

ВЕСТНИК ВОРОНЕЖСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

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

Учредитель: ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»

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

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

Журнал выходит шесть раз в год

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

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

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

Ответственный секретарь С.А. Малюкова – Воронеж

ЧЛЕНЫ РЕДАКЦИОННОЙ КОЛЛЕГИИ:

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

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

Адрес редакции: 394026, Воронеж, Московский проспект, дом 14, комн. 212

Телефон: +7 (473) 246-28-63

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», 2023

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 certificate PI № FS 77 – 74159 02 November 2018)

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

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

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

The journal is published six times a year

EDITORIAL BOARD:

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

Executive secretary S.A. Malyukova – Voronezh

MEMBERS OF EDITORIAL BOARD:

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

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

Address: 394026, Voronezh, Moskovskiy prospekt, 14, office 212

Phone number: +7(473)246-28-63

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, 2023

12+

СОДЕРЖАНИЕ

Информатика, вычислительная техника и управление

Разработка системы распознавания качества обслуживания клиентов с помощью технологии искусственных нейронных сетей Д.А. Баранов, А.С. Тупицына, В.Ф. Барабанов, Н.И. Гребенникова, К.В. Зольников....	7
Разработка масштабируемых кроссплатформенных приложений QML с интеграцией модуля геометрических построений Open CASCADE А.И. Ахлестин, А.Н. Юров, М.И. Чижов.....	13
Иерархическая квазилинейная модель прогнозирования свойств клинкера А.П. Щербаков.....	17
Бесконтактное диагностирование работающего автоматизированного технологического оборудования В.Л. Мурзинов, Ю.В. Мурзинов, П.В. Мурзинов, Д.В. Кочерженко.....	23
Структура системы удаленного мониторинга микроклимата на базе ячеистой топологии К.Ю. Филатов, В.В. Воробьев, Д.С. Булучевский, В.Ф. Барабанов, Н.И. Гребенникова.....	28
Дифференциальная модель коммуникации бактериальной популяции при эволюции дочерних колоний: конечно-элементная реализация И. Шуай, А.Г. Масловская.....	36
Использование перфорации стабилизирующих расширяющихся «юбок» для улучшения аэродинамических характеристик летательных аппаратов В.Т. Калугин, М.Д. Калугина, А.Ю. Луценко, Д.К. Назарова, Д.М. Слободянюк.....	43
Реализация процессов создания 3D-анимаций для цифровых макетов изделий средствами Open CASCADE А.И. Ахлестин, А.Н. Юров, М.И. Чижов	52
Концепция обобщенных динамических состояний в оценке вынужденных движений механических колебательных систем А.В. Елисеев, Н.К. Кузнецов, А.С. Миронов.....	57
Разработка регулятора уровня в компенсаторе давления первого контура АЭС В.Л. Бурковский, И.А. Болдырев, У.А. Щеглова, А.С. Кожин, А.А. Голиков.....	67

Радиотехника и связь

Контроль качества радиолинии метеорной связи на ультракоротких волнах В.И. Дорошенко, Ю.Г. Ксенофонтов, В.Л. Мартынов.....	74
Источник опорного напряжения на ширине запрещенной зоны для отечественного технологического процесса А.В. Русанов, Л.В. Сопина.....	84
Разработка высокопроизводительного LDPC-декодера с конвейерной обработкой данных А.В. Башкиров, М.В. Хорошайлова, К.Д. Ципина.....	90
Гибридная многоскачковая система атмосферной оптической связи с пространственным разнесением Р.П. Краснов.....	98

Эквивалентная гибридная дипольная модель оценки электромагнитных помех на основе искусственной нейронной сети М.А. Ромашенко, Д.В. Васильченко, Д.А. Пухов.....	106
Малоэлементная антенная решетка с увеличенным покрытием зоны обслуживания А.В. Лукьянчиков.....	112

Машиностроение и машиноведение

Повышение качества деталей из легкоплавких материалов путем нанесения покрытий из чугуна А.В. Норман, В.П. Смоленцев, А.В. Норман, М.В. Кондратьев.....	120
-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	------------

