (чёрный пигмент) – 1271 МГц, PLA голубой – 1214 МГц, PETG чёрный – 1209 МГц. Применение материала HIPS не оказало влияние на резонансные частоты, значения которого составило 1201 МГц. Частотные зависимости коэффициента отражения для разных материалов представлены на рис. 2-3.

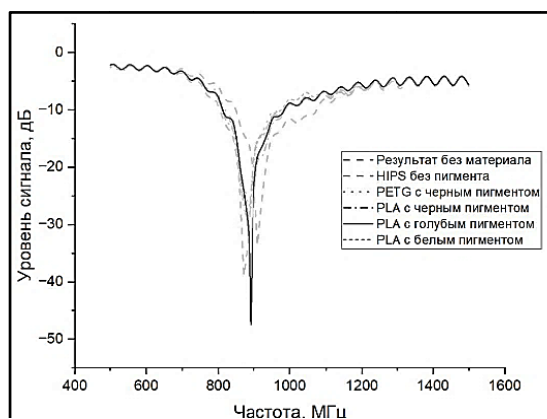


Рис. 2. Частотные характеристики антенны (~915 МГц) с применением полимерных покрытий

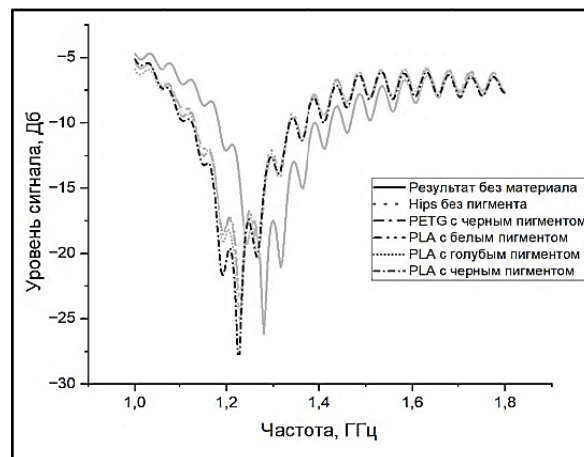


Рис. 3. Частотные характеристики антенны (~1200 МГц) с применением полимерных покрытий

Анализ результатов и выводы

Полученные результаты эксперимента подтверждают влияние диэлектрических свойств полимерных покрытий на характеристики АФУ. Данное влияние вызвано применением полимерных покрытий с $\varepsilon > 1$, что приводит к увеличению эффективной диэлектрической проницаемости среды.

В частотном диапазоне 915 МГц применение полимерных покрытий вызвало снижение резонансной частоты по сравнению с антенной без покрытия. Без покрытия резонансная частота антенны составляет 915 МГц при коэффициенте отражения $S_{11} \approx 29,7$ дБ;

HIPS (ударопрочный полистирол): значение резонансной частоты антенны составляет 917 МГц (смещение 0,2 %). Значение коэффициента отражения составляет $S_{11} \approx 29,5$ дБ. Данное влияние вызвано изменениями на границе «воздух–полимер»;

PLA, голубой пигмент (фталлоцианин Cu): значение резонансной частоты антенны составляет 905 МГц (смещение 1,1 %). Значение коэффициента отражения составляет $S_{11} \approx 22,4$ дБ. Данное влияние вызвано изменениями на границе «воздух–полимер»;

PLA, белый пигмент (наполнитель TiO_2): значение резонансной частоты антенны составляет 901 МГц (смещение 1,5 %). Значение коэффициента отражения составляет $S_{11} \approx 28,3$ дБ. Это указывает на влияние диэлектрических потерь, обусловленное высоким показателем преломления материала;

PETG, чёрный (наполнитель углерод): значение резонансной частоты антенны составляет 899 МГц (смещение 1,7 %). Значение

коэффициента отражения составляет $S_{11} \approx 24,1$ дБ. Данное влияние вызвано более высокой диэлектрической проницаемостью покрытия и наличием проводящих примесей;

PLA, чёрный (наполнитель углерод): значение резонансной частоты антенны составляет 892 МГц (смещение 2,5 %). Значение коэффициента отражения составляет $S_{11} \approx 28,6$ дБ. Данное влияние вызвано двумя факторами: во-первых, высоким значением диэлектрической проницаемости материала, обусловленным углеродным наполнителем, что увеличивает электрическую длину вибратора и приводит к снижению резонансной частоты; во-вторых, углеродный наполнитель может незначительно повысить добротность системы, компенсируя потери и сохраняя глубокий резонансный минимум.

В диапазоне 1200 МГц применение полимерных покрытий также оказывает влияние на резонансные характеристики АФУ. Без полимерного покрытия значение резонансной частоты антенны составляет 1200 МГц при коэффициенте отражения $S_{11} \approx 29,7$ дБ;

HIPS (ударопрочный полистирол): значение резонансной частоты антенны составляет 1201 МГц (смещение 0,1 %). Значение коэффициента отражения составляет $S_{11} \approx 29,1$ дБ.

PLA, голубой пигмент (Cu): значение резонансной частоты антенны составляет 1214 МГц (смещение 1,17 %). Значение коэффициента отражения составляет $S_{11} \approx 26,4$ дБ. Данное влияние вызвано увеличением эффективной диэлектрической проницаемости покрытия;

PLA, белый пигмент (наполнитель TiO_2): значение резонансной частоты антенны составляет 1202 МГц (смещение 0,75 %). Значение коэффициента отражения составляет $S_{11} \approx 28,7$ дБ;

PETG, чёрный (наполнитель углерод): значение резонансной частоты антенны составляет 1291 МГц (смещение 7,6 %). Значение коэффициента отражения составляет $S_{11} \approx 27,1$ дБ. Данное влияние вызвано высоким показателем преломления материала, что изменяет эффективную длину полуволнового вибратора;

PLA, чёрный (наполнитель углерод): значение резонансной частоты антенны составляет 1271 МГц (смещение 5,9 %). Значение коэффициента отражения составляет $S_{11} \approx 27,8$ дБ. Данное влияние вызвано двумя факторами: во-первых, высоким значением диэлектрической проницаемости материала, обусловленным углеродным наполнителем, что увеличивает

электрическую длину вибратора и повышает частоту резонанса; во-вторых, углеродный наполнитель может незначительно повышать добротность системы, компенсируя потери и поддерживая глубокий резонансный минимум.

Согласно полученным данным, резонансная частота f_0 антенны в диэлектрической среде с относительной проницаемостью ϵ_r смещается согласно выражению $f \approx \frac{f_0}{\sqrt{\epsilon_r}}$. Применение

полимерного покрытия прямо пропорционально увеличивает значение $\epsilon_{эфф}$, поэтому наблюдается снижение f относительно f_0 . Диэлектрическая проницаемость выше на низких частотах, затем уменьшается с ростом частоты и далее остается постоянной, что согласуется с [8]. Введение покрытия смещает Z_L (за счёт реактивной составляющей, связанной с ёмкостью диэлектрической оболочки), поэтому и величина S_{11} отклоняется от значения без полимерного покрытия. Если материал обладает низкими диэлектрическими потерями и малой диэлектрической проницаемостью, его влияние на электромагнитное поле минимально.

Заключение

В работе было проведено исследование влияния полимерных покрытий на резонансную частоту и коэффициент отражения АФУ в частотных диапазонах 915 МГц и 1200 МГц. Экспериментальные измерения выполнены с применением полимерных покрытий: гликоль-модифицированного полиэтилентерефталата (PETG), ударопрочного полистирола (HIPS), полилактида (PLA) и акрилонитрил бутадиен-стирола (ABS). Установлено, что влияние полимерного покрытия антенны обусловлено диэлектрическими свойствами используемых материалов. Анализ экспериментальных данных показал, что в частотном диапазоне 915 МГц материал HIPS оказывает минимальное влияние на резонансную частоту антенны. Для диапазона 1200 МГц материал HIPS и PLA с белым пигментом (наполнитель TiO_2) также оказывают минимальное смещение рабочей частоты. Полученные результаты позволяют оценить влияние полимерных покрытий на электродинамические характеристики антенн и учитывать их при проектировании АФУ.

Литература

1. Ромашенко М.А., Коновалов Р.Г., Воробьев М.Е. Основные этапы методики обеспечения электромагнитной совместимости для подвижных объектов связи // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2023. Т. 19. № 1. С. 62-68.
2. Ромашенко М.А., Васильченко Д.В., Пухов Д.А. Современное состояние задач повышения помехоустойчивости канала управления беспилотных авиационных систем на основе искусственного интеллекта // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2023. Т. 19. № 6. С. 142-146.
3. Strength of PLA Components Fabricated with Fused Deposition Technology Using a Desktop 3D Printer as a Function of Geometrical Parameters of the Process / V.E. Kuznetsov [et al.] // *Polymers*. 2018. 10(3), 313. URL: <https://doi.org/10.3390/polym10030313> свободный (дата обращения: 10.10.2025).
4. Biswas M., Banik S., Dam M. Li's formula extended to determine accurate resonant frequency of a rectangular patch antenna in multi-dielectric layers. *Progress In Electromagnetics Research M*. 99. 2021. p. 177-189.
5. Development of Novel Design of VSWR Section for SYMPLE / J. Kumar [et al.] // Conference: National Conference on Emerging Trends in Vacuum Electronic Devices & Applications, VEDA 2016, Gandhinagar, Gujarat, India, March 16-18, 2017. - URL: <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.14707.07208> свободный (дата обращения: 10.10.2025).
6. Influence of Dielectric Plate Parameters on the Reflection Coefficient of a Planar Aperture Antenna / V. Mandric [et al.] // *Applied Sciences*. 2023. Vol. 13. - URL: <https://doi.org/10.3390/app13042544> свободный (дата обращения: 10.10.2025).
7. Применение метода 3D-печати при изготовлении элементов антенно-фидерных устройств космических аппаратов / Ю.П. Борщев, А.И. Ананьев, И.В. Камышанов, Е.Н. Телелев // *Инженерный журнал: наука и инновации*. 2020. № 9(105). С. 3.
8. Fabrication of 3D-Printed Polyurethane Resin Composites and its Dielectric Performance / B. Ghule [et al.] // *Chemistry Africa*. 2023. Vol. 7. - URL: <https://doi.org/10.1007/s42250-023-00793-2> свободный (дата обращения: 10.10.2025).

Поступила 20.09.2025; принята к публикации 11.11.2025

Информация об авторах

Ромашенко Михаил Александрович – д-р техн. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, д. 84), e-mail: kipr@vorstu.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5629-6056>
Васильченко Дмитрий Владимирович – аспирант, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, д. 84), e-mail: Shadow951@bk.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1045-0841>
Ищенко Евгений Алексеевич – аспирант, инженер, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, д. 84), e-mail: kursk1998@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5270-0792>
Паршин Сергей Николаевич – лаборант, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, д. 84), e-mail: snr.parshin@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-0901-5896>
Золкин Глеб Павлович – лаборант, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, д. 84), e-mail: glebzolkin2004@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-5429-4727>

ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF POLYMER COATINGS ON THE FREQUENCY RANGE OF ANTENNA-FEEDER DEVICES

M.A. Romashchenko, D.V. Vasil'chenko, E.A. Ishchenko, S.N. Parshin, G.P. Zolkin

Voronezh state technical University, Voronezh, Russia

Abstract: the study addresses the features of using antenna-feeder devices (AFDs) with polymer coatings on unmanned aerial vehicles. The influence of polymer coatings on the electrodynamic characteristics of antenna-feeder devices operating in the frequency ranges of 915 MHz and 1200 MHz was investigated. Experimental measurements were carried out to assess the impact of polymer coatings made of glycol-modified polyethylene terephthalate (PETG), high-impact polystyrene (HIPS), polylactic acid (PLA), and acrylonitrile butadiene styrene (ABS). The dependencies of the resonant frequencies and reflection coefficients were determined. It was found that an increase in dielectric permittivity leads to a decrease in the resonant frequency and an increase in the reflection coefficient. The radiation efficiency is determined by the interaction of dielectric losses and the geometrical parameters of the polymer coatings. In the 915 MHz frequency range, the stability of the parameters is ensured by polymer coatings made of high-impact polystyrene (HIPS). The application of glycol-modified polyethylene terephthalate (PETG) coatings causes a shift in the resonant frequency of the antenna-feeder device. At 1200 MHz, stable matching is provided by polymer coatings made of high-impact polystyrene (HIPS) and white polylactic acid (PLA). The use of glycol-modified polyethylene terephthalate (PETG) results in increased reflection and a growth in the VSWR parameter. The obtained results can be applied in the design of antenna-feeder devices, taking into account the influence of the dielectric properties of polymer coatings

Key words: additive technology, polymer coating, standing wave ratio, antenna-feeder device

Acknowledgments: the work was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (project no. FZGM-2024-0003)

References

1. Romashchenko M.A., Kononov R.G., Vorob'yev M.E. "Main stages of the methodology for ensuring electromagnetic compatibility for mobile communication objects", *Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2023, vol. 19, no. 1, p. 62–68.
2. Romashchenko M.A. "Measurement of emission of radiated interference of electronic equipment in tasks of ensuring EMC", *Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2010, vol. 6, no. 7, p. 20–22.
3. Kuznetsov V.E., Solonin, A.N., Urzhumtsev, O.D., Schilling, R., Tavitov, A.G. "Strength of polylactic acid components manufactured by layered deposition using a desktop 3D printer depending on geometrical parameters of the process", *Polymers* 2018, no. 10, p. 313, available at: <https://doi.org/10.3390/polym10030313> (date of access 10.10.2025).
4. Biswas M., Banik S., Dam M. "Li's formula extended to determine accurate resonant frequency of a rectangular patch antenna in multi-dielectric layers", *Progress in Electromagnetics Research*, 2021. no. 99, pp. 177-189.
5. Kumar Jitendra, Baranwal Arpit, Jaiswal Rahul, Patel Shreekant, Singh Raj, Anitha V. "Development of novel design of VSWR Section for SYMPLE", 2017, available at: <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.14707.07208> free (date of access 10.10.2025).
6. Mandic, Vanja & Rimac-Drlje, Sanjuana & Baxhaku, Ismail "Influence of dielectric plate parameters on the reflection coefficient of a planar aperture antenna", *Applied Sciences*, 2023, no. 13, pp. 2544, available at: <https://doi.org/10.3390/app13042544> free (date of access 10.10.2025).
7. Borshchev Yu.P., Ananyev A.I., Kamyshanov I.V., Teleyaev E.N., "Application of 3D printing method in manufacturing of antenna-feeder devices for spacecraft", *Engineering Journal: Science and Innovation (Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii)*, 2020, no. 9 (105), pp. 3.
8. Ghule Babaji Laad, Dr Sadasivuni Kishor, Maurya Muni Raj, Cabibihan John-John "Fabrication of 3D-printed polyurethane resin composites and its dielectric performance", *Chemistry Africa*, 2023, no. 7, available at: <https://doi.org/10.1007/s42250-023-00793-2> free (date of access 10.10.2025).

Submitted 20.09.2025; revised 11.11.2025

Information about the authors

Mikhail A. Romachenko, Dr. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: kipr@vorstu.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5629-6056>
Dmitriy V. Vasil'chenko, Cand. Sc. (Technical), Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: Shadow951@bk.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1045-0841>
Evgeniy A. Ishchenko, graduate student, engineer, Voronezh State Technical University (84, 20th Anniversary of October St., Voronezh, 394006), e-mail: kursk1998@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5270-0792>
Sergey N. Parshin, Laboratory assistant, Voronezh State Technical University (84, 20-letiya Oktyabrya St., Voronezh, 394006, Russia), e-mail: snp.parshin@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-0901-5896>
Gleb P. Zolkin, Laboratory assistant, Voronezh State Technical University (84, 20th Anniversary of October St., Voronezh, 394006), e-mail: glebzolkin2004@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-5429-4727>

АЛГОРИТМ ОЦЕНКИ КАНАЛА СВЯЗИ OFDM-СИСТЕМ, ОСНОВАННЫЙ НА МЕТОДАХ ГЛУБОКОГО ОБУЧЕНИЯ

О.Н. Чирков

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

Аннотация: рассматриваются эффективные методы оценки канала связи OFDM-систем (Orthogonal Frequency Division Multiplexing - многопользовательская версия цифровой модуляции), основанных на методах глубокого обучения. В условиях растущих требований к надежности и эффективности беспроводных сетей стандартов 5G и Wi-Fi особую актуальность приобретает точная оценка состояния канала связи. Традиционные методы, основанные на пилот-сигналах, часто недостаточно эффективны в быстро меняющихся условиях передачи сигнала. Предлагается адаптивный алгоритм оценки характеристик канала связи, основанный на применении нейросетевых моделей. Методология включает этапы выбора информативных метрик (амплитуда, фаза), моделирования условий работы канала (отношение сигнал/шум (SNR), задержка) и формирования датасета с использованием модели Рэлея. Архитектура нейронной сети сочетает сверточные и плотные слои с механизмом внимания для выделения наиболее значимых признаков. Результаты моделирования в среде MATLAB/Simulink на основе моделей OFDM-систем демонстрируют высокую эффективность предложенного подхода. Модель достигает коэффициента детерминации 0,82 и точности предсказания до 0,95, превосходя традиционные аналоги. Ключевыми преимуществами являются высокая скорость сходимости, низкие вычислительные затраты и устойчивость результатов при изменении входных параметров. Разработанный алгоритм является перспективным решением для внедрения в современные системы связи для повышения их помехоустойчивости и адаптивности

Ключевые слова: OFDM, беспроводные сети, оценка канала, глубокое обучение, коэффициент детерминации

Благодарности: работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № FZGM-2025-0002)

Введение

Современные беспроводные системы требуют обеспечения высокой надежности и эффективности передачи данных при минимальных ресурсных затратах. Одним из важнейших аспектов повышения качества связи является точная оценка характеристик канала, что позволяет адаптировать параметры передачи и повысить устойчивость системы к помехам и искажениям [1]. В технологиях OFDM (мультиплексирование с ортогональным частотным разделением) [2], широко применяемых в стандартах LTE, 5G и Wi-Fi, задача оценки канала приобретает особую актуальность из-за высокой чувствительности к эффектам многолучевости и интерференции [3].

Традиционные методы оценки канала основаны на алгоритмах, использующих пилотные символы [4] или сигналы обратной связи [5]. Однако такие подходы могут иметь ограничения по точности и скорости работы в условиях динамично меняющихся каналов [6]. В последние годы активно развивается применение методов машинного обучения [7] для ре-

шения задач оценки характеристик канала, что способствует повышению точности и адаптивности беспроводных систем связи [8].

Использование нейросетевых моделей для оценки характеристик канала открывает новые возможности для повышения качества передачи данных в беспроводных сетях, особенно в условиях высокой мобильности и сложных средах [9]. Такой подход позволяет не только улучшить точность оценки по сравнению с классическими алгоритмами, но и обеспечить более быструю адаптацию к изменяющимся условиям среды.

Архитектура модели

Учитывая высокую сложность задачи оценки качества канала связи и невозможность разработки универсального метода, подходящего для всех условий и типов сигналов, было принято решение сосредоточиться на создании адаптивного алгоритма на базе нейросетевых технологий. Расширенная версия алгоритма представлена на рис. 1.

Для реализации нейросетевой модели и проведения экспериментов в рамках данного дипломного проекта был выбран язык про-

граммирования Python. Данное решение обусловлено следующими причинами: 1. Широкий спектр библиотек и инструментов для машинного обучения и обработки данных: Python обладает развитой экосистемой специализированных библиотек, таких как TensorFlow, Keras, PyTorch, NumPy, Pandas и других, которые значительно упрощают разработку, обучение и тестирование нейросетевых моделей. Это позволяет сосредоточиться на решении исследовательской задачи без необходимости разработки низкоуровневых алгоритмов. 2. Простота и читаемость кода: Синтаксис Python отличается ясностью и лаконичностью, что способствует быстрому прототипированию и

удобству поддержки кода. Это важно при реализации сложных архитектур нейросетей и их последующем тестировании. 3 Совместимость с современными технологиями: Python широко используется в области научных исследований и промышленной разработки систем искусственного интеллекта, что обеспечивает возможность интеграции с другими инструментами и платформами.

На основании вышеизложенных причин выбор языка программирования Python является обоснованным решением для реализации поставленных задач проекта, обеспечивая гибкость, эффективность и удобство разработки.

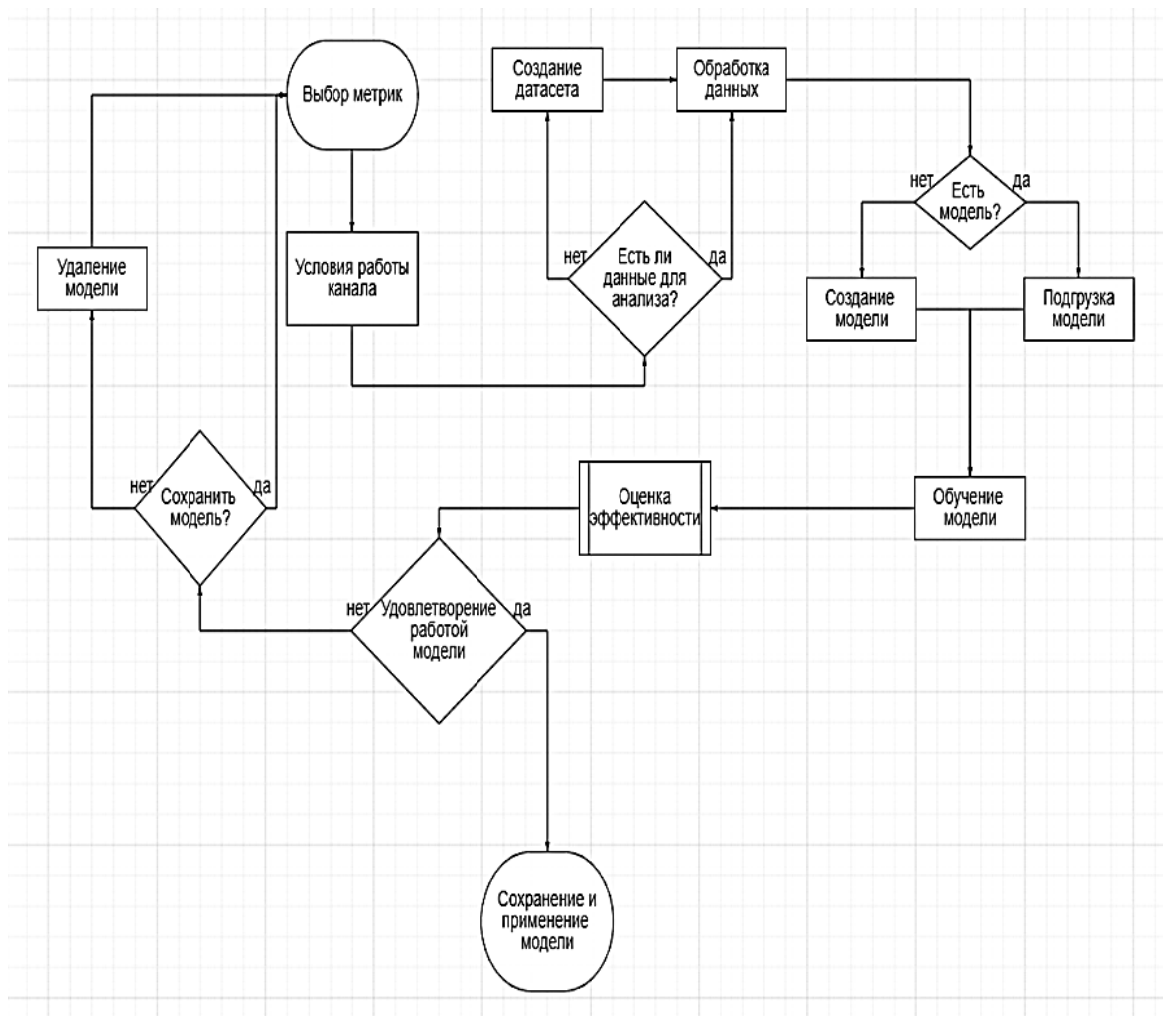


Рис. 1. Алгоритм оценки канала связи

Алгоритм

Предлагаемый метод состоит из следующих этапов:

1) Выбор метрик — это этап, на котором осуществляется определение признаков, ис-

пользуемых для обучения нейросетевой модели. Поскольку данный этап задает направление дальнейшей работы, крайне важно выбрать такие метрики, которые объективно отражают состояние канала связи и одновременно предоставляют максимально возможное количе-

ство информации для обучения модели. В рамках данного проекта были выбраны следующие метрики: амплитуда и фаза.

Амплитуда была выбрана в связи с её способностью отображать уровень затухания сигнала, а также учитывать влияние многолучевости и шумовых помех.

Фаза же является критически важной для восстановления сигнала, особенно в OFDM-системах, где модуляция часто основана на фазовых состояниях.

Совместное использование амплитуды и фазы обеспечивает полноту представления характеристик канала и позволяет учитывать сложные эффекты, возникающие при распространении сигнала. Вместе амплитуда и фаза дают полное представление о характеристиках канала, и их использование позволяет учитывать сложные эффекты канала.

2) Условия работы канала - это параметры и характеристики, определяющие качество и надежность передачи данных в рамках исследуемой системы. В рамках данного проекта были выбраны следующие условия: отношение сигнал/шум (SNR), задержка передачи и потеря пакетов данных.

Отношение сигнал/шум является ключевым показателем, характеризующим уровень помех и шумовых воздействий в канале. Высокое значение SNR свидетельствует о благоприятных условиях передачи, что способствует более точной оценке характеристик канала и повышает качество восстановления сигнала.

Задержка передачи отражает временные задержки, возникающие при распространении сигнала по каналу. Этот параметр важен для оценки временных характеристик системы, а также для анализа влияния задержек на качество передачи данных и синхронизацию.

Потеря пакетов данных — это показатель количества переданных данных, не достигших получателя или оказавшихся поврежденными. Этот критерий служит индикатором надежности канала и его устойчивости к различным воздействиям, таким как многолучевость, шум или интерференция.

Совместное использование данных условий позволяет моделировать реальные сценарии эксплуатации системы связи, а также проводить более точную оценку ее эффективности и устойчивости в различных условиях эксплуатации.

3) Данные для анализа. Данный этап характеризуется тем, что у пользователя есть выбор – использовать реальные данные или же

создать искусственный набор данных (датасет).

4) Создание датасета. На данном этапе осуществляется формирование искусственного набора данных, который служит основой для обучения нейросетевой модели. В процессе его формирования задаются заранее определенные условия среды и метрики, которые пользователь выбирал ранее, отражающие реальные сценарии функционирования системы связи.

Была выбрана модель Рэля, в которой использует моделирование фазы как равномерное распределение в диапазоне $[-\pi, +\pi]$.

Создание датасета представлено на рис. 2.

```
def generate_channel_data(num_samples=4000, num_subcarriers=64, ):
    """ 2 usages
    amplitudes = np.random.normal(loc=0.7, scale=0.4, size=(num_samples, num_subcarriers))
    amplitudes = np.clip(amplitudes, a_min=0, a_max=5)
    phases = np.random.uniform(-np.pi, np.pi, size=(num_samples, num_subcarriers))
    SNR_dB = np.random.uniform(low=0, high=40, size=(num_samples,))
    delays = np.random.uniform(low=0, high=10, size=(num_samples,))
    packet_loss_levels = np.random.uniform(low=0, high=0.4, size=(num_samples,))

    channels_real = amplitudes * np.cos(phases)
    channels_imag = amplitudes * np.sin(phases)

    channels_real_noisy = channels_real + np.random.normal(loc=0, scale=0.05, size=channels_real.shape)
    channels_imag_noisy = channels_imag + np.random.normal(loc=0, scale=0.05, size=channels_imag.shape)

    inputs = np.stack([channels_real_noisy, channels_imag_noisy], axis=2)

    snr_log = np.log1p(SNR_dB) # логарифм SNR для нелинейности
    delay_sin = delays * np.sin(phases.mean(axis=1))[:, None] # зависимость задержки от фазы

    extra_features = {
        'snr_log': snr_log,
        'delay_sin': delay_sin,
    }
    """
```

Рис. 2. Создание датасета с использованием библиотеки numpy

5) Обработка данных. Является последним подготовительным этапом, прежде чем они попадут в нейросеть. На данном этапе обычно проводится нормализация данных, сведение данных в определенный минимум для улучшения обучения нейронной сети, проверка правильности создания получаемых данных и правильность их загрузки.

6) Модель. На данном этапе пользователь может выбрать – загрузить ему уже готовую модель для дообучения или перестройки под новый набор данных, или же создать новую.

7) Создание модели. На данном этапе осуществляется разработка нейросетевой архитектуры, предназначенной для решения поставленной задачи. В процессе проектирования модели учитываются выбранные метрики и условия среды, что позволяет обеспечить ее адаптивность и эффективность в условиях моделируемых сценариев.

```
def build_and_train_model(x_train, y_amp_train, y_phase_sin_train, y_phase_cos_train):
    inputs = Input(shape=(num_subcarriers, 2))

    # Обработка признаков
    x = Conv1D(filters=64, kernel_size=3, padding='same', activation='relu', kernel_regularizer=l2(0.001))(inputs)
    x = Dense(units=256, activation='relu')(x)
    x = Dropout(0.4)(x)

    # Механизм внимания
    attention_output = MultiHeadAttention(num_heads=4, key_dim=32)(x, x)
    attention_output = LayerNormalization()(attention_output)

    # Объединяем с предыдущими признаками
    concat = Concatenate()(x, attention_output)

    # Еще один слой для усиления представления
    x = Dense(units=128, activation='relu')(concat)

    amp = Dense(units=1, activation='softplus', name='amp')(x)
    phase_logits = Dense(2)(x)
    phase_pred = Lambda(lambda x: tf.nn.l2_normalize(x, axis=-1))(phase_logits)

    model = Model(inputs=inputs, outputs=[amp, phase_pred])
```

Рис. 3. Структура нейронной сети

В рамках проекта была использована архитектура с использованием сверточных и плотных слоёв, которая включает в себя механизм повышения внимания для способности к выделению значимых характеристик. Архитектура включает в себя: обработку признаков первыми слоями, регуляризацию, механизм внимания, объединение признаков, дополнительное усиление признаков и выходные слои для предсказания значений. Алгоритмическая структура нейросети представлена на рис. 3. Основной целью является создание модели, способной точно восстанавливать характеристики канала связи на основе входных данных.

8) Обучение модели. Данный этап представляет из себя создание функций потерь и метрик для более точного предсказания, а также их объединения в наборы для обучения. На этом этапе происходит настройка гиперпараметров нейросети для более гладкого процесса обучения.

9) Оценка эффективности. Данный этап является процессом визуализации истинных значений с предсказанными обученной нейросетью. Используя графическое представление со сравнением полученных и имеющихся данных в текстовом формате, полученных из метрик и функций потерь, а также визуализацией потерь при обучении, пользователь делает вывод о проделанном обучении нейросети. Пользователь может увидеть по графику точности обучения и валидации, изображенному на рис. 4, насколько хорошо обучилась его нейронная сеть. Если пользователь остается доволен результатом, он сохраняет модель и использует ее в будущем для интеграции в процесс работы.

Моделирование

Моделирование эффективности предложенного алгоритма проводилось в MATLAB/Simulink для OFDM-систем.

На рис. 4 представлен график точности обучения предложенной модели и ее валидации. График показывает, что как обучающаяся, так и валидационная точность демонстрируют скачкообразные изменения — периодические резкие повышения и понижения. Несмотря на это, наблюдается положительная тенденция к росту, что свидетельствует о прогрессе в обучении модели. Ключевым фактором является достижение пика точности около 0.95 после 60 эпох. Такой результат указывает на хорошую способность модели к обобщению и стабильное обучение.

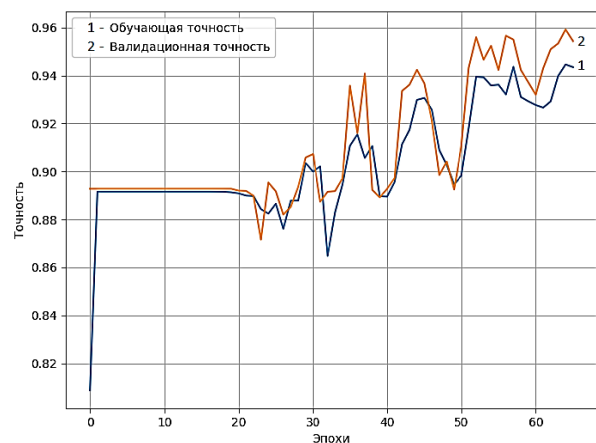


Рис. 4. График точности обучения и валидации

Результаты моделирования

Разработанный алгоритм демонстрирует высокие показатели по ключевым метрикам оценки качества предсказаний. Достигнутый коэффициент детерминации составляет 0.82, что превосходит показатели существующих аналогичных методов и свидетельствует о высокой точности модели в восстановлении целевых характеристик сигнала. Среднеквадратичная ошибка (MSE) и средняя абсолютная ошибка (MAE) находятся на уровне, подтверждающем надежность и точность предсказаний, что особенно важно при решении задач, требующих высокой точности.

Результаты модели сохраняют стабильность при применении к различным наборам данных и в условиях изменения входных параметров. Проведенные тестирования на различных выборках показали колебания метрик в

допустимом диапазоне от 5 до 10 % в зависимости от модели, что свидетельствует о высокой надежности и универсальности разработанного подхода. Был реализован уникальный алгоритм обучения нейросетей, основанный на использовании набора метрик, которые могут быть динамически заменены в процессе обучения. Такой механизм обеспечивает гибкость настройки модели под конкретные задачи и позволяет адаптировать процесс обучения без необходимости изменения архитектуры сети. Также использованы методы автоматизированной оптимизации гиперпараметров, что позволило добиться более высокой эффективности обучения и улучшить качество результатов по сравнению с традиционными подходами.

Заключение

Разработанный метод обладает высокой скоростью сходимости, что позволяет сократить время обучения по сравнению с аналогами. Методика отличается низкими вычислительными затратами — как по времени, если сравнивать с методами с применением машинного обучения, так и по памяти — что делает её пригодной для внедрения в реальные промышленные системы.

Кроме того, высокая масштабируемость позволяет адаптировать решение под задачи различного уровня сложности и объемов данных, обеспечивая его применение в широком спектре практических сценариев.

Литература

1. Чирков О.Н., Ромашенко М.А., Чепелев М.Ю. Современные методы оценки канала радиосвязи в усло-

виях многолучевости // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2019. Т. 15. № 3. С. 68-73.

2. Чирков О.Н., Астрединов Р.К. Многополосный преобразователь частоты OFDM // Проблемы обеспечения надежности и качества приборов, устройств и систем: Межвуз. сб. науч. тр. Воронеж: Воронежский государственный технический университет, 2018. С. 120-124.

3. Методы помехоустойчивого обнаружения сигналов в многоантенных системах MIMO с пространственным мультиплексированием / О.Н. Чирков [и др.] // Труды международного симпозиума «Надежность и качество». 2019. Т. 2. С. 85-87.

4. Чирков О.Н. Эффективный алгоритм динамического распределения пилот-сигналов для оценки канала радиосвязи в многоантенных системах MIMO с ортогональным частотным уплотнением OFDM // Радиотехника. 2019. Т. 83. № 6(8). С. 163-168.

5. Чирков О.Н., Кузнецова А.О. Итеративная методика помехоустойчивого приема QAM-сигналов // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2019. Т. 15. № 4. С. 84-88.

6. Ромашенко М.А., Паньчев С.Н., Чирков О.Н. Оптимальные алгоритмы совместной оценки канала радиосвязи и смещения частоты при многолучевом распространении сигнала // Радиотехника. 2019. Т. 83. № 6(8). С. 156-162.

7. Чирков О.Н., Пирогов А.А. Применение алгоритмов машинного обучения в задаче оценки беспроводного канала связи с OFDM // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2023. Т. 19. № 6. С. 164-169.

8. Башкиров А.В., Чирков О.Н., Демихова А.С. Применение глубоких нейронных сетей для задачи оценки канала и обнаружения сигнала в системах с OFDM // Радиотехника. 2025. Т. 89. № 7. С. 10-14.

9. Чирков О.Н., Стародубцев А.С. Применение методов глубокого обучения в средствах связи для оптимизации параметров систем OFDM // Научная опора Воронежской области: Сб. Тр. победителей конкурса научно-исследовательских работ студентов и аспирантов ВГТУ по приоритетным направлениям развития науки и технологий. Воронеж: ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», 2025. С. 204-205.

Поступила 16.09.2025; принята к публикации 11.11.2025

Информация об авторах

Чирков Олег Николаевич – старший преподаватель, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: chir_oleg@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2250-2100>

OFDM SYSTEMS COMMUNICATION CHANNEL ESTIMATION ALGORITHM BASED ON DEEP LEARNING METHODS

O.N. Chirkov

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract: the paper is devoted to effective methods of evaluating the OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing - multiuser version of digital modulation) communication channel of systems based on deep learning methods. In the context of growing requirements for the reliability and efficiency of wireless networks of 5G and Wi-Fi standards, an accurate

assessment of the state of the communication channel is becoming particularly important. Traditional pilot-based methods are often not effective enough in rapidly changing signal transmission conditions. The paper proposes an adaptive algorithm for evaluating the characteristics of a communication channel based on the use of neural network models. The methodology includes the stages of selecting informative metrics (amplitude, phase), modeling channel operating conditions (signal-to-noise ratio (SNR), delay), and creating a dataset using the Rayleigh model. The architecture of a neural network combines precise and dense layers with an attentional mechanism to highlight the most significant features. The simulation results in the MATLAB/Simulink environment based on OFDM system models demonstrate the high efficiency of the proposed approach. The model achieves a coefficient of determination of 0.82 and a prediction accuracy of up to 0.95, surpassing traditional analogues. The key advantages are the high convergence rate, low computational costs, and the stability of the results when the input parameters change. The developed algorithm is a promising solution for implementation in modern communication systems to increase their noise immunity and adaptability

Key words: OFDM, wireless networks, channel estimation, deep learning, coefficient of determination

Acknowledgments: this work was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (project no. FZGM-2025-0002)

References

1. Chirkov O.N., Romashchenko M.A., Chepelev M.Yu. "Modern methods of assessing the radio channel in multipath conditions", *Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2019, vol. 15, no. 3, pp. 68-73.
2. Chirkov O.N., Astredinov R.K. "Multiband frequency converter OFDM", *Problems of Ensuring Reliability and Quality of Devices, Devices and Systems : Interuniversity Collection of Scientific Works (Problemy obespecheniya nadezhnosti i kachestva priborov, ustroystv i sistem)*, Voronezh State Technical University, 2018, pp. 120-124.
3. Chirkov O.N. et al. "Methods of noise-resistant detection of signals in multi-antenna MIMO systems with spatial multiplexing", *Proc. of the Int. Symposium "Reliability and Quality" ("Nadezhnost' i kachestvo")*, 2019, vol. 2, pp. 85-87.
4. Chirkov O.N. "An effective algorithm for dynamic distribution of pilot signals for evaluating a radio communication channel in multi-antenna MIMO systems with OFDM frequency compression", *Radio Engineering (Radiotekhnika)*, 2019, vol. 83, no. 6(8), – pp. 163-168.
5. Chirkov O.N., Kuznetsova A.O. "Iterative technique of noise-resistant reception of QAM signals", *Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2019, vol. 15, no. 4, pp. 84-88.
6. Romashchenko M.A. Panychev S.N., Chirkov O.N. "Optimal algorithms for simultaneous estimation of the radio communication channel and frequency offset during multipath propagation", *Radio Engineering (Radiotekhnika)*, 2019, vol. 83, no. 6(8), pp. 156-162.
7. Chirkov O.N., Pirogov A.A. "Application of machine learning algorithms in the task of evaluating a wireless communication channel with OFDM", *Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2023, vol. 19, no. 6, pp. 164-169.
8. Bashkurov A.V., Chirkov O.N., Demikhova A.S. "Application of deep neural networks for the task of channel estimation and signal detection in systems with OFDM", *Radio Engineering (Radiotekhnika)*, 2025, vol. 89, no. 7, pp. 10-14.
9. Chirkov O.N., Starodubtsev A.S. "Application of deep learning methods in communications to optimize the parameters of OFDM systems", *Proc. of the Winners of the VSTU Student and Graduate Research Competition in Priority Areas of Science and Technology Development*, Voronezh State Technical University, 2025, pp. 204-205.

Submitted 16.09.2025; revised 11.11.2025

Information about the author

Oleg N. Chirkov, Assistant Professor, Voronezh State Technical University (84 20th Anniversary of October str., Voronezh 390006, Russia), e-mail: chir_oleg@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2250-2100>

**ШИРОКОПОЛОСНАЯ АНТЕННА КОРОТКОВОЛНОВОГО ДИАПАЗОНА,
СОСТОЯЩАЯ ИЗ НЕСИММЕТРИЧНЫХ ВИБРАТОРОВ****А.Н. Сысоев¹, Д.Ю. Муромцев², О.А. Белоусов², А.А. Тришаков²****¹АО «Тамбовский завод «Октябрь», г. Тамбов, Россия****²Тамбовский государственный технический университет, г. Тамбов, Россия**

Аннотация: разработка широкополосной антенны для КВ-диапазона, состоящей из несимметричных вибраторов, нацелена на расширение рабочих характеристик по спектру частот по сравнению с традиционными ЛПА и сохранения высокой направленности. В основе исследования лежит сравнение логопериодической антенны (ЛПА) с вариантами широкополосной антенны, в которой полуволновые вибраторы заменены на несимметричные четвертьволновые элементы. Для достижения однонаправленного излучения рассматривается система из двух связанных вибраторов и анализируется влияние электрического расстояния между элементами и фазового сдвига токов на форму диаграммы направленности (ДН). Моделирование проводилось в MMANA на диапазонах 11–12 МГц, с расчётами по двум конфигурациям: базовой широкополосной антенны и её версии с дополнительным четвертьволновым вибратором для повышения подавления бокового излучения. Результаты показывают, что базовая широкополосная антенна по сравнению с ЛПА имеет на частоте 11 МГц меньший коэффициент усиления на 0.5 дБ и более слабое подавление бокового лепестка до 3.5 дБ, тогда как на 12 МГц коэффициенты схожи, но подавление бокового излучения сохраняется ниже значений ЛПА. Увеличение электрического расстояния между вибраторами ведёт к достижению кардиоидной ДН и заметному росту коэффициента усиления: на 11 МГц антенна с двумя элементами демонстрирует прирост до 1.6 дБ, а на 12 МГц — до 2.4 дБ по сравнению с ЛПА. Введение дополнительного четвертьволнового вибратора существенно улучшает параметры: на 11 МГц увеличение КУ достигает 2 дБ, а подавление бокового излучения — 5.1 дБ; на 12 МГц соответствующие значения составляют 2.7 дБ и более 9.9 дБ соответственно. Указывается, что слабое подавление бокового излучения в нижнем диапазоне связано с отсутствием активного рефлектора, однако добавление дополнительного элемента позволяет существенно повысить направленность и подавление боковых лепестков. В результате предложенная конфигурация шире диапазона эксплуатации по сравнению с ЛПА и обеспечивает конкурентные или превосходящие характеристики по коэффициенту усиления и боковому подавлению при сохранении компактности и адаптивности конструкции.

Ключевые слова: широкополосная антенна, коротковолновый диапазон, несимметричные вибраторы, диаграмма направленности, моделирование, коэффициент усиления, подавление бокового излучения

Введение

Существующие системы мобильной радиосвязи КВ-диапазона используют набор передающих слабонаправленных антенн [1]. К таким антеннам относят V-образные антенны, вибраторы наклонные, Т-образные антенны и др. Необходимость применения целого ряда антенн обусловлена тем, что антенны КВ-диапазона обладают небольшим коэффициентом перекрытия диапазона, низким коэффициентом усиления и низким подавлением бокового излучения. Самым существенным недостатком этих антенн является то, что коэффициент усиления сильно меняется от частоты. Поэтому для обеспечения современных требований по широкополосности, коэффициенту усиления и подавлению заднего лепестка используют логопериодическую антенну (ЛПА) [2]. Она обладает постоянной диаграммой направленности на разных частотах, а отношение максимальной длины волны к минимальной

превышает величину равную десяти. В режиме передачи в ЛПА активными являются те вибраторы, которые находятся в активной области антенны. В качестве излучающих элементов в ЛПА используются полуволновые вибраторы, что накладывает конструктивные ограничения на использование данной антенны в нижней части КВ-диапазона из-за их размеров.

Цель работы — разработка антенны КВ-диапазона, состоящей из несимметричных вибраторов и имеющей более широкий диапазон работы, чем логопериодическая антенна.

**Расчет антенны КВ диапазона, состоящей
из несимметричных вибраторов**

Для решения поставленной задачи представим полуволновые вибраторы ЛПА в виде несимметричных четвертьволновых вибраторов.

Из множества элементов (n) ЛПА рассмотрим систему из двух связанных вибраторов для получения однонаправленного излучения [3]. Для получения диаграммы направленности (ДН) в виде кардиоиды на фиксирован-

ной частоте требуется электрическое расстояние между вибраторами $a = 0.25$, что соответствует $\frac{\lambda}{4}$ и фазовый сдвиг тока $\frac{\pi}{2}$. При изменении электрического расстояния между связанными вибраторами на величину

$$a = \frac{d}{\lambda},$$

где d – расстояние между вибраторами; λ – длина волны, требуется изменение фазового сдвига тока возбуждения активного рефлектора по отношению к току излучателя. Фазовый сдвиг определяется в соответствии с выражением

$$\phi = \pi - \beta \cdot d,$$

где ϕ – требуемый фазовый сдвиг; β – коэффициент фазы [4].

Вычислим длину волны λ при известных длинах четвертьволновых вибраторов l в соответствии с выражением

$$\lambda = 4 \cdot l. \quad (1)$$

Задавая электрическое расстояние a между вибраторами, определим расстояние между четвертьволновыми несимметричными вибраторами:

$$d = a \cdot \lambda. \quad (2)$$

Рассчитаем фазы токов четвертьволновых вибраторов относительно первого вибратора с фазой тока $\varphi=0^\circ$, используя выражение

$$\phi(n) = \phi(n-1) \cdot (\pi - \beta \cdot d(n)), \quad (3)$$

где n – порядковый номер вибратора.

Моделирование антенны КВ-диапазона, состоящей из несимметричных вибраторов

Проведем сравнительный анализ результатов моделирования ЛПА и широкополосной антенны (рис. 1) с использованием программного продукта MMANA [5]. Данная программа позволяет производить исследования антенн с оценкой всех ее основных параметров.

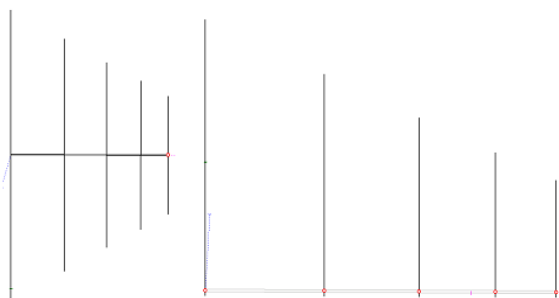


Рис. 1. Модели ЛПА и широкополосной антенны, состоящей из несимметричных вибраторов

ЛПА, рассчитанная на диапазон 11-12 МГц, имеет длину 7.25 м и высоту 13.64 м.

Широкополосная антенна, состоящая из несимметричных вибраторов, рассчитанная на диапазон 11-12 МГц по приведенной методике с электрическим расстоянием между вибраторами $a = 0.13$, имеет длину 8.4 м и высоту 6.9 м.

Проведено моделирование ЛПА и широкополосной антенны с рассчитанными фазами токов на частотах 11 и 12 МГц. Сравнительный вид ДН представлен на рис. 2.

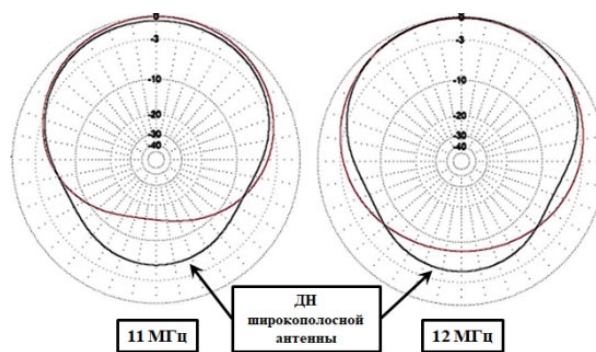


Рис. 2. ДН ЛПА и широкополосной антенны с электрическим расстоянием между вибраторами $a = 0.13$

Анализ результатов моделирования показал, что коэффициент усиления (КУ) широкополосной антенны, состоящей из несимметричных вибраторов на частоте 11 МГц меньше на 0.5 дБ чем у ЛПА, а подавление бокового излучения меньше 3.5 дБ. На частоте 12 МГц у антенн КУ одинаковый, а подавление бокового излучения у широкополосной антенны, состоящей из несимметричных вибраторов, меньше на 0.8 дБ.

Увеличим электрическое расстояние между вибраторами в широкополосной антенне до $a = 0.25$. Данное расстояние соответствует условию получения ДН в виде кардиоиды. При увеличении электрического расстояния между вибраторами длина антенны увеличилась до 16.1 м. Проведено моделирование данной антенны при фазовом распределении по вибраторам $\varphi=90^\circ$. Сравнительный вид ДН ЛПА и широкополосной антенны представлен на рис. 3.

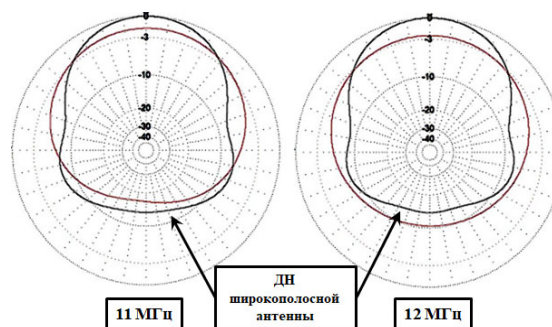


Рис. 3. ДН ЛПА и широкополосной антенны с электрическим расстоянием между вибраторами $a = 0.25$

Результаты моделирования показали, что КУ широкополосной антенны, состоящей из несимметричных вибраторов на частоте 11 МГц больше на 1.6 дБ чем у ЛПА, а подавление бокового излучения меньше на 0.1 дБ. На частоте 12 МГц КУ широкополосной антенны, состоящей из несимметричных вибраторов, больше на 2.4 дБ чем у ЛПА, а подавление бокового излучения больше 3.8 дБ.

Меньшее подавление бокового излучения широкополосной антенны на нижних частотах по отношению к ЛПА связано с отсутствием активного рефлектора, т.к. последний вибратор является активным.

Для увеличения подавления бокового излучения в нижней части диапазона дополнили данную антенну несимметричным вибратором, который равен по длине последнему вибратору (рис. 4).

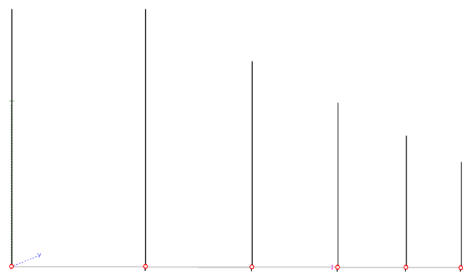


Рис. 4. Модель широкополосной антенны с дополнительным четвертьволновым вибратором

Широкополосная антенна с дополнительным четвертьволновым вибратором и электрическим расстоянием между вибраторами $a = 0.13$ имеет длину 11.9 м и высоту 6.9 м.

Проведено моделирование ЛПА и широкополосной антенны с дополнительным четвертьволновым вибратором на частотах 11 и 12 МГц. Сравнительный вид ДН представлен на рис. 5.

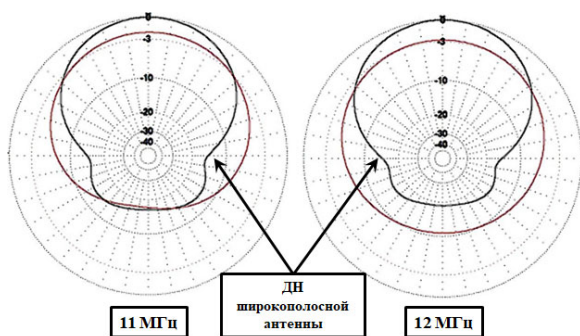


Рис. 5. ДН ЛПА и широкополосной антенны с дополнительным четвертьволновым вибратором и электрическим расстоянием между вибраторами $a = 0.13$

Проведенное моделирование показало, что КУ широкополосной антенны с дополнительным четвертьволновым вибратором на частоте 11 МГц больше на 2 дБ чем у ЛПА, а подавление бокового излучения больше на 5.1 дБ. На частоте 12 МГц КУ широкополосной антенны с дополнительным четвертьволновым вибратором больше на 2.7 дБ чем у ЛПА, а подавление бокового излучения больше 9.9 дБ.

Вывод

1. Разработана широкополосная антенна, состоящая из несимметричных вибраторов.
2. Рассчитано фазовое распределение токов по излучателям в широкополосной антенне.
3. При использовании несимметричных четвертьволновых вибраторов стало возможным применение данной антенны в более широком диапазоне частот КВ диапазона по отношению к ЛПА при одинаковой высоте их развертывания.
4. При добавлении к широкополосной антенне дополнительного вибратора происходит увеличение коэффициента усиления и увеличение подавления заднего излучения при малом электрическом расстоянии между вибраторами.

Литература

1. Игнатов В.В., Бабков В.Ю. Обоснование основных технических параметров техники радиосвязи. Л.: ВАС, 1990. 112с.
2. Ротхаммель К., Кришке А. Антенны. М.: ЛАЙТ ЛТД, 2000. Т. 1. 416 с.
3. Кочержевский Г.Н. Антенно-фидерные устройства: учебник для вузов. 3-е изд., доп. и перераб. М.: Радио и связь, 1981. 280 с.
4. Беседин А.Б., Жуков В.М., Харин А.Ф. Принципы построения фазированных антенных решеток корпоративных сетей подвижной коротковолновой радиосвязи // Радиотехника. М. 2006. № 5. С. 102-105.
5. Гончаренко И.В. Антенны КВ и УКВ. Компьютерное моделирование. MMANA. М.: ИП РадиоСофт. 2004. 128 с.

Информация об авторах

Сысоев Александр Николаевич – главный конструктор, АО «Тамбовский завод «Октябрь» (392029, Россия, г. Тамбов, ул. Бастинная, 1), e-mail: trishakov2016@yandex.ru

Муромцев Дмитрий Юрьевич – д-р техн. наук, проректор по научной работе, Тамбовский государственный технический университет (392000, Россия, г. Тамбов, ул. Советская, д. 106/5, пом. 2), e-mail: mdjur@mail.ru, ORCID: 0000-0003-2033-6591

Белоусов Олег Андреевич – канд. техн. наук, директор института энергетики, приборостроения и радиоэлектроники, Тамбовский государственный технический университет (392000, Россия, г. Тамбов, ул. Советская, д. 106/5, пом. 2), e-mail: jjour314@yandex.ru

Тришakov Алексей Александрович – аспирант, Тамбовский государственный технический университет (392000, Россия, г. Тамбов, ул. Советская, д. 106/5, пом. 2), e-mail: trishakov2016@yandex.ru

BROADBAND HF BAND ANTENNA CONSISTING OF ASYMMETRIC VIBRATORS

A.N. Sysoev¹, D.Yu. Muromtsev², O.A. Belousov², A.A. Trishakov²

¹AO Tambov Plant «Oktyabr'», Tambov, Russia

²Tambov State Technical University, Tambov, Russia

Abstract: the development of a broadband antenna for the HF band, consisting of asymmetric vibrators, is aimed at expanding the operating characteristics of the frequency spectrum compared to traditional antennas and maintaining high directivity. The study is based on a comparison of a logoperiodic antenna (LPA) with broadband antenna variants in which half-wave vibrators are replaced with asymmetric quarter-wave elements. To achieve unidirectional radiation, we considered a system of two coupled vibrators and the effect of the electrical distance between the elements and analyzed the phase shift of currents on the shape of the radiation pattern. We carried out the simulation in MMANA in the 11-12 MHz bands, with calculations for two configurations: a basic broadband antenna and its version with an additional quarter-wave vibrator to increase the suppression of side radiation. The results show that the basic broadband antenna has a 0.5 dB lower gain at a frequency of 11 MHz and a weaker side lobe suppression of up to 3.5 dB, whereas at 12 MHz the coefficients are similar, but the side radiation suppression remains below the LPA values. An increase in the electrical distance between the vibrators leads to a cardioid bottom and a noticeable increase in gain: at 11 MHz, the antenna with two elements shows an increase of up to 1.6 dB, and at 12 MHz — up to 2.4 dB compared to the LP. The introduction of an additional quarter-wave vibrator significantly improves the parameters: at 11 MHz, the CU increase reaches 2 dB, and the suppression of side radiation is 5.1 dB; at 12 MHz, the corresponding values are 2.7 dB and more than 9.9 dB, respectively. We indicate that the weak suppression of side radiation in the lower range is due to the absence of an active reflector, however, the addition of an additional element can significantly increase the directivity and suppression of the side lobes. As a result, the proposed configuration extends the range of operation compared to LPAs and provides competitive or superior performance in terms of gain and lateral suppression while maintaining compactness and adaptability of the design

Key words: broadband antenna, shortwave band, asymmetric vibrators, radiation pattern, modeling, gain, side radiation suppression

References

1. Ignatov V.V., Babkov V.Yu. "Substantiation of the main technical parameters of radio communication technology" ("Obosnovanie osnovnykh tekhnicheskikh parametrov tekhniki radiosvyazi"), Leningrad: VAS, 1990, 112 p.
2. Rothammel K., Kriske A. "Antennas. Vol. 1", Moscow: LIGHT LTD, 2000, 416 p.
3. Kocherzhevskiy G.N. "Antenna-feeder devices" ("Antenno-fidernye ustroystva"), Moscow: Radio i svyaz', 1981, 280 p.
4. Besedin A.B., Zhukov V.M., Kharin A.F. "Principles of construction of phased antenna arrays of corporate shortwave mobile radio communication networks", *Radio Engineering (Radiotekhnika)*, 2006, no. 5, pp. 102-105.
5. Goncharenko I.V. "HF and VHF antennas. Computer simulation. MMANA", Moscow: IP RadioSoft, 2004, 128 p.

Submitted 24.10.2025; revised 19.11.2025

Information about the authors

Aleksandr N. Sysoev, Chief Designer, JSC TK «Oktyabr'» (1 Bastionnaya str., Tambov 392029, Russia), e-mail: trishakov2016@yandex.ru

Dmitriy Yu. Muromtsev, Dr. Sc. (Technical), Vice-Rector for Scientific and Innovative Activities, Tambov State Technical University (106 Sovetskaya str., Tambov 392000, Russia), e-mail: mdjur@mail.ru, ORCID: 0000-0003-2033-6591

Oleg A. Belousov, Cand. Sc. (Technical), Director of the Institute of Power Engineering, Instrument Engineering and Radio Electronics, Tambov State Technical University (106 Sovetskaya str., Tambov 392000, Russia), e-mail: jjour314@yandex.ru

Aleksey A. Trishakov, graduate student, Tambov State Technical University (106 Sovetskaya str., Tambov 392000, Russia), e-mail: trishakov2016@yandex.ru

ЛИНЕЙНАЯ ФАЗИРОВАННАЯ АНТЕННАЯ РЕШЁТКА С МЕМРИСТИВНОЙ ЛИНИЕЙ ЗАДЕРЖКИ

Д.А. Шершов¹, И.А. Сафонов¹, С.М. Фёдоров^{1,2}, А.А. Силонов¹

¹Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

²Международный институт компьютерных технологий, г. Воронеж, Россия

Аннотация: анализируются возможность интеграции мемристоров в структуру фазированной антенной решётки (ФАР), оценка их влияния на характеристики антенны и демонстрация преимуществ перед традиционными подходами. Актуальность данного процесса обусловлена необходимостью преодоления ограничений классических ФАР. Существующие технологии управления фазой часто требуют сложных схем питания, обладают инерционностью и ограниченной надёжностью, особенно в экстремальных условиях. Мемристорные решения, напротив, предлагают высокое быстродействие, низкое энергопотребление и возможность сохранения состояния при отключении питания. Несмотря на растущий интерес к мемристорам в микроэлектронике, их применение в антенных решетках остается малоизученным, что определяет научную новизну исследования. Представлен обзор принципов работы ФАР и ключевых свойств мемристоров, предложена концепция фазированной антенной решетки и описаны методы её моделирования, рассматривается анализ результатов и сравнение с традиционными системами, обсуждаются перспективы внедрения технологии и возможные направления дальнейших исследований. Проведенное исследование вносит вклад в развитие адаптивных антенных систем, сочетающих высокую производительность с миниатюризацией и энергосбережением, что особенно востребовано в спутниковой связи, интернете вещей (IoT) и мобильных сетях пятого поколения (5G) и Beyond

Ключевые слова: мемристор, фазированные антенные решетки (ФАР), антенна, антенная решётка, 2.4 ГГц, патч-антенна, мемристивная линия задержки (МЛЗ)

Благодарности: работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания «Молодежная лаборатория» (№ FZGM-2024-0003)

Введение

Современные телекоммуникационные системы, радарные технологии и системы беспроводной связи сталкиваются с возрастающими требованиями к скорости передачи данных, энергоэффективности и адаптивности. Одним из ключевых компонентов, обеспечивающих выполнение этих задач, являются фазированные антенные решетки (ФАР). Эти устройства позволяют динамически формировать и направлять электромагнитный луч без механического перемещения элементов, что достигается за счет управления фазой и амплитудой сигналов в каждом излучателе решетки [1]. Однако традиционные ФАР, основанные на полупроводниковых фазовращателях или микроэлектромеханических системах (MEMS), имеют ряд ограничений, включая высокое энергопотребление, значительные габариты и сложности масштабирования. В этом контексте поиск инновационных решений для управления фазой сигнала становится критически важным.

В последние годы внимание исследователей привлекли мемристоры — нелинейные

элементы памяти, способные изменять свое сопротивление в зависимости от протекавшего через них заряда. Благодаря уникальным свойствам, таким как энергонезависимость, наноразмерные габариты и возможность аналоговой настройки, мемристоры нашли применение в нейроморфных вычислениях, энергоэффективной электронике и системах хранения данных. Их интеграция в ФАР открывает перспективы для создания компактных, перестраиваемых и энергосберегающих антенных систем. Например, мемристоры могут заменить традиционные фазовращатели, обеспечивая управление задержкой сигнала через изменение сопротивления, что упрощает архитектуру решетки и снижает энергозатраты [2].

Принцип работы ФАР

Фазированная антенная решетка — антенна, которая формирует и направляет луч за счет точного управления фазой сигнала в каждом из множества излучающих элементов. Это обеспечивает беспрецедентную скорость, гибкость и надежность по сравнению с механически сканирующими антеннами, что делает ФАР ключевой технологией в современных радиолокационных и телекоммуникационных системах.

Принцип работы фазированных антенных решеток (ФАР) основан на управлении фазой сигнала в отдельных излучающих элементах для формирования и электронного управления лучом в пространстве без физического перемещения антенны [3].