CONTENTS

Informatics, computer engineering and control

Development of a system for recognizing customer service quality using artificial neural network technology D.A. Baranov, A.S. Tupitsyna, V.F. Barabanov, N.I. Grebennikova, K.V. Zolnikov.....	7
Development of scalable cross-platform QML applications with integration of the Open CASCADE geometric constructions module A.I. Akhlestin, A.N. Yurov, M.I. Chizhov.....	13
Three-level hierarchical regression model of clinker production process A.P. Shcherbakov.....	17
Contactless diagnostics of working automated process equipment V.L. Murzinov, Yu.V. Murzinov, P.V. Murzinov, D.V. Kocherzhenko.....	23
The structure of the microclimate remote monitoring system based on cellular topology K.Yu. Filatov, V.V. Vorobyov, D.S. Buluchevsky, V.F. Barabanov, N.I. Grebennikova.....	28
Differential model of bacterial communication during the evolution of daughter colonies: finite element implementation I. Shuai, A.G. Maslovskaya.....	36
Perforation of the stabilizing divergent «skirt» for improving aircraft aerodynamic characteristics V.T. Kalugin, M.D. Kalugina, A.Yu. Lutsenko, D.K. Nazarova, D.M. Slobodyanyuk.....	43
Implementation of 3D animation creation processes for digital product layouts by means of Open CASCADE A.I. Akhlestin, A.N. Yurov, M.I. Chizhov.....	52
The concept of generalized dynamic states in the evaluation of forced movements of mechanical oscillatory systems A.V. Eliseev, N.K. Kuznetsov, A.S. Mironov.....	57
Development of level regulator in the pressure compensator of the NPP first circuit V.L. Burkovsky, I.A. Boldyrev, U.A. Shcheglova, A.S. Kozhin, A.A. Golikov.....	67

Radio engineering and communication

Quality control of meteor communication radio link on ultrashort waves V.I. Doroshenko, Yu.G. Ksenofontov, V.L. Martynov.....	74
Bandgap reference voltage source for a domestic technological process A.V. Rusanov, L.V. Sopina.....	84
Development of a high-performance LDPC decoder with pipelined data processing A.V. Bashkirov, M.V. Khoroshailova, K.D. Tsipina.....	90
Hybrid multi-hop rf-fso system with spatial diversity R.P. Krasnov.....	98
Equivalent hybrid dipole model of electromagnetic interference estimation based on artificial neural network M.A. Romashchenko, D.V. Vasilchenko, D.A. Puhov.....	106
Low-element antenna array with increased coverage area A.V. Lukyanchikov.....	112

Mechanical engineering and science of machines

Improving the quality of parts made of low-melting materials by coating cast iron
A.V. Norman, V.P. Smolentsev, A.V. Norman, M.V. Kondratiev..... 120

Информатика, вычислительная техника и управление

DOI 10.36622/VSTU.2023.19.3.001

УДК 004.5

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ РАСПОЗНАВАНИЯ КАЧЕСТВА ОБСЛУЖИВАНИЯ КЛИЕНТОВ С ПОМОЩЬЮ ТЕХНОЛОГИИ ИСКУССТВЕННЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

Д.А. Баранов¹, А.С. Тупицына¹, В.Ф. Барабанов¹, Н.И. Гребенникова¹, К.В. Зольников²

¹**Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия**

²**Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова, г. Воронеж, Россия**

Аннотация: виртуальные автоматические телефонные станции широко используются компаниями для общения с клиентами и обеспечения продаж товара и услуг. Однако успех компании напрямую зависит от работы тех сотрудников, которые контактируют непосредственно с клиентом: их производительность, понимание клиента, отсутствие факторов, способствующих снижению лояльности клиента. Имеется виртуальная автоматическая телефонная станция (далее – ВАТС) с реализованной речевой аналитикой, однако встал вопрос о её реализации путём использования технологий машинного обучения и искусственных нейронных сетей в частности. В современном бизнесе ВАТС является комплексным решением для организации офисной телефонии, а также эффективным инструментом для налаживания процесса продаж, улучшения клиентского сервиса и оптимизации бизнес-процессов. Кроме того, ВАТС позволяет решить проблему удалённых сотрудников и наладить коммуникацию между всеми филиалами и подразделениями компании, даже если они расположены в разных странах. Рассмотрены используемые методы обработки получаемого на вход текста, процесс очистки и подготовки данных, используемые слои нейронной сети, а также работающие в составе сети математические решения. В итоге работы получена модель искусственной нейронной сети, принимающая на вход текстовый вектор и возвращающая на выходе идентификационный номер признака плохого обслуживания/продаж

Ключевые слова: АТС, ВАТС, речевая аналитика, признаки плохого обслуживания, машинное обучение, нейронные сети, сети с долгой краткосрочной памятью

Введение

Средства коммуникации служат основой бизнеса и, следовательно, применение современного оборудования и актуальных принципов организации связи является залогом успешной деятельности в любой сфере. Хорошо подходящим средством, способным обеспечить надёжную связь, являются автоматические телефонные станции (далее – АТС). АТС – это система, которая служит для соединения телефонных линий управления входящими и исходящими вызовами без вмешательства со стороны человека [1]. В данном случае, связь производится посредством использования обычного телефонного аппарата, подключённого к АТС. Кроме того, стоит упомянуть, что АТС-оборудование также может иметь соединение и с внешними системами связи (например, городская телефонная сеть).

В контексте бизнеса собственная АТС даёт возможность разделить абонентов на внутренних и внешних, что позволяет минимизировать

расходы на связь и тем самым увеличить рентабельность организации.

В данной статье речь пойдёт о виртуальных АТС (далее – ВАТС). ВАТС является полноценной АТС, но размещается не на физическом носителе, а на облачной платформе. Для такой системы характерна работа IP-телефонии, основанной на передаче данных через интернет при использовании технической базы и ПО провайдера. В качестве средства связи в ВАТС, помимо телефона, можно также использовать и любое вычислительное устройство: ПК, смартфон или планшетный ПК, имеющие подключение к сети Интернет. Всё это существенно упрощает и ускоряет процесс внедрения [2, 3].

В современном бизнесе ВАТС является комплексным решением для организации офисной телефонии, а также эффективным инструментом для налаживания процесса продаж, улучшения клиентского сервиса и оптимизации бизнес-процессов. Кроме того, ВАТС позволяет решить проблему удалённых сотрудников и наладить коммуникацию между всеми филиалами и подразделениями компании, даже если они расположены в разных странах.

Помимо наличия ВАТС и других инструментов, одной из важнейших составляющих, обеспечивающих успех ведения бизнеса, является качество обслуживания клиентов. В разрезе телефонии качество обслуживания клиентов формируется в процессе диалога с ними. Таким образом, возникает потребность в анализе разговоров на предмет наличия признаков некорректного поведения (плохого обслуживания) и/или продаж (далее – Речевая аналитика).

РА может быть использована для достижения следующих целей:

- улучшение производительности сотрудников контактного центра;
- повышение удовлетворённости клиентов путём увеличения уровня оказываемой «эмпатии» к клиентам;
- снижение расходов на содержание отделов связи и поддержки в целом;
- контроль дисциплины сотрудников;
- обнаружение мошенничества.

В рамках статьи будет предложена реализация речевой аналитики с использованием технологий машинного обучения и, в частности, обработки естественного языка (далее – NLP).

Подготовка текстовых данных

Перед тем, как текст разговора подать на вход какому-либо «распознавателю», его необходимо привести к математическому виду путём прогона через конвейер NLP-методов. В контексте NLP понятие «текст» будет упоминаться под более формальным понятием – «документ».

Первым шагом в подготовке данных было получение их из базы данных при использовании возможностей СУБД и приложения, предоставляющего интерфейс для взаимодействия с СУБД. Кроме того, из БД была получена информация о РА-признаках – ID кодовый номер и описание. В целях предотвращения повторного обращения к БД и контроля ресурсов.

Далее была произведена очистка данных от дубликатов и отсутствующих данных, а также переименование столбцов таблицы на более подходящие для дальнейшей работы.