Структура ФАР

ФАР состоит из множества отдельных излучающих элементов (вибраторов, щелей, патчей и т.д.), расположенных в определенном порядке (линейно, плоски, концентрически). Каждый элемент подключен к своему фазовращателю (ФВ). Фазовращатели управляются системой управления (контроллером). Ключевой принцип – Сигнал от передатчика разделяется и подается на все излучающие элементы. Фазовращатель под управлением контроллера изменяет фазу сигнала, проходящего через каждый элемент на определенную величину ($\Delta\phi$). В определенном направлении (θ_0) сигналы от всех элементов складываются синфазно (в фазе), усиливая друг друга. Это и есть направление главного луча антенны. В других направлениях сигналы складываются не синфазно (в противофазе или со случайными фазами), ослабляя или гася друг друга. Направление луча (θ_0) зависит от разности фаз ($\Delta\phi$) между сигналами соседних элементов. Контроллер рассчитывает и устанавливает необходимый сдвиг фаз для каждого элемента, чтобы максимум излучения (луч) был направлен в нужную точку пространства (θ_0). Чтобы переместить луч в другое направление (θ_1), система управления мгновенно пересчитывает и устанавливает новые значения фазовых сдвигов для всех элементов. Физическое движение антенны при этом не требуется. Управляя не только фазой, но и амплитудой сигнала в каждом элементе (с помощью аттенуаторов), можно дополнительно формировать:

- Ширину луча – усиление сигналов по краям решетки сужает луч.
- Уровень боковых лепестков – ослабление сигналов по краям решетки снижает нежелательные боковые лепестки диаграммы направленности.
- Форму луча – создавать лучи специальной формы (например, cosec^2 для обзора поверхности).

Принцип работает и в обратную сторону (прием). Сигналы, приходящие с определенного направления (θ_0), будут суммироваться на выходе решетки с максимальной амплитудой, если фазовращатели настроены на соответствующую разность фаз для этого направления.

Это позволяет электронно «наводить» антенну на источник сигнала [4].

Преимущества ФАР

- Очень высокая скорость сканирования – луч перемещается со скоростью электронных переключений (микросекунды).
- Отсутствие механических частей – повышает надежность, снижает инерционность, позволяет создавать очень большие антенны.
- Гибкость управления лучом.
- Быстрое переключение луча между целями.
- Одновременное сопровождение многих целей несколькими независимыми лучами (МФАР - Многофункциональные ФАР).
- Быстрое изменение формы луча (сканирующий луч, луч сопровождения, луч связи).
- Адаптивное подавление помех.
- Высокая надежность – выход из строя части элементов не приводит к полному отказу антенны, только к некоторой деградации характеристик.
- Потенциально высокая мощность – суммарная мощность передатчика распределяется по многим элементам.

Недостатки ФАР

- Высокая сложность и стоимость – множество элементов, фазовращателей, сложная система управления и питания.
- Ограниченный угол сканирования – как правило, до $\pm 60^\circ$ от нормали к плоскости решетки (из-за роста уровня боковых лепестков и уменьшения эффективной площади антенны).
- Вычислительная сложность – требуется мощный процессор для расчета фазовых распределений в реальном времени.
- Потери в фазовращателях снижают общий КПД антенны.

Применение ФАР

Радиолокация: радиолокационные станции (РЛС) противовоздушной обороны (ПВО) (С-300, С-400, Patriot, Aegis), бортовые РЛС истребителей (AN/APG-77/81 на F-22/F-35), метеорологические РЛС, РЛС космического базирования.

Связь: Спутниковая связь (наземные станции, спутники), системы 5G/6G (базовые станции Massive MIMO), тропосферная связь.

Радиоастрономия: Крупные радиотелескопы (например, ALMA).

Электронная борьба (РЭБ): Системы постановки помех.

Свойства мемристоров

Ключевые свойства мемристоров (резистивных элементов памяти) вытекают из их фундаментального принципа работы — изменения электрического сопротивления (R) под действием протекшего через них заряда (q) и способности «запоминать» это состояние при отключении питания [5, 6]. Вот основные свойства:

- Гистерезис вольтамперной характеристики (ВАХ) — это главная отличительная черта. Ток через мемристор зависит не только от текущего напряжения, но и от предыстории (величины и направления протекшего заряда). ВАХ имеет характерную «петлю гистерезиса». При изменении напряжения сопротивление меняется нелинейно и зависит от предыдущего состояния.

- Резистивная память (Memory Resistance) — мемристор может находиться в двух или более стабильных резистивных состояниях (например, высокоомное состояние HRS и низкоомное состояние LRS). Переключение между состояниями происходит при приложении напряжения определенной величины и полярности («запись»). Состояние сохраняется при снятии напряжения («неразрушающее считывание» и энергонезависимость).

- Энергонезависимость — записанное резистивное состояние (HRS или LRS) сохраняется после отключения питания. Это делает мемристоры перспективными для энергонезависимой памяти (ReRAM).

- Аналоговое поведение (плавное переключение) — в отличие от транзисторов в цифровых схемах (вкл/выкл), сопротивление мемристора можно изменять плавно и непрерывно с помощью приложенных импульсов напряжения/тока. Это позволяет реализовать множество промежуточных резистивных состояний (мультиуровневая ячейка памяти).

- Структуры мемристоров (например, металл-диэлектрик-металл) могут быть изготовлены с очень малыми размерами (единицы нанометров).

- Энергоэффективность — переключение между состояниями требует очень малой энергии (порядка фемтоджоулей на бит или даже меньше). Считывание состояния также может быть малопотребляющим.

- Высокая скорость переключения — мемристоры способны переключаться между

состояниями очень быстро (наносекунды и даже пикосекунды).

- Совместимость с комплементарной структурой металл — оксид — полупроводник — технологии изготовления мемристоров часто совместимы со стандартными процессами производства КМОП-интегральных схем, что упрощает их интеграцию в существующие электронные системы.

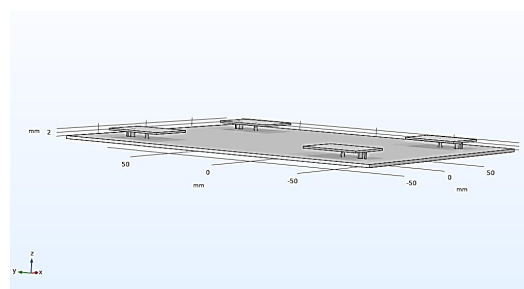
Исследование и моделирование антенны

После долгих математических расчетов была представлена следующая структура ФАР (табл. 1, рис. 1-2).

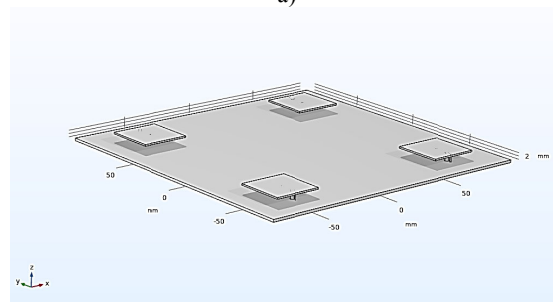
Таблица 1
Состав и структура ФАР

Антенна	Материал	Размеры
Патч	Медь	30x30мм
Подложка	Воздух	180x180мм
Заземление	Нержавеющая сталь	180x180мм
Стойки/опоры (цилиндр/конус)	Медь	1.5x5.8мм 1.5(0.5)x5.8 мм
Мемристор (Нижний электрод/основная часть/верхний электрод)	Платина Оксид Гафния (II) Нитрид Титана	0.5x0.0001мм 0.5x0.00003мм 0.5x0.00005мм

Исходя из этих параметров, рабочий диапазон антенны составляет примерно от 2.3 ГГц до 2.5 ГГц, однако основные этапы моделирования будут проводиться для частоты 2.4 ГГц, а именно, изменение диаграммы направленности данной антенны путём изменения тока, поступающего на мемристор.



а)



б)

Рис. 1. Внешний вид антенны



Рис. 2. Структура используемого мемристора

Было проведено три моделирования с разными токами: 100 мкА, 250 мкА, 50 мкА, по ним построены графики диаграммы направленности в 3D- и 2D- представлениях (рис. 3-4).

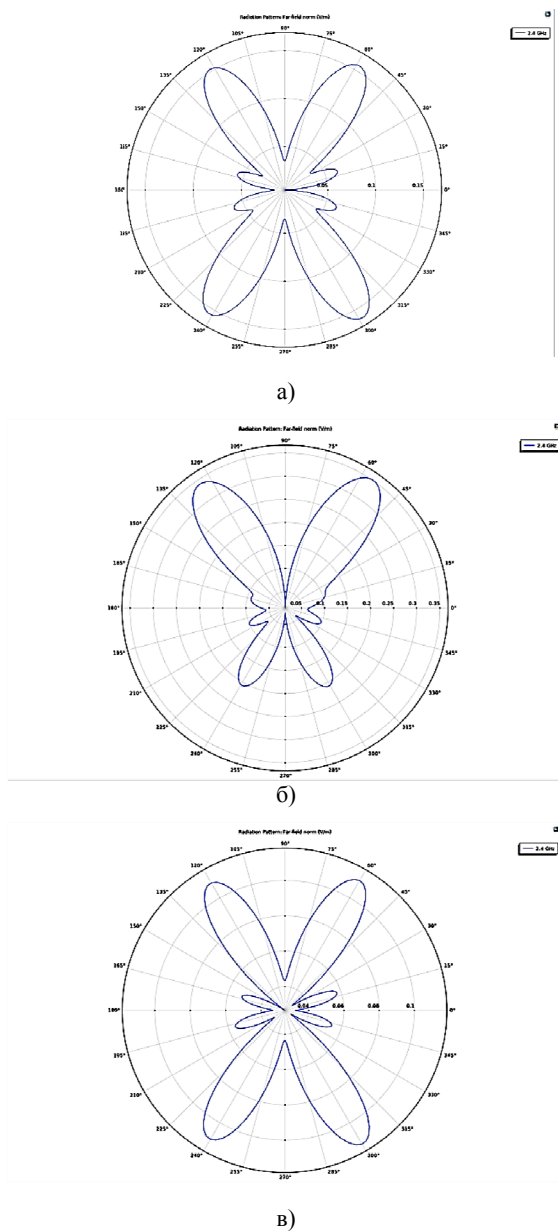
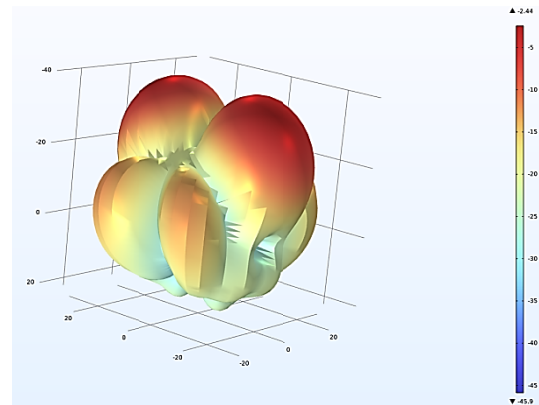
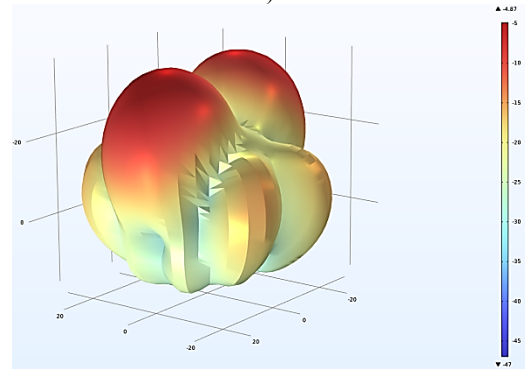


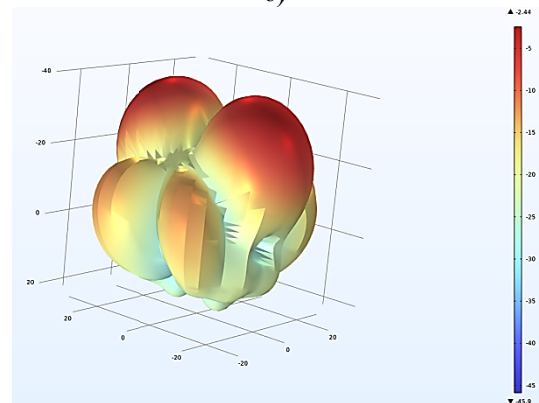
Рис. 3. Графики измерения в дальней зоне для антенны при: а) 100 мкА; б) 250 мкА; в) 50 мкА



а)



б)



в)

Рис. 4. Графики трёхмерного измерения в дальней зоне для антенны при: а) 100 мкА; б) 250 мкА; в) 50 мкА

Заключение

Фазированные антенные решетки (ФАР) являются ключевой технологией для современных систем связи (5G/6G), радаров и радиоастрономии. Их основное преимущество — электронное управление лучом без механического перемещения антенны. Традиционные ФАР используют активные фазовращатели (на основе PIN-диодов, FET-транзисторов или жидких кристаллов), которые могут быть сложными, дорогими и потреблять значительную мощность. Предложение использо-

вать мемристивные линии задержки (МЛЗ) в составе четырехэлементной патч-антенной решетки представляет собой инновационный подход к управлению лучом, обладающий уникальными потенциальными преимуществами [7, 8].

Анализ ключевых компонентов:

1. Четырехэлементная патч-антенная решетка:

Преимущества – микрополосковые патч-антенны компактны, легки, имеют низкий профиль, просты в изготовлении и интеграции на печатных платах, совместимы с планарными технологиями. Четыре элемента — это минимальная конфигурация для двумерного сканирования (по азимуту и углу места), обеспечивающая разумный компромисс между сложностью, размером, коэффициентом усиления и управляемостью.

Ограничения – относительно узкая полоса пропускания (характерная для патч-антенн), умеренный коэффициент усиления по сравнению с решетками большего размера. Требуется тщательного проектирования геометрии (расстояния между элементами) для минимизации взаимного влияния и подавления побочных лепестков.

2. Мемристивная линия задержки (МЛЗ):

Принцип работы – МЛЗ использует уникальное свойство мемристоров — их способность изменять свое сопротивление (R) под действием приложенного напряжения и «запоминать» последнее состояние даже после снятия напряжения. Изменяя состояние мемристора (High Resistance State - HRS / Low Resistance State - LRS), можно динамически управлять фазовой задержкой сигнала, проходящего через линию.

Реализация в ФАР – МЛЗ интегрируется в линию питания каждого излучающего элемента патч-антенны (или в схему корпоративного/пространственного питания). Прикладывая управляющие импульсы напряжения к мемристорам в линии, можно дискретно или аналогово (в зависимости от типа мемристора и управления) изменять фазовый сдвиг сигнала, подаваемого на каждый антенный элемент.

Ключевые особенности мемристоров для ФАР:

Энергонезависимость – состояние (сопротивление) сохраняется после снятия управляющего напряжения. Энергия тратится только на переключение состояния, а не на его поддержание. Это кардинальное отличие от PIN-диодов/FET, требующих постоянного тока смещения.

Простота управления – переключение требует коротких импульсов напряжения.

Потенциал высокой интеграции – мемристивные совместимы с КМОП-технологиями и могут быть изготовлены в наномасштабе.

Аналоговое поведение (у некоторых типов) – позволяет плавное изменение сопротивления и, следовательно, фазового сдвига.

ФАР с мемристивной линией задержки демонстрирует революционный потенциал в антенной технике, сочетая наносекундную динамику, сверхнизкое энергопотребление. Технология готова к внедрению в системы 5G+/6G, радары с электронным сканированием и компактные спутниковые терминалы.

Литература

1. Antenna Magus, Magus (Pty) Ltd, South Africa, URL: www.antennamagus.com. (дата обращения: 20.07.2025)
2. Memristors: Devices, Models and Applications / P. Mazumder [et al.] // Proc. IEEE. 2012. V. 100. № 6. pp. 1911-1916.
3. T. C. Cheston and J. Frank, "Phased array radar antennas." Radar Handbook, 1990, Section 7-1. URL: <https://sil0.tips/download/chapter-7-phased-array-radar-antennas-theodore-c-cheston-naval-research-laboratory> (дата обращения: 20.07.2025)
4. The Perfect Boundary Approximation Technique facing the big challenge of High Precision Field Computation / B. Krietenstein [et al.] // Proc. of the XIX International Linear Accelerator Conference (LINAC 98), Chicago, USA, 1998. pp. 860-862.
5. Chua L. Memristor—missing circuit element // IEEE Trans. Circuit Theory. 1971. V. 18. № 9. pp. 507-519.
6. The missing memristor found / D. Strukov [et al.] // Nature. 2008. V. 453. pp. 80-83.
7. Memristive Device Fundamentals and Modeling: Applications to Circuits and Systems Simulation / K. Eshraghian [et al.] // Proc. IEEE. 2012. V. 100. №. 6. pp. 1991-2007.
8. Stutzman W.L., Thiele G.A. Antenna Theory and Design, 2nd ed., John Wiley & Sons Inc., 1998, pp. 125-135.

Поступила 23.06.2025; принята к публикации 25.08.2025

Информация об авторах

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

Сафонов Иван Александрович – канд. техн. наук, доцент кафедры радиоэлектронных устройств и систем, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: saff@inbox.ru
Фёдоров Сергей Михайлович – канд. техн. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84); Международный институт компьютерных технологий (394026, Россия, г. Воронеж, ул. Солнечная, 29 б), e-mail: fedorov_sm@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9027-6163>
Силонов Алексей Анатольевич – преподаватель, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: silonovalexey@yandex.ru

LINEAR PHASED ANTENNA ARRAY WITH MEMRISTIVE DELAY LINE

D.A. Shershov¹, I.A. Safonov¹, S.M. Fedorov^{1,2}, A.A. Silonov¹

¹Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

²International Institute of Computer Technologies, Voronezh, Russia

Abstract: the purpose of this article is to analyze the possibility of integrating memristors into the structure of headlamps, assess their impact on antenna characteristics, and demonstrate their advantages over traditional approaches. The relevance of this work is due to the need to overcome the limitations of classic headlamps. Existing phase control technologies often require complex power circuits, have inertia, and limited reliability, especially in extreme conditions. Memristor solutions, on the other hand, offer high performance, low power consumption, and the ability to save state when power is turned off. Despite the growing interest in memristors in microelectronics, their use in antenna arrays remains poorly understood, which determines the scientific novelty of the research. The article is structured as follows: the first section provides an overview of the principles of operation of headlamps and key properties of memristors; the second section proposes the concept of a phased array antenna and describes the methods of its modeling. The third section is devoted to the analysis of the results and comparison with traditional systems; in conclusion, the prospects for the introduction of technology and possible directions for further research are discussed. The conducted research contributes to the development of adaptive antenna systems that combine high performance with miniaturization and energy conservation, which is especially in demand in satellite communications, the Internet of Things (IoT), and fifth-generation (5G) and Beyond mobile networks

Key words: memristor, phased antenna array, antenna, antenna array, 2.4GHz, patch antenna, memristive delay line

Acknowledgments: this work was carried out with the financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the framework of the state assignment «Youth Laboratory» (no. FZGM-2024-0003)

References

1. Antenna Magus, Magus (Pty) Ltd, South Africa, www.antennamagus.com. (date of access: 20.07.2025)
2. Mazumder P. et al. "Memristors: Devices", *Models and Applications Proc. IEEE*, 2012, vol. 100, no. 6, pp. 1911-1916.
3. Cheston T.C., Frank J. "Phased array radar antennas", *Radar Handbook*, 1990, section 7-1, available at: <https://silo.tips/download/chapter-7-phased-array-radar-antennas-theodore-c-cheston-naval-research-laboratory> (date of access: 20.07.2025)
4. Krietenstein B., Schuhmann R., Thoma P., Weiland T. "The Perfect Boundary Approximation Technique facing the big challenge of High Precision Field Computation", *Proc. of the XIX International Linear Accelerator Conference (LINAC 98)*, Chicago, USA, 1998, pp. 860-862.
5. Chua L. "Memristor—missing circuit element", *IEEE Trans. Circuit Theory*, 1971, vol. 18, no. 9, pp. 507-519.
6. Strukov D. et al. "The missing memristor found", *Nature*, 2008, vol. 453, pp. 80-83.
7. Eshraghian K. et al. "Memristive device fundamentals and modeling: applications to circuits and systems simulation", *Proc. IEEE*, 2012, vol. 100, no. 6, pp. 1991-2007.
8. Stutzman W.L., Thiele G.A. "Antenna theory and design", John Wiley & Sons Inc., 1998, pp. 125-135.

Submitted 23.06.2025; revised 25.08.2025

Information about the authors

Daniil A. Shershov, student, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: shershovdaniil@yandex.ru
Ivan A. Safonov, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: saff@inbox.ru
Sergey M. Fedorov, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia); Associate Professor, 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>
Aleksey A. Silonov, Assistant Professor, Voronezh State Technical University (84 20th Anniversary of October str., Voronezh, 394006, Russia), e-mail: silonovalexey@yandex.ru

АТМОСФЕРНАЯ ОПТИЧЕСКАЯ ЛИНИЯ СВЯЗИ С ПОЛЯРНЫМ КОДИРОВАНИЕМ**Р.П. Краснов, А.В. Бобровников****Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия**

Аннотация: атмосферные оптические линии связи (АОЛС) представляют собой широкополосную альтернативу радиочастотных систем передачи «последней мили», обеспечивая быстроту и легкость развертывания, работу в нелицензируемом диапазоне длин волн, высокую частотную эффективность и скрытность. В то же время ряд атмосферных явлений, таких как туман, сильный дождь или снегопад, а также присутствие турбулентности в атмосферном оптическом канале может привести к серьезному ухудшению качества связи. Для снижения влияния этого фактора при сохранении простоты устройства оптического приемника предложено использовать методы помехоустойчивого кодирования. В статье Для этой цели рассматривается использование полярных кодов, поскольку они позволяют достичь наилучших показателей информационной эффективности оптического канала. Представлена одноканальная система атмосферной оптической связи с модуляцией интенсивности и некогерентным детектированием. Для условий распространения в статистике гамма-гамма распределения приведены результаты моделирования методом Монте-Карло. Показано, что применение предложенного метода кодирования для скоростей 0,5 и 0,75 показывает эффективность полярных кодов в АОЛС для снижения влияния затухания, вызванного атмосферной турбулентностью при сохранении сравнительно низкой вычислительной сложности кодеров

Ключевые слова: АОЛС, вероятность ошибки, помехоустойчивое кодирование

Введение

Атмосферные оптические линии связи (АОЛС) представляют собой широкополосную технологию оптической беспроводной связи. Это экономически эффективное решение для связи на «последней миле», по сравнению с радиочастотными системами связи дающее ряд преимуществ. К ним можно отнести более высокую пропускную способность канала, нелицензируемый частотный диапазон, высокий уровень защищенности канала и устойчивость к электромагнитным помехам [1]. Однако в практически реализуемых системах АОЛС на качество связи оказывают влияние ряд факторов, таких как геометрические потери, ошибки нацеливания, потери из-за атмосферного затухания и турбулентности, фоновый шум [2].

Влияние атмосферной турбулентности, которое приводит к флуктуациям амплитуды и фазы оптических сигналов из-за неоднородностей температуры и давления в атмосферном канале связи, является фактором, наиболее сильно снижающим качество связи. Для решения этой проблемы используются различные методы, к наиболее употребимым среди которых можно отнести пространственное разнесение, использование ретрансляторов, а также развертывание гибридных радиооптических систем [1]. Учитывая высокую пропускную

способность каналов АОЛС можно считать, что что параметры канала будут медленно меняться во времени (т. е. будут иметь место медленные замирания), тогда параметрами передачи можно управлять, располагая информацией о состоянии канала (CSI), которая передается через канал обратной связи.

Одним из весьма эффективных путей решения такой проблемы является применение помехоустойчивого кодирования.

Было предложено сравнительно большое число кодов, потенциально повышающих помехоустойчивость оптических систем связи, например, турбокоды, коды с низкой плотностью проверок на четность (LDPC), коды Рида-Соломона [3]. Коды LDPC обеспечивают больший энергетический выигрыш кодирования по сравнению с кодами Рида-Соломона [4]. В литературе описаны каналы АОЛС с пространственно-временными, повторными и бесскоростными схемами кодирования.

В качестве перспективного решения могут быть использованы полярные коды, впервые предложенные Ариканом [5], которые могут достигать предела пропускной способности двоичного симметричного канала без памяти. Как известно, такие коды введены в стандарт беспроводной связи 5G как позволяющие реализовать максимум производительности системы передачи данных.

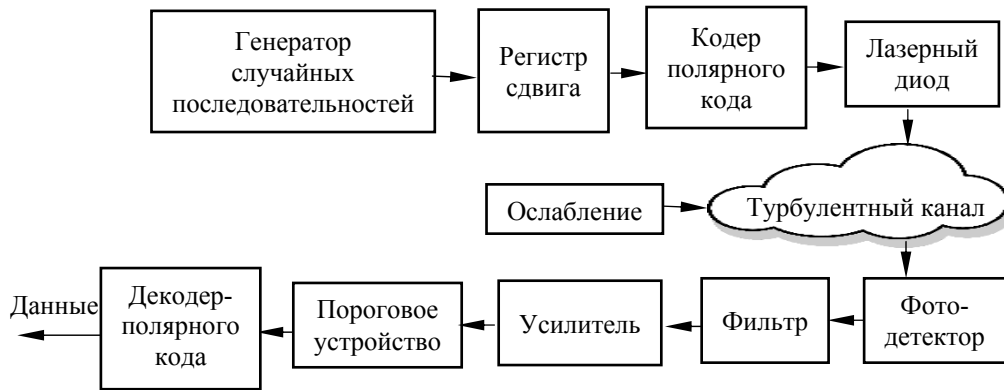


Рис. 1

Модель системы

В статье рассмотрена система атмосферной оптической связи, структурная схема которой представлена на рис. Из соображений простоты анализа выбран оптический передатчик с модуляцией интенсивности, а оптический приемник считается некогерентным. Шумы засветки полагаются малыми, следовательно, приемник работает в режиме ограничения тепловыми шумами, моделируемыми гауссовским распределением с нулевым средним [1].

Оптический канал связи далее будет рассматриваться как дискретный по времени двоичный симметричный со стираниями. Воздействие его на передаваемый сигнал будет заключаться в комбинации эффектов атмосферного ослабления и турбулентности. Моделирование распространения оптического сигнала будет проводиться в предположении плоского волнового фронта. Тогда принимаемый сигнал можно описать математическим выражением вида

$$I_R = \eta h I_0 + n, \quad (1)$$

где I_0 и I_R представляют собой интенсивности передаваемого и принимаемого сигналов соответственно, η — чувствительность фотодетектора, h — затухание интенсивности, обусловленное влиянием атмосферного турбулентного канала, n — гауссовский белый шум с нулевым средним.

Поскольку требуется обеспечение неотрицательности оптического сигнала, для угловой модуляции требуется присутствие постоянного смещения. Поэтому далее будет рассмотрен простейший тип модуляции добротности, представляя передаваемый сигнал как $I_0 = P_0 x$, где P_0 — выходная мощность излучателя, $x \in \{0, 1\}$.

Как упоминалось выше, оптический сигнал при распространении в канале подвергается

ослаблению, описываемому законом Бира-Ламберта [1]

$$I_R / I_0 = \exp(-\gamma L), \quad (2)$$

где I_R , I_0 — интенсивности принимаемого и передаваемого оптического сигнала соответственно, γ — коэффициент экстинкции, L — расстояние между передающим и приемным модулем. Величина γ в большинстве случаев определяется влиянием Ми-рассеяния, при этом γ будет равен [1]:

$$\gamma = \frac{3.91}{V} \left(\frac{\lambda_0}{550} \right)^{-q_V},$$

где V — метеорологическая дальность видимости, λ_0 — длина волны, q_V — метеокoeffициент, расчет которого приведен, например, в [1].

Основной причиной возникновения турбулентности является появление перепадов температуры и давления, что приводит к образованию воздушных течений в атмосфере. В результате в канале связи формируются области турбулентности с различными коэффициентами преломления, представляющими собой случайные величины. При распространении через эти области неоднородности волновой фронт оптического пучка искажается. Это приводит к случайному распределению фаз и, вследствие интерференции, также к случайному распределению оптической мощности в поперечном сечении пучка. В результате возникает явление сцинтилляции, когда интенсивность оптического сигнала на приемной апертуре также становится случайной.

Атмосферную турбулентность таким образом удобно определять как случайный процесс. Для его статистического описания в данной статье использовано гамма-гамма распределение при всех видах атмосферной турбулентности [4].

Величину турбулентности будем характеризовать дисперсией Рытова: $\sigma_p^2 = 1,23C_n^2 k^{7/6} L^{11/6}$, где C_n^2 – структурная константа показателя преломления, k – волновое число.

Плотность вероятности процесса, описываемого гамма-гамма распределением, равна [4]:

$$p(I_R) = \frac{2(\alpha\beta)^{(\alpha+\beta)/2}}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} I_R^{(\alpha+\beta)/2-1} K_{\alpha-\beta}(2\sqrt{\alpha\beta} I_R), \quad (3)$$

где α и β — эффективные размеры крупно- и мелкомасштабных областей турбулентности соответственно, $\Gamma(x)$ — гамма-функция. Для плоского волнового фронта эти коэффициенты определяются как [1, 4]:

$$\alpha = \left(\exp \left[\frac{0,49\sigma_p^2}{(1 + 0,65d^2 + 1,11\sigma_p^{12/5})^{7/6}} \right] - 1 \right)^{-1},$$

$$\beta = \left(\exp \left[\frac{0,51\sigma_p^2(1 + 0,69\sigma_p^{12/5})^{-5/6}}{1 + 0,9d^2 + 0,62d^2\sigma_p^{12/5}} \right] - 1 \right)^{-1},$$

где $K_a(x)$ — модифицированная функция Бесселя порядка a второго рода.

Степень флуктуаций интенсивности будем оценивать индексом сцинтилляции σ_I^2 [4]:

$$\sigma_I^2 = \frac{m[I_R^2]}{m^2[I_R] - 1}, \quad (4)$$

где m — оператор матожидания.

Для снижения влияния сцинтилляции применяется техника апертурного усреднения. В этом случае выражение для расчета индекса сцинтилляции приобретает вид [4]:

$$\sigma_I^2(D) = \exp \left[\frac{0,49\sigma_p^2}{(1 + 0,65d^2 + 1,11\sigma_p^{12/5})^{7/6}} + \frac{0,51\sigma_p^2(1 + 0,69\sigma_p^{12/5})^{-5/6}}{1 + 0,9d^2 + 0,62d^2\sigma_p^{12/5}} \right] - 1, \quad (5)$$

где D — диаметр приемной апертуры, а

$$d = \sqrt{\frac{kD^2}{4L}}.$$

Для повышения помехоустойчивости в АОЛС использован кодек полярного кода. Впервые описанные Ариканом [5], полярные коды достигают пропускной способности канала. Согласно представленной концепции, такие коды используют принцип передачи через набор поляризованных каналов. В той их части, которая соответствует каналам без помех, можно достичь Шенноновского предела пропускной способности для двоичного канала без памяти. Определим полярный код как (N, K, A) —

код, где K и N — длина информационной и кодовой частей соответственно, A — множество «замороженных» бит, получаемых в результате поляризации канала. Концепция поляризации [5, 6] состоит в создании N поляризованных каналов, в каждом из них передаются биты с различной вероятностью декодирования.

Кодек полярного (N, K) — кода для каждого вектора информационного сообщения $\mathbf{u} = [u_0, u_1, u_2, \dots, u_{N-1}]$ назначает K информационных бит для K наиболее надежных каналов. Оставшиеся $N-K$ бит объявляются «замороженными» и не несут информации [5, 6]. Получаемая кодовая комбинация $\mathbf{c} = [c_0, c_1, c_2, \dots, c_{N-1}]$ определяется согласно уравнению кодирования:

$$\mathbf{c} = \mathbf{u} \times \mathbf{G}_N, \quad (6)$$

где \mathbf{G}_N — матрица преобразования размерности $N \times N$, заданная как

$$\mathbf{G}_N = \mathbf{G}_2^{\otimes n}, \quad \mathbf{G}_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

где $n = \log_2(N)$ — длина кода, символом \otimes обозначено произведение Кронекера.

При распространении по общему набору каналов символы из \mathbf{u} преобразуются в выходной вектор $\mathbf{y} = [y_0, y_1, \dots, y_{N-1}]$.

Выбор каналов для передачи информационных и замороженных бит на передающей стороне определяется на основе вычисления параметра Бхаттачарьи. Это верхний предел для вероятности ошибки при декодировании по методу максимального правдоподобия, определяемый как

$$Z_B = \sum_y \sqrt{P(y|0)P(y|1)}. \quad (8)$$

На приемной стороне выполняется декодирование с последовательным исключением (SC).

Поскольку кодовые блоки в полярном коде добавляют корреляцию между битами информации, каждый бит кода связан со всеми своими предыдущими битами. Такая корреляция эквивалентна наличию помех в последовательности информационных бит, которые, тем не менее, повышают эффективность декодирования. Это свойство лежит в основе центрального принципа алгоритма декодирования с последовательным исключением. Здесь последовательное исключение «помех», которые были вызваны последовательностью предшествующих бит, ведет к росту надежности восстановления бит информации. Регулярность структу-

ры полярных кодов позволяет описывать алгоритм SC в виде кодовой решетки или кодового дерева аналогично, например, декодеру Витерби или кода LDPC.

Само декодирование по методу SC можно рассматривать как комбинацию алгоритмов принятия мягких и жестких решений при проходе по решетке полярного кода. Кодовая решетка может быть структурирована в виде n этапов и N уровней. Каждый этап включает $N/2$ блоков, а каждый блок состоит из двух узлов проверки и переменных [7].

Жесткие решения, распространяющиеся по решетке, представляют собой биты оценки для узлов переменных. Мягкие решения, соответствующие этим битам, вычисляются на основе соответствующего логарифмического отношения правдоподобия.

Таким образом выполняется поиск в двоичном дереве, вершины которого представляют информацию и замороженные биты, в также их конкатенацию. Декодер находит решение, используя вычисление отношения правдоподобия для каждого символа на каждом уровне поляризации канала на основе жадного алгоритма одноразового прохода по дереву.

Численное моделирование

При моделировании рассматривалась система атмосферной оптической связи со следующими характеристиками. Передавались оптические сигналы мощностью 5 мВт с модуляцией интенсивности излучения на рабочей длине волны 1550 нм на расстояние 800 м. Диаметры апертур передающего и приемного модулей были выбраны равными 10 см, квантовая эффективность фотодиода принималась равной 0,5.

Оптический турбулентный канал оказывал ослабление на сигнал согласно (2), также определялось влияние слабой ($C_n^2 = 4 \cdot 10^{-14}$, $\sigma_R^2 = 0,22$), средней ($C_n^2 = 3 \cdot 10^{-13}$, $\sigma_R^2 = 1,5$) и сильной ($C_n^2 = 7 \cdot 10^{-13}$, $\sigma_R^2 = 3,5$) турбулентности.

Кодер источника данных для битового потока скоростью 1 Мбит формировал полярный код длиной $N = 512$ бит со скоростью кодирования 0,5 и 0,75. Декодер работал по схеме декодирования SC, длина списка декодирования $L = 8$ для всех случаев.

На рис. 2-4 приведены характеристики помехоустойчивости АОЛС с применением полярных кодов, полученные при помощи моделирования по методу Монте-Карло для случая

слабой, средней и сильной турбулентности соответственно.

Как следует из рис. 2, для случая слабой турбулентности применение полярных кодов со скоростью кодирования 0,5 и 0,75 соответственно позволяет получить энергетический выигрыш кодирования составляет 16,5 и 14 дБ по сравнению с некодированной передачей (для вероятности ошибки $P_{ош} = 10^{-5}$).

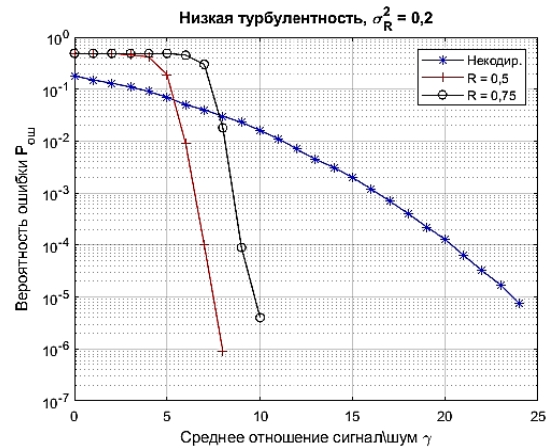


Рис. 2

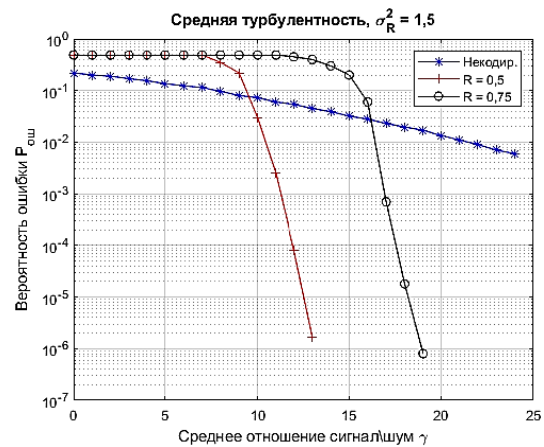


Рис. 3

В случае умеренной турбулентности, как показано на рис. 3, для полярных кодов со скоростью кодирования 0,5 и 0,75 соответственно энергетический выигрыш кодирования увеличивается более чем на 20 дБ при той же вероятности ошибки. Из зависимостей на рис. 4, приведенных для случая сильной турбулентности, энергетический выигрыш кодирования также представляет собой величину, существенно большую 20 дБ для той же вероятности ошибки.

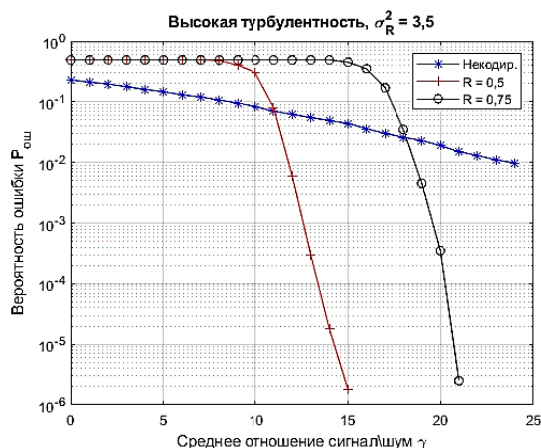


Рис. 4

Разница в помехоустойчивости систем АОЛС, в которых применены полярные коды со скоростью 0,5 и 0,75 растет по мере увеличения турбулентности, из чего можно сделать вывод о том, что более низкая скорость кода полярного кода будет более устойчива к замираниям, вызываемым атмосферной турбулентностью.

Заключение

В статье исследованы перспективы применения полярных кодов в качестве методов снижения влияния атмосферной турбулентности на качество связи в АОЛС. Показано, что поляр-

ные коды позволяют получить энергетический выигрыш кодирования более 20 дБ.

Следовательно, полярные коды могут выступать одной из эффективных технологий АОЛС, служащих для снижения влияния замираний, вызванных атмосферной турбулентностью.

Литература

1. Son I.K, Mao S. A survey of free space optical networks // Digital communications and networks. Vol. 3. No. 2. 2017. pp. 67-77.
2. Andrews L., Phillips R., Hopen C. Laser beam scintillation with applications // New York: SPIE Press, 2001. 416 p.
3. Краснов Р.П. Атмосферная оптическая линия связи с применением помехоустойчивого кодирования // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2024. Т. 20. № 3. С. 132-140.
4. Uysal M., Li J.T., Meng Y., Error rate performance analysis of coded free-space optics link over gamma-gamma atmospheric turbulence channels // IEEE transactions on wireless communications. 2006. Vol. 5. No. 6. pp. 1229-1233.
5. Arikan E. Channel polarization: a method for constructing capacity achieving codes for symmetric binary-input memoryless channels // IEEE Transactions on Information Theory. 2009. Vol. 55. Issue 7. pp. 3051-3073.
6. Pfister H.D. A brief introduction to polar codes. notes for introduction to error-correcting codes. [Электронный ресурс]. URL: <http://pfister.ee.duke.edu/courses/ecen655/polar.pdf> (дата обращения: 18.05.2025).
7. Application of polar codes for free space optical communication / K. Ito [et al.] //2017 IEEE International Conference on Space Optical Systems and Applications (ICSOS), Naha, Japan. 2017. pp. 183-187.

Поступила 16.06.2025; принята к публикации 14.11.2025

Информация об авторах

Краснов Роман Петрович – канд. техн. наук, доцент кафедры радиотехники, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: rpkrasnov@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4065-4557>

Бобровников Александр Васильевич – канд. техн. наук, доцент кафедры радиотехники, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: bobrownickov.alexander@yandex.ru

FREE-SPACE OPTICAL SYSTEM WITH POLAR CODING

R.P. Krasnov, A.V. Bobrovnikov

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract: atmospheric optical communication lines (AOCLs) offer a broadband alternative to radio frequency (RF) "last-mile" transmission systems, offering speed and ease of deployment, operation in unlicensed wavelengths, high frequency efficiency, and security. However, certain atmospheric phenomena, such as fog, heavy rain, or snowfall, as well as turbulence in the atmospheric optical channel, can significantly degrade communication quality. To reduce the impact of this factor while maintaining the simplicity of the optical receiver, we proposed to use error-correcting coding methods. This article proposes the use of polar codes for this purpose, as they allow for achieving the best information efficiency of the optical channel. We considered a single-channel atmospheric optical communication system with intensity modulation and noncoherent detection. We present Monte Carlo simulation results for propagation conditions in the gamma-gamma distribution statistics. We show that the application of the proposed coding method for rates of 0.5 and 0.75 demonstrates the effectiveness of using polar codes in AOCLs to reduce the impact of attenuation caused by atmospheric turbulence while maintaining a relatively low computational complexity of codecs

Key words: AOCL, error probability, interference-resistant coding

References

1. Son I.K., Mao S. "A survey of free space optical networks", *Digital Communications and Networks*, 2017, vol. 3, no. 2, pp. 67-77.
2. Andrews L., Phillips R., Hopen C. "Laser beam scintillation with applications", New York: SPIE Press, 2001, 416 p.
3. Krasnov R.P. "Atmospheric optical communication line using noise-immune coding", *Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2024, vol. 20, no. 3, pp. 132-140.
4. Uysal M., Li J.T., Meng Y. "Error rate performance analysis of coded free-space optics link over gamma-gamma atmospheric turbulence channels", *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2006, vol. 5, no. 6, pp. 1229-1233.
5. Arikan E. "Channel polarization: a method for constructing capacity achieving codes for symmetric binary-input memoryless channels", *IEEE Transactions on Information Theory*, 2009, vol. 55, issue 7, pp. 3051-3073.
6. Pfister H.D. "A brief introduction to polar codes. Notes for introduction to error-correcting codes", available at: <http://pfister.ee.duke.edu/courses/ecen655/polar.pdf> (date of access: 18.05.2025).
7. Ito K., Okamoto E., Takenaka H., Kunimori H., Toyoshima M. "Application of polar codes for free space optical communication", *2017 IEEE International Conference on Space Optical Systems and Applications (ICSOS)*, Naha, Japan, 2017, pp. 183-187.

Submitted 16.06.2025; revised 14.11.2025

Information about the authors

Roman P. Krasnov, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia) e-mail: rpkrasnov@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4065-4557>
Aleksandr V. Bobrovnikov, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia) e-mail: bobrownickov.alexander@yandex.ru

ОСОБЕННОСТИ РАЗРАБОТКИ МОБИЛЬНОГО ПАССИВНОГО АКУСТИЧЕСКОГО ДЕТЕКТОРА

А.И. Сукачев, Н.А. Глаголев, М.С. Рябых, Е.А. Сукачева

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

Аннотация: рассматривается структурная схема разрабатываемого мобильного акустического детектора сигналов. Из соображения кругового приёма сигналов было выбрано используемое в решении количество микрофонов, а также места их крепления на базе шлема. Определено следующее: оптимальная модель микрофонов исходя из критериев чувствительности, частотного диапазона, низкого уровня собственного шума; модель усилительного элемента, обеспечивающего согласование микрофона и входа усилительного каскада; модель аналого-цифрового преобразователя (АЦП), обеспечивающего качественное преобразование аналогового сигнала в цифровой. Представлено схемотехническое решение разрабатываемого устройства. Проведено моделирование аналогового блока приёма сигнала при уровнях входного сигнала 100 мкВ, 10 мВ, 100 мВ, 500 мВ. Получены амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) усилителя и аудиопреобразователя. По уровням несущей и побочных гармоник на выходе модели усилителя звуковой частоты (УЗЧ) при уровне входного сигнала 10 мВ и частоте 1 кГц был получен коэффициент нелинейных искажений составил 0,147 %, что удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым к системе. Разработана модель аудиопреобразователя и проведено ее моделирование. Сформирована топология печатной платы, учитывающая то, что разрабатываемая система является мобильной, печатная плата должна обладать низким уровнем внешних наводок. При проектировании печатной платы учитывалось требование перекрытия линий питания и сигнальных линий на верхнем и нижнем слоях. Для предотвращения появления фазовых сдвигов сигналов учитывалась симметрия расположения микрофонов

Ключевые слова: цифровая обработка сигналов, беспилотные летательные аппараты (БПЛА), усилитель, аудиопреобразователь, схемотехническое решение, топология печатной платы

Благодарности: работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № FZGM-2025-0002)

Введение

В современном мире вопросы обеспечения безопасности и защиты от потенциальных угроз становятся всё более актуальными. Одной из таких угроз являются БПЛА, которые могут использоваться в различных целях, включая разведывательные, террористические и другие.

Для того, чтобы устранить угрозы, связанные с несанкционированным применением БПЛА, на первом этапе используют различные методы обнаружения. Одним из таких методов является акустический метод обнаружения. Этот метод в прошлом применялся для обнаружения самолётов и показывал результат при удалении объекта от пункта обнаружения в несколько километров. С развитием систем радиолокации, обладавших большей дальностью и точностью обнаружения, от применения этого метода отказались. Тем не менее в настоящее время акустические системы развиваются и имеют дальнейшие перспективы по их использованию для обнаружения малораз-

мерных низколетящих БПЛА. Они напрямую связаны с машинным обучением и внедрением нейронных сетей, а также разработкой алгоритмов для более детальной обработки акустических сигнатур в приемной части системы. Всё это в совокупности может повысить вероятность обнаружения и идентификации объекта на фоне шумов окружающей среды.

Актуальность темы акустических систем обнаружения БПЛА обусловлена необходимостью разработки эффективных методов обнаружения и идентификации БПЛА в различных условиях эксплуатации. Акустические системы обнаружения представляют собой перспективное направление в области обеспечения безопасности, поскольку они могут обеспечить обнаружение БПЛА в режиме реального времени со степенью уверенности не ниже заданного значения на различных расстояниях и в различных условиях эксплуатации.

Разработка структурной схемы изделия

В качестве базы для крепления анализатора акустических сигналов предполагается использование шлема, что обеспечивает должную мобильность всей системы. Для кругового

приема сигнала используются четыре микрофона, которые располагаются на боковых крепежных планках шлема. Цепи усиления и оцифровки сигнала располагаются на одной печатной плате, которая представляет собой блок приема сигнала (БПС). Данное решение обусловлено тем, что на каждой стороне шлема располагаются по 2 микрофона.

Оцифрованный сигнал передаётся в блок цифровой обработки сигнала (БЦОС), представляющий из себя плату с микроконтроллером.

После анализа принятого аудиосигнала устройство будет сообщать о направлении приближающегося БПЛА путем сигнализации через наушники. С целью передачи информации об обнаружении БПЛА на другие устройства предусмотрен соответствующий разъём на БЦОС, который позволит передавать данные на передатчик.

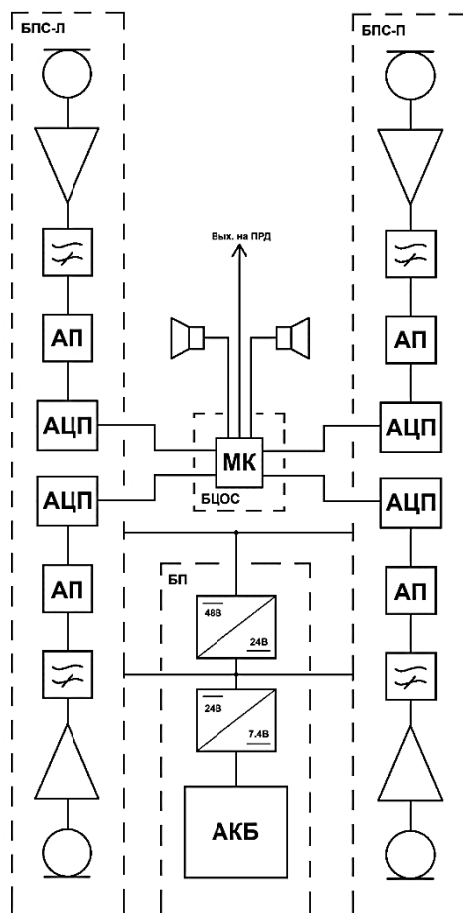


Рис. 1. Структурная схема разрабатываемого носимого анализатора акустических сигналов (БПС – блок приема сигналов (БПС-Л – левый, БПС-П – правый); БП – блок питания; БЦОС – блок цифровой обработки сигналов; АП – аудио преобразователь несимметричной линии в дифференциальную линию; АЦП – аналого-цифровой преобразователь)

В разрабатываемом решении в качестве микрофонов используются аналоговые конденсаторные капсули, сигнал с которых требует проведения предварительного усиления [1]. В свою очередь это приводит к тому, что для питания требуется высокое напряжение. Использование аккумулятора (АКБ) в качестве блока питания не позволяет обеспечить необходимый уровень напряжения, из-за чего требуется использование DC-DC преобразователей. Преобразователи обеспечивают повышение напряжения до 24 В и до 48 В. В АКБ и DC-DC преобразователи образуют блок питания устройства (БП), который размещается в районе туловища. На рис. 1 представлена структурная схема разрабатываемого устройства.

На рис. 2 показано схематическое расположение блоков устройства на шлеме.



Рис. 2. Схематическое расположение блоков устройства на тактическом шлеме

Определение элементной базы устройства

Ключевым элементом всего изделия является конденсаторный капсуль [2]. Его использование в данной работе обусловлено некоторыми преимуществами перед микроэлектромеханическими микрофонами (MEMS-микрофонами), которые обычно используются в устройствах данного типа. Среди характеристик, положительно отличающих конденсаторные капсули, можно обозначить чувствительность, частотный диапазон; низкий уровень собственного шума.

Опираясь на данные характеристики выбран RK-87, конденсаторный капсуль диаметром 34 мм. Он удовлетворяет заданным требованиям и имеет следующие характеристики:

- 1) чувствительность: от -42 до -52 дБ;
- 2) напряжение поляризации: 48 В;
- 3) частотный диапазон: 50 Гц – 20 кГц;
- 4) отношение сигнал-шум: >66 дБ.

Особенностью конденсаторных капсулей является необходимость наличия напряжения поляризации мембраны или неподвижного массивного электрода. При воздействии звукового давления на капсулю мембрана прогибается, электрическая ёмкость капсуля изменяется. При наличии поляризующего напряжения, подаваемого на неподвижный электрод, изменение ёмкости приводит к появлению переменного напряжения на обкладках конденсатора.

Для усиления аудиосигнала, выдаваемого микрофоном, необходим усилитель звуковой частоты, который будет обладать минимальным уровнем внутренних шумов [3]. Кроме того, важно соблюсти согласование импедансов микрофона и входа усилителя. Для этого импеданс входного каскада должен быть очень высок. Выполнение данных условий обеспечивается при использовании полевого транзистора в усилителе.

В ходе анализа существующих на рынке малошумящих полевых транзисторов было выявлено, что наиболее подходящим является транзистор КП-303А. Это кремниевый эпитаксиально-планарный полевой транзистор с затвором на основе р-п перехода и каналом n-типа. Его выбор обусловлен низкой электродвижущей силой шума – не более $30 \text{ нВ}/\sqrt{\text{Гц}}$ на частоте 20 Гц.

Для обеспечения своего полного функционала в разрабатываемой системе необходимо использовать АЦП, который качественно преобразовывает аналоговый сигнал в цифровой [4]. АЦП, удовлетворяющий заданному условию, должен обладать следующими характеристиками:

- 1) разрядность АЦП: необходимую точность передачи данных могут обеспечить 24-битные АЦП;
- 2) тип входа: дифференциальный. Такой тип входа обеспечивает подавление синфазных помех и наводок, а также в два раза увеличивает динамический диапазон;
- 3) отношение сигнал-шум: не менее 90 дБ;
- 4) коэффициент нелинейных искажений с учетом шума: менее -80 дБ;
- 5) частота дискретизации: 48 кГц. Более высокая частота дискретизации может негативно влиять на качество аудиосигнала;
- 6) интерфейс передачи данных: I^2S .

Анализ предлагаемых на рынке решений показал, что оптимально использование в качестве АЦП микросхемы PCM1804 от компании Texas Instruments. PCM1804 – это высокопроиз-

водительный однокристалльный стереофонический аналого-цифровой преобразователь с полным дифференциальным аналоговым входом. PCM1804 использует прецизионный дельта-сигма модулятор и включает в себя цифровой фильтр линейного фазового сглаживания и фильтр низких частот, который устраняет смещение входного сигнала по постоянному току. PCM1804 может воспроизводить звук как в формате PCM, так и в формате DSD благодаря высокоточному дельта-сигма модулятору.

Для дифференциального входа АЦП необходимо преобразовать однополярный аудиосигнал с выхода усилителя в дифференциальный сигнал. Это можно реализовать с помощью аудио преобразователя, схема которого приведена в технической документации на PCM1804. В основе этой схемы лежат операционные усилители ОРА134. Такая схема позволяет достичь низкого уровня искажений и шума.

Моделирование аналоговой части блока приема сигнала

Аналоговая часть блока приема сигнала состоит из малошумящего усилителя звуковой частоты и аудио преобразователя из однополярного в дифференциальный сигнал.

Входной каскад должен иметь минимальные внутренние шумы и искажения, и при этом хорошо согласоваться с микрофоном, поэтому была выбрана схема включения полевого транзистора КП303А с общим истоком. Второй каскад построен по каскадной схеме. Каскадное (двух-, трех- или более «этажное» включение полевых и/или биполярных транзисторов) позволяет простыми средствами добиться высокого коэффициента передачи, ослабить проникновение входного сигнала на выход усилителя, упростить схему в целом, повысить устойчивость ее работы, повысить максимальное значение напряжения питания и амплитуду выходного сигнала, соответственно. «Двухэтажные» каскадные усилители требуют удвоения напряжения питания по сравнению с обычным включением транзисторов, при этом ток, потребляемый схемой, снижается вдвое. На рис. 3 показана модель усилителя звуковой частоты (УЗЧ), построенной в Micro-Cap 12.2.0.5.

Конденсаторный капсуль в модели реализован с помощью источника переменного напряжения V1 и конденсатора C1, емкость которого 70 пФ является средним значением собственной емкости конденсаторных капсу-

лей данного типа. Напряжение поляризации подается прямо по сигнальному проводнику и в модели реализовано путем подачи 48 В через резистор R1 прямо на положительный электрод капсуля. Чтобы исключить проникновение постоянного напряжения на вход усиленного каскада используется разделитель-

ный конденсатор C2, емкость которого подобрана для наилучшего пропускания частотного диапазона сигнала. Значение сопротивления резистора R1 крайне важно в данном случае. Оно напрямую влияет на чувствительность микрофона, и должно быть не менее 3 ГОм.

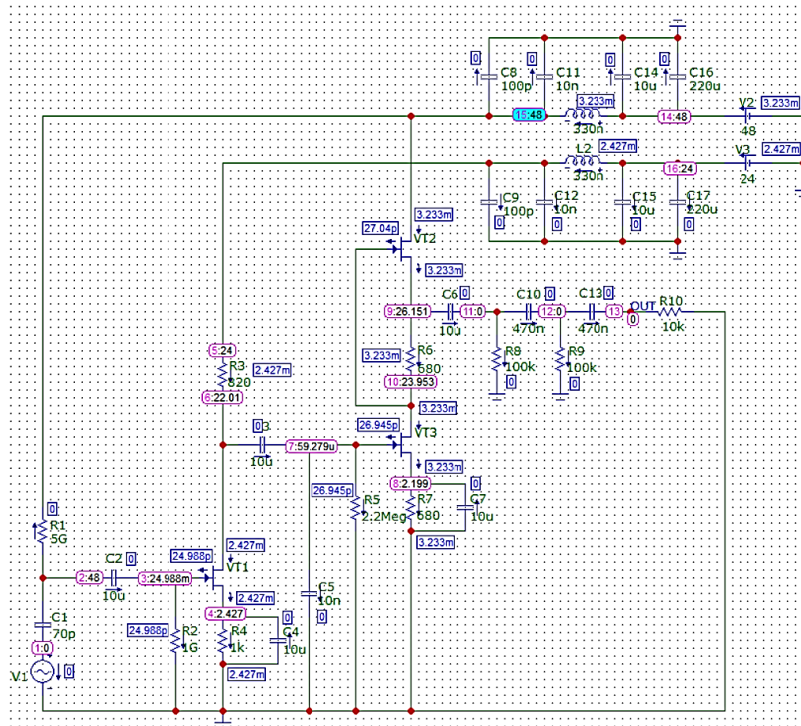


Рис. 3. Модель УЗЧ

Конденсаторы C3 и C6 также являются разделительными, и предотвращают попадание напряжения питания одного усилительного каскада в другой. Конденсаторы C8, C9, C11, C12, C14, C15, C16, C17 являются блокировочными и выполняют роль фильтрации цепей питания 24 В и 48 В. Конденсатор C5 также является фильтрующим и удаляет высокочастотные составляющие из аудиосигнала. Его наличие дает существенный прирост к отношению сигнал-шум. Коэффициент усиления регулируется путем изменения значений резисторов R3 и R4, а также конденсаторами C4 и C7.

Цепь R8, R9, C10 и C13 является фильтром верхних частот (ФВЧ), который улучшает показатель отношения сигнал-шум. В процессе моделирования было установлено, что использование фильтра нижних частот (ФНЧ) не оказывает никакого положительного влияния на отношение сигнал-шум и АЧХ.

Нагрузка на выходе усилителя также влияет на коэффициент усиления УЗЧ. На

данном этапе выбрано значение в 10 кОм, но при последующем подключении цепей аудио преобразователя оно изменится. На рис. 4-9 приведены результаты моделирования УЗЧ.

На рис. 4 видно, что в диапазоне от 200 Гц до 10 кГц коэффициент усиления составляет 50 дБ. Это основной частотный диапазон, на котором могут появиться полезные сигналы. Коэффициент усиления может регулироваться приведенными выше способами в пределах от 30 до 60 дБ.

Отношение сигнал-шум напрямую зависит от уровня входного сигнала. Так как задача изделия улавливать очень тихие звуки, его динамический диапазон составляет от 100 мкВ до 100 мВ. На рис. 5-7 будут приведены отношения сигнал-шум при уровне входного сигнала 100 мкВ, 10 мВ и 100 мВ. Также, для сравнения, будет приведено отношение сигнал-шум при среднем уровне входного сигнала в процессе записи аудио на студийном микрофоне – 500 мВ.

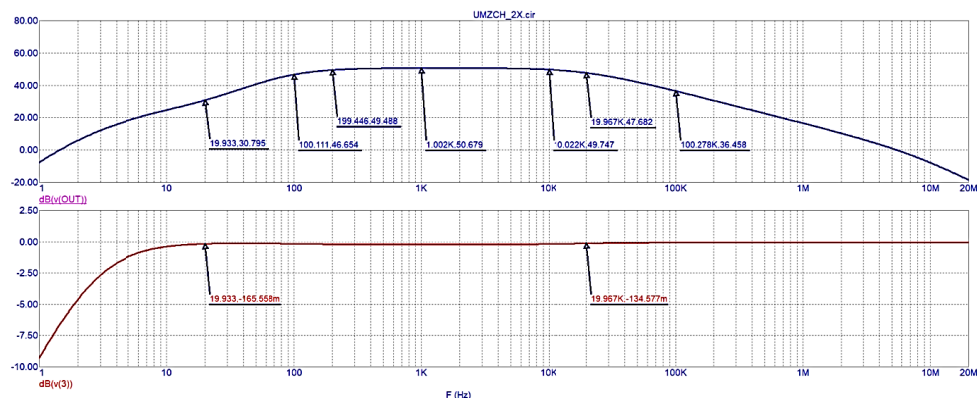


Рис. 4. АЧХ исследуемой модели УЗЧ

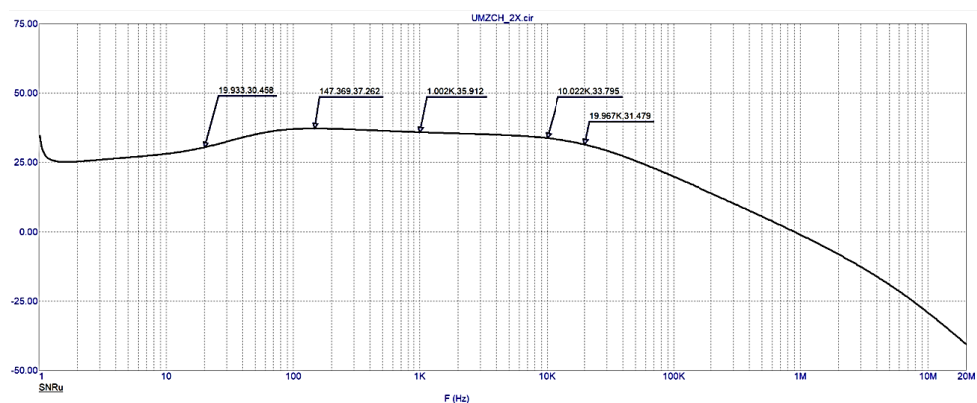


Рис. 5. Отношение сигнал-шум на выходе исследуемой модели УЗЧ при уровне входного сигнала 100 мВ

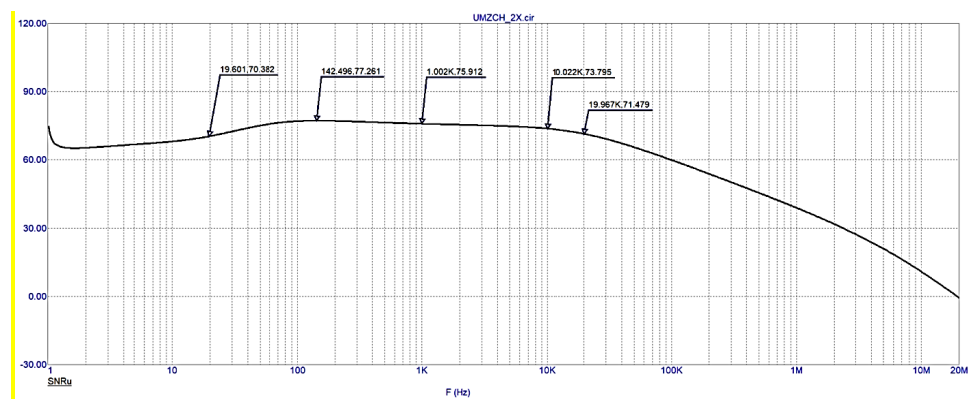


Рис. 6. Отношение сигнал-шум на выходе исследуемой модели УЗЧ при уровне входного сигнала 10 мВ

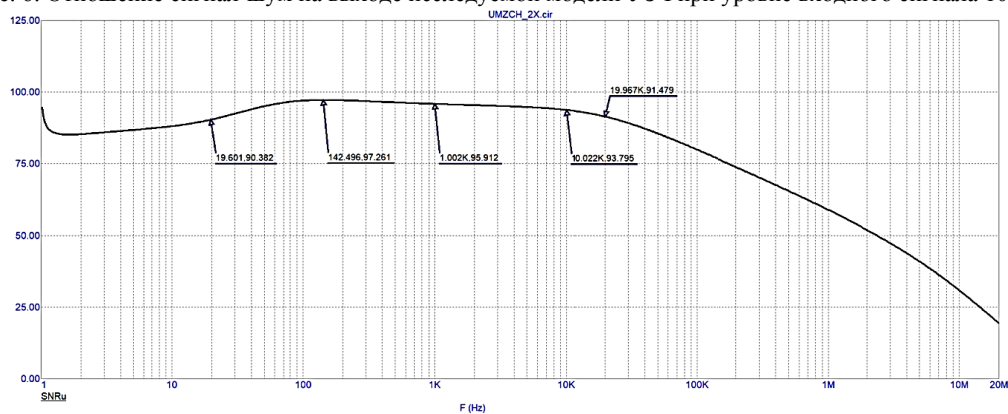


Рис. 7. Отношение сигнал-шум на выходе исследуемой модели УЗЧ при уровне входного сигнала 100 мВ

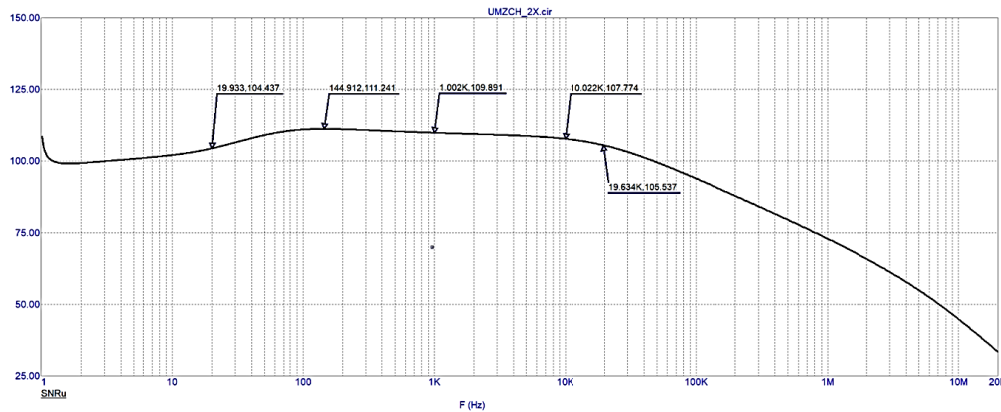


Рис. 8. Отношение сигнал-шум на выходе исследуемой модели УЗЧ при уровне входного сигнала 500 мВ

На рис. 9 представлены уровни побочных гармоник относительно несущей сигнала при

уровне входного сигнала 10 мВ и его частоте 1 кГц.

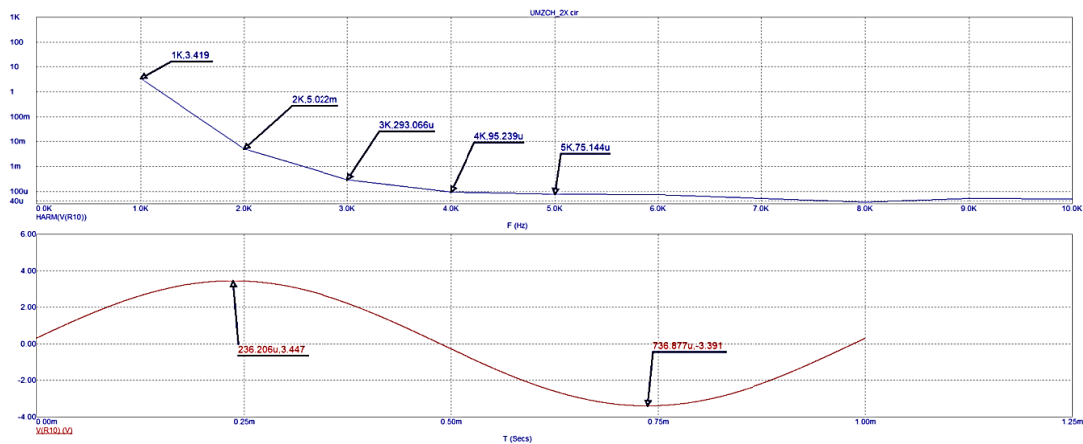


Рис. 9. Уровни несущей и побочных гармоник на выходе исследуемой модели УЗЧ при уровне входного сигнала 10 мВ и частоте 1 кГц

Коэффициент нелинейных искажений K_{Γ} рассчитывается по формуле

$$K_{\Gamma} = \sqrt{\frac{U_2^2 + U_3^2 + U_4^2 + \dots + U_n^2}{U_1^2}} \cdot 100\% \quad (1)$$

Коэффициент нелинейных искажений, рассчитанный по формуле (1), составил 0,147 %. Исходя из результатов моделирования, можно сделать вывод, что разработанная модель усилителя удовлетворяет всем заданным требованиям.

После усиления принятого сигнала необходимо преобразовать его в дифференциальный для последующей подачи на вход АЦП. Схема аудио преобразователя взята из технической документации на АЦП РСМ1804 и доработана под соответствующее выходное сопротивление усилителя.

Модель УЗЧ с последующим преобразованием сигнала в дифференциальный представлена на рис. 10.

Для согласования выхода усилителя и входа АП были увеличены номиналы резисторов R10-R15. Коэффициент усиления АП регулируется отношением R13 к R14 (R12 к R15). V6 выступает в роли выхода АЦП V_{COM} - напряжение общего режима, которое, согласно технической документации, составляет 2,5 В. Резисторы R18 и R19 (10 кОм) являются входным сопротивлением аналоговых входов АЦП. Результаты моделирования АП представлены на рис. 11-14.

На рис. 11 показаны АЧХ УЗЧ с АП в качестве нагрузки, а также АЧХ на положительном и отрицательном выходах АП. Как видно, резисторы R10-R15 подобраны так, что АЧХ самого усилителя не изменилась. АП имеет АЧХ такой же формы, как и УЗЧ, однако срез, начиная с 20 кГц, более крутой, что является положительным качеством.

Как видно из рис. 12, аудио преобразователь не внес никаких дополнительных шумов в усиленный сигнал.

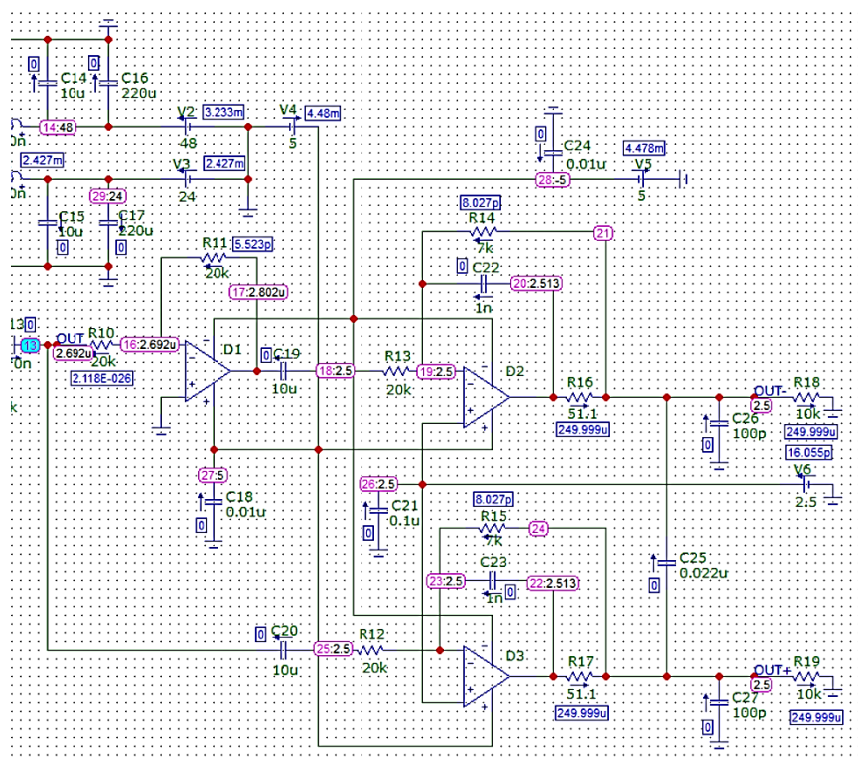


Рис. 10. Модель аудио преобразователя (АП)

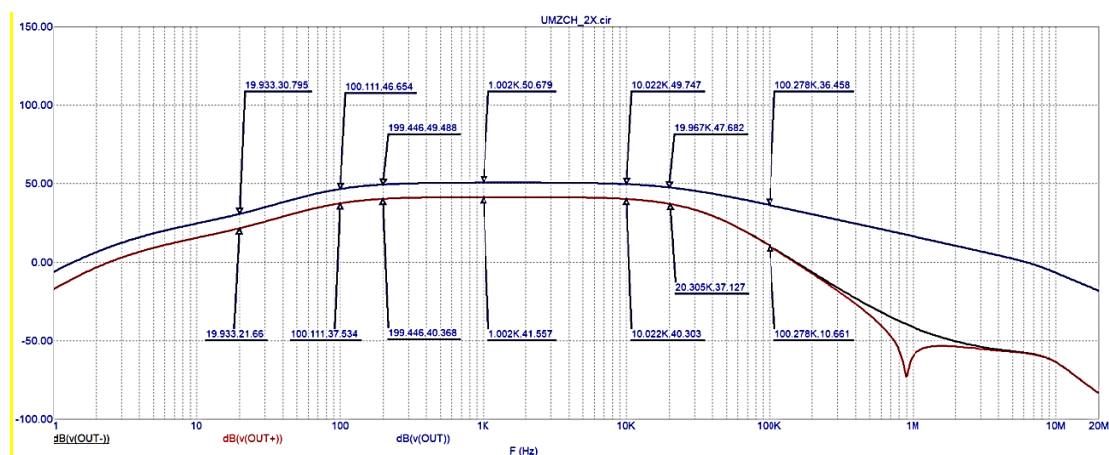


Рис. 11. АЧХ исследуемой модели УЗЧ и АП

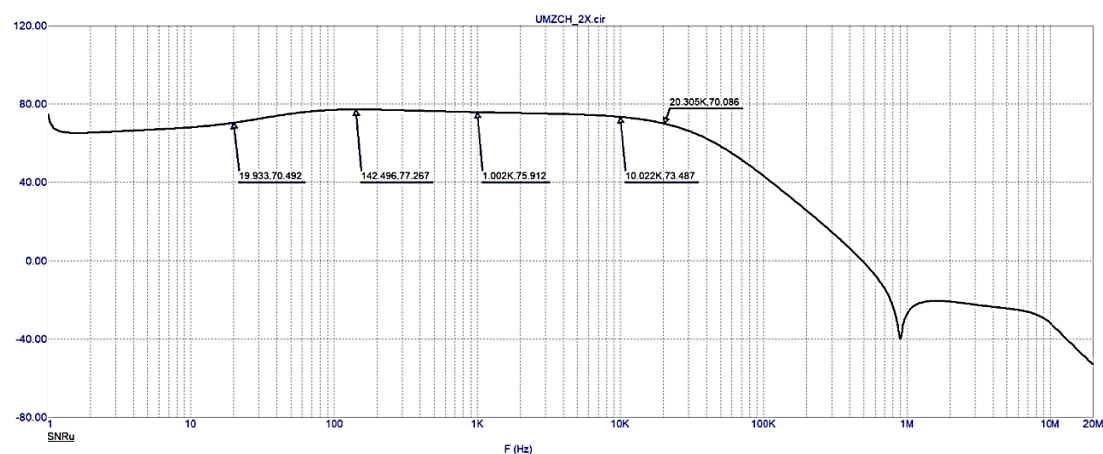


Рис. 12. Отношение сигнал-шум на выходе исследуемой модели УЗЧ и АП при уровне входного сигнала 10 мВ

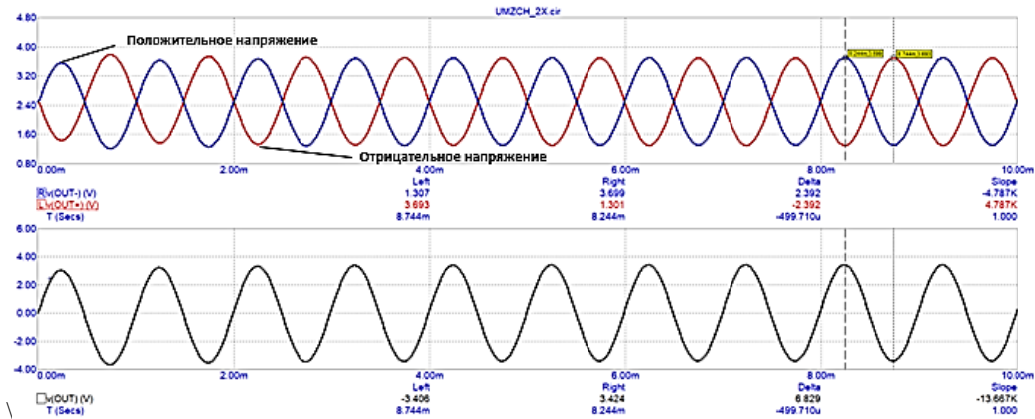


Рис. 13. Осциллограмма сигнала на выходе усилителя (нижний график) и на выходах АП (верхние графики) при уровне входного сигнала 10 мВ

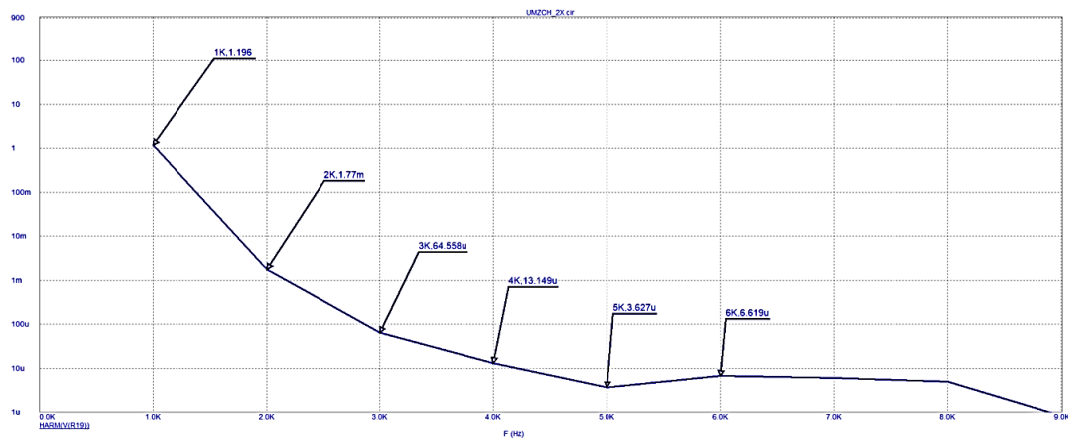


Рис. 14. Уровни несущей и побочных гармоник на выходе исследуемой модели УЗЧ и АП при уровне входного сигнала 10 мВ и частоте 1 кГц

Исходя из данных рис. 14, на выходе всей аналоговой части блока приема сигнала коэффициент нелинейных искажений K_I равен 0,148 %.

Потребляемый моделью ток – 14,640 мА. Усилитель потребляет 5,680 мА при уровне входного сигнала 10 мВ.

Разработка электрической принципиальной схемы блока приема сигналов

По результатам моделирования была разработана электрическая принципиальная схема блока приема сигналов, включающая в себя два маломощных усилителя звуковой частоты, два аудио преобразования из однополярного в дифференциальный сигнал, два АЦП, а также цепей аналогового питания 5 В и -5 В и цифрового питания 3,3 В.

Аудио преобразователи, разработанные на этапе моделирования, на схеме реализованы на основе микросхем ОРА4134UA, содержа-

щих в своем корпусе четыре операционных усилителя.

В качестве АЦП используется микросхема РСМ1804ДВР. Путем выставления на выходах 6-11 логических единиц и нулей согласно данным из технической документации на АЦП были выставлены необходимые режимы работы микросхемы, а именно:

- 1) формат цифрового аудио – РСМ;
- 2) протокол передачи цифрового сигнала – I^2S ;
- 3) режим работы – ведомый;
- 4) частота дискретизации (f_s) – 48 кГц;
- 5) тактовая частота – $256 \cdot f_s$;
- 6) фильтр верхних частот – включен.

Цепи питания реализованы на основе стабилизаторов напряжения серии АМС1117 (АМС1117-5.0 для цепи +5 В, АМС1117-3.3 для цепи +3,3 В). Для отрицательного питания -5 В был выбран инвертор постоянного напряжения LM2776ДВВР. Сначала напряжение +24 В, заведенное с блока питания, делится с

помощью резистивного делителя напряжения, выполненного на резисторах R9 и R10. Благодаря низкому току потребления всей схемы такое простое понижение напряжения возможно реализовать. Резисторы заложены типоразмера 1206 и делят напряжение до 12 В. Затем стабилизатор AMS1117-5.0 преобразовывает +12 В в +5 В, из которого в дальнейшем реализуются -5 В и цифровые 3,3 В. Вывод цифровых данных из блока приема сигналов осуществляется через восьмивыводной разъем X1.

Для того, чтобы данная система могла использоваться в полевых условиях, на схеме используется большое количество блокировочных конденсаторов, выполняющих роль фильтров цепей питания [5]. Таковыми являются электролитические конденсаторы C1-C4 емкостью 220 мкФ; керамические конденсаторы C5-C8, C29, C38, C45, C56 емкостью 10 мкФ; C9, C10, C15, C16, C21, C22 емкостью 10 нФ; C30, C42, C48, C63, C71, C73-C75, C78-C84, C86 емкостью 0,1 мкФ; C11, C12, C17, C18, C27, C28, C31, C39, C51, C57, C66-C69, C76, C77, C85, C87 емкостью 100 пФ.

Разработка топологии платы блока приема сигналов

Так как устройство является носимым, то его габариты должны быть компактными, что подразумевает собой плотный монтаж с ис-

пользованием минимальных типоразмеров SMD-компонентов. Также монтаж должен быть максимально плотным в аналоговой усилительной части в целях предотвращения возникновения внешних наводок и возбуждения внутренних шумов. При проектировании печатной платы учитывалось требование перекрытия линий питания и сигнальных линий на верхнем и нижнем слоях, так как необходимо оставлять на противоположном слое земляной полигон для прохождения обратных токов. Для предотвращения появления фазовых сдвигов сигналов, учитывалась симметрия расположения микрофонов. Топология платы приведена на рис. 15-17.

Особое внимание было уделено дифференциальным линиям на аналоговых входах АЦП. Их длина обязательно должна быть одинаковой, а расстояние между ними не должно меняться на всей их длине [6].

Также в связи с наличием цифрового питания АЦП возникла необходимость разделения земляного полигона на аналоговый и цифровой. Это связано с генерируемыми АЦП импульсными высокочастотными помехами. Если обратные токи цифрового сигнала будут протекать по аналоговому полигону земли, то через него высокочастотные помехи будут попадать в аналоговую часть устройства, чего допускать ни в коем случае нельзя.

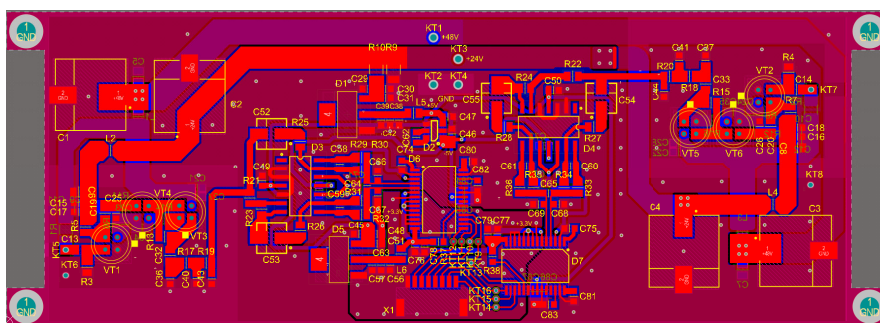


Рис. 15. Верхний слой разрабатываемой топологии платы

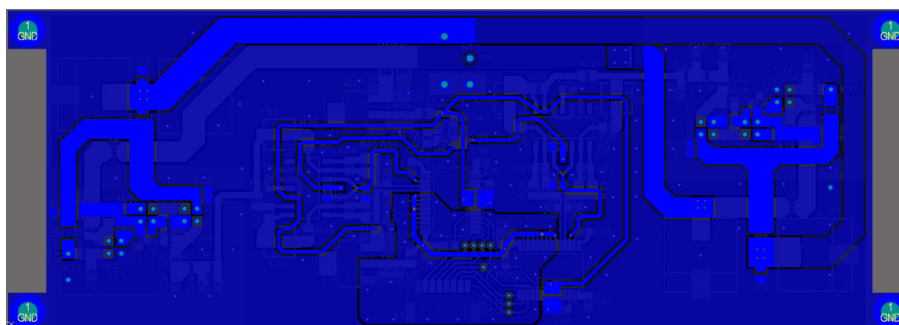


Рис. 16. Нижний слой разрабатываемой топологии платы

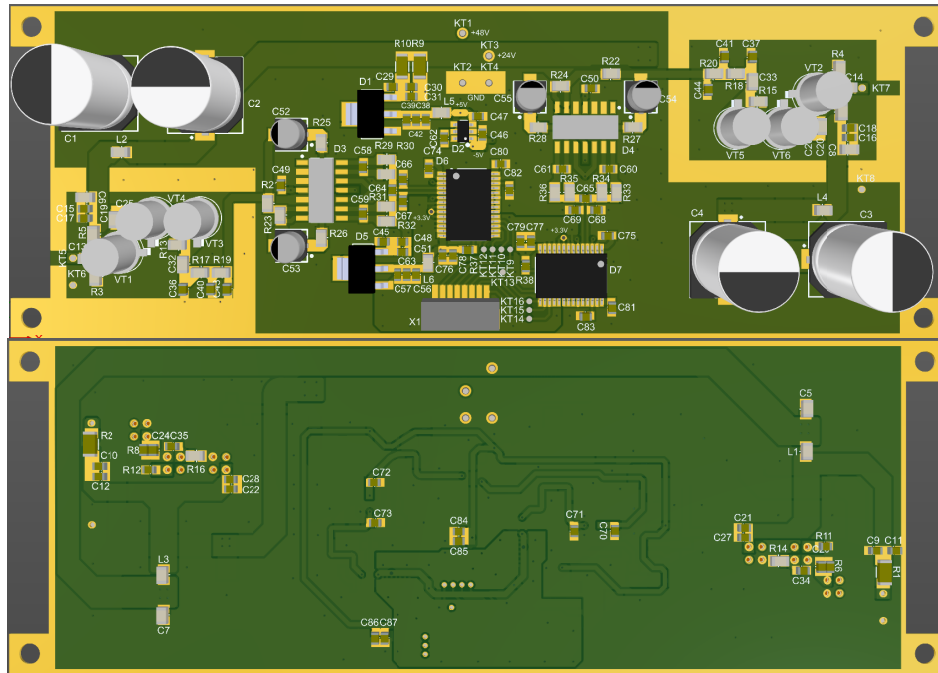


Рис. 17. 3D-вид разрабатываемой печатной платы сверху и снизу

Обязательным является наличие экранирования над усилителями. Экраны будут выполнены из медной фольги толщиной 0,1 мм и будут припаиваться на земляной полигон вокруг УЗЧ на заранее подготовленные площадки со счищенной паяльной маской.

Катушки индуктивности L2 и L4 были вынесены за экран с целью минимизации влияния на усилитель магнитных наводок.

В местах разрыва земляного полигона были заложены переходные отверстия, которые служат для соединения нижнего и верхнего слоя земли и обеспечивают непрерывное протекание обратных токов на плате.

Также паяльная маска снята в области вокруг KT2 и KT4. Это сделано для комфортной припайки экранирующей оплетки проводов питания на земляной полигон.

И с нижней, и с верхней стороны печатной платы будет установлен экран [7]. Для его крепления предусмотрены четыре отверстия на выступающих частях платы. Выступающие части платы позволяют сделать наиболее простую форму экранов без необходимости дополнительной формовки. Так же это позволяет избежать увеличения габаритных размеров печатной платы. Расстояние между двумя выступающими частями платы позволяют поместить туда микрофон, тем самым минимизируя расстояние от мембраны до входа усилителя, что является основным аспектом для защиты входного сигнала от внешних наводок. Для наилучшего заземления экранов предусмотре-

на возможность их припайки по периметру печатной платы.

Итоговые габаритные размеры печатной платы блока приема сигналов составляют 128,3×45,5 мм. Размеры без выступающих частей для крепления экрана составляют 117,5×45,5 мм.

Заключение

В ходе данной работы был полностью разработан блок приема сигналов носимого анализатора акустических сигналов. Так же была составлена логика работы всего изделия, функциональное взаимодействие блоков и продумана работа системы питания устройства.

Разработанная и проанализированная в процессе работы модель аналоговой части блока приема сигналов полностью удовлетворяет заданным требованиям, а реализованная схема блока отвечает всем правилам конструирования печатных плат и электромагнитной совместимости.

Литература

1. Бенин М.С. Звукотехника / М.С. Бенин, А.С. Подунов. М.: Досааф СССР, 1976. 159 с.
2. Эфруси М.М. Микрофоны и их применение. М.: Энергия, 1974. 90 с.
3. Атаев Д.И. Практические схемы высококачественного звуковоспроизведения / Д.И. Атаев, В.А. Болотников. М.: Радио и связь, 1986. 135 с.
4. Шкритек П. Справочное руководство по звуковой схемотехнике. М.: Мир, 1991. 432 с.

5. Вахитов Ш.Я. Современные микрофоны. Теория, Проектирование. СПб., 2003. 394 с.

6. Лопаткин А.В. Проектирование печатных плат в Altium Designer. ДМК Пресс, 2016. 400 с.

7. Воробьев Е.А. Экранирование СВЧ конструкций. М.: Советское радио, 1979. 134.

Поступила 15.09.2025; принята к публикации 11.11.2025

Информация об авторах

Сукачев Александр Игоревич – старший преподаватель кафедры радиоэлектронных устройств и систем, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), email: mag.dip@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0238-5579>

Глаголев Николай Алексеевич – студент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), email: mag.dip@yandex.ru

Рябых Максим Сергеевич – техник, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), email: mag.dip@yandex.ru

Сукачев Елена Александровна – ассистент кафедры радиоэлектронных устройств и систем, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), email: mag.dip@yandex.ru

FEATURES OF THE DEVELOPMENT OF A MOBILE PASSIVE ACOUSTIC DETECTOR

A.I. Sukachev, N.A. Glagolev, M.S. Ryabykh, E.A. Sukacheva

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract: we show block diagram of the developed mobile acoustic signal detector. Due to the consideration of circular signal reception, we selected the number of microphones used in the solution, as well as their attachment points on the helmet base. We determined the optimal microphone model based on the criteria of sensitivity, frequency range; low level of intrinsic noise. We defined the model of the amplifying element, which ensures the matching of the microphone and the input of the amplifying cascade. We defined a model of an ADC that provides high-quality conversion of an analog signal into a digital one. We developed a circuit design solution for the device under development. We carried out the simulation of an analog signal reception unit at input signal levels of 100 mV, 10 mV, 100 mV, 500 mV. We obtained the frequency response of the amplifier and audio converter. According to the carrier and side harmonics levels at the output of the UHF model at an input signal level of 10 mV and a frequency of 1 kHz, we obtained a nonlinear distortion coefficient of 0.147%, which meets all the requirements for the system. We developed a model of an audio converter and carried out a simulation of the developed model. We developed the topology of the printed circuit board, taking into account the fact that the system under development is mobile, the printed circuit board should have a low level of external interference. When designing the printed circuit board, we took into account the requirement of overlapping power lines and signal lines on the upper and lower layers. To prevent the appearance of phase shifts in the signals, we took into account the symmetry of the microphone arrangement

Key words: digital signal processing, UAV, amplifier, audio converter, circuit design, circuit board topology

Acknowledgements: the work was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (project no. FZGM-2025-0002)

References

1. Benin M.S., Podunov A.S. "Sound engineering" ("Zvukotekhnika"), Moscow: Dosaaf USSR, 1976, 159 p.
2. Ephrussi M.M. "Microphones and their application" ("Mikrofony i ikh primeneniye"), Moscow: Energy, 1974, 90 p.
3. Ataev D.I., Bolotnikov V.A. "Practical schemes for high-quality sound reproduction" ("Prakticheskie skhemy vysokokachestvennogo zvukovosproizvedeniya"), Moscow: Radio i svyaz', 1986, 135 p.
4. Shkritek P. "Reference manual for sound circuitry" ("Spravochnoe rukovodstvo po zvukovoy skhemotekhnike"), Moscow: Mir, 1991, 432 p.
5. Vakhitov Sh.Ya. "Modern microphones. Theory, Design" ("Sovremennyye mikrofony. Teoriya, Proektirovaniye"), St. Petersburg, 2003, 394 p.
6. Lopatkin A.V. "Printed circuit board design in Altium Designer" ("Proektirovaniye pechatnykh plat v Altium Designer"), ДМК Пресс, 2016, 400 p.
7. Vorob'ev E.A. "Shielding of microwave structures" ("Ekranirovaniye SVCh konstruktsey"), Moscow: Sovetskoye Radio, 1979, 134.

Submitted 15.09.2025; revised 11.11.2025

Information about the authors

Aleksandr I. Sukachev, Assistant Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: mag.dip@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0238-5579>

Nikolay A. Glagolev, student, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya St., Voronezh 394006, Russia), email: mag.dip@yandex.ru

Maksim S. Ryabykh, Assistant, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya St. Voronezh, 394006, Russia), email: mag.dip@yandex.ru

Elena A. Sukacheva, Assistant, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: mag.dip@yandex.ru

DOI 10.36622/1729-6501.2025.21.4.024
УДК 621.396

АНТЕННАЯ РЕШЕТКА НА ОСНОВЕ ПАТЧ-ЭЛЕМЕНТОВ С ВОЗМОЖНОСТЬЮ РАБОТЫ С ДВУМЯ ЛИНЕЙНЫМИ ПОЛЯРИЗАЦИЯМИ

И.А. Баранников¹, Е.А. Ищенко¹, Ю.Г. Пастернак¹, Д.К. Проскурин¹, С.М. Фёдоров^{1,2}

¹Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

²Международный институт компьютерных технологий, г. Воронеж, Россия

Аннотация: рассматривается разработанная антенная решетка на основе патч-элементов с возможностью работы с двумя линейными поляризациями. В основе антенной системы лежит использование апланатической линзы. Рассматривается конструкция антенной системы, проводится компьютерное моделирование для получения характеристик антенной системы. Конструкция антенны подразумевает три плоские металлические пластины, формирующие два плоскопараллельных волновода, между пластинами располагаются две апланатические линзы, сделанные из полистирола с показателем преломления 2,56. На выходе системы располагается антенная решетка из патч-излучателей. Преимущество использования в системе апланатической линзы заключается в том, что у неё почти нет потерь (так как тангенс угла диэлектрических потерь полистирола крайне мал и составляет величину приблизительно 0,0002), а средней распространения волн фактически является диэлектрически заполненный волновод. В ходе выполнения компьютерного моделирования были получены S₁₁ и S₂₂ параметры, диаграмма направленности на частоте 12 ГГц и картина электрического поля на частоте 11,6 ГГц. На частоте 12 ГГц для центрального порта запитки удалось добиться величины КНД (коэффициента направленного действия), равного 20,49 дБ. Уровень боковых лепестков при этом соответствует величине -10,5 дБ. Приведённая антенная система подразумевает коммутационное сканирование в азимутальной плоскости

Ключевые слова: апланатическая линза, патч-излучатель, ортогональная поляризация

Благодарности: работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания (проект № FZGM-2025-0004)

Введение

В настоящее время для разработчиков антенных систем и специалистов в области антенн стоит задача при разработке линзовых структур широкоугольного сканирования не столкнуться с проблемами аббераций и комы, а также избежать ухудшения направленных свойств антенны при смещении облучателя перпендикулярно фокальной оси линзы. Чтобы предотвратить это, разработчики и специалисты обычно используют линзы особой конфигурации, которые по большей части не подвержены появлению аббераций и комы при смещении облучателя, а также практически не искажают направленные свойства антенн. Такие линзы называются апланатическими. Апланатические линзы – это линзы, которые удовлетворяют условию Аббе и позволяют обеспечить возможность неискажённого широкоугольного сканирования при их использовании в антенных системах [1]. Сохранение направленных свойств антенны, недопустимость уменьшения коэффициента направленного действия и недо-

пустимость увеличения уровня боковых лепестков важны во многих сферах в области антенн.

Обычно сами по себе линзы в антеннах не используются автономно и обособленно, а являются составной частью какой-либо структуры. Как минимум, требуется наличие излучателя. В статье [2] плоская апланатическая линза находится между металлическими пластинами с системой щелей, образующих плоскопараллельный волновод. Антенная система обладает линейной поляризацией с коэффициентом усиления 20–24 дБ и однокоординатным сканированием диаграммы направленности в полосе частот 24–24,25 ГГц. Линза состоит из диэлектрика с показателем преломления 1,6. При этом система имеет уровень боковых лепестков диаграммы направленности (–15...–20) дБ в секторе сканирования до ±30°. Недостатком такой системы является то, что она обладает только одной поляризацией. В работе [3] приводится многолепестковая антенна в виде волновода, линза находится прямо перед раскрытием рупора волновода. Материалом для реализации апланатической линзы был выбран полистирол с показателем преломления 2,56. Для одного из портов на частоте 1,7 ГГц КСВН

(коэффициент стоячей волны по напряжению) равен 11, к тому же в области пониженных частот согласование является довольно неудовлетворительным, но с повышением частоты, примерно начиная от 2 ГГц и выше согласование становится значительно лучше и значение КСВН антенной системы усреднённо стремится к значению 2. Коэффициент усиления в направлении главного лепестка диаграммы направленности на частоте 3 ГГц равен 12,9 дБ для одного из портов. Но на частотах выше можно видеть улучшение направленных свойств антенны, при том, как на частотах ниже характеристики антенны становятся хуже. Происходит это падение характеристик апланатической линзы на более пониженных частотах из-за дифракционных искажений, появляющихся из-за меньшего, относительно длины волны, фокального расстояния линзы. Значимое воздействие электрического расстояния на рабочие параметры линзы обуславливается использованием принципов оптической оптики во время её реализации. Антенна в указанной работе также располагает только одной поляризацией.

Конструкция антенной системы

Далее будет представлен следующий этап развития антенны, указанной в предыдущей работе. В данной статье будет рассмотрена разработанная антенная решетка на основе патч-элементов с возможностью работы с двумя линейными поляризациями. Также в настоящей работе антенна обладает большей величиной коэффициента усиления относительно предыдущего варианта конструкции. В составе описываемой системы также используется диаграммообразующая схема (ДОС) на основе апланатической линзы. Конструкция антенны подразумевает три плоские металлические пластины, формирующие непосредственно два плоскопараллельных волновода, между пластинами располагаются две апланатические линзы, сделанные из полистирола с показателем преломления 2,56. На выходе системы располагается антенная решетка из патч-излучателей. Суть использования апланатической линзы заключается в том, что на выходе у неё происходит выравнивание фазового и амплитудного фронта волны. Преимущество использования в системе апланатической линзы заключается в том, что у неё почти нет потерь (так как тангенс угла диэлектрических потерь полистирола крайне мал и составляет величину приблизительно 0,0002), а средой распростра-

нения волн фактически является диэлектрически заполненный волновод. Приведённая антенная система подразумевает коммутационное сканирование в азимутальной плоскости. Имеется возможность сформировать антенную решётку в вертикальной плоскости из таких же используемых подрешёток, и, далее, последующее управление формируемым лучом производить также в угло-местной плоскости.

Выигрыш именно такой используемой конфигурации антенной системы на основе двух апланатических линз заключается в особом свойстве волн на выходе данной системы – волны поляризованы одновременно в двух ортогональных плоскостях. Верхний плоскопараллельный волновод предназначен для формирования вертикальной поляризации, нижний – для горизонтальной.

В системе питание подается в порт и далее на патч-излучатель, находящийся за линзой. Далее волна со сферическим фронтом проходит по волноводу и встречает на своём пути апланатическую линзу. После линзы фронт волны выравнивается и становится плоским. Далее по ходу волны располагается устройство возбуждения антенного элемента, состоящее из патч-элементов, волноводов и печатной дорожки. После устройства возбуждения по ходу волны располагается антенный элемент в виде патча, который уже излучает волну в открытое пространство. Завершающий патч элемент имеет соединение с двумя патч элементами устройства возбуждения, расположенными каждый в верхнем и нижнем плоскопараллельном волноводе.

Размещение дополнительной решётки из патчей реализовано в целях экономии расчётных ресурсов. Результаты расчётов с наличием дополнительной решётки показывают отсутствие искажений при случае, если бы компьютерное моделирование проводилось одновременно для двух таких антенных систем.

На рис. 1 приведён внешний вид разрабатываемой антенны, на рис. 2 показаны внутренние слои полистирола вместе с запитываемыми патч-элементами.

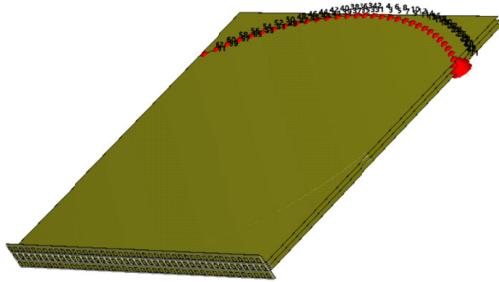


Рис. 1. Внешний вид разработанной антенны

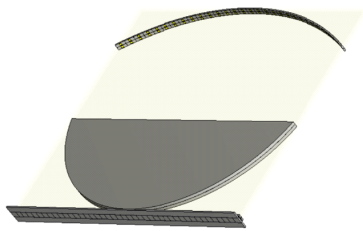


Рис. 2. Внутренние слои полистирола вместе с запитываемыми патч-элементами

Характеристики разработанной антенной системы

Было проведено компьютерное моделирование разработанной антенной решетки в программе CST Studio. На рис. 3 приведены S-параметры, полученные в результате компьютерного моделирования антенной системы – возвратные потери для центрально расположенных портов 1 и 2. $S_{1,1}$ параметр на рисунке обозначен сплошной линией, а $S_{2,2}$ параметр обозначен пунктирной линией.

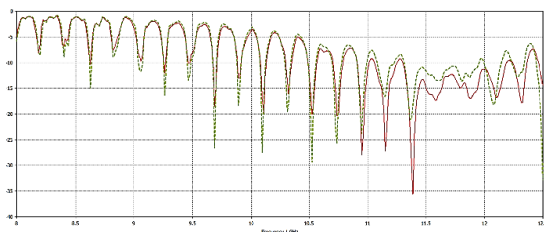


Рис. 3. $S_{1,1}$ и $S_{2,2}$ параметры

График $S_{1,1}$ и $S_{2,2}$ параметров неравномерен ввиду использования апланатической линзы и, как следствие, наличия резонансов из-за особенностей диаграммообразующего устройства.

На рис. 4 располагается диаграмма направленности на частоте 12 ГГц для центрального порта 1. КНД антенны при таком случае соответствует величине 20,49 изотропных дБ. Уровень боковых лепестков соответствует величине -10,5 дБ.

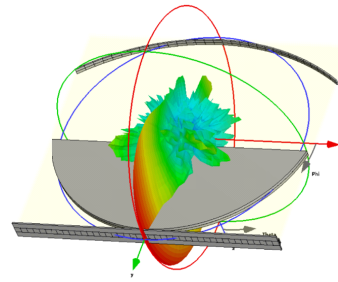


Рис. 4. ДН на частоте 12 ГГц для порта 1

На рис. 5 располагается картина электрического поля на частоте 11,6 ГГц для порта 2. Из рисунка можно наблюдать, как происходит выравнивание сферического фронта волны после апланатической линзы.

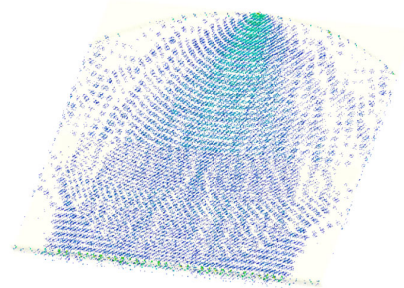


Рис. 5. Электрическое поле для центрального порта 2 на частоте 11,6 ГГц

Заключение

В данной работе была рассмотрена и исследована конструкция разработанной антенной решетки на основе патч-элементов с возможностью работы с двумя линейными поляризациями. В составе системы использовались две апланатические линзы. На частоте 12 ГГц для центрального порта КНД составил 20,49 изотропных дБ. Уровень боковых лепестков соответствует величине -10,5 дБ. Выигрыш используемой конфигурации позволил на выходе системы получить волну, поляризованную в двух ортогональных плоскостях, и дал возможность плавно и практически без искажений управлять формируемым лучом при широкоугольном сканировании.

Литература

1. Чистюхин В.В. Антенно-фидерные устройства: учеб. пособие. М.: МИЭТ, 2010. 114 с.
2. Белозерцев Ю.В., Галуза М.А., Климов А.И. Плоские сканирующие антенные решетки СВЧ с диаграммообразующей системой на основе апланатической линзы. Вестник Воронежского института МВД России. 2022. № 3. С. 115-123.

3. Использование метода виртуальных лучей для анализа сверхширокополосной многолучевой антенной решетки с апланатической линзой / А.С. Авдюшин,

А.В. Ашихмин, Ю.Г. Пастернак, С.М. Федоров // Вестник Воронежского государственного технического университета, № 9 (6-1), 2013. С. 56-58.

Поступила 05.09.2025; принята к публикации 11.11.2025

Информация об авторах

Баранников Илья Андреевич – аспирант, ассистент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: 8thbar@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3093-0455>

Ищенко Евгений Алексеевич – аспирант, инженер, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: kursk1998@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5270-0792>

Пастернак Юрий Геннадьевич – д-р техн. наук, профессор, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: pasternakyg@mail.ru

Проскурин Дмитрий Константинович – канд. физ.-мат. наук, доцент, 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, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84); Международный институт компьютерных технологий (394026, Россия, г. Воронеж, ул. Солнечная, 29 б), e-mail: fedorov_sm@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9027-6163>

ANTENNA ARRAY BASED ON PATCH ELEMENTS WITH THE CAPABILITY OF WORKING WITH TWO LINEAR POLARIZATIONS

I.A. Barannikov¹, E.A. Ishchenko¹, Yu.G. Pasternak¹, D.K. Proskurin¹, S.M. Fedorov^{1,2}

¹Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

²International Institute of Computer Technologies, Voronezh, Russia

Abstract: here we considered a developed antenna array based on patch elements with the ability to operate with two linear polarizations. The antenna system is based on the use of an aplanatic lens. We considered the design of the antenna system, and performed computer modeling to obtain the characteristics of the antenna system. The antenna design involves three flat metal plates that form two plane-parallel waveguides, between the plates there are two aplanatic lenses made of polystyrene with a refractive index of 2.56. An antenna array of patch radiators is located at the output of the system. The advantage of using an aplanatic lens in the system is that it has almost no losses (since the dielectric loss tangent of polystyrene is extremely small and is approximately 0.0002), and the wave propagation medium is actually a dielectrically filled waveguide. During the computer modeling, we obtained the S_{1,1} and S_{2,2} parameters, the radiation pattern at a frequency of 12 GHz and the electric field pattern at a frequency of 11.6 GHz. At 12 GHz, a directivity gain of 20.49 dB was achieved for the central feed port. The sidelobe level corresponds to -10.5 dB. The antenna system shown assumes switching scanning in the azimuthal plane

Key words: aplanatic lens, patch emitter, orthogonal polarization

Acknowledgments: the work was carried out with the financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the framework of the state assignment (project no. FZGM-2025-0004)

References

1. Chistyukhin V.V. "Antenna-feeder devices" ("Antenno-fidernye ustroystva"), Moscow: MIET, 2010, 116 p.
2. Belozertsev Yu.V., Galuza M.A., Klimov A.I. "Strip antenna arrays with multibeam beamforming systems based on flat lenses", *Bulletin of Voronezh Institute of the Ministry of Internal Affairs of Russia (Vestnik Voronezhskogo instituta MVD Rossii)*, 2022, no. 3, pp. 115-123.
3. Avdyushin A.S., Ashikhmin A.V., Pasternak Yu.G., Fedorov S.M. "Using the virtual ray method to analyze an ultra-wideband multibeam antenna array with an aplanatic lens", *Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2013, no. 9 (6-1), pp. 56-58

Submitted 05.09.2025; revised 11.11.2025

Information about the authors

Il'ya A. Barannikov, graduate student, assistant, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), tel.: +7(473)243-77-29, e-mail: 8thbar@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3093-0455>

Evgeniy A. Ishchenko, graduate student, 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, D. Sc. (Physics and Mathematics), Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: pasternakyg@mail.ru

Dmitriy K. Proskurin, Cand. Sc. (Physics and Mathematics), Associate Professor, Rector, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: rector@cchgeu.ru

Sergey M. Fedorov, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia); Associate Professor, 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>

РЕГИСТР ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО ПРИБЛИЖЕНИЯ ДЛЯ ОТЕЧЕСТВЕННОЙ КМОП-ТЕХНОЛОГИИ

А.В. Белявцев¹, А.В. Русанов^{1, 2}

¹АО «Научно-исследовательский институт электронной техники», г. Воронеж, Россия

²Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

Аннотация: рассмотрены метод последовательного приближения, типовая структура и блоки аналого-цифрового преобразователя (АЦП) на основе регистра последовательного приближения и сравнения его основных параметров с другим типом АЦП. Приведено описание работы и взаимодействия блоков разработанного регистра, основные диаграммы, поясняющие работу микросхемы и возможные не типовые способы её применения. Детальное представление блоков даёт возможность более полно понять принцип работы всей схемы и определить дополнительные способы её применения, найти пути повышения функциональности и эффективности работы схемы. Указаны аналогии для представленных электрических схем разработанных блоков. Описаны основные электрические характеристики и результаты моделирования. Приведён внешний вид топологии кристалла. Топология разработанной микросхемы реализована на базе отечественной КМОП-технологии (комплементарная структура металл — оксид — полупроводник) с проектными нормами 180 нм. При проектировании электрической схемы и топологии использовалась специализированная система автоматизированного проектирования (САПР). При симуляции электрической схемы использовались Spectre модели, предоставленные кремниевой фабрикой. Топология прошла обязательную проверку на соблюдение проектных правил (Design rule check, DRC) и на соответствие электрической схеме (Layout vs. Schematic, LVS)

Ключевые слова: регистр, последовательное приближение, АЦП, SAR

Благодарности: работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № FSMR-2023-0008)

Введение

Широкое распространение цифровой техники и необходимость обработки данных с датчиков физических величин (таких как температура, давление, положение и др.) привели к созданию аналого-цифрового преобразователя (АЦП). Поскольку эти величины могут иметь различную природу, то вначале их преобразуют в электрические сигналы соответствующими датчиками, а затем при помощи АЦП приводят в цифровую форму для дальнейшей обработки. При всём разнообразии различных типов АЦП, мы выделим один из наиболее используемых типов, известный как АЦП последовательного приближения (successive approximation ADC в англоязычной терминологии) или АЦП с поразрядным уравниванием.

АЦП последовательного приближения преимущественно применяют для недорогих приложений со средним и высоким разрешением. Зачастую, они имеют меньшее разрешение, чем сигма-дельта АЦП, но большую скорость преобразования. Разрешение составляет от 8 до 18 бит, с типичной скоростью выборки

около – 3 мега выборок в секунду. При этом обладают низким энергопотреблением, простотой использования и достаточно высокой точностью, что необходимо при построении портативных приборов [1].

Регистр последовательных приближений (ППП, или Successive Approximation Register (SAR) в англоязычной терминологии) в данном типе АЦП играет основную роль. С его помощью осуществляется формирование кода числа, которое определяет состояние ключей, подключающих или отключающих образцовые напряжения или токи.

Метод последовательного приближения

При рассмотрении метода последовательного приближения будем использовать классическую структуру АЦП последовательного приближения (рис. 1) [2].

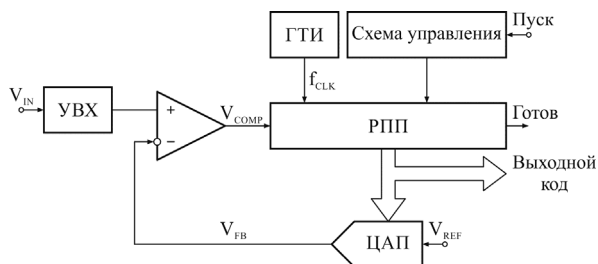


Рис. 1. Структурная схема АЦП последовательного приближения

В состав АЦП последовательного приближения входят следующие основные блоки:

- Устройство выборки-хранения (УВХ). Оно хранит величину входного напряжения, присутствующего на входе АЦП, на длительность всего цикла преобразования.
- Компаратор. Он сравнивает величину аналогового напряжения, хранимого в УВХ с значениями на выходе ЦАП при разных кодах.
- Регистр последовательного приближения (РПП). Формирует коды, подающиеся на вход ЦАП. Напряжения, соответствующие этим кодам, с выхода ЦАП подаются на компаратор.
- Цифро-аналоговый преобразователь (ЦАП). Формирует напряжения на основе цифрового кода, поступающего от РПП.

Метод последовательного приближения является алгоритмом двоичного поиска. В начале преобразования в регистре устанавливается старший бит, в случае для 8-битного АЦП его значение равно 10000000 (это значение, поданное на вход 8-битного ЦАП, даст на его выходе напряжение, соответствующее 1/2 шкалы преобразования (ШП)). Затем компаратор сравнивает значение уровня входного сигнала (полученное УВХ перед началом преобразования и хранимое на всё время измерения) с выходом ЦАП. Если напряжение входного сигнала больше, то старший бит останется установленным, затем произойдёт установка следующего бита (значение регистра станет равным 11000000, что соответствует $(1/2 + 1/4) \times \text{ШП}$) и будет снова произведено сравнение. Если напряжение входного сигнала окажется меньше, то данный бит сбросится, а следующий за ним установится и значение регистра станет равным 10100000 (соответствует $(1/2 + 1/8) \times \text{ШП}$). Снова произойдет сравнение и запись нового значения в регистр. Каждый последующий установленный бит даёт в два раза меньшее приращение на выходе ЦАП. За

8 операций сравнения (тактов) преобразование будет полностью завершено.

Описание структуры и работы РПП

Разработанная схема 8 разрядного регистра последовательного приближения аналогична схемам K155ИР17 и K564ИР13 (зарубежные аналоги AV2504, MM54C905) и способна сформировать $2^8 = 256$ значений кода, а, следовательно, и 256 значений на выходе ЦАП [3].

В разработанной схеме можно выделить три функциональные части: блок формирования импульсов (рис. 2), блок объединения импульсов, регистр последовательного приближения (рис. 3).

Внешний тактовый сигнал подводится к блоку формирования импульсов. Его устройство аналогично схеме счётчика-делителя на 8 K561ИЕ9 (зарубежный аналог CD4022). При каждом такте на его входе СР появляется импульс - так называемая «бегущая единица» на одном из его выходов «0» - «7».

Формируемые им сигналы поступают на блок объединения импульсов. Он построен на комбинационной логике и представляет собой мультиплексор с выводом X2 выбора сигнала. Он выдаёт на выходах сигналы тактирования С1 и С2, необходимые РПП. При X2 = логический «0» на выходы С1 и С2 блока поступают сигналы, сформированные путём объединения выводов «1» с «5» и «3» с «7» соответственно, а при X2 = логическая «1», выводы с «1» по «3» и с «5» по «7». В результате имеем два варианта тактирования. В первом из них длительности импульсов С1 и С2 и задержка между ними равны, во втором длительности импульсов в три раза больше времени задержки между ними. Эта особенность может использоваться при оценке быстродействия и помехоустойчивости, а также даёт возможности выбора между внутренними частотами тактирования, отличающимися фактически в два раза.

Схема регистра имеет входы: DI - данных в последовательном коде, NS - начала преобразования и С1, С2 - тактирования. Имеет выходы: DO - данных в последовательном коде (идентичны данным на DI, но задержанным на один такт), «Q7» - «Q0» - результата преобразования и NCC - окончания преобразования.

Регистр включает 8 идентичных ячеек хранения накапливаемых разрядов. Каждая ячейка состоит из синхронизируемых RS триггеров, а также логических элементов. Тригге-

ры управляются с помощью двухфазной последовательности импульсов.

Исходное состояние регистра устанавливают подачей на вход NS уровня логического "0". При этом старший разряд регистра переходит в состояние логический "0", а остальные в состояние логическая "1".

Вход DI предназначен для данных поступающих от компаратора.

Запись информации в регистр происходит последовательно, начиная со старшего разряда. Одновременно соседний младший разряд переходит в состоянии 0.

Поступающую на вход информацию контролируют по выходу DO.

О заполнении регистра сигнализирует выход NCC, на котором устанавливается уровень логического "0". Записанная информация хранится до следующего цикла.

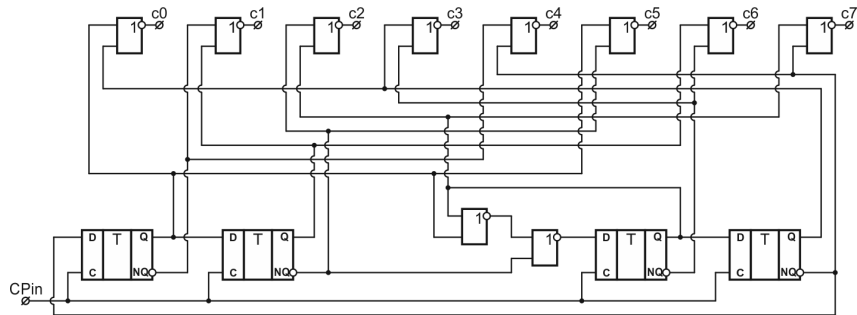


Рис. 2. Блок формирования импульсов

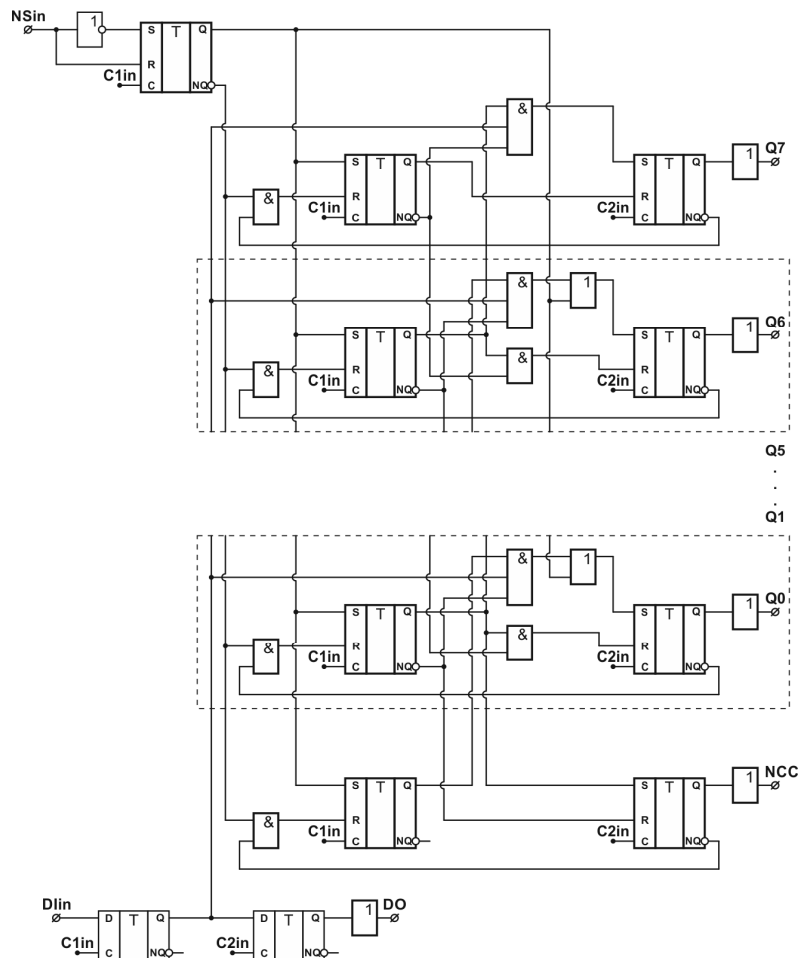


Рис. 3. Регистр последовательного приближения

Варианты применения регистра

Разработанный РПП можно настроить на работу как для разового заполнения регистра, так и для работы в непрерывном режиме - для этого следует соединить вывод NCC с NS.

Данный регистр позволяет реализовать режимы полного и укороченного цикла преобразования (актуально для АЦП низкой разрядности). Для этого следует подключить выход, следующий за младшим битом схемы, к NCC. Например, для 4-битного преобразования подключите "Q3" к NCC. При этом значения на "Q3" - "Q0" следует игнорировать.

Данный РПП не предусматривает наращивание разрядности. Если она потребуется, то следует применять дополнительную комбинационную логику.

Представленный РПП можно использовать в качестве преобразователя последовательного кода в параллельный. Для этого данные в последовательном коде подаются на вход DI, а снимают их с выходов "Q7" - "Q0" по окончании заполнения регистра – установке на выходе NCC низкого уровня.

Отличительная особенность схемы РПП заключается во взаимодействии его функциональных частей, при котором запись данных в один из разрядов регистра вызывает запись логического "0" в последующий младший разряд. Эта особенность позволяет использовать РПП как кольцевой счетчик с «бегущим нулем». Для реализации этого режима на вход DI подаётся логическая единица на весь период работы, а выход окончания преобразования NCC соединяется со входом начала преобразования NS.

Основные характеристики и результаты моделирования РПП

Типовое напряжение питания схемы составляет 3,3 В. Схема показала хорошую работоспособность во всех режимах работы для входных частот до 400 МГц. Собственный ток потребления при частоте 400 МГц на входе CP составляет 3,5 мА для случая, когда на входе X2 логическая "1" и 4,2 мА при логическом "0". При этом частота записи данных в ячейку составит $400 \text{ МГц} / 8 = 50 \text{ МГц}$, и $400 \text{ МГц} / 4 = 100 \text{ МГц}$ соответственно. Потребление схемы при отсутствии тактирования составляет менее 500 мкА.

Выход схемы буферизирован и способен выдавать ток до 5 мА. Это позволяет подклю-

чать непосредственно к её выходу маломощные светодиоды, что может быть полезно, при разработке устройств обучения и ознакомления с работой РПП.

На рис. 4 представлены диаграммы тактовых сигналов при разных значениях сигнала X2.

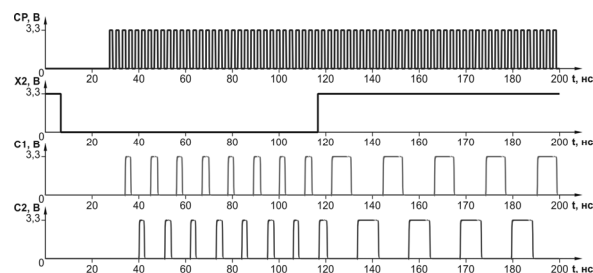


Рис. 4. Диаграмма тактовых сигналов в зависимости от значения сигнала X2

На рис. 5 представлены диаграммы работы схемы при значении сигнала X2 = логическая "1".

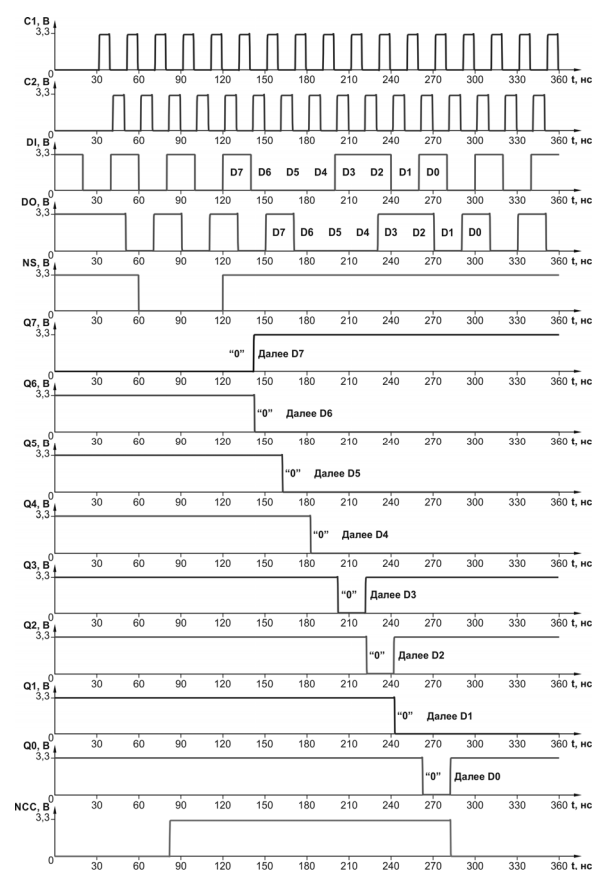


Рис. 5. Диаграмма работы схемы

Диаграмма работы РПП в непрерывном и укороченном режиме в качестве кольцевого счётчика при значении сигнала X2 = логическая "1" показана на рис. 6.

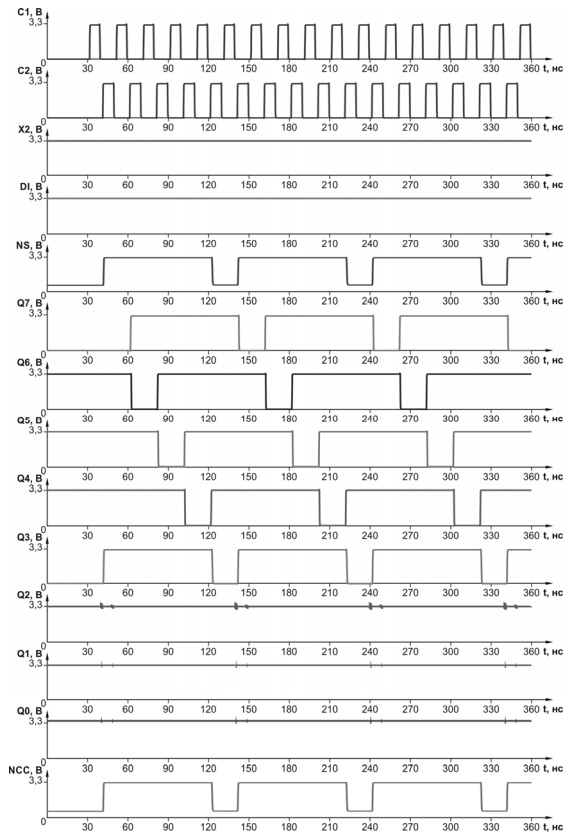


Рис. 6. Диаграмма работы в непрерывном и укороченном режиме в качестве кольцевого счётчика

Проектирование электрической схемы и топологии произведено в специализированной системе автоматизированного проектирования (САПР). При симуляции электрической схемы использовались SPICE модели, предоставленные кремниевой фабрикой. Топология прошла обязательную проверку на соблюдение проектных правил (Design rule check, DRC) и на соответствие электрической схеме (Layout vs. Schematic, LVS).

Размер кристалла составил 850×850 (мкм \times мкм). Непосредственно сама схема без площадок и структур антистатической защиты составляет 152×172 (мкм \times мкм).

Топология кристалла РПП представлена на рис. 7.