Следующим шагом, используя Pandas-метод `value_counts`, была получена информация о количестве образцов, содержащих тот или иной класс. Как можно увидеть на рис. 1, в контексте численности вхождений того или

иного класса, данные являются несбалансированными.

```
1 result_df.thesauri.value_counts()
0      627124
11     32086
3       1257
7        380
1        193
6         52
5         39
2          9
8          1
9          1
10         1
Name: thesauri, dtype: int64
```

Рис. 1. Численность данных в таблице

Для того, чтобы «сгладить» дисбаланс классов в таблице, был произведён ряд мероприятий:

- удалена большая доля вхождений, с классом 0 таким образом, чтобы оставить их соразмерными по численности с вхождениями класса 11;
- в дефицитные классы добавлены липовые данные, которые наиболее вероятно могли бы отразить тот или иной класс;
- оставлены заметки о необходимости применения в процессе обучения методов регуляризации L1 и L2, снижающих влияние «доминирующего» класса;

В итоге была получена таблица длиной приблизительно в 70 тыс. строк, каждая из которых содержит короткую фразу и кодовый номер РА-признака. Результаты первичной подготовки данных были сохранены в соответствующий файл табличного формата CSV.

Первым шагом по обработке текста является очистка документа – удаление различного входа символов, фраз, которые имеют минимальный или даже отрицательный вклад в успешность распознавания. В результате работы сервиса по преобразованию речи в текст вряд ли будут иметься подлежащие удалению вхождения, однако не исключено, что их не будет и в различных текстовых выборках, которые могут подаваться на вход системе в целях обучения модели или распознавания признаков РА. Таким образом, подлежащими удалению являются следующие вхождения:

- пробельные символы: второй и более пробел между словами, табуляция, переход на новую строку;

– некоторые знаки препинания: тире, кавычки, точки с запятыми. Большинство из них могли бы появиться в тексте, полученном в результате транскрибации речи;

– слова, не несущие смысловой нагрузки и заполняющие «пустоту»: слова-паразиты, некоторые предлоги, имена собственные, числительные.

Следующими шагами будет выявление синтаксических зависимостей между словами и дальнейшее разделение текстов на предложения и отдельные морфологические единицы, каждая из которых будут представлены в виде отдельного образца. Для проведения этих операций было решено выбрать библиотеку SpaCy версии 3.5.0. При помощи этой работы были оставлены подлежащее, сказуемое, а также связанные с ними слова (например, определения).

Статичный текст невозможно представить в качестве входных данных для модели машинного обучения. Из известных алгоритмов формирования признаков был выбран чаще всего используемый алгоритм под названием TF-IDF (termfrequencyinverse - documentfrequency – частота слова - обратная частота документа), используемый для оценки важности слова в контексте категории, текста или их совокупности [4]. Кроме того, выбор в пользу TF-IDF пал по той причине, что он должен хорошо подойти для классификации фраз, а именно тем, что способен идентифицировать ключевые слова, которые наиболее характерны для данного документа, в отличие от общих слов, которые могут быть встречены во многих других.

Составляющая TF (частота слова) вычисляется в соответствии с формулой (1):

$$TF(w) = \frac{d_w}{d}, \quad (1)$$

где w – слово, подлежащее вычислению;

d_w – количество вхождений слова w в документ;

d – общее количество слов в документе.

Составляющая IDF является мерой, которая определяет уникальность слова в коллекции документов, т.е. представляет собой отношение общего количества документов к тем, в которых встречается то или иное слово. IDF вычисляется в соответствии с формулой (2):

$$IDF(w) = \log \frac{n}{n_w}, \quad (2)$$

где n – общее число документов;

n_w – число документов, содержащее слово w .