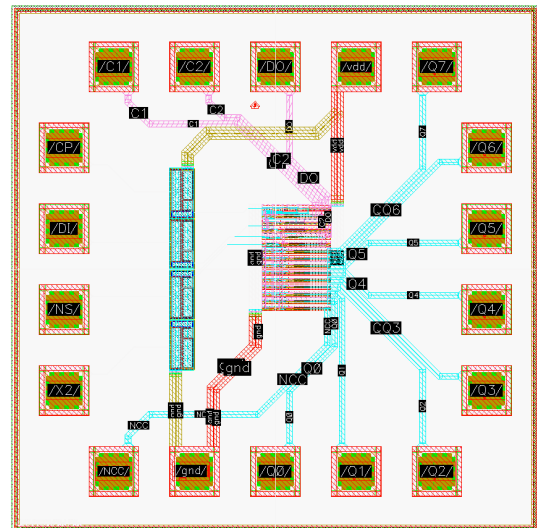


Рис. 7. Топология кристалла

Заключение

В результате разработки получена схема регистра последовательного приближения. Она позволяет наглядно изучить принцип метода последовательного приближения, а также реализовать перечисленные выше не типовые варианты использования. Параметры схемы соответствуют типовым значениям серийно выпускаемых устройств [4]. Приведены основные диаграммы работы схемы.

Производство интегральной микросхемы было выполнено за счет средств Минобрнауки России в рамках федерального проекта «Подготовка кадров и научного фундамента для электронной промышленности» по гос. заданию на выполнение НИР «Разработка методики прототипирования электронной компонентной базы на отечественных микроэлектронных производствах на основе сервиса MPW (FSMR-2023-0008)».

Литература

1. Кестер У. Какая архитектура АЦП подходит для вашей задачи? (перевод Иоффе Д.) // Современная Электроника. 2008. № 3. С. 14-21.
2. Волович Г.И. Схемотехника аналоговых и аналого-цифровых электронных устройств. 4-ое изд., перераб. и доп. М.: ДМК Пресс, 2018. 636 с.
3. Шило В.Л. Популярные цифровые микросхемы: Справочник. М.: Радио и связь, 1987. 352 с. (Массовая радиобиблиотека. Вып. 1111).
4. DataSheet DM54LS502 / DM74LS502 8-Bit Successive Approximation Register. National Semiconductor Corporation. URL: <https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/8334/NSC/DM54LS502.html> (дата обращения: 10.11.2025).

Информация об авторах

Белявцев Андрей Владимирович – инженер-конструктор, АО «Научно-исследовательский институт электронной техники» (394033, Россия, г. Воронеж, ул. Ст. Большевиков, 5), тел.: +7 (473) 226-29-37, e-mail: ralval@rambler.ru

Русанов Александр Валерьевич – канд. техн. наук, доцент кафедры радиоэлектронных устройств и систем, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: ralval@rambler.ru

SUCCESSIVE APPROXIMATION REGISTER FOR CMOS TECHNOLOGY PROCESS

A.V. Belyavtcev¹, A.V. Rusanov^{1,2}

¹ JSC «Research Institute of Electronic Technology», Voronezh, Russia

² Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract: the article discusses a successive approximation method, typical structure and blocks of an analog-to-digital converter based on a successive approximation register and a comparison of its main parameters with another type of ADC. We provide a description of the operation and interaction of the blocks of the designed register, main diagrams explaining the operation of the integrated circuit and possible non-standard ways of its application. A detailed representation of the blocks allows for a more complete understanding of the entire circuit's operation, identifying the principles of additional applications, and finding ways to improve its efficiency and operational schemes. We give analogs for the presented electrical circuits of the developed blocks. We present the main electrical characteristics and simulation results and give the layout view of designed chip. The integrated circuit is designed in standard 180 nm CMOS process (complementary metal–oxide–semiconductor). A specialized computer-aided design (CAD) system was used in the development of the electrical circuit and layout. The Spectre models provided by the silicon foundry were used for modeling the electrical circuit. The layout passed testing for compliance with design rules (Design rule check, DRC) and for conformity to the electrical circuit (Layout vs. Schematic, LVS)

Key words: register, successive approximation, ADC, SAR

Acknowledgments: this work was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (project no. FSMR-2023-0008)

References

1. Kester W. “Which ADC architecture is right for your application?”, *Modern Electronics (Sovremennaya Elektronika)*, 2008, no 3, pp. 14-21.
2. Volovich G.I. “Circuitry of analog and analog-digital electronic devices” (“Skhemotekhnika analogovykh i analogovotsifrovyykh elektronnykh ustroystv”), Moscow, DMK Press, 2018, 636 p.
3. Shilo V.L. “Popular digital microcircuits”, Moscow: Radio i svyaz', 1987, 352 p.
4. DataSheet DM54LS502/DM74LS502 8-Bit Successive Approximation Register, National Semiconductor Corporation, available at: <https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/8334/NSC/DM54LS502.html> (date of access: 10.11.2025).

Submitted 04.08.2025; revised 28.10.2025

Information about the authors

Andrey V. Belyavtcev, Engineer, JSC «Research Institute of Electronic Technology» (St. Bolshevnikov st., Voronezh 394033, Russia), tel. +7(473)226-29-37, e-mail: ralval@rambler.ru

Aleksandr V. Rusanov, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya, Voronezh 394006, Russia), e-mail: ralval@rambler.ru

**МЕТОДИКА ПРОЕКТИРОВАНИЯ МОЩНЫХ ИМПУЛЬСНЫХ ИСТОЧНИКОВ ПИТАНИЯ
ДЛЯ АППАРАТУРЫ СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ С УЛУЧШЕННЫМИ
ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ****А.В. Турецкий¹, А.А. Пирогов¹, М.В. Хорошайлова¹, И.А. Турецкий²****¹Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия****²АО НВП «ПРОТЕК», г. Воронеж, Россия**

Аннотация: представлена комплексная методика проектирования мощных импульсных источников питания (ИИП) для специальной аппаратуры, применяемой в вычислительной технике, системах связи, медицинском оборудовании и радиоэлектронной борьбе (РЭБ), направленная на минимизацию временных затрат и оптимизацию ключевых характеристик. Методика включает поэтапный анализ технического задания, выбор оптимальной схмотехнической топологии (однотактной или двухтактной), расчет и моделирование параметров силовой части, в частности трансформатора и дросселей, с использованием специализированного программного обеспечения. Особое внимание уделено практическим аспектам отладки опытных образцов. На реальных примерах проанализированы типичные проблемы, возникающие на этапе создания рабочего образца: выбросы напряжения при коммутации ключевых элементов, приводящие к ложным срабатываниям системы управления; паразитный резонанс в первичной цепи трансформатора; повышенные пульсации выходного напряжения из-за отказа снабберных цепей. Для каждой проблемы предложены и экспериментально проверены эффективные решения, такие как коррекция времени переключения транзисторов, смещение рабочей частоты преобразователя для ухода от резонанса и подбор стойких к высокочастотным воздействиям компонентов. Показано, что применение предлагаемой методики позволяет последовательно выявить и устранить недостатки конструкции, обеспечивая соответствие готового устройства заданным техническим требованиям

Ключевые слова: импульсный источник питания, электромагнитная совместимость, оптимизация параметров, расчет трансформатора, тепловые режимы

Благодарности: работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания (№ FZGM-2025-0002)

Введение

Современная специальная аппаратура, применяемая в критически важных областях, таких как системы связи, вычислительная техника, медицинское оборудование и комплексы радиоэлектронной борьбы, предъявляет высокие требования к источникам вторичного электропитания. Ключевыми критериями становятся не только высокий коэффициент полезного действия, но и бесперебойная работа в экстремальных условиях, устойчивость к внешним воздействиям, минимальные массогабаритные показатели и строгое соответствие нормам электромагнитной совместимости. Этим требованиям в полной мере отвечают импульсные источники питания, которые полностью вытеснили линейные аналоги [1, 2]. Однако проектирование мощных импульсных источников питания сопряжено со значительными трудностями, обусловленными сложностью электромагнитных процессов, происходящих в силовой части преобразователя. В

связи с этим актуальной задачей является разработка комплексной методики проектирования, которая бы системно объединила этапы выбора топологии, расчета параметров, моделирования, практической реализации и испытаний, позволяя последовательно выявлять и устранять потенциальные проблемы.

Предлагаемый подход позволяет минимизировать временные затраты на проектирование за счет глубокой интеграции расчетных и моделирующих процедур с последующей экспериментальной верификацией, что подтверждается результатами испытаний опытного образца.

Расчет компонентов мощных импульсных источников вторичного электропитания

Ключевым этапом проектирования импульсного источника питания является расчет его силовой части, в частности, моточных изделий. Исходной точкой служит определение выходной мощности преобразователя, которая рассчитывается по формуле (1) как произведение требуемых выходного напряжения $U_{\text{вых}}$ и тока $I_{\text{вых}}$ с введением коэффициента $k=1.3$,

учитывающего КПД преобразования порядка 85 % и необходимый запас надёжности.

$$P_{\text{вых}} = U_{\text{вых}} * I_{\text{вых}} * k. \quad (1)$$

Полученное значение мощности позволяет перейти к выбору магнитопровода силового трансформатора, поскольку каждый типоразмер ферритового сердечника характеризуется своей габаритной мощностью на основе геометрических параметров (площади окна S_o и поперечного сечения S_c), рабочей частоты f и допустимой магнитной индукции B_m и определяется как

$$P_{\text{габ}} = S_o * S_c * f * B_m. \quad (2)$$

После выбора конкретного сердечника выполняется расчет обмоток. Минимальное количество витков первичной обмотки, необходимое для исключения насыщения магнитопровода, находится как

$$N_1 = \frac{0.25 * 10^4 * U_{\text{мин}}}{f * B_m * S_c}, \quad (3)$$

где $U_{\text{мин}}$ – минимальное входное напряжение.

Количество витков вторичной обмотки рассчитывается исходя из требуемого выходного напряжения

$$N_2 = \frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{вх}}} * N_1. \quad (4)$$

Индуктивность намотанной катушки связана с параметрами магнитопровода и числом витков соотношением

$$L = \mu_0 * \mu * S_c * \frac{N^2}{l_a}. \quad (5)$$

Для выходного дросселя рассчитывается необходимая индуктивность, обеспечивающая заданный уровень пульсаций тока

$$L = (U_{\text{in}} - U_{\text{out}}) * \frac{U_{\text{out}}}{U_{\text{in}}} * \frac{1}{f} * \frac{1}{0.3 * I_{\text{out}}}. \quad (6)$$

Пиковый ток через дроссель и количество его витков определяются на основе выбранного сердечника.

Анализ цепей управления основан на законе Ома, а оценка коммутационных выбросов напряжения на индуктивных элементах производится с учётом скорости изменения тока.

Методика проектирования мощного источника вторичного электропитания

Разработанная методика проектирования мощных импульсных источников питания, представленная на рис. 1, реализует системный подход к созданию преобразовательной техники для специальных применений.

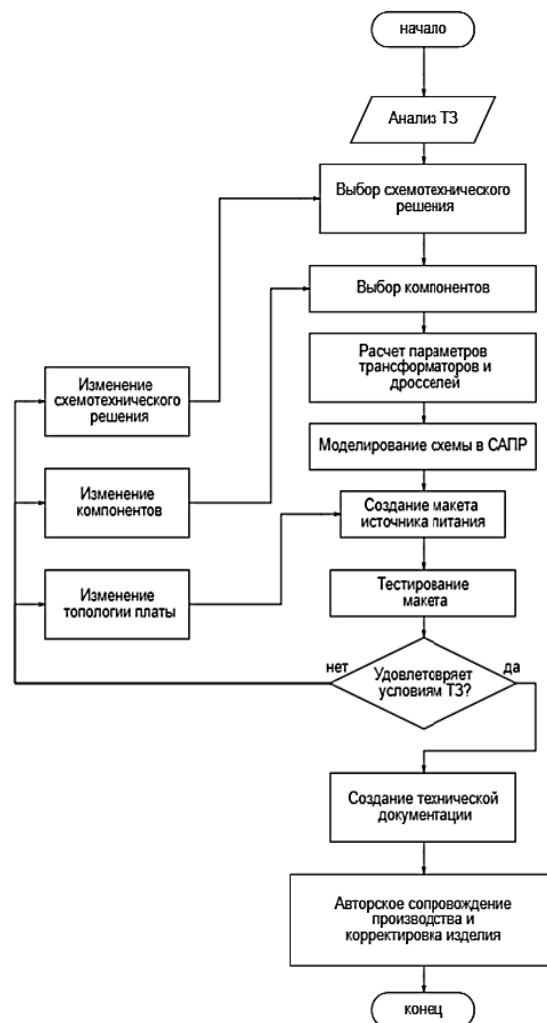


Рис. 1. Блок-схема методики проектирования источника питания большой мощности

Начальный этап предполагает всесторонний анализ технических требований, включающий спецификацию мощностных характеристик, диапазонов входных и выходных напряжений, требований к гальванической развязке, систем защиты и условий эксплуатации [3]. Особое внимание уделяется параметрам выходного напряжения - точности стабилизации и допустимому уровню пульсаций.

Ключевым аспектом методики является обоснованный выбор схемотехнической топологии, определяемый требованиями к гальванической развязке и выходной мощности. Для

преобразователей без гальванической развязки применяются базовые топологии Buck, Boost и Buck-Boost, в то время как для сетевых источников питания выбор осуществляется между обратноточковой (до 150-200 Вт), полумостовой (до 1 кВт) и мостовой (свыше 1 кВт) конфигурациями. С увеличением мощности усиливается влияние паразитных параметров элементов, что требует специальных мер компенсации.

Последовательность проектирования предполагает выбор компонентной базы на основе анализа энергетических преобразований в системе. Центральным элементом является силовой трансформатор, параметры которого рассчитываются с учетом марки феррита, количества витков обмоток и импульсных токов [4, 5]. Для управления ключевыми элементами в мощных преобразователях предпочтительнее применение IGBT-транзисторов, характеризующихся повышенной токовой нагрузочной способностью и оптимальной динамикой переключения, что позволяет минимизировать паразитные выбросы напряжения.

Расчет параметров пассивных компонентов и моделирование в средах автоматизированного проектирования позволяют оптимизировать характеристики устройства на ранних стадиях проектирования [6].

Завершающие этапы методики включают подготовку производственной документации и организацию серийного выпуска с последующим сопровождением изделия. Предложенный подход позволяет систематизировать процесс разработки и сократить временные затраты на создание надежных источников питания, отвечающих строгим требованиям специальной аппаратуры.

Экспериментальное исследование и оптимизация динамических характеристик мощного импульсного преобразователя

Практическая реализация методики проектирования мощных импульсных источников питания была апробирована на примере разработки понижающего преобразователя (buck-конвертера) [7]. Исходные параметры проектирования составили: входное напряжение 10 В, выходное напряжение 3 В при токе нагрузки 4 А и частоте коммутации 300 кГц. Расчетное значение индуктивности дросселя по формуле (1) составило 5.833 мкГн. Дальнейший расчет параметров магнитопровода выполнялся с использованием специализированного программного обеспечения, интерфейс которого представлен на рис. 2.

Рис. 2. Окно программы при внесении исходных данных при расчете дросселя

Выбор геометрических параметров сердечника и магнитных свойств материала осуществлялся на основе анализа габаритной мощности и тепловых режимов работы. Критическим аспектом проектирования стало обеспечение оптимальной плотности тока в обмотках с

учетом условий охлаждения. Как демонстрирует рис. 3, выбор недостаточного размера магнитопровода автоматически детектируется программой расчета, что предотвращает ошибки на ранних стадиях проектирования.

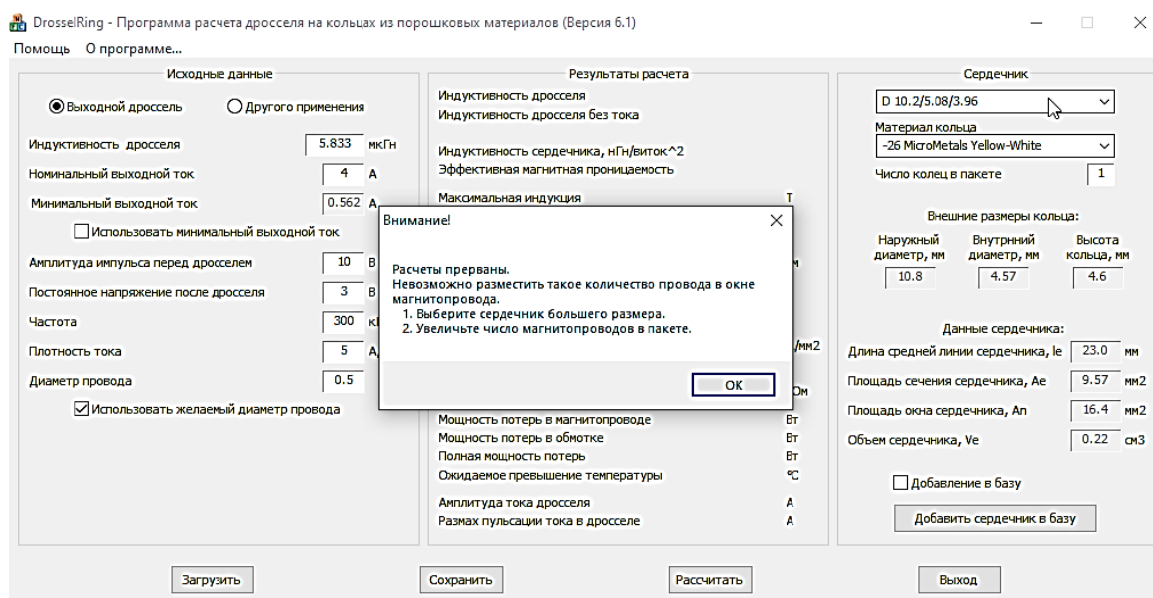


Рис. 3. Окно программы в случае выбора слишком малого сердечника

Для реализации был выбран сердечник DT106-2 с результатами окончательного расчета, показавшим необходимость выполнения 16 витков четырьмя параллельными проводами диаметром 0.5 мм.

Экспериментальные исследования выявили ряд характерных проблем, возникающих при коммутации силовых ключей. Осциллограммы на рис. 4 демонстрируют паразитные выбросы

напряжения в первичной обмотке трансформатора, обусловленные сверхбыстрыми фронтами переключения IGBT-транзисторов. Эти выбросы, достигающие амплитуды, достаточной для ложного срабатывания схемы управления, были устранены путем оптимизации динамических характеристик ключей за счет введения резисторов в затворные цепи (рис. 4, з).

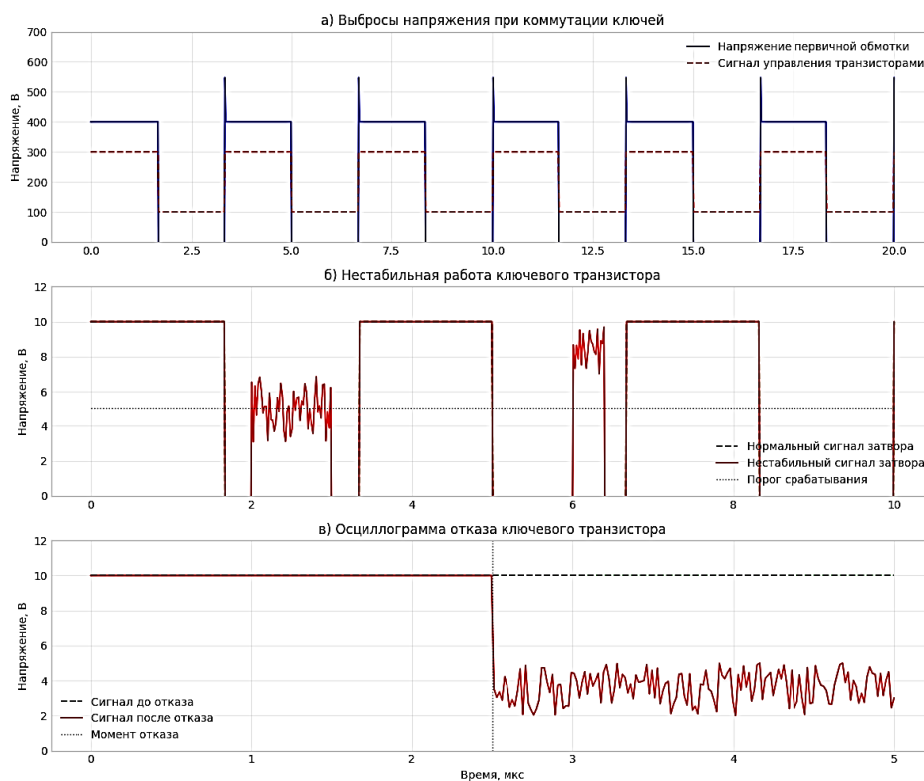


Рис. 4. Осциллограммы процессов коммутации в мощном импульсном преобразователе на различных этапах отладки

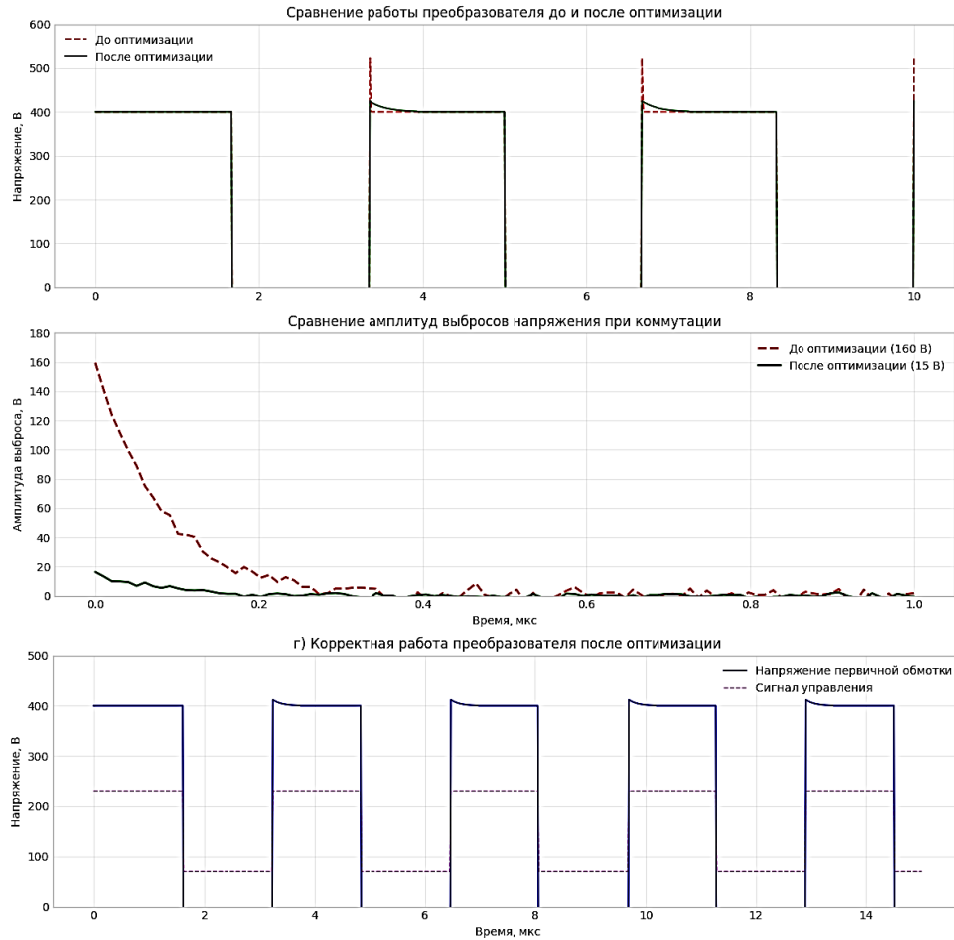


Рис. 4. Осциллограммы процессов коммутации в мощном импульсном преобразователе на различных этапах отладки (окончание)

На рис. 4, а показаны значительные выбросы напряжения амплитудой до 180 В на первичной обмотке трансформатора в моменты коммутации ключевых элементов, работающих на частоте 300 кГц. Эти выбросы, возникающие из-за чрезмерно крутых фронтов переключения транзисторов, превышали пороговый уровень логических элементов системы управления, что приводило к ложным срабатываниям. Пунктирной линией обозначен сигнал управления затворами транзисторов, демонстрирующий корректную логику работы контроллера.

Рис. 4, б детализирует проблему нестабильной работы силового ключа, где вместо ожидаемого четкого прямоугольного сигнала амплитудой 10 В наблюдаются хаотические колебания уровня напряжения от 3 до 7 В в

отдельные моменты времени. Такое поведение, длящееся примерно 0.5 мкс, было вызвано помехами от выбросов напряжения силовой цепи.

На рис. 4, в зафиксирован момент полного отказа ключевого транзистора при времени около 2.5 мкс. После этого момента выходное напряжение транзистора снизилось с нормального уровня 10 В до нестабильного значения 2-5 В, что свидетельствует о термическом разрушении полупроводниковой структуры устройства.

Далее на рис. 5 на представленных осциллограммах последовательно отображены процессы возникновения и устранения резонансных явлений в силовой цепи импульсного источника питания.

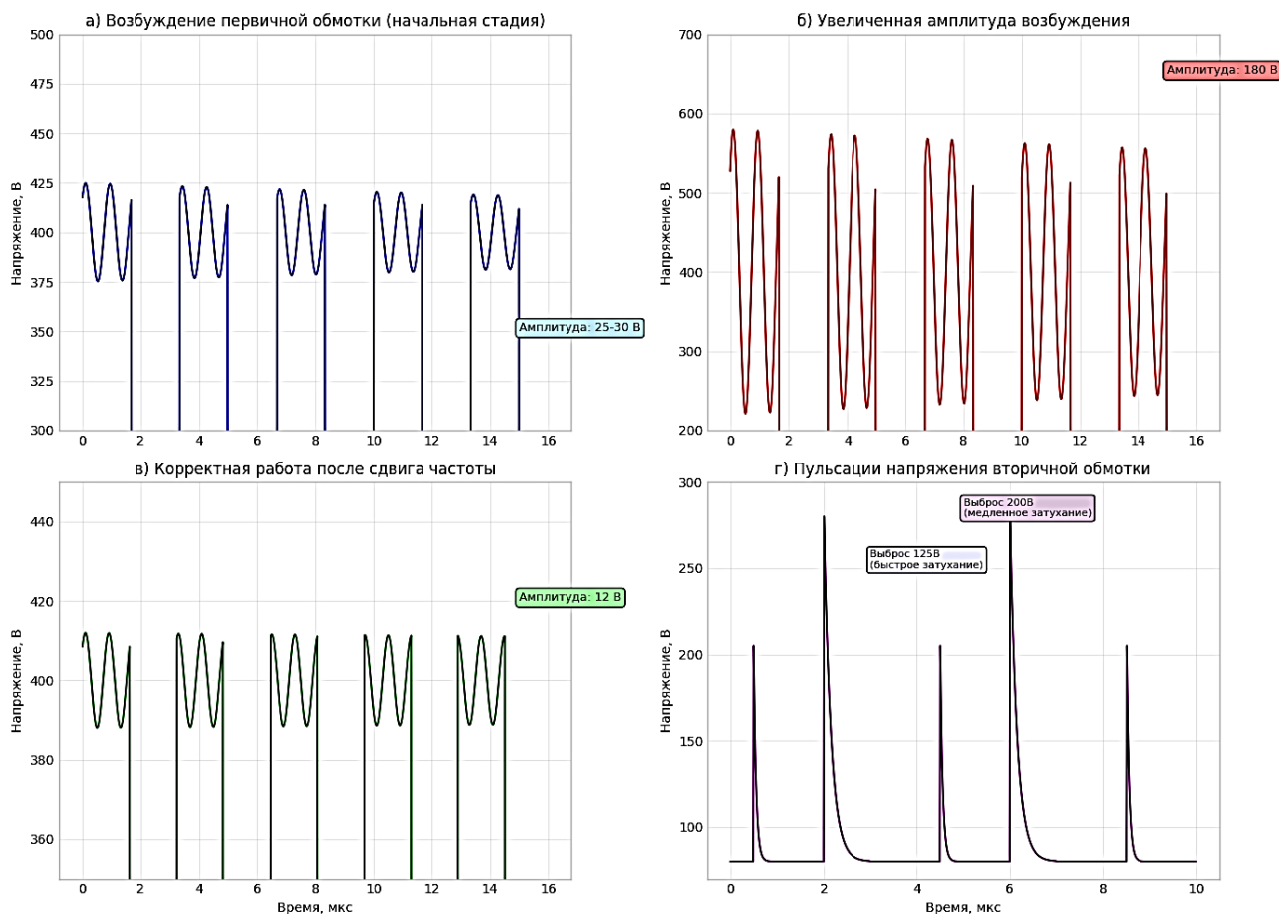


Рис. 5. Динамика резонансных явлений и оптимизация переходных процессов в силовой цепи импульсного преобразователя

Рис. 5, а демонстрирует начальную стадию возбуждения первичной обмотки трансформатора, где на фоне рабочего напряжения 400 В наблюдаются резонансные колебания амплитудой 25-30 В с частотой 1.2 МГц. Данное явление проявлялось в виде характерного потрескивания на половине мощности преобразователя.

При увеличении нагрузки до номинального значения амплитуда резонансных колебаний возрастала до 180 В, что показано на рис. 5, б. Такая значительная величина выбросов создавала механические напряжения в ферритовом сердечнике, что могло привести к его разрушению в течение короткого времени эксплуатации. Анализ временных параметров показал, что длительность затухания колебаний составляла приблизительно 100 микросекунд.

Решением проблемы резонанса стало смещение рабочей частоты преобразователя с 300 кГц на 310 кГц, что позволило выйти из зоны резонансной частоты системы. Как видно на рис. 5, в, это снизило амплитуду колебаний

до 12 В, что является безопасным значением для работы преобразователя. Длительность переходного процесса при этом увеличилась до 200 микросекунд, но это не оказывало влияния на основные характеристики устройства.

На рис. 5, г представлена осциллограмма напряжения на вторичной обмотке, где видны асимметричные выбросы: в первом плече преобразователя амплитуда составляла 125 В с быстрым затуханием за 0.5 микросекунды, во втором плече - 200 В с медленным затуханием продолжительностью 1.5 микросекунды. Такая асимметрия указывала на неравномерность работы ключевых элементов.

Детальный анализ выброса амплитудой 200 В, представленный на рис. 6, показал, что проблема была вызвана выходом из строя снабберного конденсатора в одном из плеч преобразователя. Конденсатор не выдерживал скорости нарастания напряжения 200 В за 0.3 микросекунды и терял свои демпфирующие свойства.

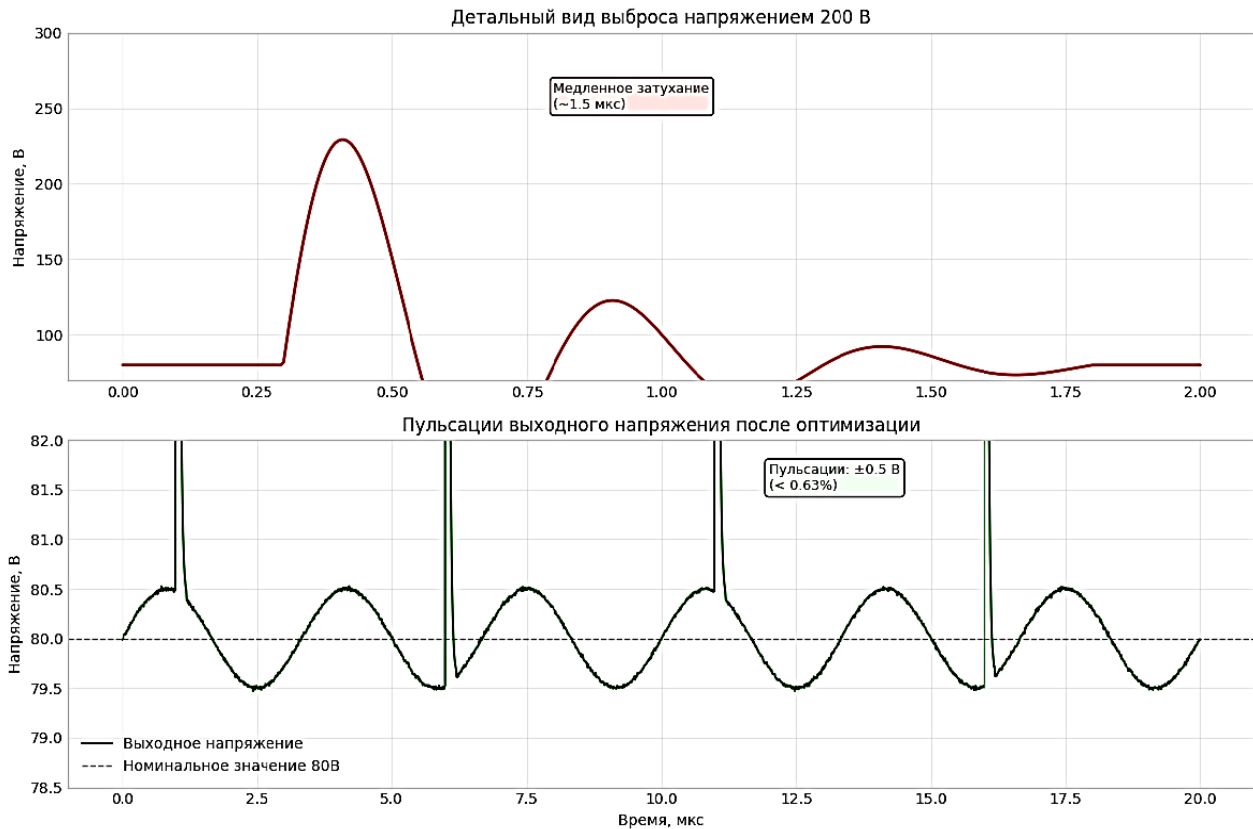
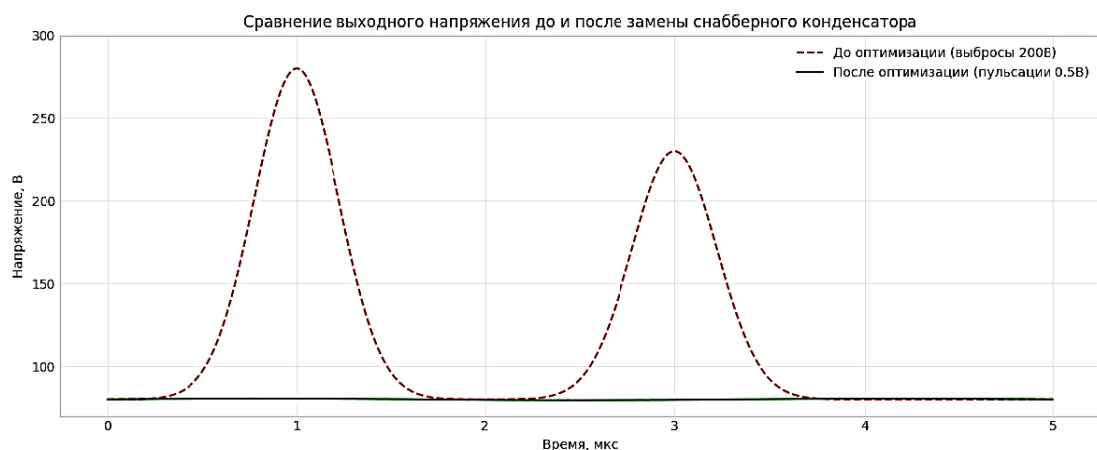


Рис. 6. Выброс амплитуды и пульсации выходного напряжения

После замены конденсатора на компонент с улучшенными частотными характеристиками удалось добиться стабильной работы преобразователя. Уровень пульсаций выходного напряжения снизился до ± 0.5 В при номинальном значении 80 В, что составляет менее 0.63 % и удовлетворяет требованиям техниче-

ского задания. Длительность остаточных выбросов не превышает 20 наносекунд, что свидетельствует о эффективном демпфировании переходных процессов.

На сравнительной осциллограмме рис. 7 наглядно продемонстрирована эффективность замены снабберного конденсатора.



- Ключевые параметры проблем и решений:
1. Резонансная частота системы: 1.2 МГц
 2. Амплитуда возбуждения до оптимизации: 180 В
 3. Амплитуда возбуждения после сдвига частоты: 12 В
 4. Выбросы на вторичной обмотке: 125 В (быстрые) / 200 В (медленные)
 5. Пульсации после оптимизации: ± 0.5 В ($< 0.63\%$ от 80 В)

Рис. 7. Сравнение выходного напряжения

До проведения оптимизации выходное напряжение характеризовалось значительными выбросами амплитудой до 200 вольт, возникшими в моменты коммутации ключевых транзисторов. Эти выбросы, существенно превышавшие номинальное значение 80 вольт, представляли серьезную угрозу для стабильности работы питаемой аппаратуры и могли приводить к ложным срабатываниям систем защиты. После замены конденсатора на компонент с улучшенными частотными характеристиками амплитуда помех снизилась более чем в 400 раз - с 200 вольт до 0.5 вольт. Такой уровень пульсаций, составляющий менее 0.63 % от номинального выходного напряжения, полностью соответствует требованиям технического задания и обеспечивает надежную работу подключенных устройств. Временные параметры переходных процессов также значительно улучшились: длительность выбросов сократилась с 1.5 микросекунд до нескольких десятков наносекунд, что свидетельствует о восстановлении демпфирующих свойств снабберной цепи.

Заключение

В результате проведенного исследования разработана и успешно апробирована комплексная методика проектирования мощных импульсных источников питания для аппаратуры специального назначения. Практическая реализация методики подтвердила ее эффективность на примере создания преобразователя с выходными параметрами 3 В при токе нагрузки 4 А и рабочей частотой 300 кГц. Ключевым достижением работы стало последовательное выявление и устранение критических проблем, характерных для силовых цепей высокой мощности. Экспериментально установлено, что первоначальные выбросы напряжения амплитудой до 200 В, обусловленные резонансными явлениями на частоте 1.2 МГц и недостаточным демпфированием, были снижены до безопасного уровня 12 В за счет коррекции времени переключения ключевых элементов и смещения рабочей частоты на 10 кГц.

Существенным преимуществом предложенной методики является ее итерационный характер, позволяющий на этапе компьютерного моделирования и прототипирования идентифицировать проблемы, которые традиционно выявляются лишь на стадии серийного производства. Оптимизация снабберных цепей позволила снизить уровень пульсаций выходного напряжения с 200 В до 0.5 В, что составляет менее 0.63 % от номинального значения 80 В и значительно превышает требования технического задания. Доказана целесообразность применения IGBT-транзисторов в мощных преобразователях, обеспечивающих оптимальное соотношение скорости коммутации и устойчивости к переходным процессам.

Литература

1. Савин М., Абрамов С. Расчет и конструирование планарного трансформатора для обратноходового преобразователя // *Электроника: Наука, технология, бизнес*. 2019. № 8 (189). С. 40-44.
2. Хорошайлова М.В., Пирогов А.А., Демихова А.С. Схема выпрямителя для динамического улучшения эффективности преобразования мощности в системах сбора внешней радиочастотной энергии // *Энергетика, информатика, инновации - 2024: труды участников XIV Международ. науч.-техн. конф., Смоленск, 13-14 ноября 2024 года*. Смоленск: Универсум, 2024. С. 115-119.
3. Хорошайлова М.В., Чернышов А.В., Леденев Д.А. Методика программирования микроконтроллера MDR32F9Q2I в задачах управления и мониторинга // *Вестник Воронежского государственного технического университета*. 2021. Т. 17. № 2. С. 76-81.
4. Comparative Review of High-Frequency Transient DC Bias Current Mitigation Strategies in Dual-Active-Bridge DC-DC Converters Under Phase-Shift Modulations / Q. Bu, H. Wen, H. Shi, Y.A. Zhu // *IEEE Trans. Ind. Appl.* 2021. 58. pp. 2166-2182.
5. Hu S., Li X, Zheng Q.F. A dual-bridge DC-DC resonant converter using extended PWM and phase-shift control // *IEEE Trans. Ind. Appl.* 2021. 57. pp. 4009-4020.
6. Хорошайлова М.В., Пирогов А.А. Разработка архитектуры высокочастотного цифрового ШИМ модулятора для DC-DC преобразователя // *Актуальные проблемы и перспективы развития радиотехнических и инфокоммуникационных систем («Радиоинфоком-2024»): сб. науч. ст. по материалам VIII Междунар. науч.-практ. конф., Москва, 18-22 ноября 2024 года*. Москва: МИРЭА - Российский технологический университет, 2024. С. 389-392.
7. Asymmetrical-PWM DAB Converter With Extended ZVS/ZCS Range and Reduced Circulating Current for ESS Applications / E.L. Carvalho [et al.] // *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2021. 36 (11). pp. 12990-13001.

Поступила 24.09.2025; принята к публикации 11.11.2025

Информация об авторах

Турецкий Андрей Владимирович – канд. техн. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: tav7@mail.ru

Пирогов Александр Александрович – канд. техн. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: pirogov.alx@gmail.com

Хорошайлова Марина Владимировна – канд. техн. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: pmv2205@mail.ru, ORCID: orcid.org/0000-0001-9167-9538
Турецкий Иван Андреевич – инженер, АО НВП «ПРОТЕК» (394028, Россия, г. Воронеж, ул. Базовая, 6), e-mail: tav7@mail.ru

DESIGN METHODOLOGY FOR HIGH-POWER SWITCHING POWER SUPPLIES FOR SPECIAL-PURPOSE EQUIPMENT WITH IMPROVED ELECTROMAGNETIC CHARACTERISTICS

A.V. Turetskiy¹, A.A. Pirogov¹, M.V. Khoroshaylova¹, I.A. Turetskiy²

¹Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

²JSC Scientific and Innovation Enterprise «PROTEK», Voronezh, Russia

Abstract: we present a comprehensive design methodology for high-power switching power supplies (SPS) for special equipment used in computing, communication systems, medical equipment and electronic warfare, aimed at minimizing time costs and optimizing key characteristics. The methodology includes a step-by-step analysis of the technical task, selection of the optimal circuit topology (single-stroke or push-pull), calculation and modeling of the parameters of the power unit, in particular the transformer and chokes, using specialized software. Special attention is paid to the practical aspects of debugging prototypes. Using real-world examples, we analyzed typical problems that arise at the stage of creating a working sample: voltage surges during switching of key elements, leading to false alarms of the control system; parasitic resonance in the primary circuit of the transformer; increased output voltage ripples due to the failure of the supply chains. We proposed effective solutions and experimentally tested for each problem, such as correcting the switching time of transistors, shifting the operating frequency of the converter to avoid resonance, and selecting components resistant to high-frequency effects. We show that the application of the proposed technique makes it possible, therefore, to identify and eliminate design flaws, ensuring that the finished device meets the specified technical requirements

Key words: switching power supply, electromagnetic compatibility, parameter optimization, transformer calculation, thermal modes

Acknowledgements: the work was carried out with the financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the framework of the state assignment (no FZGM-2025-0002)

References

1. Savin M., Abramov S. "Calculation and design of a planar transformer for a reverse-flow converter", *Electronics: Science, Technology, Business (Elektronika: Nauka, tekhnologiya, biznes.)*, 2019, no. 8(189), pp. 40-44.
2. Khoroshaylova M.V., Pirogov A.A., Demikhova A.S. "Rectifier circuit for dynamic improvement of power conversion efficiency in systems for collecting external radio frequency energy", *Proc. of the XIV Scientific and Technical Int. Conf.: Energy, Informatics, Innovations – 2024 (Energetika, informatika, innovatsii - 2024)*, Smolensk, 2024, pp. 115-119.
3. Khoroshaylova M.V., Chernyshov A.V., Ledenev D.A. "Methodology of programming the MDR32F9Q21 microcontroller in control and monitoring tasks", *Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2021, vol. 17, no. 2, pp. 76-81.
4. Bu V., Wen H., Shi H., Zhu Y.A. "Comparative review of strategies for reducing high-frequency transient DC bias currents in DC converters with two active bridges in phase shift mode", *IEEE Trans. Ed. Appendix*, 2021, no. 58, pp. 2166-2182.
5. Hu S., Li H., Zheng K.F. "A two-bridge resonant DC-to-DC converter using advanced PWM modulation and phase shift control", *IEEE Trans. Ind. Appendix*, 2021, no. 57, pp. 4009-4020.
6. Khoroshaylova M.V., Pirogov A.A. "Architectures of high-frequency Development of a digital PWM modulator for a direct current converter", *Proc. of the VIII Int. Sci. and Practical Conf.: Actual Problems and Prospects of Development of Radio Engineering and Infocommunication Systems (Radioinfocom-2024)*, Moscow, November 18-22, 2024, 2024, pp. 389-392.
7. Carvalho E.L. et al. "Asymmetric PWM DAB converter with extended ZVS/ZCS range and reduced circulation current for ESS applications", *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2021, no. 36 (11), pp. 12990-13001.

Submitted 24.09.2025; revised 11.11.2025

Information about the authors

Andrey V. Turetskiy, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya, Voronezh 394006, Russia), e-mail: tav7@mail.ru
Aleksandr A. Pirogov, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya, Voronezh 394006, Russia), e-mail: pirogov.alx@gmail.com
Marina V. Khoroshaylova, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya, Voronezh 394006, Russia), pmv2205@mail.ru, orcid.org/0000-0001-9167-9538
Ivan A. Turetskiy, Engineer, JSC Scientific and Innovation Enterprise «PROTEK» (6 Bazovaya str., Voronezh 394028, Russia), e-mail: tav7@mail.ru

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ МИКРОПОЛОСКОВЫХ ФИЛЬТРОВ ДЛЯ ПРИЕМНОГО МОДУЛЯ

А.М. Безрукавый, И.С. Бобылкин, Н.А. Ключев

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

Аннотация: в современном мире беспроводные технологии играют ключевую роль в обеспечении связи между различными устройствами. Приёмные модули, используемые в радиоэлектронной аппаратуре, должны обеспечивать высокое качество приёма сигнала и его обработку. Одним из важных компонентов приёмного модуля являются микрополосковые фильтры, которые отвечают за селекцию полезного сигнала и подавление помех. создается методика проектирования микрополосковых фильтров с заданными характеристиками и параметрами, а также изучаются их свойства для обеспечения эффективной работы модуля приёмного устройства. Были проведены работы по проведению модуляции множества новых типов микрополосковых фильтров с имеющимися улучшенными фильтрующими характеристиками. Практическая значимость заключается в улучшении качества приёма сигнала и расширении возможностей применения приёмных модулей. Микрополосковые фильтры позволяют более эффективно выделять полезный сигнал из общего потока частот, что приводит к повышению качества приёма и снижению уровня помех. Диапазон низкочастотных полос пропускания полосковых фильтров. Изучение свойств микрополосковых фильтров для обеспечения эффективной работы приемного модуля устройств. Моделирования сигналов различной частоты для изучения данного эффекта. Расчет полосы пропускания микрополосковых фильтров, моделирования и анализ данных исследований

Ключевые слова: фильтр, сигнал, помехи, СВЧ, микрополосковые, приемное устройство

Благодарности: работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № FZGM-2025-0002)

Введение

Фильтры являются неотъемлемой частью многих радиочастотных приложений. Использование в беспроводной связи побуждает инициировать более жесткие требования к радиочастотным фильтрам. К ним относятся: более высокая производительность, уменьшение габаритных параметров и меньшая стоимость готового изделия. Большинство существующих высокочастотных и сверхвысокочастотных фильтров и компонентов данного типа можно представить в виде двухпортовой сети.

Цель работы — изучение свойств микрополосковых фильтров для обеспечения эффективной работы модуля приёмного устройства.

Конструктивные особенности фильтров

При выполнении данной схемы нужно учесть её способность преобразовывать сигналы AWG в диапазоне частот 300-500 МГц до кубитных частот в диапазоне 4,5-6 ГГц. Для этого были разработаны микрополосковые фильтры для первой и второй ступени. Их печатные платы — это соединение двух слоев

меди, один из которых выполняет функции базовой плоскости заземления, а другой — геометрии микрополоски, что является самым формирующим фильтром.

Для фильтра первой ступени применялась межпальцевая геометрия из-за способности генерировать более тонкие полосы пропускания с лучшим откатом на более низких частотах в диапазоне 500 МГц-4 ГГц.

Применение параллельной геометрии было использовано для фильтра второй ступени, благодаря способности создания гораздо более широкой полосы пропускания вокруг желаемых частот кубитов.

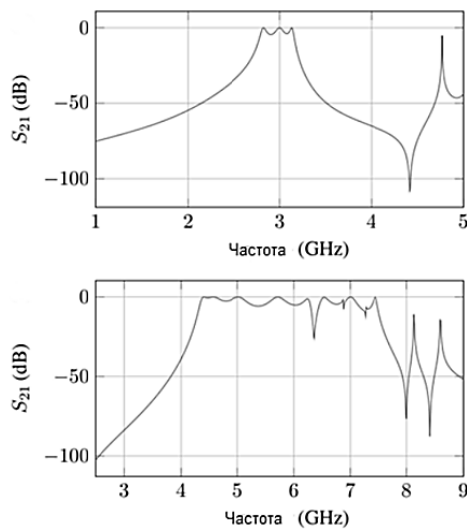
При выборе конструктивных параметров стремились не только обеспечить требуемую полосу пропускания, но и добиться того, чтобы массовое производство было максимально удобным, а размер элементов — минимальным.

Моделирование и анализ данных

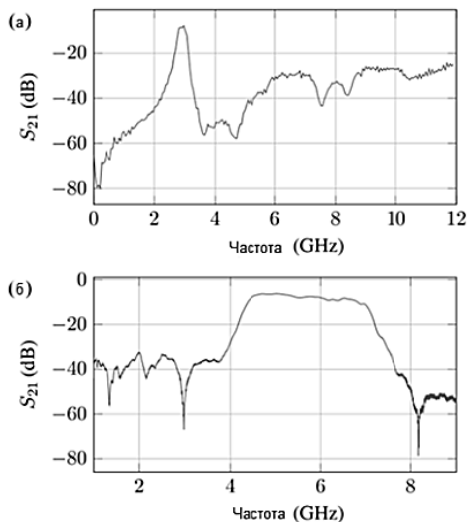
Моделирование для данных фильтров проводилось с использованием мультимодального расчета собственной частоты, за которым следовала модальная развертка частоты. Разработанные устройства проходили верификацию в программной среде COMSOL. Применяемый метод

помог добиться более быстрых результатов.

Результаты выполненных расчетов указаны на рис. 1, а. Расчеты предоставляют необходимые результаты полосы пропускания для выбранных геометрий с имеющимися небольшими различиями. Для полосы пропускания с межпальцевым типом смоделированный результат был ниже, чем проектировалось, а для параллельной полосы пропускания ширина полосы получилась короче.



а)



б)

Рис. 1. Моделирование фильтров:
а) результаты моделирования фильтра COMSOL;
б) характеристика пропускания изготовленных печатных плат фильтров

Характеристики пропускания изготовленных фильтров по величине (S_{21}) указаны на рис. 1, б. Полоса пропускания в первом случае

указывает на узкую полосу пропускания между 2,8 ГГц и 3 ГГц с быстрым уменьшением в обе стороны. Параллельная схема предоставляет желаемую полосу пропускания с имеющейся шириной полосы пропускания 2,5 ГГц.

Результаты показали, что общая ширина полосы пропускания значительно велика, что является оптимальным значением для второго каскада. После нескольких итераций с параллельными фильтрами увеличить ширину полосы пропускания до желаемого уровня оказалось затруднительно.

В результате проведенных исследований было разработано устройство, которое изображено на рис. 2.



Рис. 2. Физическая версия схемы с одним кубитом, которая включает в себя два смесителя на основе миниатюрных схем и цифровые и параллельные геометрические фильтры для первого и второго каскадов соответственно

Сравнительный анализ с существующими фильтрами

Чтобы определить актуальность данной разработки, следует выполнить рассмотрение аналогичных устройств для дальнейшего обоснования имеющихся преимуществ.

Для начала рассмотрим первый патент РФ №2812340 «Способ формирования и обработки сигнала, встроенного в маскирующую помеху» [1].

В документе описывается метод создания и обработки сигнала, который заключается в изменении каждого значения несущей частоты полезного сигнала, которому устанавливают символическое значение скорости передачи сигнала. Блок маскирует помехи для каждого значения несущей частоты, и подбирается с учетом того, что каждое изменение скорости передачи сигнала приводит к изменению ширины спектра частот.

Недостаток данной методики заключается в том, что подсистема создания шумовой помехи предоставляет размещение заградительной помехи во временной, а не спектральной области. Из этого следует, что при длительном анализе возможно определить информационные и шумовые заградительные компоненты сигнала

во временной области, однако это приведет к уменьшению конфиденциальности передаваемой информации [2].

Наиболее близкой по технической сути является методика, описанная в патенте РФ №2790098 «Способ формирования и обработки сигнала, встроенного в маскирующую помеху» [3].

У данного способа на передающей стороне радиолинии формируют сигнал и маскирующую помеху. При этом маскировочный блок помех подбирают таким образом, чтобы на частотных позициях, занимаемых полезным сигналом, значение модуля амплитуд не превышало 5 % от спектральных компонентов полезного сигнала или отсутствовало

Недостаток данного способа — выполнение работы радиолинии строго по одной скорости, т.е. в пределах одной и той же полосы пропускания канала, что уменьшает конфиденциальность передаваемой информации.

Еще одним патентным исследованием является «Способ компоновки дифференциальной пары для цепей с модальным резервированием на основе зеркально-симметричной полосковой структуры» (Патент РФ №2817634) [4].

Технический результат заключается в уменьшении уровня сигнала помехи как в дифференциальном, так и в синфазном режимах воздействия. Такой технический результат обеспечивается посредством использования компоновки полосковой структуры с резервированием и образованием пятипроводной связанной линии передачи [5].

Недостатком описанной методики является сложность использования полосковой структуры в дифференциальном и синфазном режимах. Для этого на вход между резервными проводниками необходимо подавать помеховый импульсный сигнал малой длительности, что приводит к потерям в 17,08 дБ [6].

Заключение

Подводя итоги, можно сказать, что работа по проектированию и конструированию печатной платы фильтра для модуля приемного устройства проделана верно. Был проведен срав-

нительный анализ с различными конструкциями фильтров, благодаря которым был спроектирован и реализован собственный микрополосковый фильтр. Ожидаемые результаты полностью подтвердились практическими достижениями. В результате практического эксперимента был создан фильтр для модуля приемного устройства, полностью выполняющий заданные ему функции.

Литература

1. Патент № 2812340 С1 Российская Федерация, МПК H04K 1/02. Способ формирования и обработки сигнала, встроенного в маскирующую помеху: 2015139202/07: заявл. 2015.09.14: опубл. 2016.11.20 / Ю.И. Потылицин, С.С. Манаенко, В.Э. Гель, А.Р. Тимофеев, С.В. Дворников, М.А. Вознюк, Д.А. Таюрский; заявитель Федеральное государственное казенное военное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Военная академия связи имени Маршала Советского Союза С.М. Буденного» Министерства обороны Российской Федерации.
2. Справочник по элементам полосковой техники (направленные ответители 1-3 класса) / Под ред. А.Л. Фельдштейна. М.: Связь, 1979. 336 с.
3. Патент № 2790098 С1 Российская Федерация, МПК H04K 3/00. Способ формирования и обработки сигнала, встроенного в маскирующую помеху: № 2023109685: заявл. 17.04. 2023: опубл. 30.01. 2024 / К.Н. Сорокин, П.В. Башлаков, С.В. Дворников, М.А. Гудков, А.С. Дворников, С.С. Дворников; заявитель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения».
4. Патент № 2817634 С1 Российская Федерация, МПК H04B 15/02. Способ компоновки дифференциальной пары для цепей с модальным резервированием на основе зеркально-симметричной полосковой структуры: 2023125759: заявл. 09.10. 2023: опубл. 17.04.2024 / А.М. Заболоцкий, Е. Жечев, С.В. Власов; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники»
5. Патент № 2743007 С1 Российская Федерация, МПК H01P 1/03. Микрополосковый полосно-пропускающий фильтр и устройство, включающее микрополосковый полосно-пропускающий фильтр: № 2020116697: заявл. 24.04.2020: опубл. 12.02.2021 / А.Н. Сафронов, И.С. Корнилов; заявитель Общество с ограниченной ответственностью «Миг Трейдинг».
6. Разработка топологии компактных квазиэллиптических полосовых микрополосковых фильтров / Р.Е. Семерня, С.Л. Чернышев, А.Р. Виленский, Э.О. Можаров // Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника. 2018. № 6. С. 41-53.

Поступила 18.06.2025; принята к публикации 28.08.2025

Информация об авторах

Безрукавый Артем Михайлович — студент магистратуры, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), тел.: +7 (999) 403-53-24, e-mail: artivirus07@mail.ru

Бобылкин Игорь Сергеевич – канд. техн. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), тел.: +7 (903) 851-11-13, e-mail: bobylnin@bk.ru, ORCID: 0000-0001-7489-2249
Клюев Никита Александрович – студент бакалавриата, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), тел.: +7 (906) 576-72-06, e-mail: nikita_klyev@mail.ru

METHODOLOGY FOR THE DEVELOPMENT AND RESEARCH OF MICROSTRIP FILTERS FOR THE RECEIVER MODULE

A.M. Bezrukavy, I.S. Bobylkin, N.A. Klyuev

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract: in today's world, wireless technologies play a key role in enabling communication between various devices. Receiver modules used in electronic equipment must ensure high-quality signal reception and processing. Microstrip filters, which are responsible for selecting the desired signal and suppressing interference, are among the key components of the receiving module. A methodology for designing microstrip filters with specified characteristics and parameters is being developed, and their properties are being studied to ensure the efficient operation of the receiving module. Work has been conducted on modulating many new types of microstrip filters with existing improved filtering characteristics. The practical significance lies in improving signal reception quality and expanding the application capabilities of receiving modules. Microstrip filters allow for more efficient separation of the desired signal from the general frequency stream, which leads to improved reception quality and reduced interference. The low-frequency passband range of stripline filters. The properties of microstrip filters are studied to ensure the efficient operation of the receiving module of devices. Simulation of signals of various frequencies to study this effect. Calculation of the passband of microstrip filters, simulation, and analysis of research data

Key words: filter, signal, interference, microwave, microstrip, receiver

Acknowledgments: this work was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (project no. FZGM-2025-0002)

References

1. Potylitsin Yu.I., Manaenko S.S., Gel V.E., Timofeev A.R., Dvornikov S.V., Voznyuk M.A., Tayurskiy D.A. "A method for generating and processing a signal embedded in masking interference" ("Sposob formirovaniya i obrabotki signala, vstroyennogo v maskiruyushchuyu pomekhu"), patent 2812340 C1, Russian Federation, application 2015.09.14, published 2016.11.20.
2. Feldstein A.L. ed. "Handbook on the elements of strip technology (directional couplers of class 1-3)" ("Spravochnik po elementam poloskovoy tekhniki (napravlennye otvetviteli 1-3 klassa)"), Moscow: Svyaz', 1979, 336 p.
3. Sorokin K.N., Bashlakov P.V., Dvornikov S.V., Gudkov M.A., Dvornikov A.S., Dvornikov S.S. "Method for generating and processing a signal embedded in a masking interference" ("Sposob formirovaniya i obrabotki signala, vstroyennogo v maskiruyushchuyu pomekhu"), patent no. 2790098 C1, Russian Federation, published January 30, 2024.
4. Safronov A.N., Kornilov I.S. "Method for arranging a differential pair for circuits with modal redundancy based on a mirror-symmetric stripline structure" ("Sposob komponovki differentsial'noy pary dlya tsepey s modal'nym rezervirovaniyem na osnove zerkal'no-simmetrichnoy poloskovoy struktury"), patent no. 2743007 C1, Russian Federation, application 04/24/2020, published 02/12/2021.
5. Safronov A.N., Kornilov I.S. "Microstrip bandpass filter and a device incorporating a microstrip bandpass filter" ("Mikropoloskovyy polosno-propuskayushchiy fil'tr i ustroystvo, vklyuchayushchee mikropoloskovyy polosno-propuskayushchiy fil'tr"), patent no. 2743007 C1 Russian Federation, published 12.02.2021.
6. Semernya R.E., Chernyshev S.L., Vilensky A.R., Mozharov E.O. "Development of the topology of compact quasi-elliptical band-pass microstrip filters", *News of Higher Educational Institutions of Russia. Radio Electronics (Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy Rossii. Radioelektronika)*, 2018, no. 6, pp. 41-53.

Submitted 18.06.2025; revised 28.08.2025

Information about the authors

Igor' S. Bobylkin, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), tel.: +7 (903) 851-11-13, e-mail: bobylnin@bk.ru, ORCID: 0000-0001-7489-2249
Artem M. Bezrukavy, MA, Voronezh State Technical University 84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), tel.: +7 (999) 403-53-24, e-mail: artivirus07@mail.ru
Nikita A. Klyuev, student, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), tel.: +7 (906) 576-72-06, e-mail: nikita_klyev@mail.ru

ОБРАТНОХОДОВЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ НАПРЯЖЕНИЯ ДЛЯ ПИТАНИЯ ПОДВИЖНЫХ ОБЪЕКТОВ ПО ТОНКИМ ПРОВОДНЫМ ЛИНИЯМ

М.А. Ромащенко, Н.Ю. Веретенников, А.В. Гудков

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

Аннотация: рассматривается задача передачи мощности порядка 60 Вт от аккумуляторного источника с применением тонкого проводника для обеспечения питания подвижных объектов. Проведен анализ потерь в линии и показано, что эффективным способом их снижения является повышение питающего напряжения. Для этого предлагается использовать импульсный преобразователь постоянного напряжения выполненный по топологии обратноходового преобразователя. Показано, что основным элементом такого преобразователя является магнитный компонент (высокочастотный трансформатор) и выполнен расчет его параметров, обеспечивающих работу в граничном режиме тока. Для подтверждения корректности проведенного анализа и выбранных рабочих режимов преобразователя была синтезирована его модель в среде схемотехнического проектирования LTspice. Представлены полученные по результатам выполненного моделирования осциллограммы токов первичной и вторичной обмоток трансформатора, а также осциллограммы напряжений на силовом транзисторе и выпрямительном диоде. Установлено, что предложенное решение позволяет повысить напряжение линии до 110 В, тем самым снизить токи и уменьшить потери мощности при длине линии до 400 м. Полученные результаты подтверждают корректность расчетов и демонстрируют эффективность применения обратноходовых преобразователей в системах питания подвижных объектов при помощи тонких проводных линий

Ключевые слова: обратноходовый преобразователь, подвижные объекты, импульсные источники питания, тонкая проводная линия

Благодарности: работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № FZGM-2025-0002)

Введение

Передача электрической энергии по проводным линиям остаётся одной из ключевых задач современной электроники. В условиях, когда требуется обеспечить питание подвижных объектов при ограниченных габаритах и весе проводников возникает необходимость использования тонких проводов. Однако уменьшение сечения проводника неизбежно приводит к росту его активного сопротивления, что влечёт за собой значительные потери мощности, падение напряжения на линии и снижение эффективности всей системы.

Одним из способов повышения эффективности передачи энергии на расстояние является использование преобразователей постоянного тока, позволяющих увеличить напряжение на линии и, соответственно, уменьшить ток, а значит и тепловые потери в проводе. Среди различных топологий преобразователей особый интерес представляет обратноходовый преобразователь отличающийся простотой конструкции, возможностью обеспечения гальванической развязки и эффективной работы в широком диапазоне напряжений питания.

Целью данной статьи является подробное рассмотрение практических аспектов проектирования системы передачи энергии для подвижных объектов по тонкой проводной линии питания с использованием обратноходового преобразователя.

Анализ потерь в питающей линии

Рассмотрим процесс передачи электрической энергии от аккумуляторной батареи (АКБ) с номинальным напряжением 24 В, расположенной на базовой станции управления подвижным объектом, посредством кабеля Ethernet на расстоянии 400 м. Нагрузкой является потребитель мощностью 50 Вт. Для организации линии питания задействуются две витые пары сечением жилы 0,5 мм² каждая. В результате эквивалентное сечение проводников S , используемых для подачи напряжения и обратного проводника (нулевой шины), составляет 1 мм². При этом эквивалентное расстояние l , используемое для расчетов, равняется 800 м. Таким образом, сопротивление шины питания равняется

$$R_{bus} = \rho \frac{l}{S} = 14,4 \text{ Ом}, \quad (1)$$

где $\rho = 0,018 \cdot 10^{-6}$ Ом·м. — удельное сопротивление меди.

Согласно стандарту IEEE 802.3bt технологии PoE поддерживаемое напряжение на шине питания достигает 57 В [1]. В то же время, для кабелей категории 5 установлено предельно допустимое значение рабочего напряжения 125 В. Следовательно, в рассматриваемом случае с целью снижения токов в проводниках, и, как следствие, омических потерь целесообразно повысить напряжение питания до уровня 110 В. В таком случае ток в линии должен удовлетворять условию

$$P_n = I_{bus}(V_{bus} - I_{bus}R_{bus}), \quad (2)$$

где P_n — мощность нагрузки,
 I_{bus} — ток линии питания,
 V_{bus} — напряжение питания.

Проводя анализ (2) было получено $I_{bus} = 0,487$ А, что соответствует падению напряжения на линии 7 В, и напряжению на нагрузке — 103 В. Таким образом, потери мощности в линии питания составят 3,41 Вт или 6,83 % от начальной мощности источника, что можно считать допустимым для питающей линии такой длины.

Расчет обратноходового трансформатора

В качестве повышающего преобразователя напряжения АКБ до напряжения промежуточной шины рассмотрим обратноходовый преобразователь с выходным напряжением 110 В. Для учета возможных потерь в понижающем преобразователе на стороне потребителя, зададим выходную мощность равную 60 Вт. Поскольку напряжение на выводах АКБ изменяется в процессе зарядно-разрядных циклов, выберем диапазон входных напряжений преобразователя в пределах от 18 до 36 В.

Ключевым элементом обратноходового преобразователя является магнитный компонент (обычно трансформатор со зазором в магнитопроводе), который работает в различных режимах в зависимости от параметров нагрузки, частоты переключения и коэффициента заполнения импульса управляющего сигнала ШИМ (широтно-импульсного модулятора) [2]. Можно выделить три режима работы: режим разрывных токов (Discontinuous Conduction Mode, DCM), непрерывного тока (Continuous Conduction Mode, CCM) и граничный режим (Boundary Conduction Mode, BCM) [3, 4].

При расчете магнитного компонента преобразователя выберем его индуктивность таким образом, чтобы при номинальном входном напряжении 24 В и полной нагрузке обеспечивал-

ся граничный режим работы магнитного компонента. Регулировочная характеристика обратноходового преобразователя выглядит следующим образом

$$V_{out} = \frac{V_{in}}{k_{tr}} \frac{D}{1-D} - V_f,$$

где V_{out} — выходное напряжение преобразователя,

V_{in} — входное напряжение преобразователя,

$k_{tr} = N_1/N_2$ — коэффициент трансформации,

D — коэффициент заполнения импульса ШИМ,

V_f — падение на выпрямительном диоде.

Наиболее эффективный режим работы преобразователя с точки зрения пиковых и среднеквадратичных токов обеспечивается при $D=0,5$. Тогда можно найти коэффициент трансформации как

$$k_{tr} = \frac{V_{in}}{V_{out} + V_f} \frac{D}{1-D}.$$

Подставив значения $V_{in}=24$ В, $V_{out}=110$ В, $V_f=0,6$ В, $D=0,5$, получим оптимальное значение коэффициента трансформации $k_{tr} = 0,217$.

В [5] показан способ расчета трансформатора с использованием накопленной в магнитопроводе энергии. Согласно данному подходу, вся энергия, накопленная в сердечнике в течение открытого состояния транзистора (время импульса), должна быть полностью передана за время закрытого состояния транзистора (время паузы). В настоящей работе предлагается использовать другой метод. Поскольку ток в магнитном компоненте в момент начала нового такта работы должен быть равен нулю, рассчитаем токи в обмотках трансформатора и выберем необходимые значения индуктивностей обмоток.

Если пренебречь потерями в преобразователе, то средний входной ток можно определить как

$$I_{in} = \frac{P_{out}}{V_{in}},$$

где P_{out} — выходная мощность преобразователя. Для нашего случая средний входной ток равен 2,5 А.

Поскольку ток в первичной обмотке начинается из нуля, то пиковый ток в первичной обмотке определяется выражением

$$I_{peak\ pri} = \frac{2I_{in}}{D}.$$

Необходимая индуктивность первичной обмотки определяется условием достижения пикового значения тока $I_{peak\ pri}$ за время открытого состояния транзистора t_{on} . Поскольку во время прямого такта (когда ключ открыт) к обмотке прикладывается постоянное напряжение V_{in} , то можно найти изменение тока как

$$\Delta I = \frac{V_{in} t_{on}}{L_{pri}},$$

где L_{pri} – индуктивность первичной обмотки трансформатора. Поскольку ток в обмотке в граничном режиме начинает нарастать с нуля, то $\Delta I = I_{peak\ pri}$. Отсюда

$$L_{pri} = \frac{V_{in} t_{on}}{I_{peak\ pri}}.$$

При выбранной частоте переключения транзистора $f_{sw} = 270$ кГц и коэффициенте заполнения $D = 0.5$ время открытого состояния составит

$$t_{on} = \frac{D}{f_{sw}} = 1,834 \text{ мкс.}$$

Подстановка численных значений дает требуемую индуктивность первичной обмотки $L_{pri} = 4,1$ мкГн. Индуктивность вторичной обмотки определяется через коэффициент трансформации k_{tr} :

$$L_{sec} = \frac{L_{pri}}{k_{tr}^2} = 83 \text{ мкГн.}$$

Для реализации обратноходового трансформатора выберем сердечник с зазором RM8-3C94-A250 [6, 7]. По известному значению параметра $A_L = 250$ нГн/виток² найдем требуемое количество витков первичной обмотки

$$N_1 = \sqrt{\frac{L_{pri}}{A_L}}.$$

Округлив полученное значение до целого числа, получим 4 витка в первичной обмотке. Количество витков вторичной обмотки найдем исходя из требуемого коэффициента трансформации

$$N_2 = \frac{N_1}{k_{tr}}.$$

Округлив до целого, получим значение 18 витков. Таким образом, фактический коэффициент трансформации равен 0,22.

Подставив количество витков N_1 , найдем фактическое значение индуктивности первичной обмотки

$$L_{pri} = A_L N_1^2 = 4 \text{ мкГн.}$$

Аналогично пересчитаем $L_{sec} = 81$ мкГн.

Для проверки корректности выбора сердечника определяется размах индукции в магнитопроводе, создаваемый в течение прямого такта работы преобразователя. Он рассчитывается по формуле

$$\Delta B = \frac{V_{in} t_{on}}{A_e N_1},$$

где $A_e = 63$ мм² — эффективная площадь сечения сердечника. В рассматриваемом случае расчетный размах индукции равен 0,168 Тл, что намного меньше индукции насыщения материала.

Определим максимальное напряжение на силовом транзисторе и диоде. Во время прямого такта, когда транзистор открыт, выпрямительный диод не проводит ток. В это время к нему прикладывается напряжение

$$V_{VD} = \frac{V_{in}}{k_{tr}} + V_{out}.$$

В интервале закрытого состояния транзистора на нем формируется напряжение

$$V_{VT} = V_{in} + (V_{out} + V_f) k_{tr}.$$

Подставив максимальное входное напряжение 36 В получим $V_{VT} = 59,27$ В, $V_{VD} = 281,1$ В.

Следует отметить, что приведенные значения являются теоретическими и не учитывают перенапряжения, возникающие при коммутации из-за индуктивности рассеяния. В реальных условиях амплитуда выбросов напряжения на силовом транзисторе и диоде может составлять 20–50 % от расчетного значения. Таким образом, для транзистора следует закладывать рабочее напряжение 100 В, а для диода — 400 В.

В качестве дополнительных мер защиты от перенапряжений рекомендуется применение схем демпфирования, таких как RCD-снаббер или RC-демпфер), что позволит ограничить выбросы и снизить нагрузку на силовые компоненты.

Моделирование преобразователя

Для подтверждения корректности расчетов и анализа рабочих режимов преобразователя была синтезирована его модель в среде LTspice.

На рис. 1 представлена схема обратного преобразователя. В качестве ШИМ-контроллера выбрана микросхема LT1243. Основным преимуществом этой микросхемы является простота реализации, а также наличие встроенного выходного драйвера до 1А, что позволяет управлять силовым транзистором напрямую, без использования внешнего драйвера.

Питание контроллера осуществляется от вспомогательной обмотки L3, что обеспечивает поддержание напряжения $V_{aux} \approx 14$ В при установившемся режиме. В начальный момент времени питание обеспечивается за счет резистора R11 и стабилитрона D3 (BZX84C15L).

Силовая часть построена на MOSFET транзисторе BSC060N10NS3, коммутирующим ток первичной обмотки L1 = 4 мГн. Вторичная

обмотка L2 = 81 мГн обеспечивает передачу накопленной в магнитопроводе энергии в нагрузку через диод D1 (RFN10NS4S) и фильтрующий конденсатор C2 = 4,7 мкФ. Для учета коммутационных выбросов на транзисторе и диоде между обмотками трансформатора задан коэффициент связи 0,985, что соответствует индуктивности рассеяния 2,98% и близко к реальным значениям.

Для ограничения выбросов напряжения, возникающих при коммутации силового транзистора вследствие индуктивности рассеяния, в схеме предусмотрен RCD-снабберы, состоящие из элементов D4, R12, C9 и R13, C10, D5, а также демпферы R14, C11 и R19, C13, D6. Подробно методика подбора номиналов демпфирующих цепей описана в [5]. Данные цепи выполняют функцию рассеивания остаточной энергии магнитного поля, снижая амплитуду коммутационных выбросов и уменьшая уровень электромагнитных помех, генерируемых преобразователем.

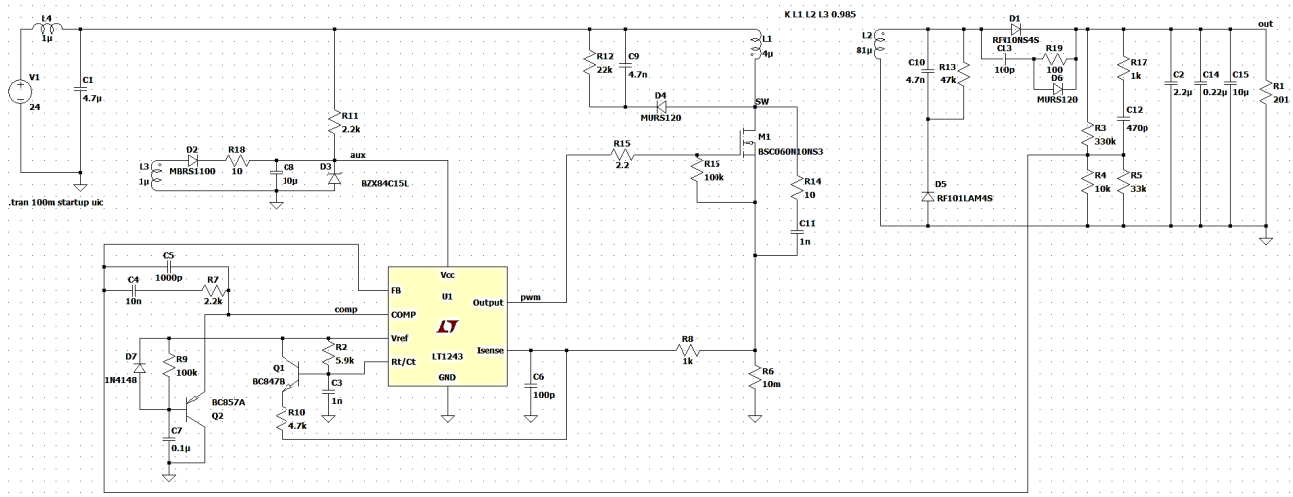


Рис. 1. Принципиальная схема моделируемого обратного преобразователя

Система стабилизации выходного напряжения реализована по классической схеме без гальванической развязки. Делитель напряжения R3 – R5 формирует сигнал обратной связи, пропорциональный уровню выходного напряжения, который передается на вывод FB контроллера. Цепь из резистора R9, конденсатора C7, и транзистора Q2 (BC857A) обеспечивает плавный пуск преобразователя, предотвращая заброс выходного напряжения при включении.

На рис. 2 представлены полученные в результате моделирования осциллограммы токов первичной и вторичной обмоток трансформатора. Сверху изображен ток первичной обмотки, снизу – ток вторичной обмотки. Колебания

токов в моменты переключения силового транзистора обусловлены воздействием индуктивности рассеяния трансформатора, а также паразитных емкостей переходов транзистора и выпрямительного диода.

В процессе открытого состояния силового ключа ток в первичной обмотке линейно возрастает, что соответствует накоплению энергии в сердечнике. После запираания транзистора накопленная энергия передаётся во вторичную обмотку, где формируется ток противоположного направления. По мере разряда магнитного потока ток вторичной обмотки плавно снижается до нулевого значения к началу следующего цикла переключения.

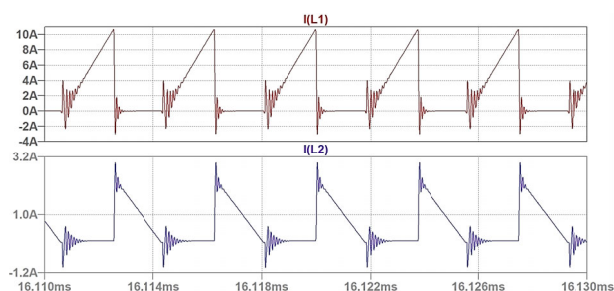


Рис. 2. Осциллограммы токов в трансформаторе

Такой характер токов соответствует граничному режиму работы преобразователя (BCM). Пиковое значение тока первичной обмотки составляет 10,5 А, что достаточно близко к расчетному значению.

На рис. 3 приведены полученные в результате моделирования осциллограммы напряжений на силовом транзисторе и выпрямительном диоде.

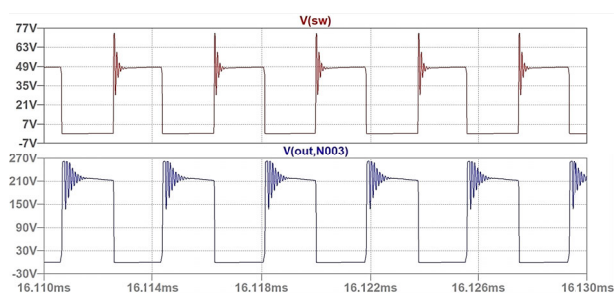


Рис. 3. Осциллограммы напряжений на силовом транзисторе (сверху) и диоде (снизу)

Максимальное значение напряжения на стоке транзистора достигает 73 В, тогда как на выпрямительном диоде наблюдается амплитуда 270 В. При повышении входного напряжения до максимального амплитуда коммутационных выбросов возрастает: напряжение на транзисторе достигает 75,5 В а на диоде – 326 В. Полученные значения подтверждают необходимость выбора элементов с запасом по напряжению, что обеспечивает надежность работы преобразователя и предотвращает пробой полупроводниковых приборов при переходных процессах.

Заключение

В работе рассмотрены практические аспекты проектирования и моделирования обратноходового преобразователя, предназначенного для передачи энергии к подвижным объектам по тонким проводным линиям питания.

В результате выполненных расчетов определены оптимальные параметры магнитного компонента, обеспечивающие работу устройства в граничном режиме тока (BCM), при котором достигается компромисс между величиной пиковых токов и потерями на переключение силовых элементов.

Расчетные значения индуктивностей и коэффициента трансформации, а также корректность выбора силовых полупроводниковых приборов, подтверждены численным моделированием в среде LTspice. Моделирование показало, что при входном напряжении в диапазоне 18–36 В и выходной мощности 60 Вт преобразователь обеспечивает формирование стабилизированного выходного напряжения 110 В.

Результаты проведенного исследования показывают, что предложенная методика расчета и моделирования обратноходовых преобразователей обеспечивает достижение высоких энергетических показателей при сохранении компактных размеров и упрощенной топологии схемы. Полученные результаты могут быть использованы при проектировании преобразователей малой и средней мощности.

Перспективным направлением дальнейших исследований является повышение эффективности преобразователя за счет обеспечения мягкого переключения полупроводниковых компонентов и снижения динамических потерь во всем диапазоне работы преобразователя.

Литература

1. IEEE Standard for Ethernet/ URL: https://standards.ieee.org/ieee/802.3-2022_Cor_1/11529 свободный (дата обращения: 04.10.2025).
2. Ромащенко М.А., Гудков А.В. Современные подходы к диагностике и ремонту маломощных импульсных источников питания // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2021. Т. 17. № 6. С. 81–86.
3. Simulation of flyback converter for continuous and discontinuous mode of operation / I. Khan [et al.] // IEEE International Conference on MOOC, Innovation and Technology in Education (MITE), Patiala, India, 2014, pp. 77–83.
4. Erickson R.W. Fundamentals of Power Electronics / Erickson R.W., Maksimovic D. Cham: Springer, 2020. 1084 p.
5. Макашов Д. Обратноходовый преобразователь/ URL: <https://bludger.narod.ru/smpps/Flyback-R01.pdf> свободный (дата обращения: 04.10.2025).
6. RM8-I URL: https://www.ferroxcube.com/upload/media/product/file/Pr_ds/RM8_I.pdf свободный (дата обращения: 04.10.2025).
7. 3C94 URL: <https://www.ferroxcube.com/upload/media/product/file/MDS/3c94.pdf> свободный (дата обращения: 04.10.2025).

Информация об авторах

Ромашенко Михаил Александрович – д-р техн. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: kpr@vorstu.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5629-6056>

Веретенников Николай Юрьевич – младший научный сотрудник, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: Veretennikoff.nik@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6746-2371>

Гудков Андрей Владимирович – соискатель, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: andrej23vm@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-7285-5016>

**FLYBACK VOLTAGE CONVERTER FOR POWER SUPPLY
OF MOVING OBJECTS VIA THIN WIRE LINES**

M.A. Romashchenko, N.Yu. Veretennikov, A.V. Gudkov

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract: this paper examines the problem of transmitting approximately 60 W of power from a battery source using a thin conductor to power moving objects. We conducted an analysis of line losses, demonstrating that increasing the supply voltage is an effective way to reduce them. We propose a pulsed DC-DC converter implemented using a flyback converter topology for this purpose. We show that the key element of such a converter is a magnetic component (a high-frequency transformer), and its parameters are calculated to ensure operation in the current limit mode. To validate the analysis and the selected operating modes of the converter, we synthesized a model in the LTspice circuit design environment. We give the oscillograms of the currents in the primary and secondary windings of the transformer, as well as oscillograms of the voltages on the power transistor and rectifier diode, obtained from the simulation results. We found that the proposed solution allows for increasing line voltage to 110 V, thereby reducing currents and power losses over line lengths of up to 400 m. The results confirm the accuracy of the calculations and demonstrate the effectiveness of flyback converters in power supply systems for mobile objects using thin wire lines

Key words: flyback converter, moving objects, switching power supplies, thin wire line

Acknowledgments: the work was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (project no. FZGM-2025-0002)

References

1. IEEE Standard for Ethernet, available at: https://standards.ieee.org/ieee/802.3-2022_Cor_1/11529 free (date of access: 04.10.2025).
2. Romashchenko M.A., Gudkov A.V. "Modern approaches to diagnostics and repair of low-power switching power supplies", Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta), 2021, vol. 17, no. 6, pp. 81-86.
3. Khan I. et al. "Simulation of flyback converter for continuous and discontinuous mode of operation", *IEEE International Conference on MOOC, Innovation and Technology in Education (MITE)*, Patiala, India, 2014, pp. 77-83.
4. Erickson R.W., Maksimovic D. "Fundamentals of power electronics", Cham: Springer, 202, 1084 p.
5. Makashov D. "Flyback converter", available at: <https://bludger.narod.ru/smpps/Flyback-R01.pdf> free (date of access: 04.10.2025).
6. RM8-I, available at: https://www.ferroxcube.com/upload/media/product/file/Pr_ds/RM8_I.pdf free (date of access: 04.10.2025).
7. 3C94, available at: <https://www.ferroxcube.com/upload/media/product/file/MDS/3c94.pdf> free (date of access: 04.10.2025).

Submitted 20.09.2025; revised 11.11.2025

Information about the authors

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

Nikolay Yu. Veretennikov, Junior Researcher, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: Veretennikoff.nik@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6746-2371>

Andrey V. Gudkov, PhD applicant, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: andrej23 vm@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-7285-5016>

МЕТОДИКА АВТОМАТИЧЕСКОГО ОПТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

О.Н. Чирков, В.К. Здоровцов, М.Н. Тамбовцев

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

Аннотация: представлена разработка системы автоматического оптического контроля (АОК) печатных плат (ПП) радиотехнических устройств на основе глубоких нейронных сетей. Рассмотрены характерные дефекты ПП, возникающие на этапах фотолитографии, травления и металлизации, и предложены методы их автоматического обнаружения и классификации. Показано, что использование архитектуры YOLOv8 (модель компьютерного зрения с сегментацией объектов на изображениях) в сочетании с алгоритмами предварительной обработки изображений позволяет достичь высокой точности детектирования дефектов при времени обработки одного кадра менее 250 мс. Исследованы и внедрены стратегии ускорения инференса с использованием фреймворков OpenVINO и DeepSparse (открытые наборы инструментов для разработки приложений компьютерного зрения и искусственного интеллекта), обеспечивающие увеличение производительности в 4–5 и 11 раз соответственно. Разработана отказоустойчивая распределённая инфраструктура на базе Apache Kafka (система обмена сообщениями между серверными приложениями, работающая в режиме реального времени) и PostgreSQL (объектно-реляционная система управления базами данных (СУБД) с открытым исходным кодом), обеспечивающая параллельную обработку данных и целостность результатов. Реализован интерфейс взаимодействия с оператором для уведомления о статусе обработки и обновлении моделей. Экспериментальная оценка системы показала точность до 94 % и полноту до 89 %. Применение предложенной методики позволяет повысить выход годной продукции, сократить время контроля и снизить эксплуатационные затраты в производстве печатных плат радиотехнических устройств

Ключевые слова: автоматический оптический контроль, печатные платы, дефекты, нейронные сети, компьютерное зрение, телевизионные системы технического зрения

Благодарности: работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № FZGM-2025-0002)

Введение

Современное производство печатных плат (ПП) для радиотехнических устройств предъявляет высокие требования к качеству и надёжности межсоединений, что обусловлено миниатюризацией элементов и увеличением плотности монтажа [1–3]. Нарушения целостности проводников, межслойные короткие замыкания, нарушения изоляции и дефекты металлизации могут приводить к отказам аппаратуры в условиях электромагнитных помех и вибрационных нагрузок [4]. Автоматический оптический контроль (АОК) является ключевым этапом технологического процесса, обеспечивающим выявление дефектов на ранних стадиях производства [5].

Традиционные методы АОК, основанные на алгоритмах обработки изображений (пороговая сегментация, анализ текстур, выделение контуров), обладают ограниченной эффективностью при анализе сложных многослойных структур с вариативным фоном и наличием те-

ней [6]. В последние годы активно развиваются методы машинного обучения, в частности, свёрточные нейронные сети (CNN), которые демонстрируют высокую точность в задачах детектирования дефектов на изображениях [7, 8]. Однако их применение для контроля ПП связано с необходимостью обработки изображений высокого разрешения в реальном времени, что требует оптимизации вычислительных алгоритмов.

В данной работе предлагается методика автоматического оптического контроля качества изготовления ПП с использованием глубокой нейронной сети YOLOv8, оптимизированной для работы в составе распределённой системы с применением технологий OpenVINO и DeepSparse. Особое внимание уделено обеспечению отказоустойчивости, масштабируемости и интеграции с системами управления производством.

Постановка задачи

Каждый производственный дефект печатной платы, от технологического нарушения до применения материалов ненадлежащего каче-

ства, потенциально ведет к отказу конечного радиоустройства. Контроль качества изготовления печатных плат, включая классификацию допустимых дефектов по их типам, геометрическим параметрам и критичности, регламентирован - ГОСТ Р53432-2009.

Выделим следующих типов дефектов:

1. Дефекты травления (рис. 1):

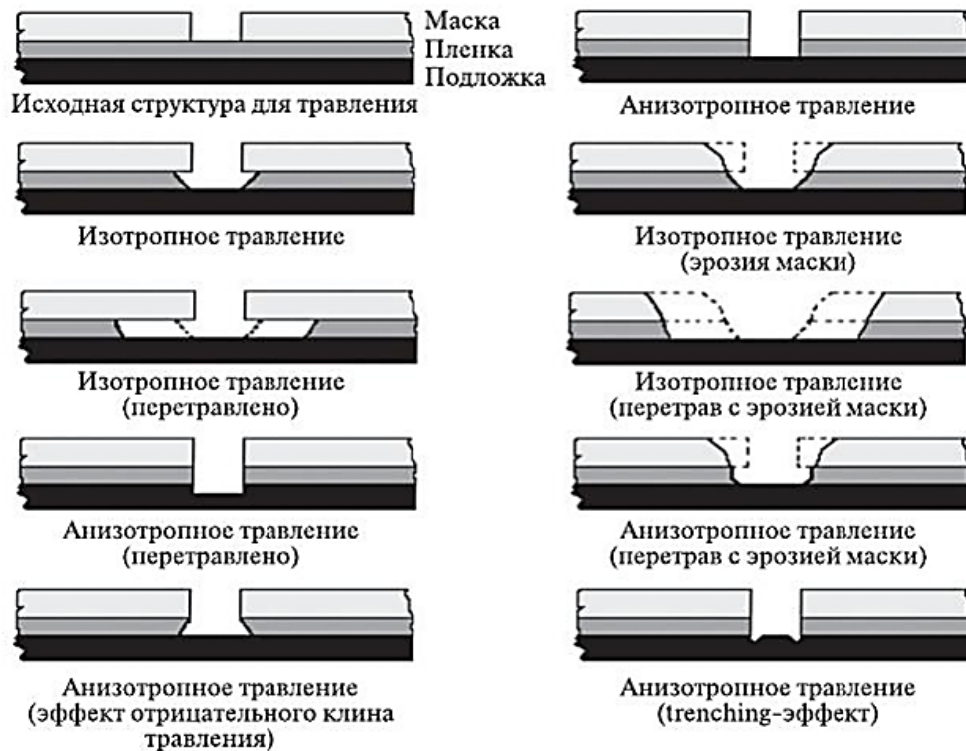


Рис. 1. Дефекты травления

2. Дефекты паяльной маски:

- Непрокрасы: отсутствие маски может привести к коротким замыканиям при пайке.
- Наплывы маски: попадание маски на контактные площадки.
- Отслоение маски: нарушение адгезии маски к основе, ведущее к её отслоению в процессе эксплуатации.

3. Дефекты металлизации:

- недостаточная толщина гальванического покрытия: снижает проводимость и механическую прочность переходных отверстий.
- пористость покрытия: приводит к окислению и коррозии контактов.
- отслоение металлизации: нарушение связи между слоями меди в отверстиях, приводящее к обрыву цепи.

4. Дефекты переходных отверстий:

- Недотрав: неполное удаление меди с незащищённых участков, приводящее к коротким замыканиям между проводниками.

- Перетрав: чрезмерное травление, истончающее проводники, может привести к обрыву цепи или изменению волнового сопротивления.

- Подтрав под маску: травление меди под защитной маской, что ослабляет адгезию и может вызвать отслоение маски.

- заполнение отверстий при пайке: закупорка отверстий припоем, препятствующая монтажу компонентов.

- отслоение покрытия в отверстиях: нарушение целостности металлизации ведет к обрыву межслойных соединений.

5. Дефекты пайки:

- Холодная пайка: недостаточный прогрев, приводящий к ненадёжному контакту.
- Перегрев: разрушение паяного соединения или повреждение компонентов.
- Пустоты в паяных соединениях снижающие механическую прочность и теплопроводность.

6. Механические повреждения (рис. 2):

- Сколы и трещины: нарушение целостности диэлектрика или проводников.
- Деформация платы: искривление ПП, затрудняющее монтаж в корпус.

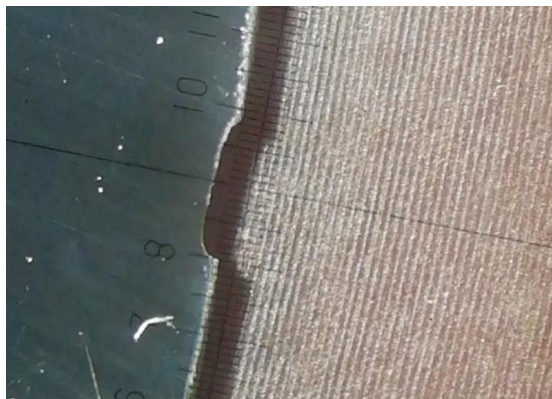


Рис. 2. Дефект скол

Оптические проявления дефектов характеризуются изменением яркости, текстуры и геометрии элементов на изображении, получаемом с помощью телевизионных систем технического зрения. Пример дефекта «обрыв проводника» представлен на рис. 3.

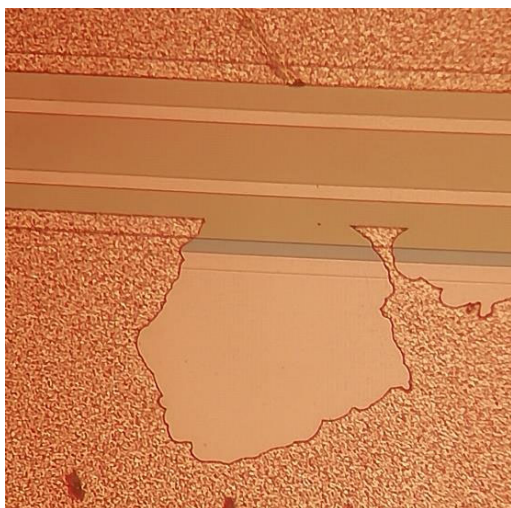


Рис. 3. Пример дефекта «обрыв проводника» на оптическом снимке

Методы контроля качества печатных плат

Для выявления перечисленных дефектов применяются различные методы контроля, которые можно разделить на контактные и бесконтактные.

1. Визуальный контроль (рис. 4). Представляет собой ручной осмотр. Используется лупа или микроскоп для выявления явных дефектов (трещины, сколы, непрокрасы). Недостаток — субъективность и низкая скорость.

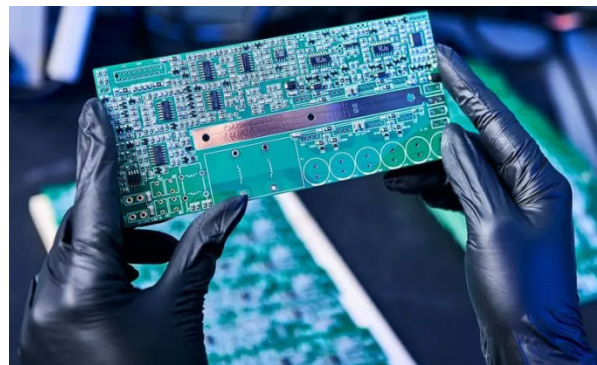


Рис. 4. Визуальный контроль

2. Автоматический оптический контроль (АОК). Система захвата изображения ПП с помощью камер высокого разрешения и сравнивает их с эталонным изображением или САД-моделью. Обнаруживаемые дефекты:

- Обрывы и короткие замыкания проводников.
- Дефекты паяльной маски (непрокрасы, наплывы).
- Положение и наличие компонентов (для собранных плат).
- Дефекты травления (неотравы, перетравы).

Преимущества: высокая скорость и объективность; возможность интеграции в производственную линию; обнаружение дефектов на ранних стадиях.

3. Оптический контроль с помощью 3D-сканеров. Позволяет оценивать высоту компонентов, паяльных паст, выявлять непропаи.

Применение: Контроль качества паяных соединений после монтажа компонентов.

4. Рентгеновский контроль. Просвечивание платы рентгеновскими лучами для выявления скрытых дефектов.

Обнаруживаемые дефекты:

- Пустоты в паяных соединениях.
- Короткие замыкания под компонентами.
- Качество переходных отверстий.

5. Контроль импеданса. Проверка волнового сопротивления проводников, критичного для высокочастотных устройств. Используются специализированные измерители импеданса (TDR-анализаторы).

6. Электрический контроль. Проверка целостности цепей и отсутствия коротких замыканий. На специализированных стендах проводится массовая проверка собранных плат на соответствие электрическим параметрам.

Оптические исследования, в частности рассматриваемый автоматический оптический

контроль (АОК), являются одним из наиболее эффективных и распространённых методов контроля печатных плат, особенно на этапах изготовления основы и монтажа компонентов.

Ключевые преимущества оптических методов:

- Высокая скорость и производительность. Современные АОК-системы способны проверять сотни плат в час.

- Объективность и воспроизводимость. Исключается человеческий фактор, все решения принимаются на основе алгоритмов.

- Раннее обнаружение дефектов. Позволяют выявить проблемы на начальных этапах производства, минимизируя стоимость исправления.

- Неразрушающий контроль. Платы не повреждаются в процессе проверки.

- Гибкость и адаптивность. Системы можно быстро перенастраивать на новые типы плат.

Современные тенденции в оптическом контроле качества ПП

Применение искусственного интеллекта (ИИ) и нейронных сетей. Алгоритмы глубокого обучения (такие как YOLO, CNN) позволяют повысить точность детектирования сложных и малоразмерных дефектов, а также снизить количество ложных срабатываний.

Использование гиперспектральных камер позволяет анализировать не только геометрию, но и химический состав поверхностей, выявляя загрязнения и нарушения в материалах.

Интеграция с Industry 4.0. АОК-системы становятся частью «умной» фабрики, обмениваясь данными с MES-системами и оборудованием для корректировки технологического процесса в реальном времени.

Ограничения оптических методов:

- Неспособность выявлять скрытые дефекты (например, внутри слоёв многослойных печатных плат (МПП) или под компонентами). Для этого требуется рентгеновский контроль.

- Зависимость от условий освещения и чистоты поверхности платы.

Методика анализа изображений дефектов

Основной инструмент анализа изображений дефектов — это цифровые методы обработки сигналов и изображений. Ключевыми методами являются:

1) Фильтрация изображений — применяется для удаления шума и выделения контуров дефектов.

2) Выделение признаков — выделение особых точек, линий и областей, характеризующих структуру поверхности.

3) Классификация дефектов — разделение дефектов на классы согласно их физическим характеристикам.

Примеры цифровых фильтров:

- Среднеарифметический фильтр — сглаживает изображение, уменьшая шум.

- Медианный фильтр — устраняет выбросы, сохраняя границы деталей.

- Градиентный фильтр — выделяет края и особенности изображения.

Методы сегментации позволяют разделить изображение на отдельные регионы, соответствующие областям с различными характеристиками. Наиболее распространенные методы сегментирования:

- Алгоритм порогового разделения — простое бинарное преобразование изображения.

- Метод кластеризации — группировка пикселей по сходству характеристик.

- Вейвлет-анализ — масштабируемый анализ частотных составляющих изображения.

Критерии оценки качества:

1) Точность — доля правильно обнаруженных дефектов среди всех обнаруженных объектов.

2) Полнота — доля обнаруженных дефектов относительно общего числа дефектов в выборке.

3) F-мера — гармоническое среднее между точностью и полнотой.

4) mAP (mean Average Precision) — интегральная метрика качества детектирования.

5) Скорость работы — время, затрачиваемое на обработку 1 кадра.

Методика работы системы автоматического оптического контроля

Методику работы системы автоматического оптического контроля качества изготовления печатных плат можно разделить на три крупных этапа: первичная конфигурация, обучение, обработка (рис. 5).

Для эффективности работы системы, чтобы проще находить и исправлять ошибки параллельно с выполнением методики будут вестись два журнала логирования, Первый журнал будет содержать информацию о работе

системы, а второй журнал будет содержать информацию о работе пользовательского интерфейса.

Рассмотрим каждый из этапов:

1. Конфигурация - это этап на котором происходит первоначальное определение па-

раметров работы системы. Может производиться с помощью файла в рабочей директории, либо через аргументы командной строки при запуске.

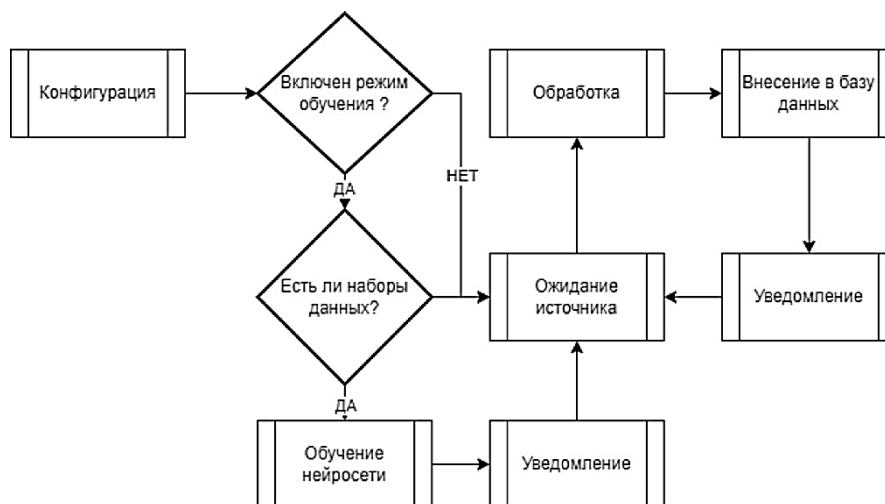


Рис. 5. Методика работы системы

Конфигурация с помощью файла заключается в проверке существования файла, чтении его содержимого и дальнейшего разбора структуры в соответствии с правилами построения файлов конфигурации.

Конфигурация через аргументы командной строки заключается в том, что требуемые параметры система получает не из файла в рабочей директории, а с помощью задания параметров запуска программы.

2. Обучение - это этап на котором происходит чтение наборов, аннотированных данных, их проверка, создание статистических данных о наборе данных, аугментация, fine-tuning.

Аугментация используется для искусственного увеличения набора данных. За счет применения различных геометрических трансформаций и шумов. Данная операция позволяет снизить затраты на аннотацию дополнительных экземпляров.

3. Обработка - использование полученных в процессе обучения весов для анализа.

Обнаружение дефектов

Модуль детектирования принимает на вход ссылку на модель и данные из Kafka. При отсутствии оптимизированной версии модели выполняется её конвертация с использованием OpenVINO или DeepSparse (открытые наборы

инструментов для разработки приложений компьютерного зрения и искусственного интеллекта). Результаты детектирования (координаты дефектов, метки класса, уверенность) сохраняются в базу данных и сопровождаются аннотированными изображениями.

После загрузки набор данных ставится в очередь на обучение. Очередь реализована через Apache Kafka. На выходе мы получаем набор данных из метрик и тестовых изображений.

Журналирование системы разделено на 3 уровня: ошибка, информация и отладка. В таблицы записываются уровни ошибка и информация. Отладочная информация выводится в консоль на сервере. Для определения в каком модуле произошла ошибка ведется учет данных от кого поступила информация о событии.

Моделирование

По результатам моделирования (рис. 6-7) получены следующие ключевые результаты экспериментов:

Средняя скорость обработки: 420 мс/кадр.

Скорость с использованием OpenVINO: 95 мс/кадр (ускорение в ~4.4 раза).

Скорость с использованием DeepSparse: 38 мс/кадр (ускорение в ~11 раз).

Точность: до 94 %.

Полнота: до 89 %.

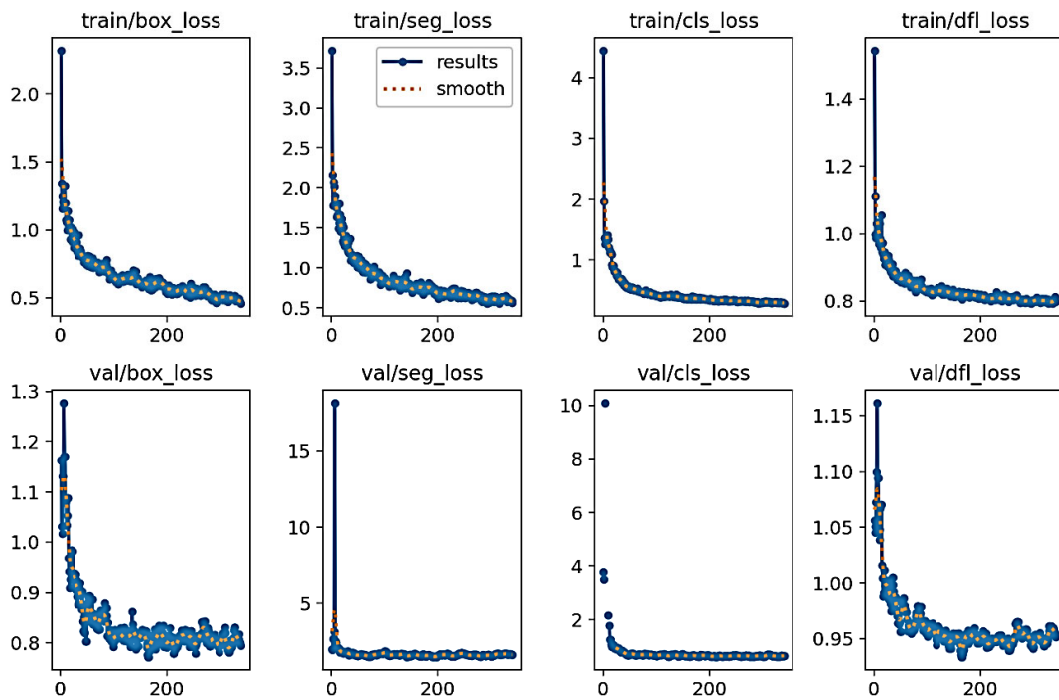


Рис. 6. Результаты анализа потерь

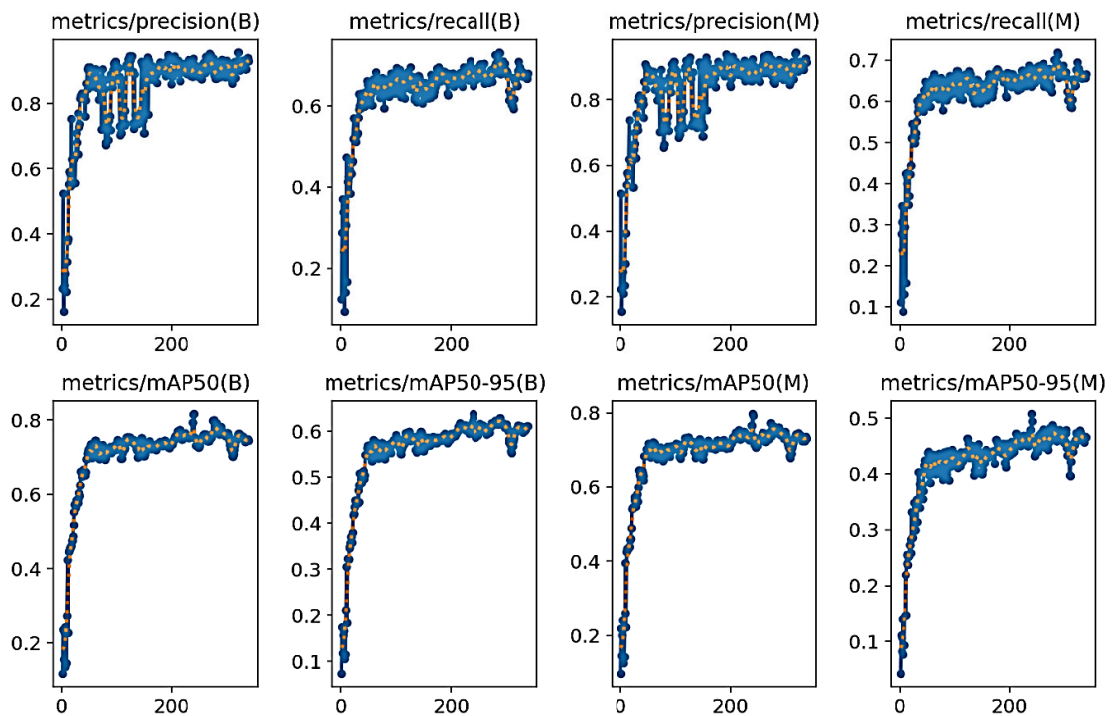


Рис. 7. Результаты анализа метрик

Заключение

Приведем основные научные результаты работы.

1. Разработаны методики предварительной обработки изображений и обнаружения дефектов на ПП с использованием архитекту-

ры YOLOv8. Показано, что применение глубокого обучения позволяет достичь высокой точности и чувствительности в обнаружении дефектов, обеспечивая обработку кадров менее чем за 250 мс/кадр.

2. Исследованы и применены две стратегии оптимизации производительности нейрон-

ных сетей: библиотека OpenVINO и библиотека Deersparse. Использование OpenVINO ускоряет обработку изображений в среднем в 4-5 раз, тогда как Deersparse увеличивает скорость распознавания в 11 раз, но с возможным снижением точности.

3. Создание инфраструктуры отказоустойчивости и параллельной обработки данных. Разработана архитектура распределённой системы на основе Apache Kafka для обеспечения отказоустойчивости и масштабируемости.

4. Эффективная работа с большими наборами данных. Спроектирована реляционная база данных PostgreSQL для хранения результатов обработки, настроек системы и истории событий.

5. Автоматизация процедуры обновления и тестирования моделей. Создана процедура автоматической загрузки и обучения моделей на размеченных наборах данных с последующим тестированием и сохранением лучших результатов. Включает использование механизма аугментации для искусственно увеличения набора данных, повышая общее качество распознавания.

6. Организация удобного интерфейса и уведомления пользователей.

7. Комплексная оценка качества работы системы: Продемонстрировано, что созданная система показывает высокую точность (94 %) и полноту (89 %), позволяя эффективно выявлять дефекты при изготовлении печатных плат. В зависимости от выбранного метода оптимизации средняя скорость обработки кадров варьируется от 15 до 450 мс.

Таким образом, полученные результаты показывают, что предложенная методика оптического контроля является высокоэффек-

тивной и экономически выгодной для промышленного применения.

Литература

1. Оптимизации оценки качества полупроводниковых пластин с помощью нейротехнологий CNN / О.Н. Чирков, А.Б. Антиликаторов, К.М. Шкаровский, М.Н. Тамбовцев // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2025. Т. 21. № 1. С. 81-87.
2. Чирков О.Н., Хрипунков А.П. Основные принципы разработки топологии при проектировании печатных плат с высокоскоростными цифровыми интерфейсами // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2025. Т. 21. № 2. С. 161-168.
3. Чирков О.Н., Костюков А.С., Хрипунков А.П. Методика проектирования печатных плат для работы с высокоскоростными цифровыми интерфейсами // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2025. Т. 21. № 3. С. 163-173.
4. Wang X., Liu Y., Zhang H. Automatic defect detection for silicon wafer surface using convolutional neural networks // IEEE Transactions on Industrial Informatics. 2018. 14(1). Pp. 354-363.
5. Liu Z., Chen J., Liang C. Efficient deep learning-based defect detection in semiconductor manufacturing // Journal of Manufacturing Systems. 2020. Vol. 56. pp. 155-166.
6. Kim D., Park K., Choi W. Deep learning based image segmentation for wafer inspection // Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation. 2019. Pp. 5421-5426.
7. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024666477 Российская Федерация. Программа контроля дефектов полупроводниковых пластин с использованием компьютерного зрения и алгоритмов глубокого машинного обучения : № 2024665362 : заявл. 04.07.2024 : опубл. 15.07.2024 / О.Н. Чирков, А.А. Пирогов, М.Н. Тамбовцев ; заявитель ФГБОУ «Воронежский государственный технический университет».
8. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024684516 Российская Федерация. Программа контроля дефектов полупроводниковых пластин в фотолитографии при технологии изготовления 350 нм с использованием CNN нейросети: № 2024683496: заявл. 10.10.2024: опубл. 17.10.2024 / О.Н. Чирков, М.Н. Тамбовцев; заявитель ФГБОУ «Воронежский государственный технический университет».

Поступила 16.09.2025; принята к публикации 11.11.2025

Информация об авторах

Чирков Олег Николаевич – старший преподаватель, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: chir_oleg@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2250-2100>
Здоровцов Вадим Константинович – студент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: kivr@vorstu.ru
Тамбовцев Максим Николаевич – студент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: kivr@vorstu.ru

TECHNIQUE OF AUTOMATIC OPTICAL QUALITY CONTROL OF PRINTED CIRCUIT BOARDS USING NEURAL NETWORKS

O.N. Chirkov, V.K. Zdorovtsov, M.N. Tambovtsev

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract: the work is devoted to the development of an automatic optical control system for printed circuit boards (PCBs) of radio engineering devices based on deep neural networks. We considered the characteristic defects of PP that occur at the stages of photolithography, etching and metallization, and proposed methods for their automatic detection and classification. We show that using the YOLOv8 architecture (a computer vision model with segmentation of objects on images) in combination with image preprocessing algorithms makes it possible to achieve high accuracy in detecting defects with a processing time of less than 250 ms per frame. We researched and implemented strategies for accelerating inference using the OpenVINO and DeepSparse frameworks (open toolkits for developing computer vision and artificial intelligence applications), which increase productivity by 4-5 and 11 times, respectively. We developed a fault-tolerant distributed infrastructure based on Apache Kafka (a real-time messaging system between server applications) and PostgreSQL (an open source object-relational database management system), providing parallel data processing and integrity of results. We implemented the interface of interaction with the operator for notification of the status of processing and updating of models. An experimental evaluation of the system showed accuracy of up to 94 % and completeness of up to 89%. The application of the proposed methodology makes it possible to increase the yield of usable products, reduce control time and reduce operating costs in the production of printed circuit boards for radio engineering devices

Key words: automatic optical control, printed circuit boards, defects, neural networks, computer vision, television vision systems

Acknowledgments: this work was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (project no. FZGM-2025-0002)

References

1. Chirkov O.N., Antilikatorov A.B., Shkarovskiy K.M., Tambovtsev M.N. "Optimization of the quality assessment of semiconductor wafers using CNN neurotechnologies", *Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2025, vol. 21, no. 1, pp. 81-87.
2. Chirkov O.N., Khrpunkov A.P. "Basic principles of topology development in the design of printed circuit boards with high-speed digital interfaces", *Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2025, vol. 21, no. 2, pp. 161-168.
3. Chirkov O.N., Kostyukov A.S., Khrinkov A.P. "Design methodology of printed circuit boards for working with high-speed digital interfaces", *Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2025, vol. 21, no. 3, pp. 163-173.
4. Wang X., Liu Y., Zhang H. "Automatic defect detection for silicon wafer surface using convolutional neural networks", *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2018, no. 14(1), pp. 354-363.
5. Liu Z., Chen J., Liang C. "Efficient deep learning-based defect detection in semiconductor manufacturing", *Journal of Manufacturing Systems*, 2020, no. 56, pp. 155-166.
6. Kim D., Park K., Choi W. "Deep learning based image segmentation for wafer inspection", *Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, 2019, pp. 5421-5426.
7. Chirkov O.N., Pirogov A.A., Tambovtsev M.N. "A program for defect control of semiconductor wafers using computer vision and deep Machine learning algorithms", Certificate of state registration of a computer program No. 2024666477 Russian Federation, no. 2024665362, application 07.04.2024, published 07.15.2024, applicant Voronezh State Technical University.
8. Chirkov O.N., Tambovtsev M.N. "The program for defect control of semiconductor wafers in photolithography with 350 nm manufacturing technology using CNN neural network", Certificate of state registration of a computer program no. 2024684516 Russian Federation, no. 2024683496: application 10.10.2024: published 17.10.2024, applicant Voronezh State Technical University.

Submitted 16.09.2025; revised 11.11.2025

Information about the authors

Oleg N. Chirkov, Assistant Professor, Voronezh State Technical University (84 20th Anniversary of October str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: chir_oleg@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2250-2100>

Vadim K. Zdorovtsov, student, Voronezh State Technical University (84 20th Anniversary of October str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: kivr@vorstu.ru

Maksim N. Tambovtsev, student, Voronezh State Technical University (84 20th Anniversary of October str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: kivr@vorstu.ru

Машиностроение и машиноведение

DOI 10.36622/1729-6501.2025.21.4.030
УДК 629.735.33

ОПТИМИЗАЦИЯ МАРШРУТА КЛЁПКИ ПАНЕЛЕЙ КРЫЛА МАЛОЙ ТОЛЩИНЫ

И.Н. Титов

Филиал Публичного акционерного общества «Авиационный комплекс им. С.В. Ильюшина» – ВАСО, г. Воронеж, Россия

Аннотация: рассматриваются аналитические и практические подходы к разработке последовательности клёпки панелей крыла малой толщины с целью повышения точности сборки и обеспечения требуемого радиального натяга в высокоресурсных соединениях с помощью заклёпок ОСТ 1 34012-76. Актуальность исследования обусловлена необходимостью минимизации остаточных деформаций и напряжений, которые могут возникнуть при клёпке тонкостенных конструкций авиационной техники (АТ), особенно в условиях ограниченного технологического пространства и высокой плотности заклёпочных рядов с созданием рационального напряжённо-деформированного состояния (НДС). Проанализированы рекомендации по существующим маршрутам клёпки и вариантам предварительной фиксации элементов, включая установку технологических болтов (ТБ) и другого временного крепежа. В работе предложен аналитический метод выбора оптимального маршрута клёпки, учитывающий расположение стрингеров, конфигурацию панели и особенности технологического оснащения. Рассмотрены различные схемы обработки стрингеров по сечениям, а также влияние типа технологического крепежа на стабильность геометрии сборки. Экспериментальная проверка на опытных панелях крыла показала, что применение обоснованной последовательности клёпки позволяет снизить трудоёмкость сборочного процесса на 30 – 40 %, обеспечить требуемый радиальный натяг в диапазоне 1 – 2 % и сохранить отклонения размеров в пределах допусков, установленных нормативно-технической документацией (НТД). Полученные результаты могут быть использованы при проектировании и организации серийного производства летательных аппаратов (ЛА)

Ключевые слова: маршрут клёпки, напряжённо-деформированное состояние, аналитический подход, радиальный натяг, деформация

Введение

При проектировании и производстве современных ЛА клёпанной конструкции, в частности при клёпке панелей крыла на автоматическом клёпальном оборудовании с помощью заклёпок по ОСТ 1 34012-76, существует ряд требований:

- отсутствие значительных деформаций, влияющих на последующий процесс сборки;
- обеспечение наименьших перестроений и переходов в процессе клёпки с целью снижения цикла автоматической клёпки;
- создание рационального НДС панелей, влияющего на долговечность конструкции [1].

Цель исследования: разработка такой последовательности клёпки, которая бы позволила выполнить перечисленные требования с минимальными затратами и большой эффективностью, с учётом требуемого радиального натяга, который лежит в пределах $1,5 \pm 0,5$ %.

Задачи исследования:

- анализ существующих вариантов последовательностей клёпки на примере нескольких

современных ЛА с учётом достижения требуемого радиального натяга в высокоресурсных заклёпочных соединениях;

- разработка маршрута клёпки аналитическим методом на одно из изделий при поставке на производство;

- выполнение клёпки панелей малой толщины с требуемым радиальным натягом на трёх комплектах с целью подтверждения качества и стабильности принятых решений.

Основным методом при создании маршрута клёпки использовалось аналитическое восприятие процесса и возможных влияний на НДС, в зависимости от той или иной последовательности обработки.

В условиях серийного производства до сих пор отсутствуют программные комплексы, которые бы позволяли выполнять необходимые расчёты с выдачей рекомендаций по созданию последовательности клёпки в зависимости от конструкции панелей крыла, требованиям по необходимому радиальному натягу. Процесс создания маршрутов клёпки ложится в обязанности технологов не только опытно-конструкторских бюро (ОКБ), но и технологов серийных предприятий.

Разработка маршрута клёпки панелей

До начала клёпки производилась предварительная установка технологического крепежа, преимущественно технологических болтов (ТБ). Расстояние было кратным шагу между заклёпок, но не более 600 мм (примерное расстояние между нервюрами). Исключения составляли зоны герметизации (зоны установки болтов и болт-заклёпок) и некоторые другие,

оговариваемые особо, например места дальнейшей фиксации при сборке.

При разработке маршрута клёпки на панели крыла учитывалось, что обработка должна выполняться последовательно с минимальными перестроениями по типоразмерам заклёпок, независимо от расположения в конструкции. Изменение диаметра и длины каждого типоразмера предусматривало клёпку за один переход с последующим перемещением к другому типоразмеру, как показано на рис. 1.

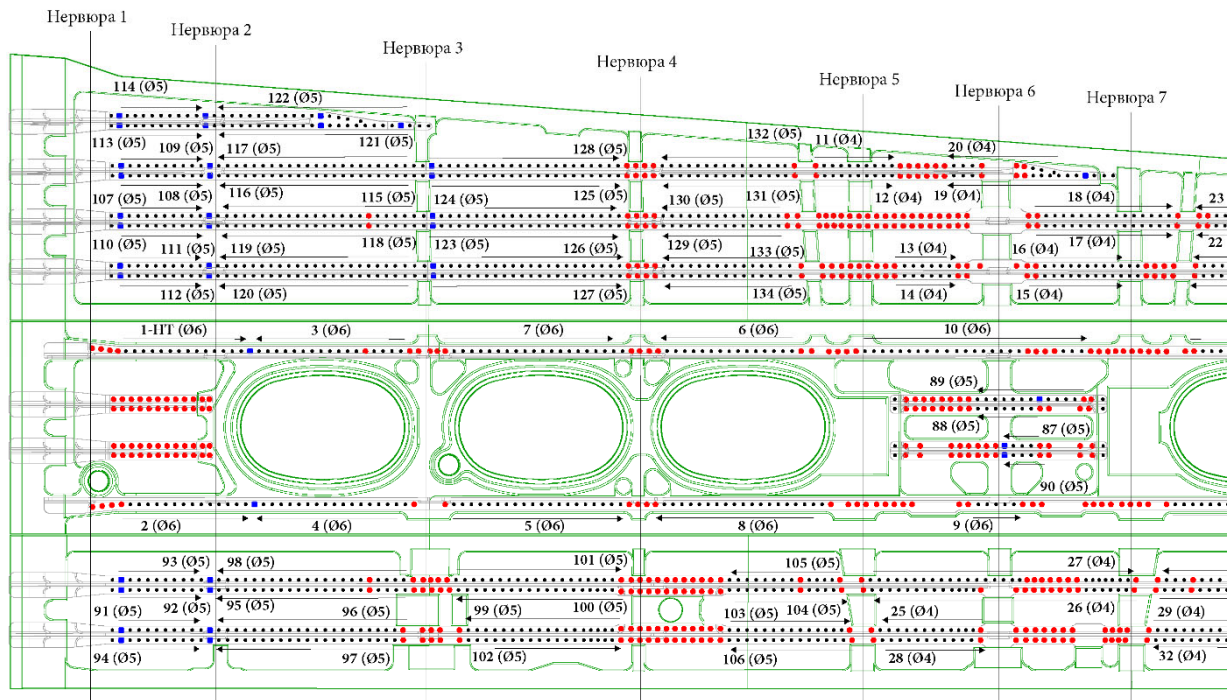


Рис. 1. Поэтапная клёпка каждого типоразмера

Известно несколько вариантов выполнения зон фиксации стрингера (ЗФС):

- на концах стрингеров по 6-10 предварительных заклёпок;
- установка ЗФС в середине клёпанной панели.
- установка ЗФС по одной штуке в каждую сторону от технологического крепежа [2].

В данном варианте маршрутов клёпки ЗФС не выполнялась, а использовался метод дополнительной установки технологического крепежа на концах стрингеров с последующей установкой болт-заклёпок. Такое решение также снижает количество разметочных работ под заклёпки в процессе автоматической клёпки. Схема применения дополнительного технологического крепежа показана на рис. 2.

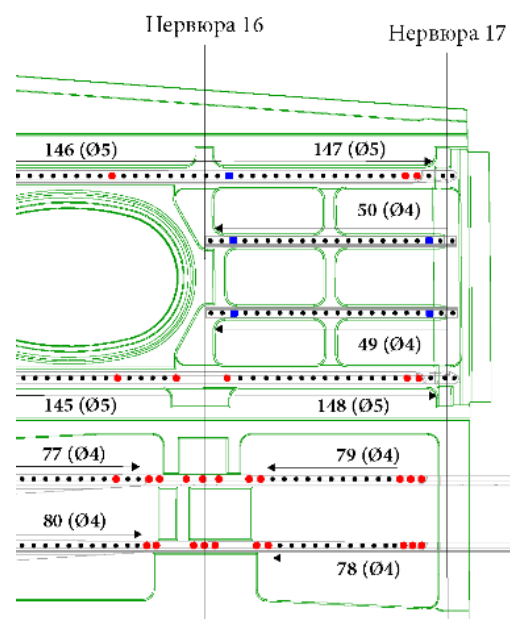


Рис. 2. Схема применения дополнительного технологического крепежа

Учитывая, что радиальный натяг не превышает 2 % в заклёпочном соединении, было сделано предположение, что установленных ТБ будет достаточно для того, чтобы пренебречь их податливостью на сдвиг.

Было рассмотрено два варианта конструкций применяемых стрингеров по сечению:

- уголкового типа;
- Т-образного типа.

П-образные цельные (фрезерованные) стрингера в конструкции панелей малой толщины не нашли применение.

Обработка швов стрингеров уголкового типа представляет собой участки с двухсторонним направлением в зависимости от последовательности и направления маршрута клёпки [3]. Данное решение показано на рис. 3.

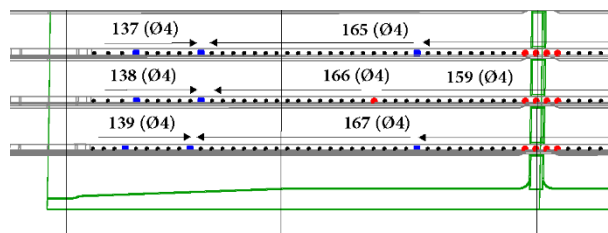


Рис. 3. Варианты для стрингеров уголкового типа

Т-образные стрингеры обрабатываются в одном симметричном направлении или навстречу друг другу, при этом зон перекрытия не выполнялось, что позволило сократить численность ТБ. Данный способ показан на рис. 4.

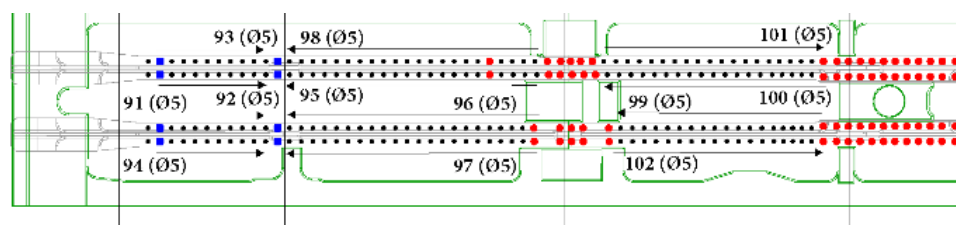


Рис. 4. Варианты для стрингеров Т-образного типа

Последовательность обработки панелей включает разные варианты направлений обработки, чтобы растягивающие и сжимающие напряжения не сводились в определённой точке.

Полученные результаты и их анализ после клёпки

В результате клёпки на первых трёх комплектах панелей крыла самолёта было получено, что действующие рекомендации нашли своё подтверждение.

Прилегание панелей крыла до клёпки и после клёпки соответствует необходимым значениям согласно действующей НТД. После клёпки в любом контрольном сечении панели отклонение от рубильников приспособления не превышало 0,5 мм без приложения допускаемой нагрузки, что укладывается в допуск, который равен 0,7 мм для панелей одинарной кривизны.