Таким образом, мера TF-IDF вычисляется согласно формуле (3):

$$TFIDF = TF \cdot IDF. \quad (3)$$

Так как таблица содержит большую численность слов, значимость документов решено было формировать на основе вектора, размером в 10 000 слов – такое количество позволит как добиться большей точности распознавания, так и обеспечить «вменяемую» нагрузку системы (рис. 2).

```
1 vectorizer = TFIDF(ncols=10000)
2 x = vectorizer.run(text_rows)
3 x
```

<68038x22245 sparse matrix of type '<class 'numpy.float64'>' with 493708 stored elements in Compressed Sparse Row format>

Рис. 2. Представление текста в формат TF-IDF

Далее стоит обратить внимание на кодовые номера меток. Так как каждая метка содержит произвольное числовое значение, не идущее по порядку с другими, в контексте подготовки данных они были расценены как категориальные. Каждая из этих меток была закодирована в качестве порядкового номера, отвечающего за ту или иную метку. Для проведения подобной операции было решено использовать класс библиотеки Scikit-learn под названием OrdinalEncoder.

На рис. 3 показана реализация кодирования меток, а также вывод их закодированных вариантов и исходных.

```
1 ordinal_encoder = OrdinalEncoder()
2 y = ordinal_encoder.fit_transform(df[['thesauri']])
3 print(ordinal_encoder.categories_)
4 y
```

[array([0, 101, 102, 103, 105, 106, 107, 108, 109, 110, 111])]
array([[10.],
 [10.],
 [10.],
 ...,
 [10.],
 [10.],
 [10.]])

Рис. 3. Представление меток из категориальных в числовые (порядковые)

Заключительным шагом в подготовке данных было разделение полученных результатов на две выборки: одна из них будет использоваться для обучения модели нейронной сети, а другая – для её тестирования. Для этого был

применён метод `train_test_split`, поставляемый библиотекой `Scikit-learn`. Выбор в пользу данного метода пал по тем причинам, что он может безошибочно разбить данные на нужные доли, а также перемешать их и сразу записать в соответствующие переменные. Таким образом, было получено 4 переменные:

- переменные `x_train` и `x_test` содержат в себе разреженные векторы TF-IDF признаков для обучения и тестирования модели соответственно;

- переменные `y_train` и `y_test` содержат в себе массивы соответствующих меток, используемых вместе с векторами для обучения и тестирования модели соответственно;

В результате проведённой работы были получены данные признаков и классов, полностью готовых к использованию в качестве входных данных к модели нейронной сети: как для её обучения, так и тестирования.

Формирование структуры нейронной сети и обучение

Для построения нейронной сети и её последующего обучения использовалась библиотека `Tensorflow` под оболочкой `Keras`. В модели использовался следующий перечень слоёв:

- входным в модель слоем является слой `Input`, имеющий количество нейронов, равное максимальной длине вектора, получаемого на вход. Длина вектора равна 10000 элементов;

- после прохода через слой `Input`, данные поступают на вход одному из основных слоёв модели – рекуррентному слою с долгой краткосрочной памятью (LSTM) [5], состоящему из 100 нейронов. На выходе слой возвращает новую последовательность;

- для замедления обучения и предотвращения переобучения, далее следует слой `Dropout`, отключающий 30 % поступающих в него нейронов;

- оставшаяся после отключения последовательность поступает на вход новому LSTM-слою, содержащим в себе 128 нейронов;

- после прохода через второй слой рекуррентного слоя, 30 % обнуляется, пройдя через слой `Dropout`, что позволяет снизить риск переобучения от LSTM с большим числом нейронов;

- выходным слоем является полносвязный слой `Dense`, возвращающий конечный ответ.

Графическая схема построенной нейронной сети показана на рис. 4.

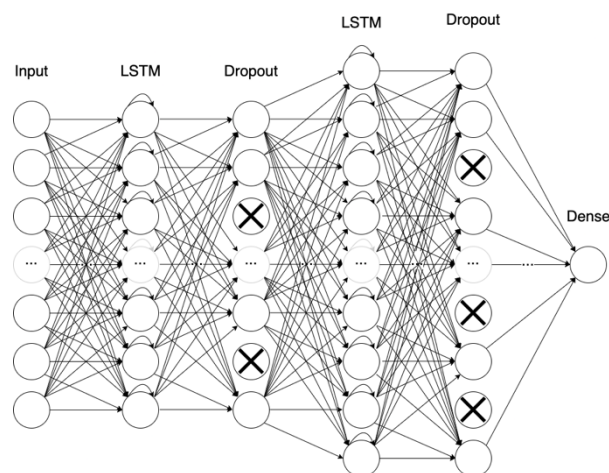


Рис. 4. Схема нейронной сети

В процессе обучения модели ориентир производился на метрику ассигасу. Хотя она не является исчерпывающим показателем качества обучения модели, она может дать предварительный итог работы (рис. 5).