Трудоёмкость контроля в процессе производства снизилась ориентировочно не менее чем на 30% за счёт отсутствия необходимости приложения нагрузки по сечениям.

Расчёт трудоёмкости притягивания панелей за счёт деформации не был произведён

ввиду отсутствия необходимости выполнения данной работы.

Цикл автоматической клёпки панелей крыла по сравнению с базовыми расчётами за счёт снижения количества ТБ, перемещений и установки дополнительных ЗФС уменьшился ориентировочно на 40 – 50 %.

Заключение

В результате проведённых исследований и опытной реализации предложенных маршрутов клёпки удалось достичь снижения трудоёмкости процессов сборки тонкостенных панелей крыла на 30 – 40 %, уменьшить необходимость применения дополнительной нагрузки по сечению и обеспечить соответствие полученных соединений нормативным требованиям. Практическая апробация показала, что последовательность клёпки с минимизацией переходов по типоразмерам позволяет сократить цикл сборки. Полученные результаты могут быть использованы при организации производства АТ и разработке регламентирующей документации.

Перспективой дальнейших исследований является автоматизация выбора оптимального маршрута клёпки с использованием программного моделирования НДС [4].

Литература

1. Повышение эффективности сборки панелей при маршрутах клёпки швов с зонами фиксации стрингеров / А.Ф. Макаров, Ю.В. Маслов, В.Ф. Громов, О.В. Строгова. // *Авиационная промышленность*. 1995. № 9. С. 7-11.
2. Вялов А.В. Автоматизация технологического проектирования в авиастроении: учеб. пособие / А.В. Вялов. Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВПО «КнАГТУ», 2014. 171 с.

3. Олейников А.И., Бормотин К.С. Моделирование процесса клёпки панели // *Дальневосточный математический журнал*. 2013. Т. 13. № 1. С. 102-106.

4. Лысенко Ю.Д., В.А. Звягинцев В.А. Механизация и автоматизация сборочно-клёпальных работ на базе машин импульсного действия: учеб. пособие / Ю.Д. Лысенко, В.А. Звягинцев. Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2007. 76 с.

Поступила 11.08.2025; принята к публикации 06.10.2025

Информация об авторах

Титов Игорь Николаевич – ведущий инженер-технолог, филиал Публичного акционерного общества «Авиационный комплекс им. С.В. Ильюшина» – ВАСО (394029, Россия, г. Воронеж, ул. Циолковского, д. 27), тел.: +7 (952)557-01-73, e-mail: titovin@internet.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-8340-8160>.

OPTIMIZATION OF THE RIVETING ROUTE FOR THIN WING PANELS

I.N. Titov

Branch of the public joint-stock company «Aviation complex named after S.V. Ilyushin» – VASO, Voronezh, Russia

Abstract: the article examines analytical and practical approaches to developing a riveting sequence for thin wing panels in order to improve assembly accuracy and ensure the required radial tension in high-resource joints using rivets OST 1-34012-76. The relevance of the study is due to the need to minimize residual deformations and stresses that may arise during riveting of thin-walled structures of aircraft equipment (AE), especially in conditions of limited technological space and high density of rivet rows with the creation of a rational stress-strain state (SSS). The article analyzes recommendations for existing riveting routes and options for preliminary fixation of elements, including the installation of process bolts and other temporary fasteners. The paper proposes an analytical method for selecting the location of stringers, panel configuration and features of the process equipment. Various schemes for processing stringers by sections, as well as the influence of the type of the type of process fasteners on the stability of the assembly geometry are considered. Experimental testing on the test wing panels showed that the use of a justified riveting sequence allows reducing the energy intensity of the assembly process by 30 – 40 %, ensuring the required radial interference of 1 – 2 %, respectively and maintaining dimensions within the tolerances established in the normative and technical documentation. The results obtained can be used in the design and organization of serial production of aircraft

Key words: riveting route, stress-strain state, analytical approach, radial tension, deformation

References

1. Makarov A.F., Maslov Yu.V., Gromov V.F., Strogova O.V. “Increase in efficiency of panel assembly by joint riveting routes with stringer locking areas”, *Aviation Industry (Aviatsionnaya promyshlennost')*, 1995, no. 9, pp. 7-11.
2. Vyalov A.V. “Avtomayion of process design in aircraft manufacturing” (“Avtomatizatsiya tekhnologicheskogo projektirovaniya v aviastroenii”), Komsomolsk-on-Amur: KnAGTU, 2014, 171 p.
3. Oleynikov A.I., Bormotin K.S. “Modeling of the panel-riveting process”, *Far Eastern Mathematical Journal (Dal'nevostochnyy matematicheskiy zhurnal)*, 2013, vol. 13, no. 1, pp. 102-106.
4. Lysenko Yu.D., Zvyagintsev V.A. “Mechanization and automation of assembly and riveting operation based on pulse-action machines” (“Mekhanizatsiya i avtomatizatsiya sborochno-klopal'nykh rabot na baze ma-shin impul'snogo deystviya”), Samara State Aerospace University, 2007, 76 p.

Submitted 11.08.2025; revised 06.10.2025

Information about the author

Igor' N. Titov, leading engineer-technologist, branch of the public joint-stock company «Aviation complex named after S.V. Ilyushin» – VASO (27 Tsiolkovskogo str., Voronezh 394029, Russia), tel.: +7 (952)557-01-73, e-mail: titovin@internet.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-8340-8160>

ПОСТРОЕНИЕ МОДЕЛИ ИНТЕРФЕРЕНЦИИ ПОВЕРХНОСТЕЙ РЕЗАНИЯ, ОБРАЗОВАННЫХ ЗУБЬЯМИ ОХВАТЫВАЮЩЕЙ ФРЕЗЫ С КОНСТРУКТИВНОЙ РАДИАЛЬНОЙ ПОДАЧЕЙ В ПРОЦЕССЕ ФРЕЗЕРОВАНИЯ РК-ПРОФИЛЬНЫХ ВАЛОВ

В.В. Куц¹, О.Н. Кириллов², А.Н. Кальченко¹

¹Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Россия

²Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

Аннотация: решается актуальная задача повышения эффективности обработки РК-профильных валов путем применения перспективной схемы охватывающего фрезерования инструментом с конструктивной радиальной подачей. Основным предметом исследования является явление интерференции (взаимного пересечения) поверхностей резания, формируемых соседними зубьями фрезы, которое непосредственно влияет на нагрузку и износ инструмента. С целью анализа данного явления разработана комплексная математическая модель, позволяющая точно определить моменты входа и выхода каждого зуба в материал заготовки, а следовательно, и продолжительность его контакта с материалом. Модель основана на параметрическом описании траектории движения режущих кромок в системе координат неподвижной заготовки с учетом кинематической связи вращения фрезы и вала, а также радиальной подачи. Результаты компьютерного моделирования наглядно демонстрируют неравномерность распределения времени резания по зубьям фрезы. Установлено, что максимальное время резания характерно для зубьев, формирующих впадину профиля (вблизи $\varphi_i = 0$), в то время как зубья, обрабатывающие выступ ($\varphi_i = \pi$), имеют минимальное время контакта. Выявленная асимметрия нагрузки является критически важной информацией для последующего анализа кинематических углов, геометрии срезаемого слоя и прогнозирования износа, что в конечном итоге позволит оптимизировать конструкцию инструмента и режимы резания для повышения стойкости и производительности процесса

Ключевые слова: РК-профильный вал, охватывающая фреза, интерференция поверхностей резания, время резания, математическое моделирование, формообразование

Введение

Замена традиционных шлицевых и шпоночных соединений на так называемые профильные соединения с целью повышения их эксплуатационных характеристик сталкивается, особенно в условия серийного и крупносерийного производства, с рядом технологических проблем, связанных либо высокой стоимостью, либо с низкой производительностью применяемого оборудования [1]. Одним из направлений решения вышеуказанной проблемы является применение воспроизводительных схем формообразования [2], с применением, например фасонного инструмента [3, 4] или инструмента с конструктивной подачей протяжкой или фрезой [5-7]. Основным недостатком применения фасонного инструмента и фрез с конструктивной подачей является то, что увеличение точности обработки требует значительного увеличения габаритных размеров инструмента. Это является следствием большой разницы кривизны производящей поверхности инструмента в направлении главного движения и поверхности обрабатываемого вала в направлении подачи. В патенте [8] для частичного устранения данного недостатка был пред-

ложен способ фрезерования поверхности РК-профильного вала охватывающей фрезой с конструктивной радиальной подачей, где формообразование вала осуществлялось за один оборот фрезы и вала. Дальнейшим развитием этого способа стал способ охватывающего фрезерования [9, 10], где фреза за один оборот формирует лишь одну грань РК-профиля, и для формирования полного профиля фрезе необходимо выполнить число оборотов, кратное числу граней обрабатываемого профиля. Это позволило уменьшить габариты инструмента при достижении требуемой точности обработки. На рис. 1 показана схема обработки в соответствии с этим способом.

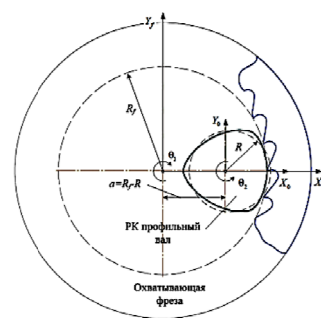


Рис. 1. Схема формообразования РК-профильного вала охватывающей фрезой с конструктивной радиальной подачей [9,10]

Согласно схеме (рис. 1), фреза и обрабатываемый вал имеют соосное расположения и их взаимное вращение является кинематически связанным, частота вращения фрезы кратно (в соответствии с количеством граней у обрабатываемого профиля) больше частоты вращения вала.

Таким образом, за один оборот фрезы осуществляется формообразование одного участка профиля вала.

В работах [9, 10] на основании выполненных исследований были определены области допустимых значений для таких конструктивных параметров фрезы, как средний диаметр и количество зубьев исходя из заданной предельно допустимой погрешности формообразования. Однако, нерешенной осталась задача построения модели интерференции поверхностей резания, образованных соседними зубьями, связанная с определением интервалов времени резания каждого зуба охватывающей фрезы в процессе срезания припуска. Решение данной задачи позволит выполнить исследование изменения кинематических углов режущих кромок зубьев охватывающей фрезы в процессе фрезерования, а так изменения геометрических параметров срезаемых каждым зубом слоёв обрабатываемого материала для последующей оценки их скорости износа.

Построение модели интерференции поверхностей резания охватывающей фрезы

Решение поставленной задачи выполним на основе моделирования процесса срезания припуска при фрезеровании в соответствии со схемой (рис. 1), для чего поверхность резания, описываемую режущей кромкой i -го зуба охватывающей фрезы в системе координат неподвижного вала представим в виде функции

$$\bar{Q}_i(t) = A^{(6)}(\theta(t)/N) \cdot A^{(1)}(-H(t)) \cdot A^{(6)}(\theta(t)) \cdot \bar{r}(\psi_i), \quad (1)$$

где $A^{(6)}(\theta(t)/N)$ – матрица поворота заготовки вокруг своей оси (оси Z)

$$A^{(6)}(\theta(t)/N) = \begin{bmatrix} \cos(\theta(t)/N) & -\sin(\theta(t)/N) & 0 & 0 \\ \sin(\theta(t)/N) & \cos(\theta(t)/N) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$\theta(t)$ – угол поворота фрезы за время t при

заданных режимах обработки

$$\theta(t) = \frac{\pi \cdot n \cdot t}{30}, \quad (3)$$

где n – число оборотов фрезы, об/мин;

t – время с начала обработки, с;

N – число граней РК-профиля;

$A^{(1)}(-H(t))$ – матрица перемещения фрезы вдоль оси X (поперечная подача)

$$A^{(1)}(-H(t)) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -H(t) \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (4)$$

где $H(t)$ – функция расчёта межосевого расстояния между фрезой и валом

$$H(t) = \begin{cases} H_0 + \frac{s_m \cdot t}{60}, & \text{при } H_0 + \frac{s_m \cdot t}{60} < a; \\ a, & \text{при } H_0 + \frac{s_m \cdot t}{60} = a, \end{cases} \quad (5)$$

где H_0 – межосевое расстояние до начала обработки;

s_m – минутная подача фрезы, мм/мин;

a – межосевое расстояние в конце обработки;

$A^{(6)}(\theta(t))$ – матрица поворота фрезы на угол $\theta(t)$;

$\bar{r}(\psi_i)$ – функция, определяющая положение режущей кромки i -го зуба охватывающей фрезы;

ψ_i – угловое положение i -го зуба охватывающей фрезы.

На рис. 2 представлен результат моделирования поверхностей резания образованных зубьями охватывающей фрезы двумя зубьями фрезы за первый оборот.

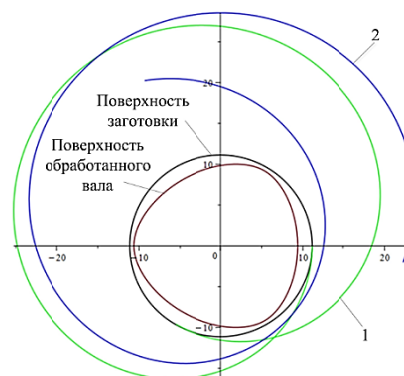


Рис. 2. Результат моделирования поверхностей резания, образованных зубьями охватывающей фрезы: 1) с $\psi_i=0$; 2) $\psi_i=0,52$ рад.

На начальном этапе моделирования интерференции поверхностей резания, образованных соседними зубьями для каждого (i -го) зуба, определим момент времени входа в материал заготовки на j -м обороте фрезы, путем решения уравнения относительно времени t_1

$$\begin{cases} |\bar{Q}_i(t_1)| = R_{\text{заг}}; \\ T_n(i) + T_{\text{об}} \cdot \left(j - \frac{1}{Z_f} - 1 \right) \leq t_1 \leq T_n(i) + T_{\text{об}} \cdot \left(j + \frac{1}{Z_f} - 1 \right), \end{cases} \quad (6)$$

где $R_{\text{заг}}$ – радиус заготовки;

$$T_n(i) – \text{время поворота } i\text{-го зуба на угол } \Psi_i$$

$$T_n(i) = T_{\text{об}} \frac{\Psi_i}{2\pi}, \quad (7)$$

где $T_{\text{об}}$ – время полного оборота фрезы

$$T_{\text{об}} = \frac{60}{n}, \text{ с}; \quad (8)$$

Z_f – количество зубьев фрезы.

Полученное решение уравнения (6) представим в виде функции

$$t_1 = t_1(i, j). \quad (9)$$

Далее определим время выхода каждого зуба из материала заготовки на j -м обороте фрезы, путем решения уравнения относительно времени t_2

$$\begin{cases} |\bar{Q}_i(t_2)| = R_{\text{заг}}; \\ t_1(i, j) \leq t_2 \leq t_1(i, j) + T_n(i) + \frac{T_{\text{об}}}{Z_f}. \end{cases} \quad (10)$$

Полученное решение уравнения (10) представим в виде функции

$$t_2 = t_2(i, j). \quad (11)$$

Далее сформируем множество точек пересечения рассматриваемого участка поверхности резания i -зуба на j -м обороте фрезы в интервале времени $[t_1(i, j), t_2(i, j)]$ с поверхностями резания соседних зубьев на j -м и $(j-N)$ -м оборотах фрезы. Расчёт точек пересечения рассматриваемого участка поверхности резания, с поверхностями резания, образованными $(i-k)$ -ми зубьями на $(j-N)$ -м обороте фрезы, путем решения для каждого зуба, с номерами $\{i-k\}_{k=1, \overline{Z_f-1}}$

уравнения

$$\begin{cases} \bar{i}_0 \cdot \bar{Q}_i(t_{i,i-k}) = \bar{i}_0 \cdot \bar{Q}_{i-k}(t_{i-k,i}); \\ \bar{j}_0 \cdot \bar{Q}_i(t_{i,i-k}) = \bar{j}_0 \cdot \bar{Q}_{i-k}(t_{i-k,i}); \\ t_1(i, j) \leq t_{i,i-k} \leq t_2(i, j); \\ t_1(i-k, j-N) \leq t_{i-k,i} \leq t_2(i-k, j-N); \end{cases} \quad (12)$$

относительно времён $t_{i,i-k}$ и $t_{i-k,i}$. На основе полученных для i -го зуба решений сформируем множество точек $T_{1ij} = \{[t_{i,i-k}, t_{i-k,i}]\}_{k=1, \overline{Z_f-1}}$

Похожим образом выполним расчёт точек пересечения рассматриваемого участка поверхности резания, с поверхностями резания, образованными $(i+k)$ -ми зубьями на j -м обороте фрезы, путем решения для каждого зуба, с номерами $\{i+k\}_{k=1, \overline{Z_f-1}}$ уравнения.

$$\begin{cases} \bar{i}_0 \cdot \bar{Q}_i(t_{i,i+k}) = \bar{i}_0 \cdot \bar{Q}_{i+k}(t_{i+k,i}); \\ \bar{j}_0 \cdot \bar{Q}_i(t_{i,i+k}) = \bar{j}_0 \cdot \bar{Q}_{i+k}(t_{i+k,i}); \\ t_1(i, j) \leq t_{i,i+k} \leq t_2(i, j); \\ t_1(i+k, j-N) \leq t_{i+k,i} \leq t_2(i+k, j-N) \end{cases} \quad (13)$$

относительно времени $t_{i,i+k}$ и $t_{i+k,i}$. На основе полученных для i -го зуба решений сформируем множество точек $T_{2ij} = \{[t_{i,i+k}, t_{i+k,i}]\}_{k=1, \overline{Z_f-1}}$. Полученные точки пересечения поверхностей резания разобьём на два подмножества:

- подмножество возможных точек входа i -го зуба в материал заготовки

$$\begin{aligned} T_1 = & \left\{ t \in T_{1ij} : |\bar{Q}_i(t_{i,i-k} + \varepsilon_t)| < |\bar{Q}_{i-k}(t_{i-k,i} + \varepsilon_t)| \right\} \cup \\ & \left\{ t \in T_{2ij} : |\bar{Q}_i(t_{i,i+k} + \varepsilon_t)| < |\bar{Q}_{i+k}(t_{i+k,i} + \varepsilon_t)| \right\}, \end{aligned} \quad (14)$$

где ε_t – малая величина приращения времени;

- подмножество возможных точек выхода i -го зуба из материала заготовки

$$\begin{aligned} T_2 = & \left\{ t \in T_{1ij} : |\bar{Q}_i(t_{i,i-k} + \varepsilon_t)| \geq |\bar{Q}_{i-k}(t_{i-k,i} + \varepsilon_t)| \right\} \cup \\ & \left\{ t \in T_{2ij} : |\bar{Q}_i(t_{i,i+k} + \varepsilon_t)| \geq |\bar{Q}_{i+k}(t_{i+k,i} + \varepsilon_t)| \right\}. \end{aligned} \quad (15)$$

На основе множества T_1 определяем момент времени соответствующий началу резания i -го зуба на j -м обороте фрезы

$$t_n(i, j) = \begin{cases} \max(T_1), & \text{при } T_1 \neq \emptyset; \\ t_1(i, j), & \text{при } T_1 = \emptyset, \end{cases} \quad (16)$$

а на основе множества T_2 определяем момент времени соответствующий окончанию резания i -го зуба на j -м обороте фрезы

$$t_k(i, j) = \begin{cases} \min(T_2), \text{ при } T_2 \neq \emptyset; \\ t_2(i, j), \text{ при } T_2 = \emptyset. \end{cases} \quad (17)$$

Оценить продолжительность контакта i -го зуба на j -м обороте фрезы можно по формуле

$$\Delta t(i, j) = t_k(i, j) - t_n(i, j). \quad (18)$$

Результаты

На рис. 3 представлен результат расчёта времени входа и выхода из материала заготовки зуба формирующего впадину РК-профиля на 4-м, 7-м, 10-м и 13 -м обороте охватывающей фрезы.

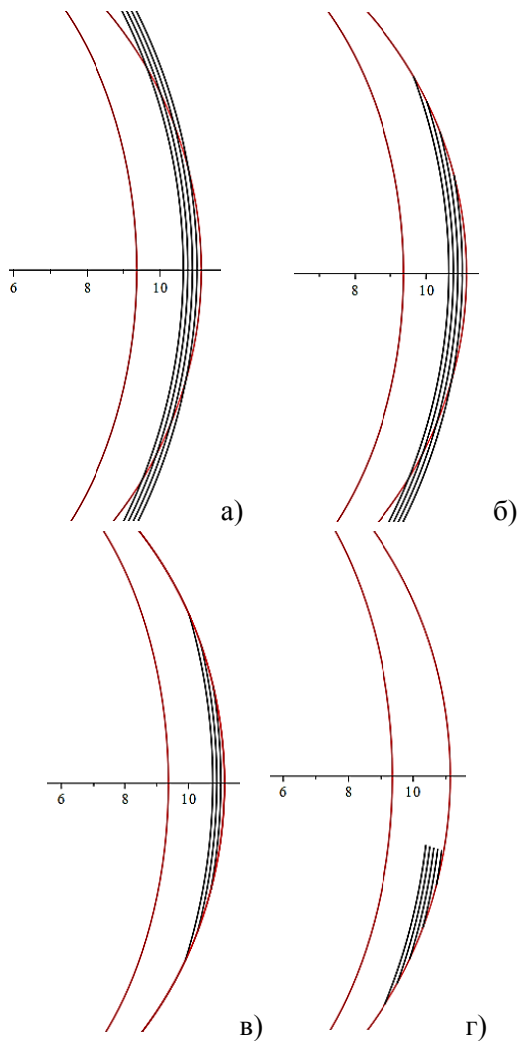


Рис. 3. Результаты расчёта времени входа и выхода из материала заготовки зуба формирующего впадину РК-профиля: а) исходное состояние; б) с учётом (9); в) с учётом (11); г) с учётом (16) и (17)

На рис. 4 показан результат моделирования интерференции поверхностей резания образованных зубьями охватывающей фрезы при обработке одной стороны РК-профиля.

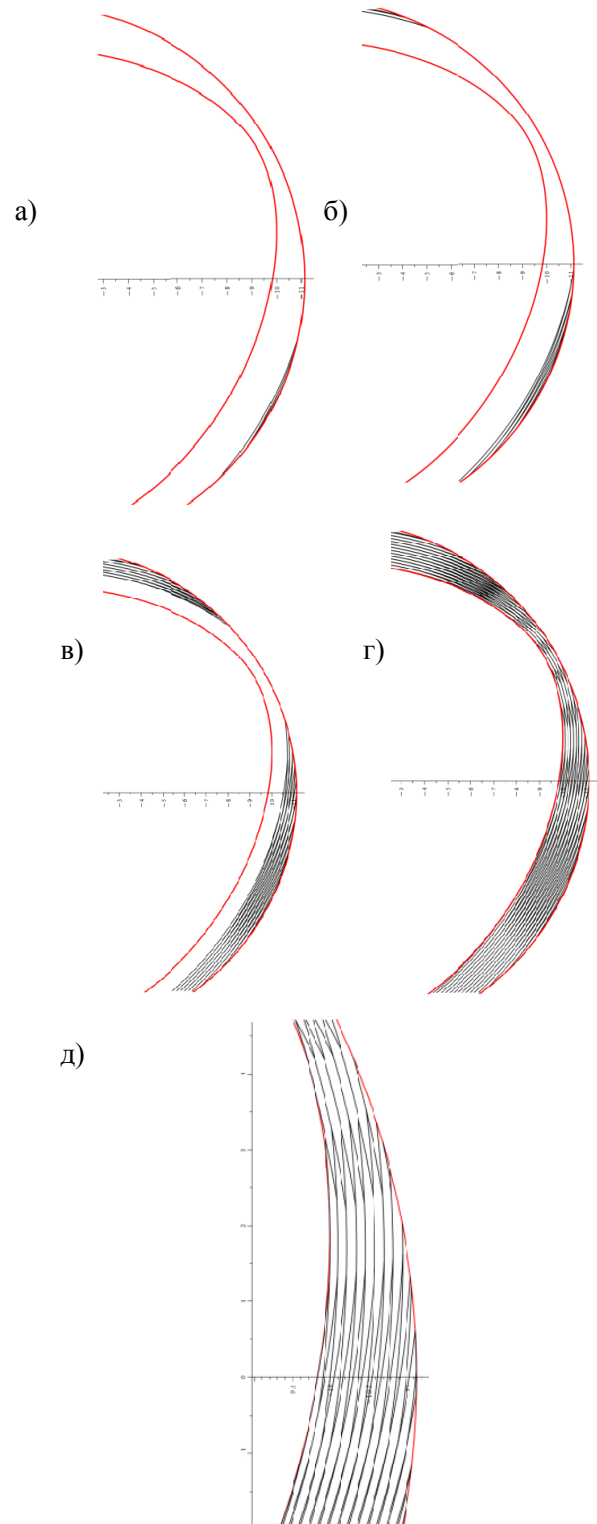


Рис. 4. Интерференция поверхностей резания образованных зубьями охватывающей фрезы при числе оборотов вала: а) 2; б) 4; в) 9; г) 15; д) 15 - увеличено

Результаты проведенного анализа изменения величины $\Delta t(i, j)$ для различных зубьев охватывающей фрезы (рис. 5) показали, что время резания для различных зубьев не одинаково, чем ближе зубья охватывающей фрезы к участку, формирующему впадину РК-профильного вала ($\psi_i = 0$) тем время резания становится больше, а чем зубья ближе к участку, формирующему выступ РК-профильного вала ($\psi_i = \pi$).

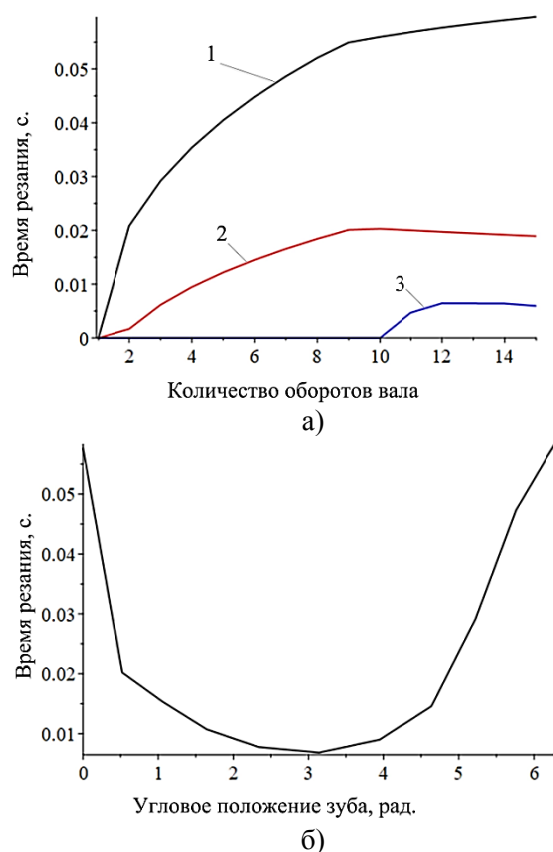


Рис. 5. Изменение времени резания для зубьев охватывающей фрезы: а) от количества оборотов вала: 1) с $\psi_i = 0$; 2) $\psi_i = 0,52$ рад. 3) $\psi_i = \pi$; б) от углового положения зубьев на 12-м обороте вала

Исходя из графика (рис. 5, б), также можно сделать вывод, время резания для зубьев с угловым расположением от 0 до π несколько ниже, чем для зубьев с угловым расположением от π до 2π .

Выводы

1. Разработана математическая модель, позволяющая анализировать интерференцию

поверхностей резания, образуемых соседними зубьями охватывающей фрезы с конструктивной радиальной подачей при обработке РК-профильных валов. Модель обеспечивает определение интервалов времени активного резания для каждого зуба инструмента на протяжении всего процесса формообразования.

2. На основе предложенной модели установлено, что процесс резания для различных зубьев фрезы является неравномерным. Наибольшее время контакта с материалом заготовки имеют зубья, расположенные в зоне формирования впадины профиля (вблизи углового положения $\varphi_i = 0$), в то время как зубья в зоне формирования выступа ($\varphi_i = \pi$) имеют наименьшее время резания.

3. Проведенный анализ показывает асимметрию времени резания между зубьями, расположенными в верхней (от 0 до π) и нижней (от π до 2π) полусферах фрезы, что необходимо учитывать при проектировании инструмента и назначении режимов резания для обеспечения равномерного износа.

4. Полученные результаты являются основой для последующих исследований, включающих анализ изменения кинематических углов режущих кромок, геометрических параметров срезаемого слоя и прогнозирования скорости износа зубьев фрезы, что в конечном итоге направлено на оптимизацию процесса и повышение его эффективности.

Литература

1. Тимченко А.И. Процессы формообразования профильных поверхностей изделий с равноосным контуром: спец. 05.02.08 «Технология машиностроения»: автореф. дисс. ... д-ра техн. наук / А.И. Тимченко. Москва, 1993. 41 с.
2. Ивахненко А.Г. Предпроектные исследования металлорежущих систем / А.Г. Ивахненко, В.В. Куц. Курск: Юго-Западный государственный университет, 2013. 188 с.
3. Шитиков А.Н. Обеспечение качества изготовления РК-профильных валов методом фасонного фрезерования: монография. Курск: «Университетская книга», 2015. 126 с.
4. Шитиков А.Н. Проектирование сборных фасонных фрез для обработки наружного РК-профиля: спец. 05.02.07 «Технология и оборудование механической и физико-технической обработки»: автореф. дисс. ... канд. техн. наук / А.Н. Шитиков. Тула, 2007. 20 с.
5. Максименко Ю.А. Создание метода проектирования дисковых фрез с конструктивным исполнением радиальной подачи для обработки валов с РК- и К-профилем: спец. 05.02.07 «Технология и оборудование механической и физико-технической обработки»: дисс. ... канд. техн. наук / Ю.А. Максименко. Курск, 2014. 135 с.
6. Мальнева Ю.А., Куц В.В., Горохов А.А. Новый способ обработки валов с равноосным контуром дисковой

фрезой с радиальной конструктивной подачей // Молодежь и XXI век - 2015: материалы V Международной молод. науч. конф.: в 3-х томах, Курск, 26–27 февраля 2015 года / Отв. ред.: А.А. Горохов. Том 3. Курск: «Университетская книга», 2015. С. 142-145.

7. Патент на полезную модель № 103317 U1 Российская Федерация, МПК В23С 5/06. Фреза торцевая для обработки валов с равноосным контуром: № 2010122286/02: заявл. 01.06.2010: опубл. 10.04.2011 / В.В. Куц, А.Г. Ивахненко, М.Л. Струблев; заявитель Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Юго-Западный государственный университет» (ЮЗГУ).

8. Патент № 2613242 С Российская Федерация, МПК В23С 3/08. Способ обработки валов с равноосным контуром охватывающей фрезой с радиальной конструктивной подачей: № 2015114273: заявл. 17.04.2015 : опубл. 15.03.2017 / Ю.А. Мальнева, В.В. Куц, А.Г. Ивахненко;

заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Юго-Западный государственный университет» (ЮЗГУ).

9. Исследование погрешности формообразования РК-профильных валов охватывающей фрезой с радиальной конструктивной подачей / Ю.А. Мальнева, В.В. Куц, А.Н. Кальченко [и др.] // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2024. № 10. С. 570-576.

10. Установление области допустимых значений среднего радиуса и числа зубьев охватывающей фрезы с конструктивной радиальной подачей, обеспечивающих требуемую погрешность формообразования РК-профильных валов / Ю.А. Мальнева, В.В. Куц, А.Н. Кальченко, Т.А. Толмачева // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2024. Т. 20. № 4. С. 148-153.

Поступила 25.09.2025; принята к публикации 20.10.2025

Информация об авторах

Куц Вадим Васильевич – д-р техн. наук, профессор кафедры машиностроительных технологий и оборудования, Юго-Западный государственный университет (305040, Россия, г. Курск, ул. 50-лет Октября, 94), e-mail: kuc-vadim@yandex.ru

Кириллов Олег Николаевич – д-р техн. наук, профессор кафедры технологии машиностроения, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: kirillov.olli@yandex.ru

Кальченко Андрей Николаевич – аспирант, Юго-Западный государственный университет (305040, Россия, г. Курск, ул. 50-лет Октября, 94), e-mail: kalchenko79@mail.ru

CONSTRUCTION OF A MODEL OF INTERFERENCE OF CUTTING SURFACES FORMED BY THE TEETH OF AN ENCLOSING MILLING CUTTER WITH A CONSTRUCTIVE RADIAL FEED DURING MILLING OF RC PROFILE SHAFTS

V.V. Kuts¹, O.N. Kirillov², A.N. Kal'chenko¹

¹Southwestern State University, Kursk, Russia

²Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract: the article solves the urgent problem of improving the processing efficiency of RC profile shafts by using a promising scheme for encompassing milling with a tool with a constructive radial feed. The main subject of the study is the phenomenon of interference (mutual intersection) of cutting surfaces formed by adjacent milling cutter teeth, which directly affects the load and wear of the tool. In order to analyze this phenomenon, a comprehensive mathematical model has been developed that makes it possible to accurately determine the moments of entry and exit of each tooth into the workpiece material, and therefore the duration of its contact with the material. The model is based on a parametric description of the trajectory of the cutting edges in the coordinate system of a fixed workpiece, taking into account the kinematic relationship between the rotation of the milling cutter and the shaft, as well as radial feed. The results of computer modeling clearly demonstrate the uneven distribution of cutting time along the teeth of the milling cutter. It is established that the maximum cutting time is typical for the teeth forming the profile cavity (near $\varphi_i = 0$), while the teeth processing the protrusion ($\varphi_i = \pi$) have a minimum contact time. The revealed load asymmetry is critical information for the subsequent analysis of kinematic angles, geometry of the cut layer and wear forecasting, which ultimately will optimize the tool design and cutting modes to increase the durability and productivity of the process

Key words: RC-profile shaft, spanning milling cutter, interference of cutting surfaces, cutting time, mathematical modeling, shaping

References

1. Timchenko A.I. "Processes of shaping profile surfaces of products with an equiaxed contour" ("Protsesty formoobrazovaniya profil'nykh poverkhnostey izdeliy s ravnoosnym konturom"), Dr. Tech. Sci. diss. abstract, Moscow, 1993, 41 p.
2. Ivakhnenko A.G., Kutz V.V. "Pre-design studies of metal-cutting systems" ("Predproektnye issledovaniya metallorazhushchikh sistem"), Kursk: Southwestern State University, 2013, 188 p.
3. Shitikov A.N. "Quality assurance of manufacturing of RC profile shafts by the method of shaped milling" ("Obespechenie kachestva izgotovleniya RK-profil'nykh valov metodom fasonnogo frezerovaniya"), monograph Kursk: University Book, 2015 126 p.

4. Shitikov A.N. "Design of prefabricated shaped milling cutters for processing the external RC profile" ("Proektirovanie sbornykh fazonnykh frez dlya obrabotki naruzhnogo RK-profil'ya"), Cand. Tech. Sci. diss. abstract, Tula, 2007, 20 p.
5. Maksimenko Yu.A. "Creation of a method for designing circular milling cutters with a radial feed design for machining shafts with RC and K profiles" ("Sozdanie metoda proyektirovaniya diskovykh frez s konstruktivnym ispolneniyem radial'noy podachi dlya obrabotki valov s RK- i K-profil'em"), Cand. Tech. Sci. diss. abstract, Kursk, 2014, 135 p.
6. Malyneva Yu.A., Kutz V.V., Gorokhov A.A. "A new method of processing shafts with an equiaxial contour with a disk milling cutter with a radial constructive feed", *Proc. of the V Int. Youth Scientific Conf.: Youth and the XXI century – 2015 (Molodezh' i XXI vek)*, Kursk, February 26-27, 2015, pp. 142-145.
7. Kutz V.V., Ivakhnenko A.G., Storublev M.L. "End mill for machining shafts with an equiaxial contour" ("Freza tortsevaya dlya obrabotki valov s ravnoosnym konturom"), utility model patent no. 103317 U1 Russian Federation, IPC B23C 5/06, no. 2010122286/02, published 04.10.2011 applicant South Ural State University.
8. Malineva Yu.A., Kutz V.V., Ivakhnenko A.G. "Method of processing shafts with an equiaxial contour with a spanning milling cutter with a radial structural feed" ("Sposob obrabotki valov s ravnoosnym konturom okhvatyvayushchey frezoy s radial'noy konstruktivnoy podachey"), patent no. 2613242 C Russian Federation, IPC B23C 3/08, no. 2015114273, application 17.04.2015: published 15.03.2017, applicant South Ural State University.
9. Malneva Yu.A., Kutz V.V., Kalchenko A.N. et al. "Investigation of the error in shaping RC profile shafts with a spanning milling cutter with a radial structural feed", *Bulletin of Tula State University (Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta)*, 2024, no. 10, pp. 570-576.
10. Malineva Yu.A., Kutz V.V., Kalchenko A.N., Tolmacheva T.A. "Establishing the range of permissible values of the average radius and the number of teeth of a spanning milling cutter with a constructive radial feed, ensuring the required error in shaping RC-profile shafts", *Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2024, vol. 20, no. 4, pp. 148-153.

Submitted 25.09.2025; revised 20.10.2025

Information about the authors

Vadim V. Kutz, Dr. Sc. (Technical), Professor, Southwestern State University (94 50-let Oktyabrya str., Kursk 305040, Russia), e-mail: kuc-vadim@yandex.ru

Oleg N. Kirillov, Dr. Sc. (Technical), Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya Street, Voronezh 394006, Russia), e-mail: kirillov.olli@yandex.ru

Andrey N. Kal'chenko, graduate student, Southwestern State University (94 50-let Oktyabrya str., Kursk 305040, Russia), e-mail: kalchenko79@mail.ru

**ТЕХНОЛОГИЯ И ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ КОМБИНИРОВАННЫХ МЕТОДОВ ОБРАБОТКИ
ОБЪЕКТОВ ТРАНСПОРТНОГО И ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО МАШИНОСТРОЕНИЯ****О.В. Уразов****Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия**

Аннотация: рассмотрены технологические вопросы комбинированной обработки с одновременным использованием нескольких регулируемых физико-технических воздействий, включающих тепловые, электрохимические, механические процессы формообразования мест сопряжения элементов конструкций на примерах многозвенных силовых передач и длинномерных магистралей для транспортировки жидких рабочих сред. Показано влияние таких объектов на ресурс и межремонтный период изделий авиакосмического и энергетического машиностроения на этапах их создания, совершенствования и освоения в серийном производстве. Обоснован выбор типовых объектов исследования с учетом условий эксплуатации изделий и предложен для этого новый оценочный показатель — критерий технологичности, показывающий количественный уровень эффективности рассматриваемого варианта технологического процесса. Таким образом, научно обосновывается правомерность выбора, назначения или разработки, создания новых технологических решений, определяющих и развивающих базовые показатели в изделии и обеспечивающих возрастание его качества в целом. На этой базе разработаны перспективные технологические приемы и средства оснащения производства, что позволило построить механизм формирования комбинированных процессов с расширенным использованием накопленного отраслевого опыта успешного применения физико-технических воздействий, в их числе защищенных охранными документами государства. Приведены примеры использования изобретений, большая часть которых получена учеными научной школы ВГТУ, включая изобретение автора и его статьи. Они адаптированы к условиям эксплуатации трансмиссионных и магистральных передач, используемых в авиакосмическом и энергетическом машиностроении, что позволило войти автору в число исполнителей по программам отраслевого и государственного уровня

Ключевые слова: технология, оборудование, воздействия, технологичность, трансмиссии, магистрали, ресурс, перспективы

Введение

В современном машиностроении происходят изменения, требующие от технологов совершенствования технологических приемов, создания для их реализации новых средств технологического обеспечения [1, 2]. Накопленный отечественный и зарубежный опыт [3] дает возможность получить по этим вопросам обширную информацию, в различной степени воздействующую на уровень производственной технологичности при проектировании комбинированных технологических процессов [4, 5, 6] и обеспечивающую создание качественной продукции [7, 8, 9]. Этот процесс начинается на этапе анализа запросов потенциальных заказчиков и обеспечивается выделяемыми ресурсами на проведение экспериментальных исследовательских и опытно-промышленных работ. При положительных результатах исследований достигается возможность передача материалов для серийного производства, где формируется реальная технико-экономическая отдача от внедрения, которая должна оправдывать затраты на создание перспективного объекта производства,

компенсировать затраты на предшествующие этапы работы. Учитывая, что государственное финансирование в первую очередь выделяется по программам, определяющим будущее всей страны, а в энергетике и машиностроении в первую очередь для развития атомной отрасли и транспортного машиностроения, то авиакосмическая промышленность заинтересована в ускоренном создании прогрессивных комбинированных методов обработки (КМО) с использованием результатов числовых, аддитивных технологий, средств искусственного интеллекта. Применение положительных результатов исследований на всех этапах создания нового продукта зависит от научно обоснованного выбора этапов и сроков разработки продукции. Это стало возможным путем управления этапами исследований по рекомендациям, полученным на базе расчетов производственной технологичности [7] по закономерностям управления выбором технологических воздействий в комбинированных методах обработки с учетом условий эксплуатации в авиакосмическом и энергетическом машиностроении [8]. При проведении научных изысканий учитываются достижения и перспективы развития отраслевой техники [2, 5, 6 и др.], защищенные охранными документами новые

способы и устройства [10 и др.], позволяющие расширить область использования комбинированной обработки (КО) на общее машиностроение, в том числе для упрочнения [11, 12, 13], повышения надежности и ресурса [14] изделий с ограниченным доступом инструмента в зону обработки [15, 16]. Проведенные исследования [15, 8] показали, что применительно к высоконагруженным изделиям длинномерных транспортных силовых передач в авиакосмической отрасли и в магистралях атомных станций главное внимание требуется уделять местам сопряжения участков, повышению их надежности и ресурса до уровня не ниже установленного показателя межремонтного периода деталей и узлов в изделии.

Анализ производственной технологичности сопрягаемых участков трансмиссий и магистралей авиакосмической и энергетической отраслей машиностроения

Отработка производственной технологичности является методом оценки качества мероприятий технологического назначения на этапах изготовления изделия и включает непрерывный процесс оценки эффективности принимаемых технологических решений, направленных на их совершенствование по потребительским свойствам и технико-экономическим показателям на всех этапах создания, освоения, запуска в серийное производство, выпуска, эксплуатации, обслуживания, а также при ремонте и восстановлении продукции. Технологичность включает управление процессом обеспечения заданных и требуемых эксплуатационных показателей качества при минимизации сроков и затрат для их выполнения на этапах проектирования, а также на других этапах ее отработки, формирующих содержание производственной технологичности. Целью проведения мероприятия является научное обоснование назначения и выбора в комбинированном технологическом процессе воздействий, их величины и совместимости для улучшения эксплуатационных и потребительских свойств объектов производства. Область использования предлагаемых решений должна ограничиваться количеством объектов исследования, приведенных в табл. 1, прогнозом их совершенства при использовании в рассматриваемых отраслях науки и дальнейшего эффективного применения в других видах продукции, в основном отечественного машиностроения.

Варианты структурных схем сопрягаемых участков приводов и магистралей

Многолетний опыт создания, совершенствования, использования, эксплуатации и утилизации транспортных и энергетических систем позволил выделить наиболее эффективные направления научных и прикладных исследований по назначению новых технологических процессов, созданию для этого средств оснащения, учитывающих требования технологичности конструкций и методов их изготовления в производстве. Наиболее высокий уровень производственной технологичности достигнут в наукоемких изделиях авиакосмической отрасли и атомной энергетики. Результаты выполненных отечественных [3, 4, 6, 8 и др.] зарубежных [3 и др.] работ обосновали правомерность оперативного использования их в качестве базы для расширения зоны применения в машиностроении, в первую очередь в исследуемых здесь типовых наукоемких элементах [1, 8, 10, 11 и др.] транспортного и энергетического машиностроения, приведенных в табл. 1 и 2.

Приведенные в табл. 1 длинномерные сборные разъемные сборные силовые приводы из цельных металлических трубных заготовок с равномерным или импульсным вращательным движением используются в транспортных машинах, в том числе в летательных аппаратах, и в бытовой технике с возможностью ускоренного освоения в серийном и крупносерийном производстве. Ограничивает их использование высокая вероятность возникновения концентраторов напряжений, снижающих ресурс, затрудненный подход с инструментом к месту обработки концевых участков, где в заготовках они осажены вдоль оси. Здесь формируются очаги напряжений, нарушается точность профиля. Возникают винтовые канавки от перемещения инструмента при расточке, что приводит к разрушению этих участков отверстий и снижает усталостную прочность материала. При оценке технологичности снижается технологический показатель. В качестве рекомендаций предлагается разработать и использовать КМО по бесконтактной схеме с одновременной чистовой подготовкой поверхности и ее управляемым упрочнением на заданную величину. В результате достигается выравнивание величины остаточных напряжений до величины не ниже аналогичного показателя всего объекта обработки в условиях его эксплуатации, особенно в создаваемых изделиях.

Таблица 1

Типовые объекты изготовления и характеристики технологичности для совершенствования приводов в транспортном машиностроении

Вариант объекта	Объект исследования		Ограничения при традиционной обработке в машиностроении	Рекомендации по производственной технологичности	Ожидаемые результаты от отработки технологичности
	Название	Назначение			
I	Разъемные силовые приводы из цельных металлических трубных заготовок (рис. 1, а)	Длинномерные сборные разъемные трубчатые реверсивные приводы с равномерным движением в транспортных системах наукоемких машин	Ограниченный доступ инструмента к месту обработки концевых участков труб после их продольной осадки. Образование переходных участков в местах осадки с формированием локальных очагов напряжений из-за нарушений точности участков. Формирование при чистовой механической обработке винтовых канавок от перемещения инструмента в отверстии, вызывающих местную концентрацию напряжений и снижающих усталостную прочность материала привода. Низкий показатель принципа полезности по трудоемкости и затратам.	Разработать КМО внутренней поверхности по бесконтактной схеме с одновременной чистовой подготовкой поверхности и ее упрочнение с управлением по разработанным моделям.	Выравнивание величины остаточных напряжений до величины не ниже аналогичного показателя всего объекта обработки. Повышение ресурса безотказной работы и межремонтного цикла и ресурса привода в условиях его эксплуатации с возможностью повышения качества и работоспособности в перспективных изделиях. Расширение области использования КО на изделия с ограниченным доступом инструмента в зону обработки. Повышение уровня полезности мероприятия
II	Разъемные силовые приводы из цельных металлических труб и полужакрытых концевых участков, соединенных сваркой (рис. 1, б)	Применение в транспортных системах машин и бытовой технике с возможностью освоения в серийном и крупносерийном производстве	Высокая вероятность образования концентраторов напряжений на концевых участках, вызывающих ограничения по ресурсу применения приводов, необходимость прерывания в работе привода при снижении межремонтного цикла и ресурса объекта. Необходимость задела ремонтного задела для транспортного средства. Сложность восстановления объекта в полевых условиях. Пониженный уровень производственной технологичности.	Усилить входной контроль получаемых концевых участков с использованием предлагаемой системы оценки уровня производственной технологичности и применение КМО с упрочнением места соединения наконечников с трубами. По оценке на этапе контроля обосновать необходимость в выборе или разработке инструмента и оборудования для КО, в том числе участков с ограниченным доступом инструмента	Повышение качества и уровня технологичности приобретаемых наконечников путем конкурсного отбора продукции, в том числе по результатам усталостных испытаний, проводимых на разрабатываемом оборудовании инструментом КМО мест соединения для повышения ресурса объекта. Достигнутое сокращение сроков запуска новых изделий в серийное производство.

Приведенные в табл. 1 длинномерные сборные разъемные сборные силовые приводы из цельных металлических трубных заготовок с равномерным или импульсным вращательным движением используются в транспортных машинах, в том числе в летательных аппаратах, и в бытовой технике с возможностью ускоренного освоения в серийном и крупносерийном производстве. Ограничивает их использование вы-

сокая вероятность возникновения концентраторов напряжений, снижающих ресурс, затрудненный подход с инструментом к месту обработки концевых участков, где в заготовках они осажены вдоль оси. Здесь формируются очаги напряжений, нарушается точность профиля. Возникают винтовые канавки от перемещения инструмента при расточке, что приводит к разрушению этих участков отверстий и снижает

усталостную прочность материала. При оценке технологичности снижается технологический показатель. В качестве рекомендаций предлагается разработать и использовать КМО по бесконтактной схеме с одновременной чистовой подготовкой поверхности и ее управляемым упрочнением на заданную величину. В результате достигается выравнивание величины остаточных напряжений до величины не ниже аналогичного показателя всего объекта обработки в условиях его эксплуатации, особенно в создаваемых изделиях.

Аналогичные показатели относятся к объектам в табл. 1, п. II, имеющим полузакрытые концевые участки (рис. 1, б; рис. 2, а), приобретаемые на стороне или изготавливаемые у себя по серийной технологии. Требуется запас деталей для ремонта и восстановления приво-

да, что затрудняет выполнение регламентных и восстановительных работ в полевых условиях, что вызывает понижение уровня производственной технологичности. Предлагается повысить качество и требования к контролю концевых участков приводов. Для этого целесообразно использовать разработанную систему оценки уровня производственной технологичности, использовать КМО и создаваемое оборудование, средства контроля, инструмент, обеспечивающий доступ к месту выполнения работ. Достигается реализация приемов для получения конкурентоспособной продукции, автоматизация производства, расширение области использования КМО, сокращение сроков запуска новых и модернизированных изделий в серийное производство.

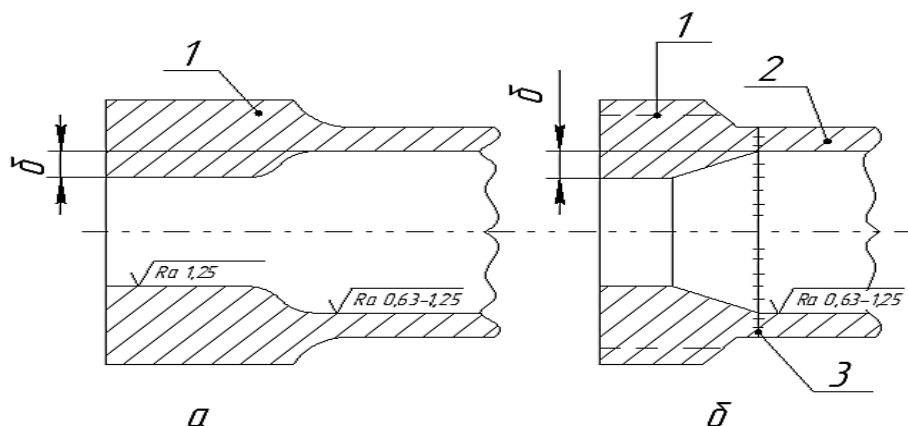


Рис. 1. Концевые участки силовых приводов трансмиссий:

а – из цельнометаллических трубчатых заготовок с продольной осадкой концов (δ – напуск на чистовую обработку внутренней поверхности); б – сборные участки из серийно изготавливаемых наконечников 1, присоединяемых к трубе 2 привода неподвижной сборкой 3, например, сваркой

Заготовки труб обычно получают от металлургических предприятий с размерами и качеством по стандартам для оружейных стволов, что технологично, доступно и экономически целесообразно. Обработка внутренней поверхности таких заготовок для стволов, как правило, доступна для инструмента хотя бы с одного конца. Но условия эксплуатации изделий имеют принципиальные различия. В их числе то, что в них происходит ограниченное число крутильных и знакопеременных воздействий при эксплуатации, автоматическое устранение концентраторов напряжений в начале применения изделия. Это приводит к необходимости изменения технологического процесса обработки внутренней поверхности приводов с гарантированным удалением концентраторов напряжений, где исключается применение механического протягивания этой поверх-

ности из-за имеющегося напуска материала, хотя такой процесс способен устранять поперечные углубления от чистового точения, при котором возникают концентраторы напряжений при эксплуатации изделия. В процессе освоения КМО снижается потребность в проведении затратных многоцикловых усталостных испытаний предварительного механического упрочнения наиболее склонных к разрушению концевых участков. При разработке новых технологических приемов чистовая обработка и наклеп совмещаются, а созданная оснастка обеспечивает ремонтпригодность приводов в течение всего периода эксплуатации изделия. Типичным приводом летательных аппаратов является вал винта вертолета на рис. 2, выполненный из легированной стали с увеличенными размерами сечений в местах соединения составных участков.

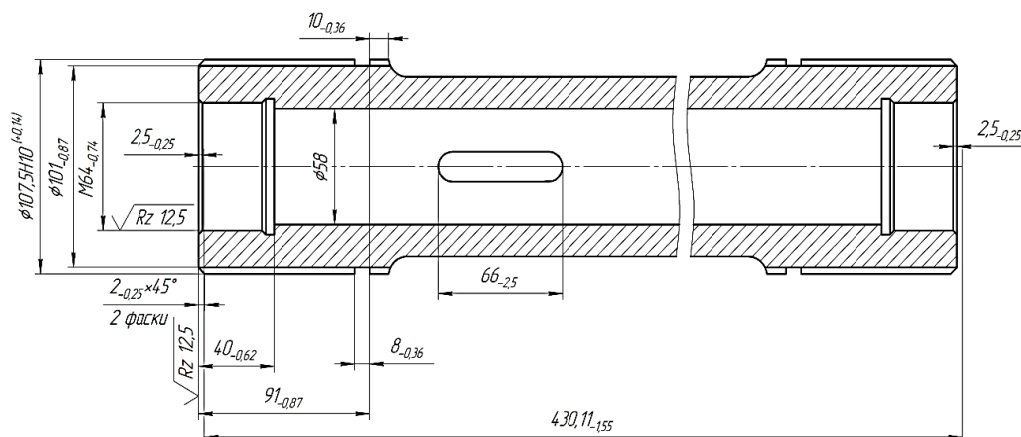


Рис. 2. Вал винта длинномерного привода вертолета

Внутренняя поверхность детали на рис. 2 должна иметь повышенную чистоту, а деталь претерпевает упрочнение для достижения требуемой надежности в межремонтный период, что подтверждается ресурсными испытаниями. В действующем процессе обработки используются в основном традиционные методы удаления припуска после торцевого осаждения материала на концах. При этом технолог сталкивается с затруднениями по поводу подвода инструмента к месту обработки через уменьшенные по внутреннему диаметру концевые участки и из-за недостаточного сопротивления изгибу длинных борштаг при большой длине участка расточки или других вариантов чистовой обработки. Такие ограничения становятся все значимее при снижении диаметров отверстия в случае одностороннего подвода инструмента на большую глубину и при нестабильном протекании процесса обработки на чистовом этапе формообразования. В силу указанных причин может возникнуть нежелательный дисбаланс привода с вибрацией, аналогичной долговременным цикловым нагружениям. Повышенное время на чистовую операцию и отдельно, а термическое или механическое упрочнение [12, 13] не позволяет получить конкурентоспособную величину критерия полезности [7], что требует разработки новых комбинированных методов обработки (КМО), позволяющих реализовать режимы бесконтактного чистового снятия припуска [1-6] и создать базу для стабильного упрочнения менее доступной внутренней поверхности по предлагаемым в [11, 12, 13] методам упрочнения для достижения требуемых эксплуатационных показателей [2, 3], в том числе ресурса и ремонтпригодности [14, 15] изделия. Рекомендации по проектированию КМО приведены в [1, 4, 5], ожидаемые результаты показаны в варианте 1 табл. 1, а также подтверждены в процессе внедрения КО на предприятиях Воронежа. Приня-

тый процесс комбинированной обработки таких деталей, объединяющий управляемый анодный съем припуска [4] с механическим упрочнением [13] внутренней поверхности, позволяет получить заданную на рис. 2 шероховатость поверхности, требуемый наклеп основной части трубы и подготовить свойства материала внутренней части концевой участка под нарезание качественной резьбы путем предварительного удаления напуска и неравномерно упрочненного слоя, в том числе обладающего повышенной хрупкостью, вызывающей при эксплуатации осыпание резьб.

В варианте II табл. 1, конструкциях сборных участков на рис. 1, б показаны более технологичные по форме элементы приводов, полученных за счет использования стандартных, а, следовательно, более дешевых, серийно выпускаемых концевых участков. Однако это не всегда позволяет повысить величину показателя по принципу полезности, т.к. при выполнении сборки могут возникать новые концентраторы напряжений, удаление которых вызывает такие же ограничения. Они частично рассмотрены для варианта 1, а их устранение стало возможным с использованием рекомендаций из табл. 1, где предлагается [4, 5, 15] обосновать выбор или разработку не только процессов комбинированной обработки (КО), но и технологических средств оснащения [1, 2] для расширения области применения материалов работы на другие отрасли машиностроения. При этом не потребуются значительные вложения на последующие испытания и отработку процессов, т.к. уже полученные результаты, приведенные в работе для отраслевых изделий, полностью достоверны. В сложной международной обстановке ожидаемые в варианте II табл. 1 результаты не только технологичны, но и актуальны для страны.

В табл. 2 приведены типовые объекты изготовления и характеристики технологичности для обеспечения герметичности высоконагруженных магистралей, учитывающих условия

эксплуатации на атомных энергетических станциях, а также в двигателях и системах летательных аппаратов и в общем машиностроении.

Таблица 2

Типовые объекты изготовления и характеристики технологичности для совершенствования приводов в транспортном машиностроении

Вариант объекта	Объект исследования		Ограничения при традиционной обработке в машиностроении	Рекомендации по производственной технологичности	Ожидаемые результаты от отработки технологичности
	Название	Назначение			
III	Однослойные размерные герметичные магистрали с концевыми участками единого или различного сечения, соединенными с магистралью неподвижной неразъемной сборкой	Для создания технологичных магистралей, работающих при постоянных и импульсных нагрузках, с гарантируемым ресурсом и заданным межремонтным периодом, с возможностью выполнения операций при минимальных сроках простоя оборудования, особенно в потенциально опасных зонах атомных установок	Снижение ресурса концевых участков магистралей за счет мест сопряжения концевых элементов с магистралями. Ограничение предельных характеристик и ресурса длинномерных магистралей. Опасность нарушения герметичности и пожароопасность при работе двигателей авиакосмической техники. Для атомных станций дополнительно возникает опасность негативного воздействия на персонал облучения. Создание местных сопротивлений течению рабочих сред в местах соединения концевых участков с магистралями.	Изготовление концевых участков по серийной технологии для ускорения и удешевления операции сборки. Использование методов ускоренной оценки усталостной прочности мест соединения концевых участков с магистралями. Применение комбинированных методов обработки с выдавливаемыми и Регулируемыми наклепом мест соединения. Обоснование назначения методов и средств для реализации в основном и ремонтном производстве базы для повышения уровня производственной технологичности	Повышение уровня технологичности магистралей. Повышение межремонтного периода магистралей. Улучшение условий труда обслуживающего персонала. Создание технологических методов и средств для организации обслуживания магистралей в условиях их использования в авиакосмической и атомной энергетической отрасли. Экономия средств на обслуживание герметичных магистралей за счет привлечения внешних исполнителей для изготовления концевых участков на по серийным технологиям с обеспечением заданного уровня качества изделий.
IV	Однослойные и многослойные магистрали из толстостенных труб	Обеспечение качества и герметичности магистралей в условиях использования неразъемной сборки для транспортировки опасных, агрессивных и вредных рабочих сред, протекающих при высоких давлениях с возможностью импульсных нагрузок. Обеспечение ресурса и межремонтного периода эксплуатации магистралей в ракетных двигателях и атомных электрических станциях.	Возможность появления концентраторов напряжения и подповерхностных дефектов в местах соединения участков магистралей, особенно расположенных в труднодоступных местах. Сложность обеспечения равномерного наклепа и требуемого качества поверхностного слоя в местах соединения участков. Необходимость остановки агрегатов атомной электростанции на период восстановления работоспособности магистралей и удлинения сроков испытаний двигателей транспортной техники. Увеличение потерь на снижение выпуска энергии и уровня производственной технологичности систем.	Применение КМО непрофилируемым инструментом в форме щетки с оригинальными параметрами и режимами обработки. Разработка технологических приемов и средств оснащения с выравниванием свойств, повышение межремонтного периода и ресурса сборных магистралей атомных электростанций и двигателей. Повышение уровня технологичности и герметичности магистралей.	Создание и применение новых, на уровне изобретений методов и средств обработки и контроля концевых элементов магистралей с автоматизацией процессов. Снижение времени простоя при выпуске продукции. Повышение качества, надежности, ресурса изделий, создание базы для повышения уровня квалификации персонала.

Анализ табл. 2 (варианты III-IV) показывает, что технологические процессы и методы повышения качества, работоспособности и ресурса магистралей в атомной и ракетно-космической отрасли близки по видам применяемых способов, видам производства, используемым средствам контроля и испытаний объектов с концевыми участками одинакового или различного сечения, соединенными с магистралью неподвижной неразъемной сборкой. Они предназначены для создания герметичных устройств с высоким межремонтным ресурсом при выполнении операций при минимальных сроках простоя оборудования. В большей степени это относится к созданному и создаваемому технологическому оборудованию для комбинированных методов обработки объектов III варианта (табл. 2, рис. 3, а), где рассматриваются сварные однослойные магистрали с высоким межремонтным периодом. Существенным положительным отличием здесь является отсутствие необходимости перемещения объектов в процессе эксплуатации. Однако это усложняет доступ персонала и инструмента к месту выполнения технологических операций и контроля концевых участков магистралей при выполнении регламентных и ремонтных работ. Отмеченные в табл. 2 (рис. 3, б) ограничения особенно значимы для IV варианта объектов исследований, поскольку время пребывания персонала в потенциально опасной зоне работающего изделия ограничено возможностью получения травм и профессиональных заболеваний.

Проводимые с участием автора исследования по автоматизации восстановительных и контрольных работ для Нововоронежской атомной электростанции и создание новых (на уровне изобретений [10]) автоматических устройств позволяет частично решить проблему

сокращения пребывания персонала в опасных зонах атомных станций. Это нашло дальнейшее применение при изготовлении и испытании ракетных двигателей, но здесь требуется продолжение и расширение области выполнения работ в этом направлении. Общим ограничением для использования традиционных методов обработки высоконагруженных приводов и магистралей является требование по выравниванию силовых усилий режущей кромки механического инструмента и устранение винтообразных углублений после резания, особенно на внутренней поверхности труб и в местах сопряжения концевых участков. Эти углубления становятся концентраторами напряжений, что снижает усталостную прочность и особенно нежелательно для приводов, работающих под действием перегрузок и импульсных воздействий. Разработанные средства КМО [15] позволяют выполнять удаление припуска даже на труднодоступных для электродов-инструментов участках в длинномерных магистралях и приводах с переменным сечением без механического воздействия на деталь с перемещением инструмента только вдоль ее оси. Исключением является вариант IV в табл. 2, где обработку мест сопряжения магистралей требуется проводить после сборки, когда доступ в каналы прекращается. Тогда эффективным методом КО остается наружная зачистка места сварки и ее упрочнение непрофилированным электродом-щеткой за счет подводимой тепловой энергии и импульсов от соударений периферии инструмента с обрабатываемой поверхностью, подготовленной к упрочнению электрохимическим воздействием в той же операции. Электрические режимы такого метода приведены в [16].

Геометрия концевых участков и мест соединения магистралей показаны на рис. 3.

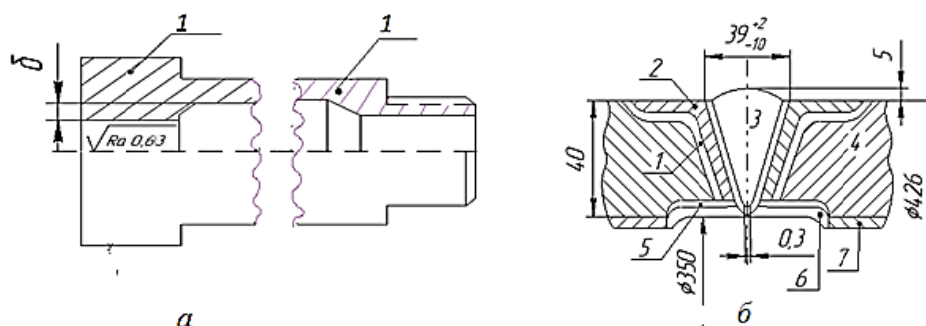


Рис. 3. Концевые участки труб (1) для соединения участков в герметичных магистралях:
а – однослойная труба с усиленными переходными зонами; б – двухслойные трубы после неподвижной сборки сваркой:
1 – прокладка; 2 – вставка из металла; 3 – присадочный материал; 4 – концевой участок магистрали; 5, 6 – для защиты внутренней поверхности трубы от капель расплава при сборке; 7 – внутренняя труба

Для всех видов магистралей требуется назначить мероприятия по повышению периода работоспособности и ресурса за счет упрочнения и снижения сопротивления течению рабочих сред, особенно на переходных участках, где возникают местные неровности, часть которых не может быть полностью удалена. В технических условиях (табл. 2) указывается на необходимость включения в процесс обработки технологических операций, которые обеспечивают после КМО (a на рис. 3) шероховатость проточного профиля (включая переходные зоны) не ниже $Ra = 0,63-1,25$, что для легированных сталей достижимо при разработанных приемах КО по схеме протягивания [15] и с использованием непрофилированного электрода по [16] для варианта IV в табл. 2 и новой конструкции мест соединения многослойных магистралей (рис. 3, б), показанной на примере участка дыхательного трубопровода НВАЭС.

Обобщенным критерием для научного обоснования выбора технологического приема для эффективного использования в трансмиссиях и магистралах транспортных и энергетических систем является критерий технологичности [7], позволяющий численным методом оценить конкурентоспособность каждого воздействия и их предлагаемые комбинации в едином технологическом процессе [2] с использованием средств технологического оснащения [4]. Приведенные исследования создают доказательную базу для обоснования целесообразности применения освоенных [1, 4, 6] или разработки новых [2, 3] комбинированных технологических приемов (КМО), в том числе включающих воздействия для упрочнения поверхностных слоев с целью повышения качества, надежности и ресурса изделий, рассмотренных в табл. 1 и 2. Режимы и технология КМО приведены в [1] и табл. 3.

Таблица 3

Технологические режимы электрических воздействий освоенных КМО

№ п/п	Способ комбинированной обработки	Основные режимные параметры КМО		Перемещение электродов	Преимущественная область эффективного применения
		Напряжение на электродах, В	Технологическая среда		
1	Эрозионно-химический	30 - 40	Токопроводящие эмульсии (СОЖ). Растворы соли с концентрацией 4 – 8 % по массе с антикоррозионными добавками	Скорость подачи электрода инструмента до 26 мм/мин. Возможно вращение одного из электродов с частотой 100-120 Гц	КО деталей из конструкционных легированных сталей в транспортном машиностроении
2	Электроабразивный	15 – 32 (при черновой обработке), 3 – 15 (при чистовой обработке)	То же	Давление на заготовку 0,2 – 0,5 Мпа, скорость вращения инструмента 18 – 30 м/с	Обработка переходных участков сопряжения деталей с целью выравнивания остаточных напряжений
3	Обработка электродом-щеткой	4 – 10 (до 18 В)	Токопроводящие эмульсии, растворы солей с концентрацией 8 – 10 % по массе с добавкой 15 % масла индустриального	Окружная скорость электрода – щетки более 25 м/с; изгиб концов электрода-щеточки в месте обработки на периферийном участке 0,1 – 0,5 мм	Для чистовой подготовки поверхности под упрочнение в местах сопряжения элементов высокоресурсных ответственных конструкций транспортного и энергетического машиностроения
4	Электрохимический с наложением ультразвукового поля	10 - 15	Растворы солей с концентрацией 2 – 5 % по массе	Амплитуда колебаний - до 40 мкм. Частота ультразвуковых колебаний – 18 – 22 кГц	Интенсификация процесса КО при обработке труднодоступных для инструмента неподвижных участков магистралей
5	Динамическим потоком несвязанных твердых токопроводящих гранул	До 90 (в импульсе)	Токопроводящие эмульсии, растворы солей с концентрацией 1 – 3% по массе	Скорость подачи гранул до 15 м/с Рассчитывается по требуемой силе удара для поверхностного упрочнения	Обработка труднодоступных поверхностей гидравлических и транспортных систем с возможностью удаления от инструмента до 100 мм
6	Гидроабразивный в электрическом поле	До 50	То же	Скорость струи – до 30 м/с	Удаление шаржированного слоя, снижение шероховатости поверхности и локальное упрочнение труднодоступных участков деталей

Приведенные в табл. 3 режимные параметры расширяют возможности технологов при проектировании процессов обработки типовых деталей, частично приведенных в табл. 1 и 2, на изделия других отраслей машиностроения, где требуемые эксплуатационные показатели могут быть эффективно достигнуты по результатам оценки уровня производственной технологичности.

Создание научной базы для выбора и проектирования средств технологического оснащения КМО

Новые способы и электрод-инструменты для КМО внутренних поверхностей типовых заготовок

Приведенные в табл. 1 и 2 объекты комбинированной обработки с изменяющимся по длине профилем при использовании традиционных методов усложняют доступ электродов-инструментов в рабочую зону и не всегда позволяют обеспечить получение элементов конструкции с требуемыми эксплуатационными характеристиками. Применительно к рис. 1 и рис. 3, а для установки инструмента в канал перед комбинированной обработкой поверхности требуется поместить его через канал до выхода рабочей части за пределы конца обрабатываемой детали. Однако при традиционной обработке даже с использованием электрода-

инструмента, как правило постоянного сечения, наличие концевых напусков в заготовках не позволяет пропустить через нее концевой упрочняющий элемент. В рассматриваемых типовых конструкциях заготовок величина напуска не превышает 0,15-0,1 мм, но это нарушает процесс подготовки к выполнению комбинированной обработки. С участием автора было применено [15] и расширено создание нового вида инструментов с изменяющимся сечением рабочей части, технологический процесс управления которым выполняется по силе продольного перемещения электрода.

Выбор метода обработки по критерию производственной технологичности [7, 9] показал, что для комбинированной обработки объектов, приведенных на рис. 3, б предпочтительнее использовать в качестве инструмента электрод-щетку, который при минимальных ограничениях обеспечивает получение достаточно чистой поверхности под дальнейшее упрочнение до требуемого уровня в той же технологической операции.

В табл. 4 приведены обобщенные сведения по методологии назначения в технологический процесс для комбинированной обработки (КО) электродов-инструментов, обеспечивающих достижение требуемых технологических показателей при численной оценке вариантов по критерию полезности производственной технологичности [7].

Таблица 4

Инструмент для комбинированных методов обработки КО металлических заготовок с ограниченным доступом в зону удаления припуска и упрочнения поверхностного слоя

Объект КО	Инструмент		Метод управления процессом обработки	Технологические Цели КО	Источник информации
	Характеристика	Рабочие перемещения			
Отверстия в длинномерных круглых заготовках с прямой осью и постоянным по длине профилем	Инструмент постоянного сечения с блоками анодного растворения припуска и твердым упрочняющим элементом	Поступательное вдоль оси заготовки	По скорости перемещения инструмента вдоль оси заготовки	Уточнение размеров сечения отверстия. Подготовка поверхности отверстия под упрочнение. Получение требуемого наклепа поверхностного слоя под упрочнение.	[15] [4] [1]
Отверстия в длинномерных круглых заготовках с прямой осью и переменным сечением на концевых участках (вид а, б табл. 1, вид а таб. 2)	Инструмент с твердым упрочняющим элементом с измененным диаметром	Поступательное вдоль оси заготовки	По силе перемещения инструмента вдоль оси заготовки с автоматическим регулированием припуска под наклеп	Стабилизация степени наклепа поверхностного слоя по длине отверстия. Выравнивание свойств и размеров отверстия по длине заготовки	[15] [1] [11] [10]
Точные отверстия в длинномерных заготовках с прямой осью и ограниченным доступом инструмента в зону обработки (вид а, б табл. 1)	Инструмент КО с твердым уплотняющим элементом, соединенным катодом шаровым шарниром	Перемещение вдоль оси заготовки и ее вращение совместно с упрочняющим элементом	По силе, действующей на инструмент вдоль оси заготовки при ее вращении с упрочняющим элементом	Устранение дисбаланса в деталях (вид а, б в табл. 1). Выравнивание наклепа внутреннего слоя по длине заготовки)	Патент РФ №2191664

Окончание табл. 4

Отверстия с переменными по длине и сечениям геометрий и размерами сечений с ограниченным наклепом поверхностного слоя	Инструмент нежесткой конструкции катодного элемента с возможностью его деформации по внутренней поверхности обрабатываемого отверстия с ограниченным доступом инструмента в зону обработки.	Стабильное перемещение вдоль оси заготовки с автоматическим изменением внутреннего давления на элемент, в том числе импульсным воздействием.	Давлением на внутреннюю поверхность катодного элемента и ударными импульсами перпендикулярно обрабатываемой поверхности	Выравнивание толщины детали по длине и степени наклепа внутренней поверхности заготовки	[15] А.с. СССР 253516, 1146155
Наружная поверхность мест соединения магистралей высокого давления из толстостенных металлических труб с ограниченным доступом инструмента в зоне соединения магистралей (вид б табл. 2)	Доступ инструмента внутрь заготовки после сборки магистралей невозможно (вид б табл. 2). Непрофилированный дисковый инструмент с автономными гибкими пучками из металла	Перемещение периферии пучков под действием центробежных сил и ударное воздействие пучков на поверхность зоны соединения магистралей после удаления припуска за счет анодного растворения неровностей	Регулирования степени наклепа поверхности изменением частоты вращения инструмента при перемещении его по месту соединения магистралей с контактом пучков с обрабатываемой поверхностью в период ее выравнивания с управлением по стабильной величине тока	Устранение местных концентраторов напряжений в месте соединения участков магистралей и управляемый наклеп поверхности для повышения ресурса и межремонтного периода работы изделия	[2] [16] [8] А.с. СССР 914227, 875745

Приведенные в табл. 4 сведения по комбинированному инструменту для обработки отверстий и наружных поверхностей дают возможность изготавливать качественные металлические стыковочные узлы при ограниченном доступе инструмента в зону удаления припуска и упрочнения поверхности заготовки. Характеристики концевых участков длинномерных деталей приведены в табл. 1 и 2. Рассмотрены инструменты нежесткой конструкции, геометрия которых изменяется путем управления давлением внутри катодного элемента. Проанализирована обработка наружных частей стыковочных узлов магистралей высокого давления, работающих в установках атомных электростанций, где высокая степень автоматизации операций по восстановлению магистралей позволяет сократить длительность регламентных работ с остановкой процесса получения энергии, снижает вероятность неблагоприятного воздействия на персонал. Использование в качестве инструмента электрода в форме щетки позволило до полутора раз повысить ресурс магистралей и получить значительный экономический эффект, подтвержденный документально.

Выбор и создание нового оборудования для КМО

Для реализации в авиакосмической и энергетической отраслях машиностроения разработанного технологического процесса для типовых деталей, приведенных в табл. 1 и 2, было создано оригинальное оборудование, учитывающее особенности отраслей, специфику использования его на стадии выпуска новой продукции, а также при ремонте силовых передач и ответственных магистралей высокого давления. Часть такого материала освещена в [15, 16].

Использование результатов исследований КО в машиностроении требует обоснованного выбора оборудования и инструмента для достижения требуемых эксплуатационных показателей. Однако в условиях действующих международных ограничений требуется проектировать и выпускать средства технологического обеспечения производства собственными силами предприятий машиностроения. Для этого в большинстве случаев целесообразно создавать технологические объекты на базе изобретений, используемых для обработки аналогичных деталей, эффективность которых подтверждена в процессе их применения за предшествующий период.

Заключение

1. На базе критерия «принцип полезности» [7] для цифровой оценки уровня производственной технологичности разработаны требования к наукоемким объектам, в первую очередь на примерах авиакосмической и энергетической отраслей машиностроения.

2. Раскрыт и научно обоснован выбор, назначение и необходимость создания комбинированных технологических процессов, средств технологического оснащения для методов обработки с оптимальным сочетанием механических и физико-технических воздействий.

3. Предложены технологические решения для повышения качества и эксплуатационных свойств наиболее напряженных концевых и переходных элементов силовых передач и высоконагруженных ответственных магистралей до достижения эксплуатационного ресурса не ниже аналогичного показателя всего изделия.

4. Рассмотрены типовые объекты производства, приведены рекомендуемые комбинации в едином технологическом процессе возможных способов обработки, подтвержденных результатами испытаний ведущих научных и производственных организаций страны, внедрением предложенных способов, инструмента и оборудования в машиностроение.

Литература

1. Справочник технолога / Под ред. А.Г. Сулова // М.: Инновационное машиностроение. 2019. 800 с.
2. Перспективы развития комбинированных методов обработки в наукоемком машиностроении / В.П. Смоленцев [и др.] // Современные технологии производства в машиностроении: Воронеж: Межвуз. сб. научн. тр. Вып.18. 2025. С. 4-16.
3. Теоретические основы проектирования технологических комплексов / Под общ. ред. А.М. Русецкого.

Авт. В.П. Смоленцев [и др.] // Минск: Беларуская наука. 2012. 239 с.

4. Смоленцев Е.В. Проектирование электрических и комбинированных методов обработки // М.: Машиностроение-1. 2005. 511 с.

5. Электрофизические и электрохимические методы обработки материалов (в 2 т) / Под ред. В.П. Смоленцева // М.: Высш. шк. 1983. 247 с.

6. Физико-химические методы обработки в производстве газотурбинных двигателей / Под ред. Б.П. Саушкина // М.: Дрофа. 2002. 656 с.

7. Смоленцев В.П., Сафонов С.В., Смоленцев Е.В. Обеспечение качества продукции авиационно-космического машиностроения на этапах отработки технологичности изделий // Наукоемкие технологии в машиностроении. 2025. № 6(168). С. 11-18.

8. Уразов О.В., Данилов А.Д. Исследование процесса восстановления поврежденных поверхностей трубопроводов методом поверхностного наклепа // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2021. Т. 17. № 5. С. 126-132.

9. Сафонов С.В. Технологическое обеспечение эксплуатационных характеристик изделий // Воронеж: Изд. дом ВГУ. 2015. 232 с.

10. Патент на полезную модель № RU 231708 U1, 06.02.2025, МПК B24B 39/04. Автоматизированное устройство для поверхностного упрочнения зоны повреждения сварных соединений / А.Д. Данилов, О.В. Уразов // 2025. Бюл. изобр. № 4.

11. Мухин В.С. Поверхность: технологические аспекты прочности деталей ГТД // М.: Наука. 2005. 296 с.

12. Киричек А.В., Соловьев Д.Л., Лизуткин А.Г. Технология и оборудование статико-импульсной обработкой поверхностным пластическим деформированием / М.: Машиностроение. 2004. 288 с.

13. Бабичев А.П., Бабичев И.А. Основы вибрационной технологии / Ростов-на-Дону: Изд. центр. ДГТУ. 1998. 624 с.

14. Усталостная прочность конструкционных сталей после электрохимической размерной обработки / В.П. Смоленцев [и др.] // Электрофизические и электрохимические методы обработки. 1970. № 3. С. 35-40.

15. Смоленцев В.П. Технология электрохимической обработки внутренних поверхностей. М.: Машиностроение. 1978. 176 с.

16. Кириллов О.Н. Технология комбинированной обработки непрофилированным электродом. Воронеж: ГОУ ВПО «Воронежский государственный технический университет». 2010. 254 с.

Поступила 23.09.2025; принята к публикации 20.10.2025

Информация об авторе.

Уразов Олег Владимирович – инженер-исследователь, Воронежский государственный технический университет (394006 Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: 201174uov@mail.ru

TECHNOLOGY AND EQUIPMENT FOR COMBINED METHODS OF PROCESSING OBJECTS OF TRANSPORT AND POWER ENGINEERING

O.V. Urazov

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract: we considered technological issues of combined processing with the simultaneous use of several controlled physical and technical influences, including thermal, electrochemical, and mechanical processes of shaping the interface points of structural elements, using examples of multi-link power transmissions and long-length lines for transporting liquid working media. We show the influence of such facilities on the resource and the inter-repair period of aerospace and power engineering products at the stages of their creation, improvement and development in mass production. We justified the choice of typical research objects, taking into account the operating conditions of the products, and proposed a new evaluation indicator for this, the manufacturability criterion, which shows the quantitative level of efficiency of the technological process option under consideration. Thus, we scientifically substantiated the legitimacy of the choice, appointment or development, creation of new technological solutions that determine and develop the basic indicators in the product and ensure an increase in its quality as a whole. On this basis, we developed promising technological techniques and means of equipping production, which made it possible to build a mechanism for the formation of combined processes with the expanded use of accumulated industry experience in the successful application of physical and technical impacts, including those protected by state security documents. In the article, we gave examples of the use of inventions, most of which were obtained by scientists of the VSTU scientific school, including the author's invention and his articles. They are adapted to the operating conditions of transmission and main gears used in aerospace and energy engineering, which allowed the author to become one of the performers of programs at the industry and state levels

Key words: technology, equipment, impacts, adaptability, transmissions, highways, resource, prospects

References

1. Suslov A.G. ed. "Technologist's Handbook" ("Spravochnik tekhnologa"), Moscow: Innovative Engineering, 2019, 800 p.
2. Smolentsev V.P., Tsybmal T.V., Izvekov A.A., Yukhnovich S.S. "Prospects for the development of combined processing methods in high-tech engineering", *Interuniversity Collection of Scientific Papers: Modern Production Technologies in Mechanical Engineering (Sovremennye tekhnologii proizvodstva v mashinostroyenii)*, Voronezh, 2025, issue 18, pp. 4-16.
3. Smolentsev V.P. et al., Rusetsky A.M. ed. "Theoretical foundations of the design of technological complexes" ("Teoreticheskie osnovy proyektirovaniya tekhnolo-gicheskikh kompleksov"), Minsk: Belarusskaya nauka, 2012, 239 p.
4. Smolentsev E.V. "Design of electrical and combined processing methods" ("Proektirovanie elektricheskikh i kombinirovannykh metodov obrabotki"), Moscow: Mashino-stroyeniye-1, 2005, 511 p.
5. Smolentsev V.P. ed. "Electrophysical and electrochemical methods of materials processing" ("Elektrofizicheskie i elektrokhimicheskie metody obrabotki materialov"), Moscow: Vyssh. shk., 1983, 247 p.
6. Saushkin B.P. ed. "Physico-chemical processing methods in the production of gas turbine engines" ("Fiziko-khimicheskie metody obrabotki v proizvodstve gazoturbinnnykh dvigateley"), Moscow: Drofa, 2002, 656 p.
7. Smolentsev V.P., Safonov S.V., Smolentsev E.V. "Ensuring the quality of aerospace engineering products at the stages of testing the manufacturability of products", *High-Tech Technologies in Mechanical Engineering (Naukoemkie tekhnologii v mashinostroyenii)*, 2025, no. 6(168), pp. 11-18.
8. Urazov O.V., Danilov A.D. "Investigation of the process of restoration of damaged pipeline surfaces by surface riveting", *Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2021, vol. 17, no. 5, pp. 126-132.
9. Safonov S.V. "Technological support of operational characteristics of products" ("Tekhnologicheskoe obespecheniye ekspluatatsionnykh kharakteristik izdeliy"), Voronezh: VSU, 2015, 232 p.
10. Danilov A.D., Urazov O.V. "Automated device for surface hardening of the damage zone of welded joints" ("Avtomatizirovannoe ustroystvo dlya poverkhnostnogo uprochneniya zony povrezhdeniya svarnykh soedineniy"), utility model patent no. RU 231708 U1, 02.06.2025, IPC B24B 39/04, 2025.
11. Mukhin V.S. "Surface: technological aspects of the strength of GTD parts" ("Poverkhnost': tekhnologicheskie aspekty prochnosti detaley GTD"), Moscow: Nauka, 2005, 296 p.
12. Kirichek A.V., Soloviev D.L., Lizutkin A.G. "Technology and equipment for static-pulse treatment by surface plastic deformation" ("Tekhnologiya i oborudovanie statiko-impul'snoy obrabotkoy poverkhnostnym plasticheskim deformirovaniem"), Moscow: Mashinostroyeniye, 2004, 288 p.
13. Babichev A.P., Babichev I.A. "Fundamentals of vibration technology" ("Osnovy vibratsionnoy tekhnologii"), Rostov-on-Don: DSTU, 1998, 624 p.
14. Smolentsev V.P. et al. "Fatigue strength of structural steels after electrochemical dimensional processing", *Electrophysical and Electrochemical Processing Methods (Elektrofizicheskie i elektro-khimicheskiye metody obrabotki)*, 1970, no. 3, pp. 35-40.
15. Smolentsev V.P. "Technology of electrochemical treatment of internal surfaces" ("Tekhnologiya elektrokhimicheskoy obrabotki vnutrennikh poverkhnostey"), Moscow: Mashinostroyeniye, 1978, 176 p.
16. Kirillov O.N. "Technology of combined treatment with an unprofiled electrode" ("Tekhnologiya kombinirovannoy obrabotki neprofilirovannym elektrodom"), Voronezh State Technical University, 2010, 254 p.

Submitted 23.09.2025; revised 20.10.2025

Information about the author

Oleg V. Urazov, Research Engineer, Voronezh State Technical University (84, 20 let Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: 201174uov@mail.ru

МОДЕРНИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ ОХЛАЖДЕНИЯ ФРЕЗЫ ПРИ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ ДЕТАЛЕЙ ВНУТРИКОРПУСНОГО УСТРОЙСТВА ВВЭР

Ю.П. Косогова, А.Г. Федотов

Волгодонский инженерно-технический институт – филиал НИЯУ МИФИ, г. Волгодонск, Ростовская обл., Россия

Аннотация: значительная часть деталей внутрикорпусных устройств реакторов типа *водо-водяной энергетический реактор* (ВВЭР) изготавливается из аустенитных нержавеющей сталей, обладающих плохой обрабатываемостью резанием, что увеличивает не только трудоемкость изготовления и расход дорогостоящего металлообрабатывающего инструмента, но в отдельных случаях требует ручной доработки деталей до заданного качества. Проанализированы причины перехода большего количества тепла в инструмент при обработке нержавеющей сталей по сравнению с обработкой конструкционных углеродистых сталей. Выявлено, что повышение обрабатываемости резанием аустенитной нержавеющей стали может быть достигнуто как повышением режущих свойств инструмента, так и снижением усилий, затрачиваемых при резании металла. Предложено применить способ охлаждения инструмента при резании распыленной охлажденной жидкостью, при котором будет использован эффект забора тепла в результате фазового перехода из твердого состояния в жидкое, а затем в газообразное. Подача *смазочно-охлаждающей технологической среды* (СОТС) в виде частиц инея осуществляется непосредственно на фрезу посредством спроектированного устройства, с целью исключения охлаждения самой детали. При использовании предложенной системы охлаждения можно уменьшить количество тепла, поступающего в инструмент, сохранить высокую температуру обрабатываемого материала в зоне резания, снижающую его механические свойства. Разработана схема охлаждения и предложена конструкция оснастки, обеспечивающей охлаждение инструмента, но исключающей охлаждение детали

Ключевые слова: обработка резанием, износ инструмента, нержавеющей аустенитные стали, фреза, смазочно-охлаждающие технологические среды (СОТС)

Введение

Обработка материалов может осуществляться либо в вакууме, либо в смазочно-охлаждающей технологической среде (СОТС). Опыт показывает, что эффективные СОТС позволяют в 1,2-4 раза повысить стойкость инструмента, на 20-60 % увеличить режимы резания, уменьшить энергозатраты при механообработке. СОТС является сложной гетерогенной системой, в которой выделяют дисперсную фазу (компоненты, присадки, добавки) и основную среду (жидкую или газообразную) [1, 2]. Смазочно-охлаждающие жидкости (СОЖ) являются самой распространённой технологической средой при обработке материалов, что объясняется более высокой проникающей, смазывающей, охлаждающей способностью. Необходимые технико-экономические показатели СОТС проявляются в первую очередь при реализации таких функциональных свойств, как смазывающее и охлаждающее действия. Силы трения без смазочного материала для двух взаимодействующих тел являются суммой всех тангенциальных сил, возникающих в точках контакта при перемещении одного тела

относительно другого. Эти силы при резании металлов могут привести к процессам схватывания. Действие смазочно-охлаждающей технологической среды состоит в уменьшении схватывания, трения, задира, изнашивания, фрикционного нагрева контактирующих поверхностей инструмента и заготовки. В процессе резания образуются физически чистые ювенильные поверхности заготовки и инструмента, которые обладают большой химической активностью за счёт не скомпенсированных атомных связей. В результате при электронном обмене между атомами происходит образование адгезионных связей между инструментом и заготовкой, что увеличивает адгезионно-усталостный износ инструмента. При наличии условий, способствующих упрочнению обрабатываемого металла при резании могут образоваться наросты, зоны прилипания третьего тела.

Смазочно-охлаждающие жидкости (СОЖ) оказывают влияние на процесс резания в первую очередь благодаря охлаждающим свойствам. В большинстве случаев охлаждение снижает изнашивание режущего инструмента и улучшает качество обрабатываемой поверхности. Очевидный способ увеличения охлаждающей способности СОТС перевод её на вод-

ную основу, т. е. создание истинных водных растворов.

При фрезеровании нержавеющей стали количество теплоты, поглощаемое фрезой значительно больше, чем при обработке конструкционных сталей при равных режимах резания. Существует несколько причин перехода большого количества тепла в инструмент при обработке нержавеющей стали по сравнению с обработкой конструкционных углеродистых сталей. Вследствие повышенной способности к упрочнению при пластической деформации жаропрочных сплавов пределы прочности могут возрасти в 2 раза (с 600 до 1200 МПа). В результате этого значительно возрастает количество работы, затрачиваемой на резание и, как следствие, происходит увеличение температуры по сравнению с температурой при резании конструкционных углеродистых сталей.

Подача СОЖ осуществляется свободно падающими или напорными струями. Во втором случае смазочная жидкость подается под высоким давлением тонкой струей в зазор между задней поверхностью резца и обрабатываемой деталью. Подача СОТС может осуществляться через каналы в инструменте, что способствует лучшему удалению стружки, снижению теплообмена между стружкой и инструментом, повышению стойкости инструмента. Подача охлаждающей жидкости по каналам в теле инструмента очень эффективна, но применима не для всех инструментов [3, 4]. Другим методом является метод подвода СОЖ в распыленном состоянии. При механическом распыливании жидкость под давлением вытекает из различных форсунок в неподвижную воздушную среду. Обычно в качестве газоносителя (дисперсионной среды аэрозоля) принимается сжатый воздух (давление до 0,2–0,4 МПа). Размер диспергированных частиц жидкости достигает 10–20 мкм. Скорость струи распыленной жидкости составляет несколько сотен метров в секунду. Диспергированные в воздушной среде частицы жидкости оказывают охлаждающее действие не только путем теплообмена, но и за счет испарения. Достаточно эффективным является способ добавления смазочно-охлаждающей жидкости (СОЖ) в виде распыленной охлажденной жидкости. В результате двух фазовых переходов возможно поглощение на 1 кг воды $2633 \text{ кДж/кг} = 658 \text{ ккал}$, из них $333 \text{ кДж/кг} = 85 \text{ ккал}$ за счет таяния льда и $2300 \text{ кДж/кг} = 573 \text{ ккал}$ за счет испарения воды.

Несмотря на то, что количество теплоты, уходящей в режущий инструмент, значительно меньше количества теплоты, уходящей в стружку и деталь, температура поверхности инструмента значительно больше температуры детали и стружки [5–7]. Теплопроводность стали 08X18H10T равна $0,0027 \text{ Вт/м}^{\circ}\text{C}$, в то время как теплопроводность стали 45 равна $0,0040 \text{ Вт/м}^{\circ}\text{C}$, в результате чего снижается доля тепла поглощаемого деталью и стружкой и, одновременно, повышается доля тепла поглощаемого инструментом, при обработке нержавеющей стали [8–10]. Из-за вязкости нержавеющей стали образуется непрерывная (сливная) стружка, увеличивается время постоянного контакта между стружкой и передней поверхностью инструмента, что также способствует передаче тепла от стружки к инструменту. Учитывая то, что при обработке нержавеющей стали на износ инструмента большое влияние оказывают силы трения, то в зону резания необходимо также подавать вещества, снижающие коэффициенты трения. При использовании фрез из быстрорежущих сталей или твердосплавных эффективно применение СОТС в распыленном состоянии, т.к. при этом стойкость инструмента повышается в 1,5–3 раза по сравнению с резанием без СОТС на воздухе или при поливе [11–14].

Материалы и методы

В качестве объекта исследований выбрана деталь внутрикорпусного устройства (ВКУ) реактора ВВЭР, изготовленная из аустенитной нержавеющей стали 08X18H10T – труба упорных стаканов, которые служат в качестве направляющих и опорных частей тепловыделяющих сборок (ТВС). Она обладает требуемыми эксплуатационными свойствами, чтобы в процессе работы не разрушаться под воздействием высоких температур, давления и радиации. При производстве других деталей ВКУ применяются аналогичные материалы нержавеющей стали и коррозионностойких сплавов, например, 12X18H10T и 12X18H9T. В каждой из этих труб необходимо прорезать 390 пазов шириной 3 мм (рис. 1), общее количество таких пазов в комплекте труб для одного реактора составляет 63000, все из них должны быть изготовлены в соответствии с высокими требованиями к качеству поверхностного слоя.

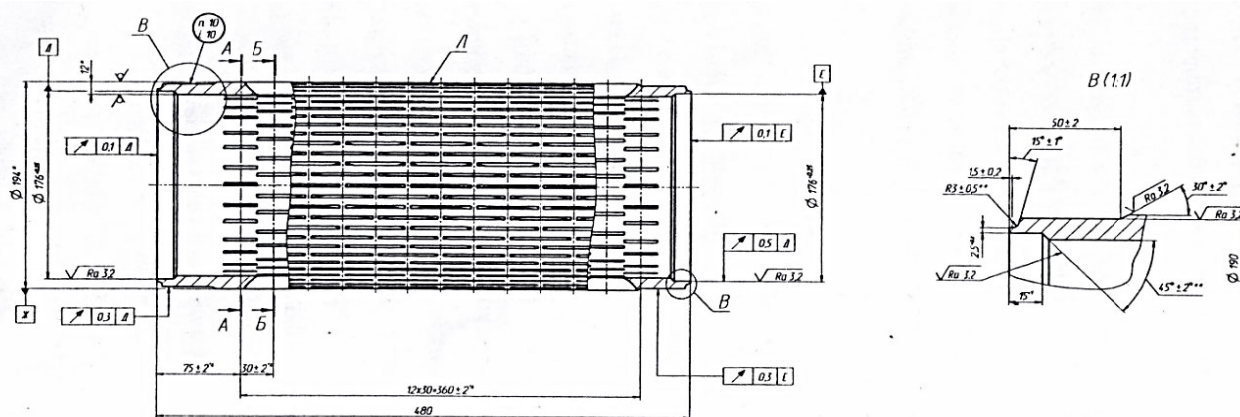


Рис. 1. Чертеж детали

В филиале «АЭМ-технологии» «Атом-маш» в г. Волгодонске на вертикально-фрезерном станке 6Р13 производится основная обработка 390 пазов дисковой фрезой шириной 3,0-3,2 мм. Марка применяемого материала инструмента Р6М5. При прорезании паза боковые поверхности инструмента находятся в постоянном контакте с деталью. Такое постоянно соприкосновение материалов в условиях повышенной температуры вызывает быстрый износ как боковых поверхностей, так и режущего лезвия инструмента (рис. 2).

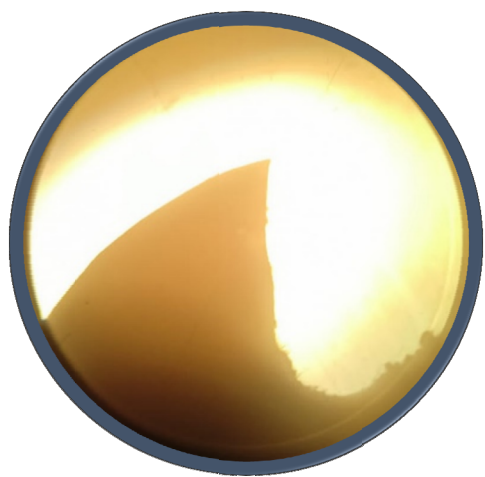


Рис. 2. Износ зубьев фрезы

Обработка резанием нержавеющей стали 08Х18Н10Т ведется со следующими режимами резания: $t = 12$ мм, $b = 3$ мм, $S = 0,12$ мм/мин, $V_c = 12$ м/мин, стойкость инструмента при этом $T \approx 45$ минут. Приблизительное количество обработанных пазов между переточками составляет 20 штук, количество переточек не превышает четырех, таким образом на изготовление одной детали расходуется около 50 фрез.

Фрезерование коррозионностойких сталей дисковыми фрезами из быстрорежущих сталей целесообразно осуществлять с применением эмульсионных и полусинтетических СОТС. Чем пластичнее сталь, тем большее влияние оказывает СОТС на процесс фрезерования. При фрезеровании вязких сталей более эффективны СОТС, с высокими смазывающими свойствами при одновременном обеспечении высокого охлаждающего действия. Смазочно-охлаждающая жидкость должна не только эффективно воздействовать на процесс резания, но и удовлетворять дополнительным требованиям: она должна быть дешёвой, не должна быть токсичной или пожароопасной, не должна вызывать коррозию станка или обработанной детали. Для обработки углеродистых и легированных сталей при высоких скоростях резания предпочтительно применять масляные СОТС. Это связано с тем, что действия СОТС сопровождается воздействием кислорода воздуха на процесс резания. При применении СОТС полностью или частично из зоны резания вытесняется воздух и тем самым уменьшается влияние кислорода воздуха. Кроме того СОТС и кислород воздуха могут или взаимно усиливать процессы изнашивания поверхности инструмента (водные СОЖ интенсифицируют стадии взаимодействия после хемосорбции) или ослаблять (при использовании масляной фазы в эмульсиях и масляных СОТС как препятствия доступа кислорода к поверхностям). Выбор оптимальных технологий и технических средств подачи СОТС является сложной задачей, при решении которой необходимо учитывать большое число факторов: состав и свойства среды, специфику операции, конструкцию рабочей зоны станка и инструмента, а также свойства инструмента. Подаваться СОЖ

может одним компонентом (однофазная подача) и многофазно (несколько различных СОЖ).

В качестве смазочно-охлаждающей жидкости для обработки аустенитных нержавеющей сталей были выбраны отечественные СОЖ: СИНАПОЛ, Аквол-11, Модус-А. В качестве эффективной альтернативы рекомендуется смазочно-охлаждающая жидкость ТЕХМОЛ ЭКСТРА, синтетическая смазочно-охлаждающая жидкость универсального применения (концентрат СОЖ) (ТУ 2422-005-13092819-2002).

Результаты

Основными источниками теплоты в процессе резания являются зона стружкообразования и участки инструмента, которые контактируют с обрабатываемой деталью и стружкой. Снижение температуры инструмента и детали в процессе резания повышает точность обработки вследствие уменьшения температурной деформации. Повышение стойкости режущей части инструмента считается главной задачей применения СОЖ. Известно, что стойкость резцов с неперетачиваемыми твердосплавными пластинами при применении внутреннего охлаждения повышается практически в два раза по сравнению со стойкостью инструмента, работающего без охлаждения. Высокая удельная теплоемкость и коэффициент теплопередачи воды улучшают охлаждающие свойства водосмешиваемых СОТС по сравнению с масляными жидкостями. Благодаря испарению воды из водосмешиваемых продуктов теплота испарения способствует общему охлаждению. Необходимо учитывать, что одни и те же СОТС эффективны для одних инструментальных материалов, могут быть не эффективны для других. Так, например, смазывающий и охлаждающий эффект СОЖ приемлем при фрезеровании для инструмента из быстрорежущих сталей [15-17]. В результате того, что фреза нагревается до более высокой температуры, чем деталь, она в результате коэффициента линейного расширения увеличивается по ширине больше, чем прорезаемый паз, что вызывает заклинивание фрезы по боковым поверхностям. При этом возрастают нормальные силы на контакте материала детали и боковой поверхности дисковой фрезы и в результате значительно возрастает износ инструмента. Износ зубьев фрезы представлен на рис. 3. Начальный размер ширины инструмента умень-

шается с 3,2 мм до 2,8 мм и ниже. В ходе обработки также уменьшается высота зуба, которую корректируют правкой инструмента, в следствии этого диаметр фрезы уменьшается с 63,0 мм до 58,0 мм.



Размеры фрезы до обработки:

— $D = 63 \text{ мм}$
— $b = 3,2 \text{ мм}$

Размеры фрезы после обработки:

— $D = 58 \text{ мм}$
— $b = 2,8 \text{ мм}$

Рис. 3. Износ зубьев фрезы

Применение смазочно-охлаждающих жидкостей повышает технологические показатели операций обработки резанием. При этом снижается шероховатость обработанной поверхности вследствие устранения или уменьшения процессов фрикционного переноса и наростообразования; уменьшается глубина и интенсивность наклёпа обработанной поверхности, значения внутренних напряжений; уменьшается деформация заготовки и инструмента под действием механических нагрузок и снижается температура стружки, заготовки, инструмента, а, следовательно, понижаются их температурные деформации и интенсивность размерного изнашивания инструмента.

С учетом вышесказанного, возникает необходимость охлаждать не только рабочую зону фрезы, но и всю фрезу, уменьшая ее тепловое расширение, что необходимо учесть при проектировании устройства для подачи смазочно-охлаждающей среды. Для преобразования распыленной воды в иней, предлагается охлаждать жидкость воздухом, охлажденным посредством вихревых трубок, за счет использования эффекта Ранка-Хилша.

При токарной обработке твердосплавными инструментами суспензию необходимо подавать под давлением на заднюю поверхность резца, исключив перепады в охлаждении инструмента. При фрезеровании дисковыми быстрорежущими фрезами подаем СОЖ в форме мелкодисперсной фазы в виде инея (замёрзших капель) через каналы инструмента в зону резания.

Для снижения температуры в зоне резания и, как следствие, повышения стойкости инструмента предлагается способ охлаждения в зоне резания за счет эффекта отбора тепла из-за фазового перехода из твердого состояния в жидкое, а затем в газообразное. Это можно реализовать, если подавать в зону резания распыленную жидкость в виде инея (застывших частиц воды). Схема системы подвода СОТС представлена на рис. 4.

Резервуар СОТС обеспечивает наличие смазочно-охлаждающей жидкости, поступающей в дозатор-компенсатор и сбор конденсата СОТС для повторного использования.

Назначение дозатора-распылителя - преобразовать жидкость в аэрозоль, подавая такое количество жидкости, которое может быть переведено в твердое состояние охлажденным воздухом, поступающим из вихревой трубки.

Охладитель воздуха (вихревая трубка Ранка-Хилша) обеспечивает охлаждение сжатого воздуха до температуры -30° (-50° C).

Принцип работы вихревых труб заключается в разделении потока сжатого воздуха, поступающего тангенциально внутренней поверхности трубы. Часть воздушного потока в результате сложных аэродинамических процессов, обусловленных геометрией элементов трубы разогревается и движется по периферии трубы к горячему концу. Остальная часть потока расширяется и движется противотоком по центральной части трубы к холодному концу.

Смеситель-сопло обеспечивает смешивание суспензии жидкости с охлажденным воздухом и образование инея, направляемого в зону резания. После испарения в зоне резания пар конденсируется частично на обрабатываемой детали, частично в воздушном пространстве, замкнутом кожухом станка. Конденсат попадает в поддон и возвращается в резервуар СОТС. Защитный экран (кожух) станка с числовым программным управлением (ЧПУ) препятствует попаданию пара и суспензии в окружающую среду.

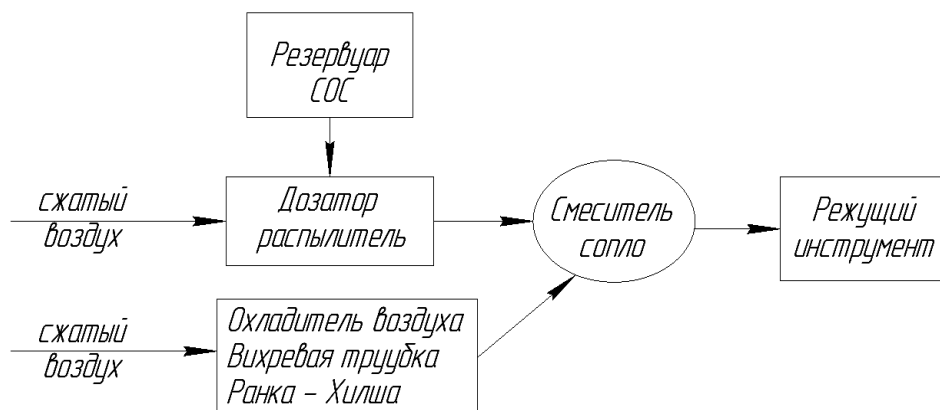


Рис. 4. Схема системы подвода СОТС

В системе подвода СОТС максимально использованы покупные, серийно выпускаемые элементы (изделия), что снижает затраты на изготовления самой системы. В качестве дозатора-распылителя используется маслораспылитель, модели В44-26 по ТУ 4152-002-00220859-95, с расходом не менее 80 капель/мин, применяемый в пневматических системах. Распылитель дополнительно оборудован

штуцером с обратным клапаном, который устанавливается в отверстие для заливки жидкости, что обеспечивает периодическое пополнения СОТС из резервуара посредством насоса. В качестве охладителя воздуха используется вихревая трубка производителя Ningbo XHnotation Pneumatic Technology Co., Ltd.(КНП).

Конструкция смесителя-сопла представлена на рис. 5.

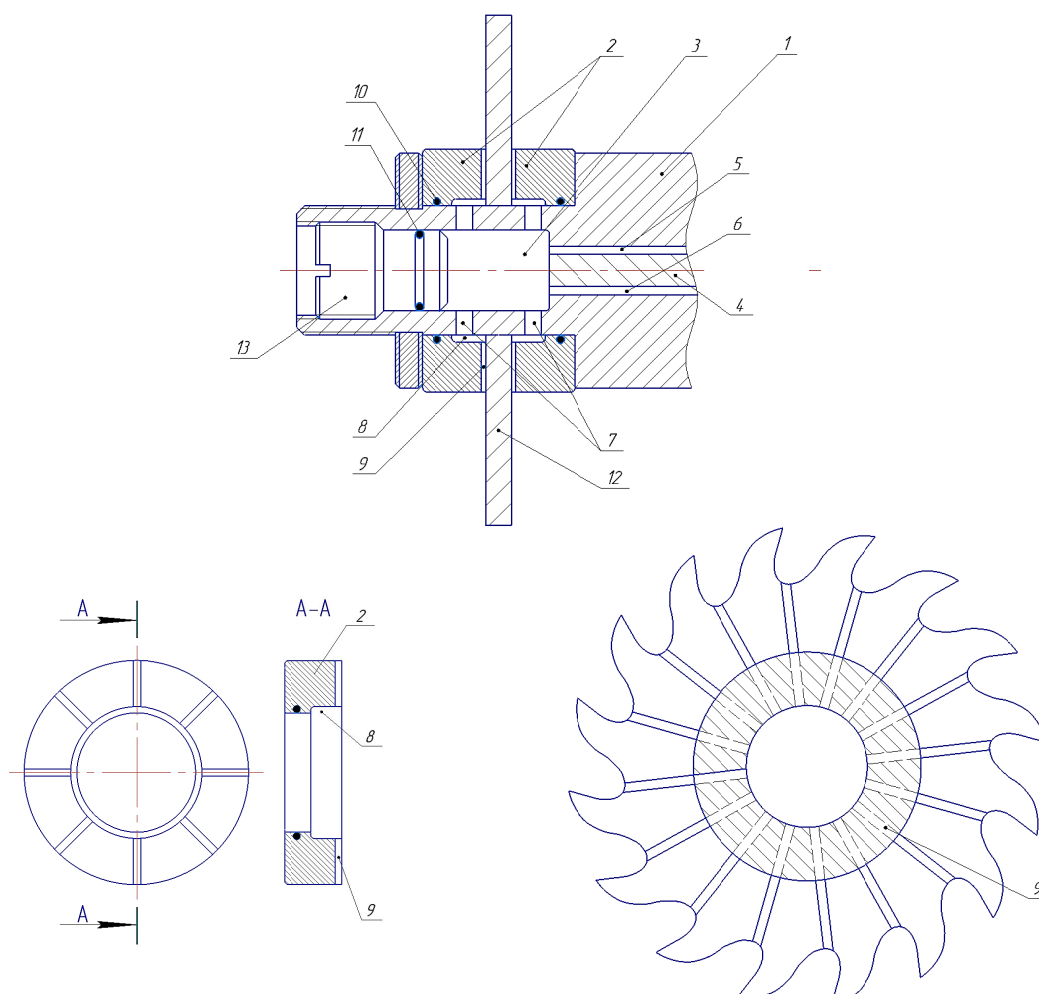


Рис. 5. Смеситель-сопло

Смеситель-сопло выполнен в виде полости 3 и восьми отверстий 7 (по четыре отверстия с каждой стороны фрезы), просверленных в оправке 1. По отверстию 5 в смеситель поступает поток суспензии СОТС, а по отверстию 6 поток охлажденного воздуха, которые смешиваясь, образуют взвесь замерзших частиц в потоке воздуха (иней). На каждый зуб фрезы 12 иней поступает через отверстия 7, кольцевую выточку 8 и каналы 9 прижимных шайб 2 (каналы 9 выполнены против каждого зуба фрезы). Уплотнения 10, 11 и заглушка 13 препятствуют выходу смеси вне зоны резания.

Предложенная конструкция смесителя-сопла обеспечивает подачу СОТС в виде инея непосредственно на фрезу, исключая охлаждение самой детали. Предложенная технология обработки пазов внутрикорпусного устройства реактора ВВЭР проводилась на вертикально-фрезерном центре модели MILLSTAR LV1400, фреза менялась через каждые 40 пазов. Модернизация технологического процесса механической обработки 63000 пазов позволила повы-

сить скорость резания (фрезерования) в 2 раза при сохранении заданной стойкости инструмента. Одновременно снижается величина заусенец и трудоемкость их удаления.

Предложенный технологический процесс можно тиражировать и на другие детали из аустенитных нержавеющей сталей, изготавливаемые в филиале «АЭМ-технологии» «Атоммаш» в г. Волгодонск.

Заключение

Разработана инновационная система обработки упорных стаканов, выполненных в виде перфорированных труб, применяемых в ВВЭР в качестве направляющих и опорных частей тепловыделяющих сборок (ТВС), которая имеет следующие преимущества по сравнению с применяемой на предприятии:

- уменьшает тепловое расширение фрезы, исключает тем самым ее заклинивание и дефекты на боковых сторонах обрабатываемого паза;

- позволяет снизить количество используемого инструмента в 2 раза, что уменьшает расходы на инструмент;

- повышает производительность процесса в 1,5 раза (время обработки сокращается с 5300 часов до 2700 часов).

Установлено, что применение распыленных СОТС препятствует образованию наростов и наплывов на рабочих поверхностях инструмента, повышает качество обработанной поверхности; уменьшает наклеп, внутренние напряжения и температурные деформации заготовок в процессе резания. Наблюдается повышение экономических показателей операции резания за счёт увеличения стойкости инструмента, сокращения его расходов вследствие уменьшения интенсивности изнашивания.

Литература

1. Ким В.А., Якубов Ч.Ф., Схиртладзе А.Г. Мезомеханика процессов контактного взаимодействия при трении и резании металлов. Старый Оскол: ООО «Тонкие наукоемкие технологии», 2018. 244 с.
2. Артеменко Н.С., Каменов Р.У., Госина К.К. Особенности обработки резанием жаропрочных и жаростойких сталей и сплавов // Инновационные проекты и технологии машиностроительных производств: материалы всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участием, Омск, 15–16 октября 2015 года. Омск: Омский государственный университет путей сообщения, 2015. С. 127-133.
3. Особенности моделирования шероховатости поверхности при фрезеровании нержавеющей сталей с применением различных сред / Э.Р. Ваниев, Р.М. Джемалидинов, И.Э. Теминдаров, Э.Л. Бекиров // Наукоемкие технологии в машиностроении. 2024. № 4(154). С. 19-28.
4. Гайфуллин И.И., Плаксин А.М., Пиунов В.Ю. К вопросу оптимального выбора режимов резания при механической обработке нержавеющей стали с использованием жидких СОТС // Вестник НПО им. С.А. Лавочкина. 2024. № 1(63). С. 74-81.
5. Косонова Ю.П., Кравченко П.Д., Гашнева М.А. Вариант применения съемного рычага захвата кантования эллипсоидных днищ корпусного оборудования АЭС // Глобальная ядерная безопасность. 2020. № 4(37). С. 60-67.
6. Влияние экологически чистых технологических сред на контактные характеристики процесса резания в начальный период эксплуатации / А.И. Алиев, Р.М. Джемалидинов, В.В. Скакун, И.В. Харченко // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. 2019. № 1(73). С. 8-14.
7. Марков В.В., Киселева Е.В. Смазочно-охлаждающие технологические средства для обработки металлов резанием. Иваново: Ивановский государствен-

ный энергетический университет им. В.И. Ленина, 2011. 108 с.

8. Доманин К.Ю. Влияние СОТС на обработку резанием нержавеющей и жаропрочных сталей и сплавов // Актуальные вопросы науки и техники: Студенческая междунар. науч.-практ. конф., Воронеж, 18 июня 2014 года. Воронеж: ФГБОУ ВПО «Московский государственный университет путей сообщения. Воронежский филиал», 2014. С. 183-187.

9. Пат. № 2734314 С1 Российская Федерация, МПК В23Q 11/10. Устройство для подачи смазывающей технологической среды / В.В. Скакун, Р.М. Джемалидинов. № 2020117893: заявл. 19.05.2020; опубл. 15.10.2020.

10. Киселева Е.В., Марков В.В. Повышение эффективности лезвийного резания путем механохимической активации водомасляных эмульсионных СОТС. Иваново: Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина, 2013. 120 с.

11. Experimental investigation of the effects of cryogenic cooling on tool life in Ti6Al4V milling / P. Albertelli, V. Mussi, M. Strano, M. Monno // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2021. Vol. 117. No. 7. Pp. 2149-2161.

12. Assessment of Tribological Indicators of the Turning Process Vessel Steel 20 MnMoNi 5-5 / E. Fominov, E. Fisunova, T. Lavrenova, V. Kurochkina // III International Scientific and Practical Conference Technologies, Materials Science and Engineering: AIP Conference Proceedings, Dushanbe, 08–10 апреля 2024 года. Vol. 3243. Melville: AIP PUBLISHING, 2024. P. 20051.

13. Исследование влияния масляных СОТС с улучшенными трибологическими свойствами на силы резания и шероховатость обработанных поверхностей / Э.Д. Умеров, В.В. Скакун, Р.М. Джемалидинов, Ю.А. Егоров // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). 2025. Т. 27, № 1. С. 6-19.

14. Ивченко Т.Г. Оценка возможностей повышения эффективности обработки при использовании СОТС // Прогрессивные технологии и системы машиностроения. 2018. № 1(60). С. 37-43.

15. Гайфуллин И.И., Кириллов А.К. Выбор смазочно-охлаждающих технологических средств на основе их функциональных действий при лезвийной обработке конструкционных материалов // Машиностроение: традиции и инновации (МТИ-2021): Материалы XIV всерос. конф. с междунар. участием, Москва, 25 октября – 20 2021 года. Москва: Московский государственный технологический университет «СТАНКИН», 2021. С. 123-129.

16. Nadolny K., Sutowski P., Kieraś S. Modern Approach to Delivery Coolants, Lubricants and Antiadhesives in the Environmentally Friendly Grinding Processes // International Journal of Precision Engineering and Manufacturing - Green Technology. 2020. Vol. 8. pp. 639-663.

17. Башмакова Е. В. Изучение влияния на износ режущего инструмента разной технологии приготовления СОТС // NovalInfo.Ru. 2018. Т. 1, № 84. С. 43-48.

Поступила 01.07.2025; принята к публикации 06.10.2025

Информация об авторах

Косонова Юлия Павловна – канд. техн. наук, доцент кафедры машиностроения и прикладной механики, Волгодонский инженерно-технический институт – филиал НИЯУ МИФИ (347360, Россия, Ростовская обл., г. Волгодонск, ул. Ленина, д. 73/94), тел.: +7(8639) 22-57-64, e-mail: ypkosogova@mephi.ru, ORCID: 0000-0003-3952-7814

Федотов Анатолий Григорьевич – канд. техн. наук, доцент кафедры машиностроения и прикладной механики, Волгодонский инженерно-технический институт – филиал НИЯУ МИФИ (347360, Россия, Ростовская обл., г. Волгодонск, ул. Ленина, д. 73/94), тел.: +7(8639) 22-57-64, e-mail: ypkosogova@mephi.ru

MODERNIZATION OF THE COOLING SYSTEM OF THE CUTTER IN MECHANICAL PROCESSING OF PARTS OF THE INTERNAL VESSEL DEVICE OF WVER

Yu.P. Kosogova, A.G. Fedotov

**Volgodonsk Engineering and Technical Institute - branch of National Research Nuclear University
MEPhI, Volgodonsk, Russia**

Abstract: a significant portion of the parts of the internal devices of WVER reactors are made of austenitic stainless steels, which have poor machinability, which increases not only the labor intensity of manufacturing and the consumption of expensive metal-cutting tools, but in some cases requires manual finishing of the parts to the specified quality. We analyzed the reasons for the transfer of a greater amount of heat into the tool during the processing of stainless steels compared to the processing of structural carbon steels. We revealed that an increase in the machinability of austenitic stainless steel can be achieved both by increasing the cutting properties of the tool and by reducing the efforts expended when cutting the metal. We propose to use a method of cooling the tool during cutting with sprayed cooled liquid, which will use the effect of heat collection as a result of the phase transition from a solid state to a liquid, and then to a gaseous state. We carried out the supply of coolant in the form of frost particles directly to the cutter by means of a designed device, in order to exclude cooling of the part itself. When using the proposed cooling system, it is possible to reduce the amount of heat entering the tool, maintain a high temperature of the processed material in the cutting zone, reducing its mechanical properties. We developed a cooling scheme and a design of equipment has been proposed that provides cooling of the tool, but excludes cooling of the part

Key words: cutting processing, tool wear, stainless austenitic steels, milling cutter, lubricating and cooling process media

References

1. Kim V.A., Yakubov Ch.F., Skhirtladze A.G. "Mesomechanics of contact interaction processes during friction and cutting of metals" ("Mezomekhanika processov kontaktnogo vzaimodeystviya pri trenii i rezanii metallov"), Stary Oskol: Tonkie naukoemkie tekhnologii, 2018, 244 p.
2. Artemenko N.S., Kamenov R.U., Gosina K.K. "Features of cutting heat-resistant and heat-resistant steels and alloys", *Proc. of the All-Russian Scientific and Technical Conf. with Int. Participation: Innovative Projects and Technologies of Mechanical Engineering Production (Innovatsionnye proekty i tekhnologii mashinostroytel'nykh proizvodstv)*, Omsk, October 15-16, 2015, pp. 127-133.
3. Vaniev E.R., Dzhemalyadinov R.M., Temindarov I.E., Bekirov E.L. "Features of modeling surface roughness during milling of stainless steels using various media", *Science-Intensive Technologies in Mechanical Engineering (Naukoemkie tekhnologii v mashinostroyenii)*, 2024, no. 4(154), pp. 19-28.
4. Gaifullin I.I., Plaksin A.M., Piunov V.Yu. "On the issue of optimal selection of cutting modes during mechanical processing of stainless steel using liquid cutting fluids", *Bulletin of NPO n.a. S.A. Lavochkin (Vestnik NPO im. S.A. Lavochkina)*, 2024, no. 1 (63), pp. 74-81.
5. Kosogova Yu.P., Kravchenko P.D., Gashneva M.A. "Option for using a removable grip lever for tilting ellipsoid bottoms of NPP vessel equipment", *Global Nuclear Safety (Global'naya yadernaya bezopasnost')*, 2020, no. 4 (37), pp. 60-67.
6. Aliev A.I., Dzhemalyadinov R.M., Skakun V.V., Kharchenko I.V. "Influence of environmentally friendly technological environments on the contact characteristics of the cutting process in the initial period of operation", *Bulletin of Rostov State University of Railway Engineering (Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putey soobshcheniya)*, 2019, no. 1 (73), pp. 8-14.
7. Markov V.V., Kiseleva E.V. "Lubricating and cooling technological means for metal cutting" ("Smazochno-okhlazhdayushchie tekhnologicheskie sredstva dlya obrabotki metallov rezaniem"), Ivanovo State Power Engineering University named after V. I. Lenin, 2011, 108 p.
8. Domanin K.Yu. "Influence of cutting fluids on cutting of stainless and heat-resistant steels and alloys", *Student Int. Sci. and Practical Conf.: Current Issues in Science and Technology (Aktual'nye voprosy nauki i tekhniki)*, Voronezh, June 18, 2014, pp. 183-187.
9. Skakun V.V., Dzhemalyadinov R.M. "Device for supplying a lubricating process medium" ("Ustroystvo dlya podachi smazyvayushchey tekhnologicheskoy sredy"), patent no. 2734314 C1 Russian Federation, declared 19.05.2020, publ. 15.10.2020.
10. Kiseleva E.V., Markov V.V. "Increasing the efficiency of blade cutting by mechanochemical activation of water-oil emulsion cooling lubricants" ("Povyshenie effektivnosti lezviynogo rezaniya putem mekhanokhimicheskoy aktivatsii vodomaslyanykh emul'sionnykh SOTS"), Ivanovo State Power Engineering University named after V. I. Lenin, 2013, 120 p.
11. Albertelli P., Mussi V., Strano M., Monno M. "Experimental investigation of the effects of cryogenic cooling on tool life in Ti6Al4V milling.", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2021. vol. 117, no. 7. pp. 2149-2161.
12. Fominov E., Fisunova E., Lavrenova T., Kurochkina V. "Assessment of Tribological indicators of the turning process vessel steel 20 MnMoNi 5-5", *III International Scientific and Practical Conference Technologies, Materials Science and Engineering: AIP Conference Proceedings*, Dushanbe, Melville: AIP PUBLISHING, 2024, vol. 3243. pp. 20051.

13. Umerov E.D., Skakun V.V., Dzhemalyadinov R.M., Egorov Yu.A. "Study of the influence of oil cutting fluids with improved tribological properties on cutting forces and roughness of machined surfaces", *Metalworking: Technology, Equipment, Tools (Obrabotka metallov: tekhnologiya, oborudovaniye, instrumenty)*, 2025, vol. 27, no. 1, pp. 6-19.
14. Ivchenko T.G. "Assessment of the possibilities of increasing the efficiency of processing using cooling liquids", *Progressive Technologies and Systems of Mechanical Engineering (Progressivnye tekhnologii i sistemy mashinostroyeniya)*, 2018, no. 1(60), pp. 37-43.
15. Gaifullin I.I., Kirillov A.K. "Selection of lubricating and cooling technological means based on their functional actions in blade processing of structural materials", *Proc. of the XIV All-Russian Conf. with Int. Participation: Mechanical Engineering: Traditions and Innovations (MIT - 2021)*, Moscow, October 25 - 20, 2021, pp. 123-129.
16. Nadolny K., Sutowski P., Kieraś S. "Modern Approach to Delivery Coolants, Lubricants and Antiadhesives in the Environmentally Friendly Grinding Processes", *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing - Green Technolog.*, 2020, vol. 8, pp. 639-663.
17. Bashmakova E.V. "Study of the influence of different technologies of preparation of cutting fluids on the wear of cutting tools", *NovaInfo.Ru*, 2018, vol. 1, no. 84, pp. 43-48.

Submitted 01.07.2025; revised 06.10.2025

Information about the authors

Yuliya P. Kosogova, Cand. Sc. (Technical), Assistant Professor, Volgodonsk Engineering Technical Institute, the Branch of the National Research Nuclear University «MEPhI» (73/94Lenin str., Volgodonsk 347360, Rostov region, Russia), tel.: +7(8639) 22-57-64, e-mail: ypkosogova@mephi.ru, ORCID: 0000-0003-3952-7814

Anatoliy G. Fedotov, Cand. Sc. (Technical), Assistant Professor, Volgodonsk Engineering Technical Institute, the Branch of the National Research Nuclear University «MEPhI» (73/94Lenin str., Volgodonsk 347360, Rostov region, Russia), tel.: +7(8639) 22-57-64, e-mail: agfedotov@mephi.ru

ГАЗОДИНАМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ БПЛА ТИПА КОНВЕРТОПЛАН В СНАРЯЖЕННОМ СОСТОЯНИИ С ПРИМЕНЕНИЕМ CFD МЕТОДОВ

Е.Н. Некравцев, К.С. Сафонов

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

Аннотация: представлены результаты комплексного газодинамического анализа беспилотного летательного аппарата (БПЛА) типа конвертоплан с использованием методов вычислительной гидродинамики (CFD) в среде Ansys Fluent. Особенность газодинамического анализа заключается в продувочной модели летательного аппарата с размещенными на его поверхности двумя мультикоптерами (полезной нагрузкой), которые существенно снижают аэродинамические характеристики БПЛА. Актуальность работы обусловлена растущими требованиями к аэродинамической эффективности и управляемости БПЛА вертикального взлета и посадки, особенно в переходных режимах полета. В отличие от существующих исследований, фокусирующихся на изолированных режимах, в данной работе проведен сравнительный анализ аэродинамических характеристик (поля давлений, скорости, подъемная сила, лобовое сопротивление) для пяти критических углов атаки: -2° , 0° , 2° , 4° и 8° . На основе полученных данных выявлены ключевые зоны формирования аэродинамических моментов и сопротивления, что позволило сформулировать рекомендации по оптимизации геометрии несущих поверхностей и компоновки аппарата. Проведенный анализ демонстрирует не только корректность примененной методики расчета, но и выявляет специфические особенности обтекания конвертоплана с размещенной на его борту полезной нагрузкой, которые необходимо учитывать для повышения устойчивости и энергоэффективности на аэродинамически невыгодных режимах полета. Результаты работы имеют практическую ценность для этапа проектирования БПЛА подобного класса, позволяя сократить количество натурных экспериментов и целенаправленно оптимизировать конструкцию.

Ключевые слова: БПЛА, конвертоплан, газодинамический анализ, CFD, Ansys Fluent, аэродинамические характеристики, угол атаки

Благодарности: работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № FZGM-2025-0002)

Введение

БПЛА тандемной схемы типа конвертоплан (далее БПЛА) был разработан, изготовлен и испытан в рамках работы, выполненной при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № FZGM-2025-0002).

Разрабатываемый БПЛА [1] имеет тандемную аэродинамическую схему, которая предусматривает наличие двух крыльев (переднего и заднего), расположенных одно за другим на некотором расстоянии вдоль фюзеляжа. Оба крыла — прямоугольные с прямой передней кромкой, имеют одинаковый аэродинамический профиль и его хорду. Крылья отличаются размахом и, соответственно, площадью. Исходя из аэродинамических расчетов и особенностей данного типа БПЛА, переднее крыло имеет меньший размах, заднее крыло большего размаха. Крылья имеют двояковыпуклый несимметричный профиль РП-14 %.

Полет БПЛА может быть осуществлен в двух режимах:

- подъемный вертикальный режим (вертолетный) для осуществления взлета и посадки;
- горизонтальный режим (самолетный) для реализации крейсерского, гораздо более экономичного полета за счет аэродинамической подъемной силы, которая создается планером БПЛА (крыльями и несущим фюзеляжем).

Вертолетный полет реализуется за счет тяги, создаваемой вращающимся «крылом», в качестве которого выступает несущий винт. Этот режим полета является крайне неэкономичным, но очень удобным, т.к. не требует наличия специально подготовленной наземной инфраструктуры в виде взлетно-посадочных полос, что делает такой летательный аппарат малотребовательным к наземным площадкам. Неэкономичность вертолетного режима полета объясняется необходимостью создания тяги воздушного винта, превышающей массу летательного аппарата. Отношение максимальной тяги к силе тяжести, действующей на летательный аппарат, называется коэффициентом его тяговооруженности. Для вертолета этот коэффициент должен принимать значения в диапазоне 1,2 - 2,5. Чем выше значение коэффициен-

та, тем лучше маневренность вертолета. Но это, безусловно, требует больших затрат энергии.

Коэффициент тяговооруженности самолета имеет гораздо меньшие значения, которые укладываются в диапазон 0,2 – 1,3. Этот факт объясняется наличием подъемной силы неподвижного крыла. Потребная тяга силовой установки самолета определяется из отношения его взлетного веса к его аэродинамическому качеству. Поэтому самолетный режим является энергетически более экономичным.

В создаваемом БПЛА используются вертикальный подъем для удобства эксплуатации с неподготовленных площадок в полевых условиях и самолетный крейсерский режим с целью экономии энергии аккумуляторных батарей, предназначенных для питания электрической силовой установки, состоящей из шести подъемных и четырех из них маршевых поворотных двигателей на специальных мотогондолах с аэродинамическими обтекателями (рис. 1). Поворот винтомоторных групп осуществляется при помощи сервоприводов.

Газодинамический расчет вертикального движения БПЛА не представляет интереса, поскольку сила тяги двигателей, работающих на подъем, существенно превышает взлетный вес аппарата. Такое соотношение параметров вполне достаточно для подъема БПЛА на заданную высоту и перевода его в горизонтальный (самолетный) полет. Далее в горизонтальном полете максимальная сила тяги уменьшается, так как часть двигателей отключается.

Этот режим полета представляет наибольший интерес, т.к. характеризует несущие способности аэродинамической схемы планера БПЛА.

Целью проведения электронных аэродинамических продувок БПЛА в самолетном режиме полета являлось получение аэродинамических характеристик в соответствии с заданными условиями и режимами полета.

Проведены электронные аэродинамические продувки БПЛА в снаряженном состоянии, т.е. с находящимися на его верхней поверхности двумя квадрокоптерами для выполнения работ по аэро- и фотосъемке. Получены результаты в виде полей распределения скорости обтекающего потока и давления. Определены значения подъемной силы и силы лобового сопротивления БПЛА для различных углов атаки.

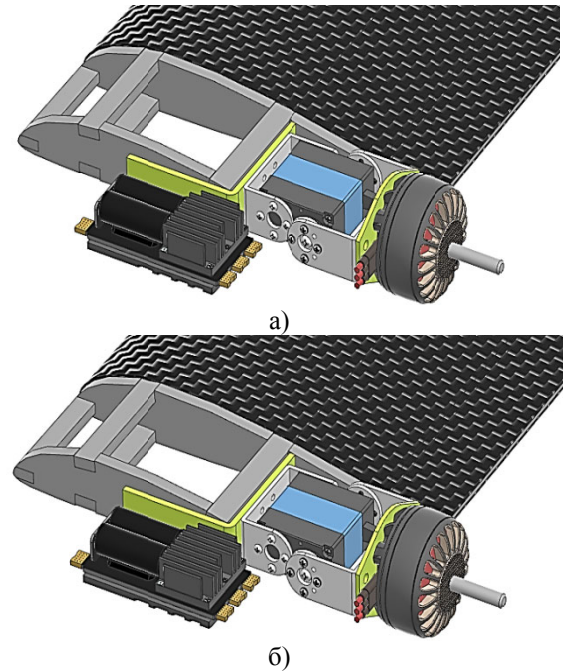


Рис. 1. Положение оси винтомоторной группы в разных режимах полета БПЛА (воздушный винт условно не показан): а - режим взлет- посадка (90°), б - полетное положение

При моделировании основных параметров конструкции применялась система аэродинамического расчета Ansys с модулем FluidSimulation. Аэродинамическая продувка, проводилась с помощью программного продукта AnsysFluidFlow (Fluent). ANSYS Fluent — программный комплекс CFD позволяет проводить решение задач численного трехмерного моделирования движения потоков и процессов турбулентности.

Исходными данными для проведения электронных аэродинамических продувок являлись:

— расчетные углы атаки БПЛА: -3, -2, 0, 2, 4, 8, 10, 12, 14, 16, 17, 17,5, 18;

— расчетная максимальная скорость полета БПЛА на уровне моря в снаряженном состоянии соответствует крейсерской скорости полета БПЛА;

— плотность воздуха: 1,2255 кг/м³;

— тип расчетной сетки – адаптивная;

— величина расчетной ячейки: максимальная – 25 мм, минимальная - 0,043 мм;

— тип модели вязкости газа– Spalart

— Allmaras.

В ходе газодинамического моделирования получены результаты для указанных углов атаки в виде:

— полей распределения скорости потока;

— картин обтекания аппарата в виде потока множества струй;

— полей распределения статического, динамического, полного и абсолютного давления;

— значений подъемной силы и силы лобового сопротивления.

Исследуются следующие параметры потока, обтекающего конвертоплан.

Статическое давление — давление на поверхность, параллельную движению потока со стороны потока. С увеличением скорости потока, в соответствии с законом Бернулли, его статическое давление должно уменьшаться.

Динамическое давление — это дополнительное давление, которое оказывает поток в направлении своего перемещения за счет собственной скорости (скоростной напор). С увеличением скорости потока, его динамическое давление (также по закону Бернулли) должно увеличиваться.

Полное давление — это сумма статического и динамического давления потока, которое вдоль линии тока остается неизменным без учета потерь.

Абсолютное давление — это истинное давление потока (с учетом атмосферного), отсчитываемое от абсолютного нуля давления — абсолютного вакуума.

Результат газодинамического анализа

На рис. 2 представлена электронная модель БПЛА с расположенными на ее верхней поверхности беспилотными квадрокоптерами и условным объемом воздуха для аэродинамической продувки.

На рис. 3 приведена расчетная сетка продуваемого объема воздуха. В процессе подготовки электронных продувок была задана модель вязкости газа и скорость набегающего потока. Параметры расчетной сетки: максимальная величина элемента — 40 мм, средняя величина элемента — 20 мм, минимальный размер ребра элемента — 0,48172 мм.

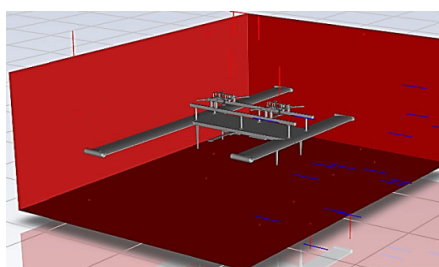


Рис. 2. Модель БПЛА с расчетным объемом воздуха

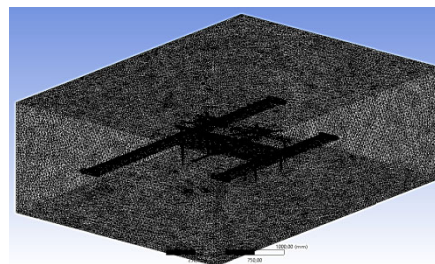


Рис. 3. Расчетная сетка продуваемого объема воздуха

Результаты электронных продувок БПЛА в виде цветовых диаграмм полей распределения давления и скорости показаны для угла атаки (8°) на рис. 4-9.

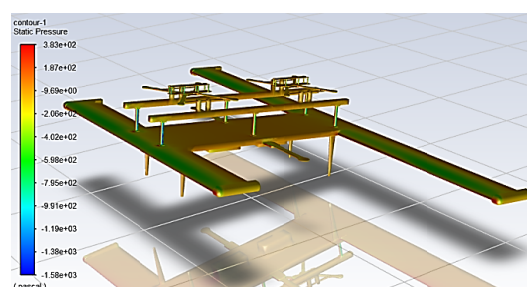


Рис. 4. Статическое давление

На рис. 4 показано статическое давление, оказываемое воздухом на поверхность БПЛА. На нижней поверхности крыла и фюзеляжа наблюдается область повышенного давления, окрашенная в оранжевый цвет (это особенно хорошо видно на отражённой части в нижней части рисунка). На верхней поверхности крыла видна область пониженного давления, окрашенная в зелёный цвет. Разница давлений между нижней и верхней поверхностями свидетельствует о возникновении подъемной силы на крыльях БПЛА.

Однако наличие значительного лобового сопротивления, вызванного креплением двух квадрокоптеров, расположенных на верхней части фюзеляжа (что видно по жёлто-оранжевой области), указывает на зону торможения потока. Эта зона будет препятствовать набору скорости.

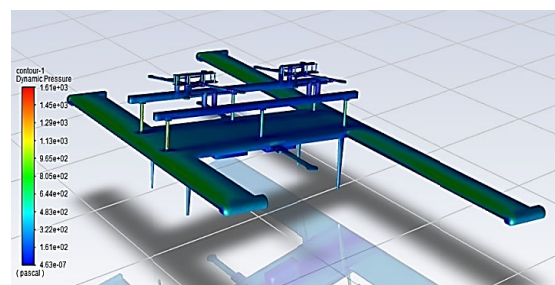


Рис. 5. Динамическое давление

На рис. 5 показано влияние динамического давления на БПЛА. Поскольку динамическое давление прямо пропорционально квадрату скорости, цвета на диаграмме напрямую показывают, где поток движется быстрее, а где медленнее. Яркие цвета (красный, желтый, зеленый) — зоны высокой скорости и, следовательно, высокой кинетической энергии потока. Темные цвета (синий, голубой) — зоны низкой скорости потока. На верхней поверхности крыла при угле атаки 8° ожидаемо видна зона высокого динамического давления (зеленые тона). Это подтверждает, что воздух здесь ускоряется, огибая профиль, что является причиной падения статического давления и создания подъемной силы. Зоны высокого динамического давления являются критическими с точки зрения прочности конструкции [5]. Эти области испытывают наибольшие аэродинамические нагрузки. Статическое и динамическое давление напрямую связаны между собой через уравнение Бернулли. Там, где поток ускоряется и динамическое давление высокое (рис. 5 — яркие цвета), статическое давление становится низким (рис. 4 — зеленые зоны), и наоборот.

Квадрокоптеры на верхней части фюзеляжа, которые создавали зону высокого давления на рис. 4, на данной диаграмме создают зону низкого динамического давления (синий цвет). Это явный признак аэродинамической «тени», завихрений и торможения потока, что подтверждает вывод о значительном лобовом сопротивлении.

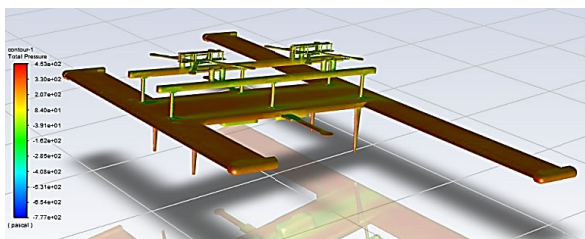


Рис. 6. Полное давление

Данная цветовая диаграмма отображает распределение полного (или торможения) давления вокруг поверхности БПЛА. Полное давление — это сумма статического и динамического давлений. Оно представляет собой полную энергию потока: потенциальную (статическое давление) и кинетическую (динамическое давление). Коричневые, красные, оранжевые области характеризуют высокую полную энергию потока. Это характерно для невозмущенного набегающего потока, который еще не

растратил свою энергию на преодоление сопротивления. Холодные цвета — области, где полная энергия потока значительно снижена. Это прямые указатели на потери энергии. Из рис. 6 видно, что потери энергии на поверхности БПЛА малы, что говорит о плавном и безотрывном обтекании потока воздуха. Потери наблюдаются только в зонах где размещены квадрокоптеры, которые прямо указывают на основные источники аэродинамического сопротивления.

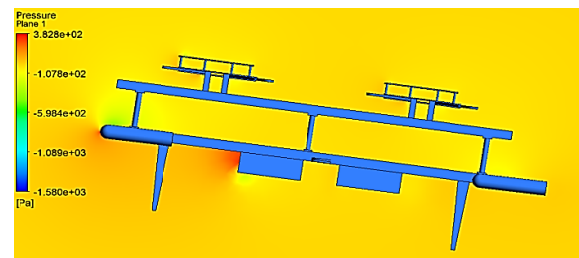


Рис. 7. Полное давление в среднем сечении

На данном рисунке показана визуализация распределения полного давления не на поверхности модели, а в плоском продольном сечении, проходящем через БПЛА. Резкий переход из красной области в желто-зеленую на передней кромки крыла и в нижней центральной части (область расположения аккумуляторных батарей) говорит о зоне, которая создает дополнительное сопротивление, забирающее энергию из потока. Продувка в данном сечении позволила увидеть скрытые потери полного давления, которые не были видны при поверхностном обтекании.

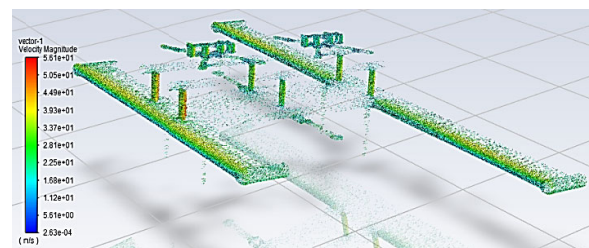


Рис. 8. Поле скорости на поверхности БПЛА

Рис. 8 показывает скорость потока непосредственно у поверхности БПЛА. Яркие зоны (красные, желтые) указывают на поток движущийся с высокой скоростью. Это указывает на тонкий пограничный слой и ламинарное течение. Темные цвета (синий, голубой) — зоны низкой скорости у поверхности. Это характерно для толстого пограничного слоя, областей отрыва потока

или зон с высоким трением, где поток сильно замедлен. Контраст между высокой скоростью на верхней поверхности крыла (красные/желтые тона) и относительно низкой на нижней (синие, зеленые тона — это особенно хорошо видно на отраженной части в нижней части рисунка) наглядно демонстрирует работу крыла по созданию подъемной силы. На рисунке хорошо видны зоны сильного замедления потока и завихрений перед и за квадрокоптерами на фюзеляже, что подтверждает их роль как основных источников сопротивления.

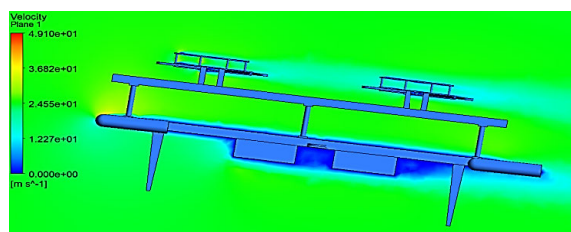


Рис. 9. Поле скорости в среднем сечении БПЛА

Рис. 9 показывает структуру потока в объеме, раскрывая аэродинамические явления, которые невозможно увидеть на поверхностной карте. Это самый наглядный рисунок, показывающий, как весь БПЛА в целом ведет себя в набегающем потоке, ускоряя его над крылом (небольшая желтая область), создавая зоны застоя (синяя область перед аккумуляторными батареями) и мощные вихревые структуры позади себя. Это объемная синяя область снизу фюзеляжа, позади аккумуляторных батарей. Так же видна форма и протяженность спутной струи — широкого следа замедленного воздуха (голубая струя) за всем БПЛА и за непосредственно расположенными сверху квадрокоптерами, которая является прямым следствием лобового сопротивления как самого БПЛА, так и квадрокоптеров сверху.

Окончательный результат газодинамического анализа с применением САЕ – системы (системы инженерного анализа) сведен к определению подъемной силы и силы лобового сопротивления после нахождения соответствующих коэффициентов, которые в конечном итоге позволяют определить аэродинамическое качество летательного аппарата и требуемую силу тяги силовой установки для совершения горизонтального полета.

Как показывает практика, для подтверждения электронных результатов инженерного анализа следует проводить контрольный аналитический расчет

аэродинамических параметров по известным классическим методикам. Наша рабочая группа также пошла по пути контроля электронных расчетов. Были получены результаты для некоторых углов атаки с отклонениями результатов определения подъемной силы и силы лобового сопротивления в диапазоне 5-7 %. Для меньших углов атаки погрешность была меньше, для больших несколько возрастала. Далее в табл. 1 приведены усредненные значения указанных аэродинамических параметров по углам атаки.

Таблица 1

Усредненные значения указанных аэродинамических параметров по углам атаки

Угол атаки, град	Коэффициент подъемной силы, C_{ya}	Подъемная сила, Н	Коэффициент лобового сопротивления, C_{xa}	Лобовое сопротивление, Н
-3	0,00	0,00	1,82	427,69
-2	0,17	52,32	1,82	427,85
0	0,51	156,97	1,83	429,17
2	0,85	261,61	1,84	431,96
4	1,19	366,26	1,86	436,19
6	1,52	470,90	1,88	441,97
8	1,86	575,54	1,92	450,05
10	2,20	680,19	1,96	460,86
12	2,54	784,83	2,00	471,08
14	2,88	889,48	2,05	482,59
16	3,22	994,12	2,11	496,57
17	3,39	1046,44	2,14	504,05
18,5	3,57	1103,33	2,24	526,39
20	3,54	1094,06	2,29	538,14

По данным таблицы был построен график поляры БПЛА (рис. 10).

Аэродинамическое качество вычисляется по известному отношению коэффициента подъемной силы C_{ya} к коэффициенту лобового сопротивления C_{xa} .

$$K = C_{ya} / C_{xa}. \quad (1)$$

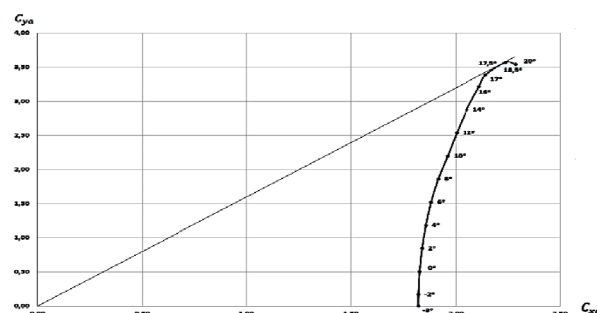


Рис. 10. Поляра БПЛА

Максимальное аэродинамическое качество БПЛА достигается при угле атаки $17,5^\circ$ (рис. 10) и принимает значение 1,6.

Малое значение аэродинамического качества связано с достаточно большим значением коэффициента лобового сопротивления $C_{ха}$, который вызывается, в первую очередь, неоптимизированной конструкцией БПЛА в снаряженном состоянии. Снаряженное состояние, как было отмечено ранее, учитывает наличие полезной нагрузки в виде двух квадрокоптеров, закрепленных на верхней поверхности фюзеляжа. Как известно, лобовое сопротивление складывается из нескольких составляющих: профильного (давления и трения), индуктивного и волнового. На небольших скоростях полета (до 450 км/ч) волновое сопротивление во внимание не берется, два остальных же были учтены. Бóльшее влияние на суммарный коэффициент лобового сопротивления БПЛА оказал коэффициент минимального лобового сопротивления при нулевой подъемной силе, который в рассматриваемом БПЛА и будет являться профильным. Этот коэффициент составил 1,82. Дальнейший прирост суммарного коэффициента лобового сопротивления был вызван увеличением индуктивного сопротивления, которое растет с увеличением угла атаки полета БПЛА. Индуктивное сопротивление будет складываться от двух крыльев, поэтому его общее значение также достаточно велико.

Потребная сила тяги силовой установки может быть определена как отношение взлетной силы веса БПЛА к его максимальному аэродинамическому качеству по формуле

$$P_{\text{потр}} = G_{\text{взл}} / K_{\text{мах}}. \quad (2)$$

Подставляя известные значения, и выражая силу тяги в килограммах силы, можно получить $P_{\text{потр}} = 21,875$ кгс. Располагаемая сила тяги $P_{\text{расп}} = 48$ кгс, показывает запас по тяге в 2,2 раза, т.е. ее будет вполне достаточно для совершения горизонтального полета по самолетному. После схода полезной нагрузки (квадрокоптеров) коэффициент лобового сопротивления ($C_{ха}$) уменьшится до значения 0,48, что приведет к повышению аэродинамического качества до 7,2 и уменьшит потребную силу тяги до значения 4,9 кгс. Запас по силе тяги возрастет до 9,8 раз, что приведет к снижению потребной частоты вращения двигателей силовой установки, уменьшению расхода энергии электрических батарей и

увеличению времени полета. Это обстоятельство сделает вполне вероятным ведение режима барражирования в определенной зоне с целью ретрансляции управляющего сигнала вплоть до момента выполнения полезной нагрузкой полетного задания. После этого БПЛА сможет вернуться в исходную точку старта.

Заключение

Проведенный аэродинамический анализ показывает состоятельность разработанной компоновочной схемы БПЛА. Несмотря на ее невысокое аэродинамическое качество в снаряженном состоянии, избыток силы тяги силовой установки в 2,2 раза позволит выполнить задачу доставки полезной нагрузки на дальнее расстояние до точки ее «схода». Расчетное время полета до «схода» полезной нагрузки, не превышает половину расчетного времени нахождения БПЛА в воздухе.

Как было отмечено в предыдущих публикациях, модельный образец БПЛА вертикального взлета и посадки типа конвертоплан прошел наземные контрольно - настроечные и летные испытания в режиме вертикального подъема. Для реализации летных испытаний в режиме горизонтального полета и подтверждения газодинамического анализа, приведенного в настоящей статье, разработано полетное задание, на основании которого будут проведены указанные испытания. Их результаты будут освещены в следующих публикациях.

Литература

1. Некравцев Е.Н., Сафонов К.С., Самохвалов В.В. БПЛА тандемной схемы вертикального взлета и посадки типа конвертоплан // Экономика и безопасность, 2025. № 2. С. 253-258.
2. Исследование параметров электродвигателя для винтомоторной группы квадрокоптера / Ю.В. Писаревский [и др.] // Энергетика: состояние, проблемы, перспективы: материалы XIV Всерос. науч.-техн. конф.. Оренбург, 2023. С. 121-126.
3. Чернега А.А., Иванников Е.Д., Некравцев Е.Н. Легкий беспилотный летательный аппарат среднего радиуса действия // Научная опора Воронежской области: сб. тр. победителей конкурса н.-и. работ студентов и аспирантов ВГТУ по приоритетным направлениям развития науки и технологий. Воронеж, 2023. С. 129-131.
4. Чернега А.А., Иванников Е.Д., Некравцев Е.Н. Многоцелевой беспилотный летательный аппарат среднего радиуса действия // Научная опора Воронежской области: сб. тр. победителей конкурса н.-и. работ студентов и аспирантов ВГТУ по приоритетным направлениям развития науки и технологий. Воронеж, 2023. С. 140-141.

5. Полимерно-композиционные материалы в агрегатах и системах авиакосмической техники / Е.Н. Некравцев, К.С. Сафонов, И.С. Попов, В.В. Самохвалов // Созвездие Роскосмоса: траектория науки. Материалы II Отраслевой науч.-практ. конф. Красноярск, 2023. С. 66-67

Поступила 24.10.2025; принята к публикации 24.11.2025

Информация об авторах

Некравцев Евгений Николаевич – канд. техн. наук, доцент, заведующий кафедрой самолетостроения, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: kafedra_ss@bk.ru
Сафонов Кирилл Сергеевич – канд. техн. наук, доцент кафедры самолетостроения, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: safonov-kirik@mail.ru

GAS DYNAMIC ANALYSIS OF A CONVERTOPLAN UAV IN A LOADED STATE USING A CFD SYSTEM

E.N. Nekravtsev, K.S. Safonov

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract: the article presents the results of a comprehensive gas dynamic analysis of an unmanned aerial vehicle (UAV) of the tiltrotor type using computational fluid dynamics (CFD) methods in the Ansys Fluent environment. A special feature of the gas dynamic analysis is the purge model of the aircraft with two multicopters (payload) placed on its surface, which significantly reduce the aerodynamic characteristics of the UAV. The relevance of the work is due to the growing demands on the aerodynamic efficiency and controllability of vertical take-off and landing UAVs, especially in transient flight modes. In contrast to existing studies focusing on isolated modes, this paper provides a comparative analysis of aerodynamic characteristics (pressure fields, speeds, lift, drag) for five critical angles of attack: -2° , 0° , 2° , 4° and 8° . Based on the data obtained, the key zones of formation of aerodynamic moments and drag were identified, which made it possible to formulate recommendations for optimizing the geometry of the bearing surfaces and the layout of the apparatus. The analysis demonstrates not only the correctness of the calculation method used, but also reveals the specific features of the flow around a tiltrotor with a payload placed on board, which must be taken into account to increase stability and energy efficiency in aerodynamically unfavorable flight conditions. The results of the work are of practical value for the design stage of UAVs of this class, allowing to reduce the number of field experiments and purposefully optimize the design

Keywords: UAV, tiltrotor, gas dynamic analysis, CFD, Ansys Fluent, aerodynamic characteristics, angle of attack

Acknowledgments: the work was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (project no. FZGM-2025-0002)

References

1. Nekravtsev E.N., Safonov K.S., Samokhvalov V.V. "Tandem vertical takeoff and landing UAVs of the tiltrotor type", *Economics and Safety (Ekonomika i bezopasnost')*, 2025, no. 2, pp. 253-258.
2. Pisarevsky Yu.V., Pisarevsky A.Yu., Tikunov A.V., Titova L.N., Burkovsky A.V., Nekravtsev E.N. "Investigation of electric motor parameters for a quadcopter propeller group", *Energy: status, problems, prospects (Energetika: sostoyaniye, problemy, perspektivy)*, coll. of the XIV All-Russian Scientific and Technical Conference, Orenburg, 2023, pp. 121-126.
3. Chernega A.A., Ivannikov E.D., Nekravtsev E.N. "Light unmanned aerial vehicle of medium range. In the collection", *Scientific support of the Voronezh region (Nauchnaya opora Voronezhskoy oblasti)*, coll. of works of the winners of the VSTU students' and postgraduates' scientific papers competition on priority areas of science and technology development, Voronezh, 2023, pp. 129-131.
4. Chernega A.A., Ivannikov E.D., Nekravtsev E.N. "Multipurpose unmanned aerial vehicle of medium range", *Scientific support of the Voronezh region (Nauchnaya opora Voronezhskoy oblasti)*, coll. of works of the winners of the VSTU students' and postgraduates' scientific papers competition on priority areas of science and technology development, Voronezh, 2023, pp. 140-141.
5. Nekravtsev E.N., Safonov K.S., Popov I.S., Samokhvalov V.V. "Polymer composite materials in aggregates and systems of aerospace technology", *Roscosmos Constellation: the trajectory of science (Sozvezdiye Roskosmosa: trayektoriya nauki)*, proc. of the II Industry Scientific and Practical Conference, Krasnoyarsk, 2023, pp. 66-67

Submitted 24.10.2025; revised 24.11.2025

Information about the authors

Evgeny N. Nekravtsev - Associate Professor, Cand. Sc. (Technical), Head of the Department of Aircraft Engineering, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia)

Kirill S. Safonov – Associate Professor, Cand. Sc. (Technical), Department of Aircraft Engineering, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia)

ПОДБОР ДРАЙВЕРОВ УПРАВЛЕНИЯ ДВИГАТЕЛЯМИ УСТРОЙСТВА ДЛЯ ОЧИСТКИ КАНАЛОВ ОХЛАЖДЕНИЯ ПОСЛЕ ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКИ

И.Г. Дроздов, Е.А. Ищенко, А.А. Болдырев, Е.Д. Егорова

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

Аннотация: исследуется предельная скорость вращения шагового двигателя, которая может быть получена при дроблении шагов на драйверах A4988, DRV8825 и LV8729. Полученные результаты иллюстрируются анализом кода управления, формируемым на Raspberry Pi5 с использованием языка Python и библиотекой RpiMotorLib. Исследование производилось на экспериментальной установке, моделирующей нагрузку и перемещения по программно-управляемой оси подачи установки для лазерной обработки. В процессе исследования был выявлен закон определения скорости перемещения нагрузки с использованием шарико-винтовой передачи. При выполнении измерений были определены скоростные показатели двигателя, токовые характеристики при разных дроблениях шага, температурные показатели. Сформулированы рекомендации для обоснованного подбора моделей драйверов для шаговых двигателей, используемых в приводах подачи станочного оборудования, позволяющих осуществить точные позиционирующие движения, при этом обеспечив на быстрых ходах возможно высокие скорости. Полученные результаты позволяют определить возможность использования моделей драйверов для осуществления движения линейных продольной и поперечной подач при перемещении рабочих органов в устройстве лазерной очистки каналов охлаждения камеры сгорания вблизи критического сечения жидкостного ракетного двигателя (ЖРД) после лазерной обработки элементов «искусственной шероховатости»

Ключевые слова: искусственная шероховатость, лазерная размерная обработка, лазерная очистка, шаговый двигатель, шарико-винтовая передача, драйвер шагового двигателя, A4988, DRV8825, LV8729

Благодарности: работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания «Специальная установка с ЧПУ» (№ FZGM-2025-0007)

Введение

Перспективным методом нанесения «искусственной шероховатости» в каналах охлаждения ЖРД является размерная лазерная обработка [1]. Однако, в процессе испарения металла образуется металлосодержащая копоть, оседающая возле обработанной поверхности (рис. 1), особенно при обработке вблизи стенок канала. Хорошие результаты по очистке изделий из бронзовых сплавов от подобных загрязнений показывают методы лазерной очистки [2].

Для модернизации лазерного оборудования с целью применения для обработки каналов ЖРД целесообразным является добавление модуля лазерной очистки с автоматическим программно-управляемым перемещением рабочих органов. С учетом требований к точности позиционирования, нагрузкам, скорости (и как следствие, производительности обработки) для обеспечения движения подач выбраны шарико-винтовые передачи с шаговыми двигателями.



Рис. 1. Образцы с «искусственной шероховатостью», нанесенной лазерным методом

Для управления шаговыми двигателями требуется ряд контроллеров, которые обеспечат передачу требуемых сигналов для запитывания обмоток шагового двигателя. Стандартная схе-

ма реализации управления шаговым двигателем включает в свой состав: контроллер (компьютер), драйвер шагового двигателя и сам двигатель [3]. Особенности современных драйверов шаговых двигателей является то, что они позволяют обеспечивать высокую точность позиционирования двигателя путем дробления шага, а также достижения высокой скорости вращения вала шагового двигателя [3, 4]. Однако достижение максимальной скорости шагового двигателя приводит к снижению максимального крутящего момента двигателя, что снижает предельную нагрузку, которую может перемещать двигатель [5]. Поэтому особый интерес вызывает предельно возможная скорость двигателя, которая может быть реализована с использованием драйверов шаговых двигателей для перемещения малых нагрузок. В случае системы лазерной очистки элементов камеры ЖРД нагрузка определяется массой рабочих органов, а максимальная скорость является залогом высокой производительности процесса.

Существует ряд исследований, направленных на определение характеристик наиболее распространенных драйверов шаговых двигателей семейства A4988, которые хорошо себя зарекомендовали в конструкциях станков с числовым программным управлением (ЧПУ). Большинство таких исследований направлены на исследование драйверов, которые подключаются к одноплатному компьютеру на базе Arduino [6-8], однако вычислительные мощности такого решения ограничены, поэтому особый интерес вызывают исследования, которые направлены на реализацию управления шаговыми двигателями с более мощных контроллеров, например, AVR или Raspberry Pi [9-10]. В данной работе исследуется предельная скорость шагового двигателя, которая может быть достигнута драйверами A4988, DRV8825 и LV8729 при управлении шаговым двигателем Nema 17. На основе проведенных исследований можно сделать вывод о применимости драйверов для управления двигателями в приводах подачи системы лазерной очистки.

Конструкция установки

Для проведения эксперимента была составлена схема, которая состояла из следующей схемы: главный контроллер Raspberry Pi 5, который передает сигнал на драйвер шагового двигателя, обеспечивающий управление Nema17 17HS4023, вращающего шариковую передачу (ШВП) SFU1204 550 мм

1204 (диаметр 12 мм, шаг 4 мм) с опорами BK/BF10 и муфтой D19L25. Запитывание драйвера выполнялось лабораторным источником питания Rigol DP2031 с ограничением по напряжению 12 В и током 2 А, чего достаточно для выбранной модели шагового двигателя. Вид экспериментальной установки приводится на рис. 2.

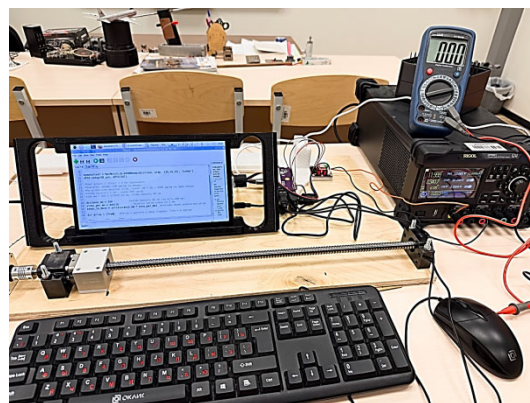


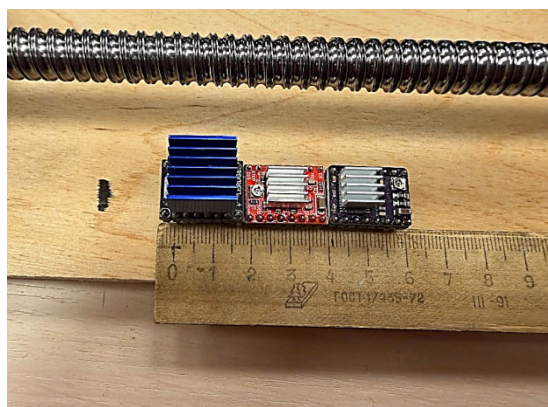
Рис. 2. Исследуемая установка из ШВП и компьютера-контроллера

В процессе исследования рассматривались драйверы шагового двигателя A4988, DRV8825, LV8729, которые используются во многих ЧПУ-станках и 3D-принтерах. Основные характеристики драйверов приводятся в табл. 1.

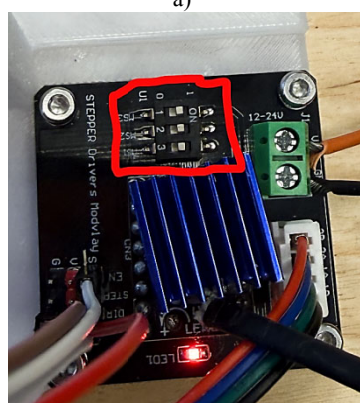
Таблица 1
Характеристики драйверов шаговых двигателей

Драйвер	A4988	DRV8825	LV8729
Производитель	Allegro A4988	TI DRV8825	ONS LV8729
Напряжение питания, В	8...35	8.2...45	6...36
Шаг (мин)	1/16	1/32	1/128
Максимальный ток, А	1 (2 с охлаждением)	1.5 (2.5 с охлаждением)	1.5

Как видно, драйверы реализуют разное дробление шага, что определяет предельную точность позиционирования вала двигателя. Определение уровня дробления шага двигателя определяется путем установки уровней сигналов на входе драйвера MS1-MS3 – рис. 3. Дробные значения шагового двигателя, которые могут быть сформированы драйвером, приводятся в табл. 2.



а)



б)

Рис. 3. Исследуемые драйверы: а) виды драйверов LV8729, A4988, DRV8825; б) установка уровней входов MS1-MS3 (выделены)

Таблица 2

Дробление уровней поворота вала шагового двигателя Nema17

Тип дробления шага	Угол поворота двигателя на шаг, °	Количество шагов на оборот двигателя
Полный (Full)	1.8	200
Половина (Half)	0.9	400
1/4	0.45	800
1/8	0.225	1600
1/16	0.1125	3200
1/32	0.05625	6400
1/64	0.028125	12800
1/128	0.0140625	25600

Как видно, с ростом дробления наблюдается кратный рост количества шагов, необходимый для поворота двигателя на полный оборот, а следовательно, будет снижаться и максимальная скорость работы двигателя, чем формируются баланс на этапе проектирования точности и скорости. Так как для управления двигателем используется одноплатный компьютер Raspberry Pi 5, то следует уделить внимание программной части, которая реализует управление драйвером и шаговым двигателем.

Анализ кода-управления шагового двигателя

Для управления шаговым двигателем были использованы язык программирования Python и открытая библиотека RpiMotorLib. В процессе реализации управления с использованием Raspberry Pi необходимо определить, какие выходы GPIO будут отвечать за управление драйвером. Для работы двигателя необходимо использование трех выходов, которые определяют направление (DIR), дают команду на включение (EN) и передают сигналы шагов (STEP):

direction = 21 # Контакт, который определяет направление движения

step = 20 # Контакт, который подает импульсы и управляет драйвером

EN_pin = 16 # Контакт включения драйвера

Следующим шагом определяется тип драйвера и двигателя, а также тип деления шага:

```
mymotortest = RpiMotorLib.A4988Nema(direction, step, (19,19,19), "A4988")
```

где в скобках определяется по порядку – контакт направления (*direction*), шага (*step*), комбинация положения ключей деления шага MS1-3 (в нашем случае все контакты были выбраны низкого уровня «0,0,0»), определение типа драйвера "A4988" (или DRV8825, LV8729).

Следующая строка устанавливает контакт включения как выходной тип:

```
GPIO.setup(EN_pin, GPIO.OUT)
```

Далее в код передается команда на вращение двигателя на нужное количество шагов (в нашем случае для перемещения на 300 мм):

```
distance_mm = 300 # дистанция перемещения в 300 мм
```

```
steps_per_mm = 50 # количество шагов для перемещения на 1 мм
```

```
steps_to_move = int(distance_mm * steps_per_mm) # количество шагов
```

Далее определяем направление вращения:

```
dir_array = [True] # False = крутится в одну сторону, True = в другую
```

Следующим шагом устанавливается низкий уровень на выходе EN, что включает драйвер, так как этот выход инвертирован:

```
GPIO.output(EN_pin, GPIO.LOW)
```

Далее выполняется вращение двигателя:

```
for i in range(1):
```

```
    mymotortest.motor_go(dir_array[i],
```

```
        "Full", # тип деления Full, Half, 1/4, 1/8 и т.д.
```

```
        steps_to_move, # количество шагов
```

```
        0.0005, # задержка между шагами (с) – скорость вращения
```



```
False, # подробная телеметрия в консоль
0.0005) # задержка запуска двигателя
time.sleep(1)
```

С учетом данного кода в режиме полного шага было исследовано, как формируется скорость вращения шагового двигателя. С учетом формируемого сигнала скорости перемещения каретки определяется по формуле:

$$v = \frac{L_{dist}}{N_{step} \cdot 2t_{d1}}, \quad (1)$$

где L_{dist} – дистанция перемещения ШВП;
 N_{step} – количество шагов, необходимых для перемещения на L_{dist} ;

t_{d1} – задержка между шагами (с) (в нашем случае по коду выше 0.0005 с);

v – скорость перемещения каретки по ШВП.

Или же если получить значение в оборотах в минуту:

$$RPM = \frac{60}{N_{RPM} \cdot 2t_{d1}}, \quad (2)$$

где RPM – количество оборотов в минуту;
 $N_{RPM} = \frac{N_{eng}}{P}$, N_{eng} – количество шагов двигателя на оборот без деления, P – дробление шага двигателя драйвером.

Для оценки базовых характеристик скорости и зависимости от параметра t_{d1} был исследован драйвер A4988, при выставленных уровнях напряжения $V_{ref} = 1.025$ В ($I_{cur} = 0.5$ А). В табл. 3 приводятся характеристики драйвера A4988 при управлении параметром t_{d1} (режим шага полный). На рис. 4 приводятся графические зависимости основных параметров скорости от задержки шага.

Таблица 3
 Скоростные режимы драйвера A4988
 на полном шаге

t_{d1} , с	v_{calc} , мм/с	v_{meas} , мм/с	I_{cur} , А	RPM_{meas} , об/мин
0.0010	10.00	09.35	0.57	140
0.0009	11.10	10.28	0.58	154
0.0008	12.50	11.47	0.63	172
0.0007	14.29	12.96	0.62	194
0.0006	16.67	14.77	0.60	221
0.0005	20.00	17.19	0.54	258
0.0004	25.00	20.79	0.47	312
0.0003	33.33	26.59	0.40	399

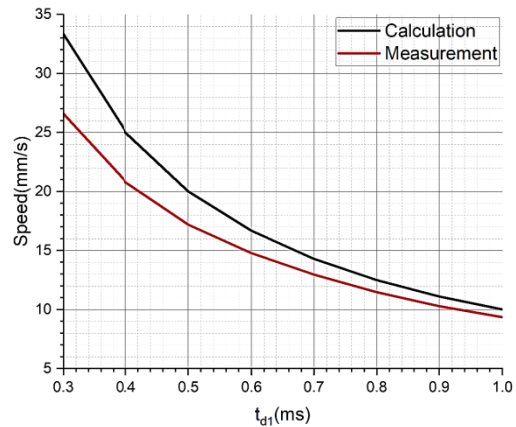
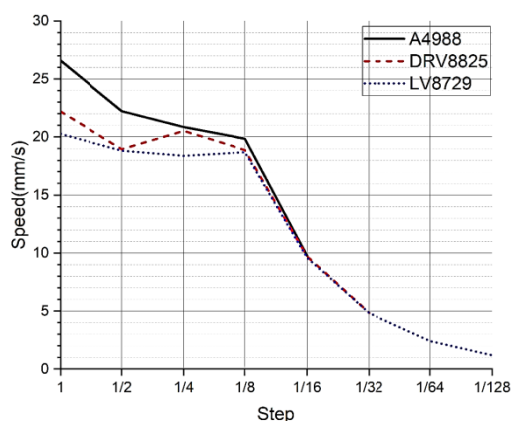


Рис. 4. Зависимость скорости движения нагрузки ШВП от задержки между шагами

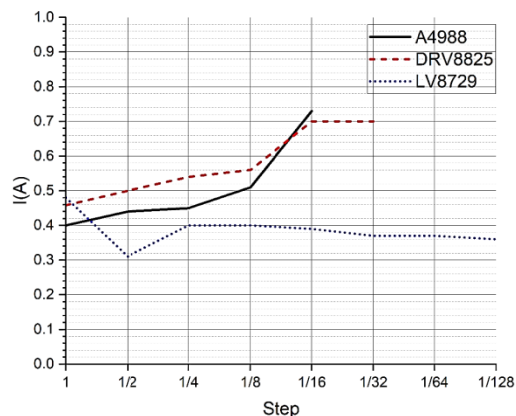
Таким образом, видно, что полученная на практике скорость вращения шагового двигателя ниже теоретического (расчетного) значения, что может быть вызвано скоростью реакции секундомера при измерениях, а также сопротивлением линии при вращении и задержками сигналов. На основании полученных значений особый интерес вызывает наивысшая скорость, которая может быть получена при дроблении шагов драйверов.

Экспериментальные измерения предельных скоростей вращения вала при дроблении шага

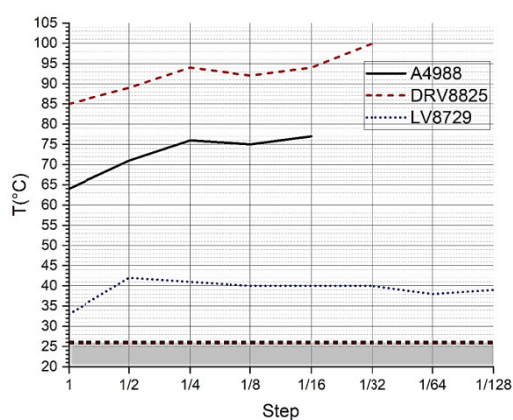
В процессе исследования рассматривались три драйвера, а на винт ШВП была установлена нагрузка 113 грамм. Измерения выполнялись до момента, когда вращение двигателя прекращалось и не позволяло перемещать нагрузку по ШВП. В табл. 4-6 приводятся основные характеристики, полученные при измерении разных драйверов, а на рис. 5 приводятся основные графические зависимости параметров от величины дробления шага.



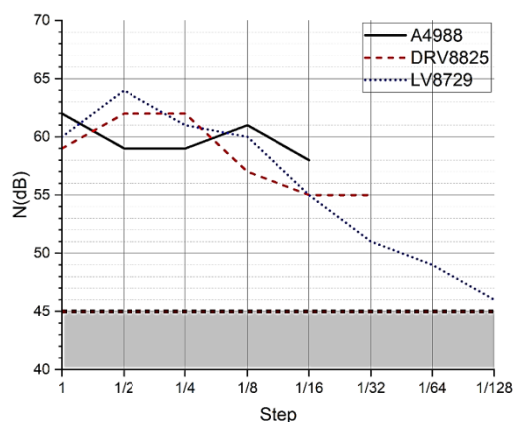
а) зависимость максимальной скорости от шага



в) зависимость тока от шага



б) зависимость температуры от шага



г) зависимость шума от шага

Рис. 5. Зависимость характеристик системы драйвер/двигатель от дробления шага

Таблица 4

Максимальные скоростные режимы драйвера A4988 при дроблении шагов

Положение ключей			Дробление шага	v_{meas} , мм/с	t_{d1} , мс	I_{cur} , А	T_d , °C	N, дБ
MS1	MS2	MS3						
0	0	0	Full	26.59	0.300	0.40	64	62
1	0	0	Half	22.22	0.130	0.44	71	59
0	1	0	1/4	20.86	0.055	0.45	76	59
1	1	0	1/8	19.85	10^{-3}	0.51	75	61
1	1	1	1/16	09.79	$5 \cdot 10^{-9}$	0.73	77	58

Примечания:
 Фоновый шум 45 дБ
 Температура окружающей среды 26°C
 $V_{ref}=1.025$ В
 T_d – температура радиатора драйвера шагового двигателя
 Направление движения вперед True

Таблица 5

Максимальные скоростные режимы драйвера DRV8825 при дроблении шагов

Положение ключей			Дробление шага	v_{meas} , мм/с	t_{d1} , мс	I_{cur} , А	T_d , °C	N, дБ
MS1	MS2	MS3						
0	0	0	Full	22.19	0.400	0.458	85	59
1	0	0	Half	18.95	0.250	0.500	89	62
0	1	0	1/4	20.53	0.060	0.540	94	62
1	1	0	1/8	18.87	$2 \cdot 10^{-3}$	0.560	92	57
0	0	1	1/16	09.72	$5 \cdot 10^{-9}$	0.700	94	55
1	1	1	1/32	04.85	$5 \cdot 10^{-9}$	0.700	100	55

Примечания:
 Фоновый шум 45 дБ
 Температура окружающей среды 26°C
 $V_{ref}=0.689$ В
 T_d – температура радиатора драйвера шагового двигателя
 Направление движения вперед True

Таблица 6

Максимальные скоростные режимы драйвера LV8729 при дроблении шагов

Положение ключей			Дробление шага	v_{meas} , мм/с	t_{d1} , мс	I_{cur} , А	T_d , °С	N, дБ
MS1	MS2	MS3						
0	0	0	Full	20.26	0.45	0.48	33	60
1	0	0	Half	18.82	0.20	0.31	42	64
0	1	0	1/4	18.38	0.07	0.40	41	61
1	1	0	1/8	18.69	10^{-3}	0.40	40	60
0	0	1	1/16	09.60	10^{-9}	0.39	40	55
1	0	1	1/32	04.83	10^{-17}	0.37	40	51
0	1	1	1/64	02.42	10^{-37}	0.37	38	49
1	1	1	1/128	01.20	10^{-77}	0.36	39	46

Примечания:
 Фоновый шум 45 дБ
 Температура окружающей среды 26°C
 $V_{ref}=0.925$ В
 T_d – температура радиатора драйвера шагового двигателя
 Направление движения вперед False

Полученные результаты показывают, что повышение дробления шага приводит к снижению скорости вращения центрального вала, однако при снижении шага удается повысить точность позиционирования, а также уменьшить шум работы системы. При использовании драйвера LV8729 можно заметить, что предельная скорость вращения достигается при уровне тока, который близок к уровню 0.4 А. Особое внимание стоит также уделить температурным режимам драйверов. Видно, что драйвер DRV8825 работает в очень высокотемпературном режиме, что также можно заметить и по уровню тока, который нарастает вместе с температурой, при этом предельная температура кристалла по информации производителя составляет 150°C, при этом для A4988 такая температура равна 85°C, как и для LV8729. Поэтому в случае выбора драйвера DRV8825 необходимо продумывать возможность активного охлаждения драйвера, чтобы обеспечить рассеяние тепла.

На основании всех полученных результатов можно отметить, что в случае необходимости работы только в режимах Full и Half оптимальным выбором является драйвер A4988, но в случае необходимости увеличения дробления шагов следует выбирать драйвер LV8729, который обеспечивает большее деление шага, меньшую температурную нагрузку, а также меньший ток потребления при близких скоростях.

Заключение

В статье был произведен анализ предельных скоростных режимов работы шагового двигателя при использовании разных драйверов с возможностью дробления шагов. Проведенные исследования показывают, что выбор драй-

веров шаговых двигателей следует выполнять на основе анализа нескольких показателей: нагрев драйвера, шумность двигателя, возможность обеспечения минимального дробления шага, при этом стоит помнить, что с уменьшением микрошага при дроблении снижается также и скорость вращения винта, но при этом значительно повышается точность. Полученные результаты показали, что лучшими характеристиками обладает драйвер LV8729, однако в случае использования полного или половинного микрошага можно использовать драйвер A4988, который позволяет обеспечить высокую скорость перемещения, а также малые температуры нагрева, особенно по сравнению с драйвером DRV8825. Таким образом, выбор драйвера управления двигателями подачи устройства лазерной очистки элементов камеры сгорания ЖРД определяется исходя из требований к точности позиционирования с обеспечением наибольшей скорости быстрых ходов на основе предложенных рекомендаций.

Литература

1. Патент № 2618594 С Российская Федерация, МПК В23Н 5/00, В23Н 7/38. Способ получения искусственной шероховатости на поверхности детали комбинированным методом обработки : № 2016110651 : заявл. 22.03.2016 : опубл. 04.05.2017 / А.Ю. Рязанцев, С.С. Юхневич, В.А. Поротиков ; заявитель Федеральное государственное унитарное предприятие «Государственный космический научно-производственный центр имени М.В. Хруничева» (ФГУП «ГКНПЦ им. М.В. Хруничева»). – EDN ZTWKDR.
2. Патент № 2619692 С1 Российская Федерация, МПК В08В 7/00. Способ лазерной очистки металлов : № 2016120022 : заявл. 24.05.2016 : опубл. 17.05.2017 / М.В. Волков, В.М. Журба, В.М. Митякин, Н.Л. Орлов ; заявитель Общество с ограниченной ответственностью «Научно-производственное предприятие Волоконно-Оптического и Лазерного Оборудования». – EDN HJILPI.
3. Barabas Z.A., Morar A. High Performance Microstepping Driver System based on Five-phase Stepper

Motor (sine wave drive) // *Procedia Technology*, 2014. Vol. 12. Pp. 90-97.

4. Мирзаев Р.А., Халковский Ф.А., Смирнов Н.А. Управление биполярным шаговым двигателем с помощью контроллера // *Актуальные проблемы авиации и космонавтики*. 2010. Т. 1. № 6. С. 365-366.

5. Nasr M., Singh A., Moore K.J. Smart Automatic Modal Hammer: Predictor–Corrector Approach for Accurate Excitation of Dynamical Systems // *Journal of Vibration Engineering & Technologies*. 2024. 12(S1). pp. 1045–1063.

6. Tunable and scalable production of nanostar particle platforms for diverse applications using an AI-integrated automated synthesis system / A.J. Canning [et al.] // *Journal of Materials Science*. 2025. 60(8). pp. 3768-3785.

7. Мельниченко В.О. Контроль шагового двигателя с помощью драйвера шагового двигателя и платы Arduino // Теоретические и прикладные аспекты естественно-

научного образования в эпоху цифровизации: материалы III Междуна. науч.-практ. конф., Брянск, 11–12 апреля 2024 года. Брянск: Брянский государственный университет им. акад. И.Г. Петровского, 2024. С. 83-88.

8. Севцов И.А., Тюрин С.А., Трусков В.А. Сравнительный анализ драйверов для шагового двигателя // *Труды международного симпозиума «Надежность и качество»*. 2020. Т. 2. С. 102-103.

9. Wardhana A.W., Nugroho D.T. Stepper motor control with DRV 8825 driver based on square wave signal from AVR microcontroller timer // *In AIP Conference Proceedings*. 2019. Vol. 2094. p. 020015.

10. Optimized compound control strategy for high-speed 3D printing: enhancing surface quality and printing precision / R. Zhou [et al.] // *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*. 2025. 47(8).

Поступила 24.10.2025; принята к публикации 24.11.2025

Информация об авторах

Дроздов Игорь Геннадьевич – д-р техн. наук, профессор, декан факультета машиностроения и аэрокосмической техники, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: dig@cchgeu.ru

Ищенко Евгений Алексеевич – аспирант, инженер, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: kursk1998@yandex.ru

Болдырев Александр Александрович – канд. техн. наук, доцент кафедры ракетных двигателей, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: alexboldyrev@yandex.ru

Егорова Елена Дмитриевна – лаборант-исследователь, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: reus.kaf@cchgeu.ru

MOTOR CONTROL DRIVERS SELECTION FOR COOLING CHANNEL CLEANING AFTER LASER TREATMENT

I.G. Drozdov, E.A. Ishchenko, A.A. Boldyrev, E.D. Egorova

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract: the maximum rotation speed of a stepper motor that can be obtained with step fractionation on the A4988, DRV8825, and LV8729 drivers is investigated. The obtained results are illustrated by the analysis of the control code generated on a Raspberry Pi5 using the Python language and the RpiMotorLib library. The study was conducted on an experimental setup simulating loading and movements along the software-controlled feed axis of a laser processing machine. During the study, a law for determining the load movement speed using a ball screw was identified. During the measurements, the speed indicators of the motor, current characteristics at different step fractionation, and temperature indicators were determined. Recommendations are formulated for a substantiated selection of driver models for stepper motors used in feed drives of machine tools, enabling precise positioning movements while ensuring the highest possible speeds at high speeds. The obtained results make it possible to determine the possibility of using driver models to implement the movement of linear longitudinal and transverse feeds when moving working bodies in a device for laser cleaning of combustion chamber cooling channels near the critical section of a liquid rocket engine (LRE) after laser processing of “artificial roughness” elements

Key words: artificial roughness, laser dimensional processing, laser cleaning, stepper motor, ball screw transmission, stepper motor driver, A4988, DRV8825, LV8729

Acknowledgments: The work was carried out with the support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation as part of the state assignment «Special CNC Installation» (no. FZGM-2025-0007)

References

1. Ryazantsev A.Yu., Yukhnovich S.S., Porotikov V.A. “Method of obtaining artificial roughness on the surface of a part by a combined processing method” (“Способ получения искусственной шероховатости на поверхности детали комбинированным методом обработки”), patent of RF no. 2618594, IPC B23H 5/00, B23H 7/38 no. 2016110651, appl. 22.03.2016, publ. 04.05.2017, applicant FSUE “GKNPC named after M.V. Khrunichev”, EDN ZTWKDR.

2. Volkov M.V., Zhurba V.M., Mitkin V.M., Orlov N.L. "Method of Laser Cleaning of Metals" ("Sposob lazernoy ochistki metallov"), patent of RF no. 2619692 C1, IPC B08B 7/00, no. 2016120022, appl. 24.05.2016, publ. 17.05.2017, applicant Scientific and Production Enterprise of Fiber-Optic and Laser Equipment LLC, EDN HJILPI.
3. Barabas Z.A., Morar, A. "High Performance Microstepping Driver System based on Five-phase Stepper Motor (sine wave drive)", *Procedia Technology*, 2014, no. 12, pp. 90–97, available at: <https://doi.org/10.1016/j.protcy.2013.12.460>
4. Mirzaev R.A. Khalkovsky F.A., Smirnov N.A. "Control of a Bipolar Stepper Motor Using a Controller", *Actual Problems of Aviation and Cosmonautics (Aktual'nyye problemy aviatsii i kosmonavtiki)*, 2010, vol. 1, no. 6, pp. 365–366, EDN TBIAZL
5. Nasr M., Singh A., Moore K.J. "Smart Automatic Modal Hammer: Predictor–Corrector Approach for Accurate Excitation of Dynamical Systems", *Journal of Vibration Engineering and Technologies*, 2024, no. 12(S1), pp. 1045–1063, available at: <https://doi.org/10.1007/s42417-024-01461-6>
6. Canning A.J., Li J.Q., Chen J., Hoang K., Thorsen T., Vaziri A., Vo-Dinh, T. "Tunable and scalable production of nanostar particle platforms for diverse applications using an AI-integrated automated synthesis system", *Journal of Materials Science*, 2025, no. 60(8), pp. 3768–3785, available at: <https://doi.org/10.1007/s10853-025-10692-1>
7. Melnichenko V.O. "Stepper Motor Control Using a Stepper Motor Driver and an Arduino Board", *Theoretical and Applied Aspects of Natural Science Education in the Era of Digitalization (Teoreticheskiye i prikladnyye aspekty yestestvenno-nauchnogo obrazovaniya v epokhu tsifrovizatsii)*, proc. of the III International Scientific and Practical Conference, Bryansk, April 11–12, 2024, Bryansk, Bryansk State University named after Acad. I.G. Petrovsky, 2024, pp. 83–88, EDN ZQPKZR
8. Sevstov I.A., Tyurin S.A., Trusov V.A. "Comparative Analysis of Stepper Motor Drivers", *Proceedings of the International Symposium "Reliability and Quality"*, 2020, vol. 2, pp. 102–103, EDN LORXQP
9. Wardhana A.W., Nugroho D.T. (). "Stepper motor control with DRV 8825 driver based on square wave signal from AVR microcontroller timer", *AIP Conference Proceedings*, 2019, vol. 2094, p. 020015
10. Zhou R., Jiang J., Li P., Lu S., Li B., Du C. "Optimized compound control strategy for high-speed 3D printing: enhancing surface quality and printing precision", *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 2025, 47(8), available at: <https://doi.org/10.1007/s40430-025-05684-w>

Submitted 24.10.2025; revised 24.11.2025

Information about the authors

Igor G. Drozdov – Dr. Sc. (Technical), Professor, Dean of the Faculty of Mechanical Engineering and Aerospace Engineering, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: dig@cchgeu.ru
Evgeny A. Ishchenko – Postgraduate Student, Engineer, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: kursk1998@yandex.ru
Alexander A. Boldyrev – Cand. Sc. (Technical), Associate Professor of the Department of Rocket Engines, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: alexboldyrev@yandex.ru
Elena D. Egorova – Laboratory Research Assistant, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: reus.kaf@cchgeu.ru

Правила для авторов

1. Принимаются к рассмотрению оригинальные научные статьи на русском языке общим объемом от 4 до 10 страниц. Материал статьи следует представить в электронном виде в формате word и pdf.

2. Текст статьи предоставляется в формате А 4. Поля страницы: верхнее – 2,5 см; нижнее - 2 см; правое - 2 см; левое - 2 см.

Шрифт текста - Times New Roman, межстрочный интервал 1,0. Размер шрифта основного текста 11. Аннотация, ключевые слова, благодарности, подрисуночные надписи, информация об авторах – 9 шрифт. Допускается в формулах, таблицах и рисунках уменьшить размер шрифта до 9.

3. Абзацный отступ - 0,8 см. Аннотация, ключевые слова и благодарности должны располагаться с дополнительным отступом 0,8 см от левого края.

4. На первой странице текста необходимо указать УДК (в левом верхнем углу листа от поля); название статьи (8-10 слов без каких-либо сокращений и аббревиатур, заглавными буквами), инициалы и фамилию автора(ов); полное наименование места работы автора(ов) с указанием города и страны; далее следуют аннотация, ключевые слова (от 5 до 10), а также благодарности (если есть).

5. Аннотация (реферат) к статье должна быть: информативной (не содержать общих слов); оригинальной; содержательной (отражать основное содержание статьи и результаты исследований); структурированной (следовать логике описания результатов в статье); компактной (укладываться в объем от 150 до 250 слов). Аннотация акцентирует научную новизну проведенных исследований и их результатов, отражает логику построения статьи (т.е. затрагивает основные этапы исследований). «Англоязычная» аннотация должна быть написана качественным английским языком.

6. Основной текст статьи должен быть структурирован по принципу выделения значимых его элементов (введение, постановка задачи, методы исследования, результаты, выводы или заключение и т.п.). Основной текст и литературу представляют на листе в две колонки шириной по 8 см каждая (межколоночное расстояние 1 см).

7. Таблицы располагаются по тексту. Над названием таблицы справа пишут «Таблица 1». Ссылка

на таблицу в тексте оформляется следующим образом: «табл. 1».

8. Оформление рисунков в формате BMP. Подрисуночные подписи не входят в состав рисунков, а располагаются отдельным текстом. Рекомендуемая ширина рисунков - не более ширины колонки. При необходимости допускается ширина рисунка равная двум колонкам. Буквы и цифры на рисунке должны быть разборчивы. Перед названием рисунка пишут «Рис. 1.». Ссылку на рисунок оформляют следующим образом: «рис. 1».

9. Формулы нумеруют в круглых скобках (2), подстрочные примечания - арабскими цифрами.

10. Используемые в работе термины, единицы измерения и условные обозначения должны быть общепринятыми. Все употребляемые авторами обозначения (за исключением общеизвестных констант типа e , h , c и т.п.) и аббревиатуры должны быть определены при их первом упоминании в тексте.

11. Все литературные ссылки в материале должны быть указаны в квадратных скобках - [1]. В тексте статьи должны присутствовать ссылки на все используемые литературные источники по мере их упоминания. Литература оформляется в соответствии с требованиями ГОСТ Р 7.0.5-2008 Библиографическая ссылка. Желательно, чтобы в литературе самоцитирование не превышало 30%.

12. После литературы необходимо расположить информацию о каждом авторе, включающую расшифровку имени и отчества, обозначение ученой степени, звания и должности, полное наименование места работы, полный адрес организации, контактные данные (e-mail, номер телефона), а также ссылку на профиль автора в ORCID.

13. Далее следует англоязычный информационный блок, где содержится перевод заглавия, ФИО авторов, полного наименования мест работы авторов, аннотации, ключевых слов, благодарностей, литературы и информации об авторах.

14. Вместе со статьей в редакцию предоставляют заполненный лицензионный договор на право использования научной статьи и разрешение на публикацию (письмо и экспертное заключение о возможности открытого опубликования), которое должно быть заверено печатью и подписью ответственного лица.

Материалы представляются по адресу:

394026, Воронежская обл., г. Воронеж, Московский пр-т, д. 14, к. 211.
ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»,
Редакция журнала «Вестник Воронежского государственного технического университета»
Тел.: +7(473)278-38-89; e-mail: vestnik@vorstu.ru

Дата выхода в свет: 25.12.2025.
Формат 60x84/8. Бумага писчая.
Усл. печ. л. 28,6. Уч.-изд. л. 26,3.
Тираж 25 экз. Заказ № 279
Цена свободная

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»
394006 Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84

Отпечатано: отдел оперативной полиграфии издательства ВГТУ
394006 Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84