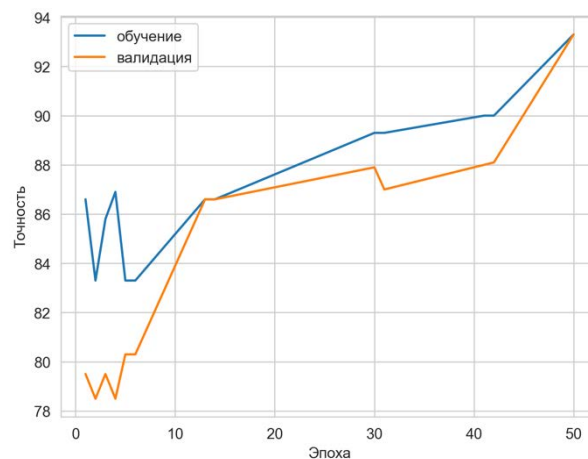


Рис. 5. График точности по эпохам

Определение качества обучения модели

Для определения качества обслуживания, был произведён ряд вычислений метрик `precision` по формуле (4), `recall` по формуле (5) и `f1` по формуле (6)

$$p = \frac{TP}{TP+FP}, \quad (4)$$

$$r = \frac{TP}{TP+FN}, \quad (5)$$

$$F1 = 2 \frac{p \cdot r}{p+r} = \frac{TP}{TP + \frac{FN+FP}{2}} \quad (6)$$

Вычисление метрики происходило для каждого класса. Для этого использовались вектор прогнозов тестовой выборки и непосредственно вектор тестовой выборки. Для выделения значения ложно-положительных и других значений использовались функции where и count_nonzero, поставляемые библиотекой numpy (рис. 6).

```

1 predicted_values = model.predict(x_test)
2
3 for encoded_value in range(len(ordinal_encoder.categories_[0])):
4     y_test_filtered = np.where(y_test == encoded_value, 1, 0)
5     predicted_filtered = np.where(predicted_values == encoded_value, 1, 0)
6
7     true_positive = np.count_nonzero(y_test_filtered * predicted_filtered == 1)
8     false_positive = np.count_nonzero(predicted_filtered - y_test_filtered == 1)
9     false_negative = np.count_nonzero(y_test_filtered - predicted_filtered == 1)
10
11     label = ordinal_encoder.inverse_transform(np.array([encoded_value]).reshape(-1, 1))[0][0]
12     precision = true_positive / (true_positive + false_positive)
13     recall = true_positive / (true_positive + false_negative)
14     f1 = 2 * (precision * recall) / (precision + recall)
15
16 print(f'Номер метки: {label:3}\tp = {precision:5.2}\tr = {recall:5.2}\tF1 = {f1:5.2}')

```

Номер метки: 0 p = 0.95 r = 0.93 F1 = 0.94

Рис. 6. Процесс поклассового вычисления метрик precision, recall и F1

Значения метрик по классам приведено в таблице ниже.

Значения метрик precision, recall и F1

РА-признак	Метрика, %			Кол-во меток
	precision	recall	F1	
Отсутствует	97	91	94	5171
Клиент хочет сделать заказ	82	82	82	686
Сотрудник упомянул акцию	96	94	95	1011
Невнятная речь	95	73	83	684
Жалобы клиентов	91	75	89	475
Оператор провоцирует клиента	94	68	83	170
Мат, грубости, оскорбления	94	70	80	724
Слова-паразиты, жаргон	91	98	94	854

Заключение

В итоге работы была получена модель искусственной нейронной сети, принимающая на вход текстовый вектор размерностью в 1000 элементов и возвращающая на выходе идентификационный номер признака плохого обслуживания/продаж (в случае его отсутствия – значение 0). Медианное значение метрик точности и полноты равно 94 % и 85 % соответственно. По причине малой численности некоторых классов и данных в целом, некоторые РА-признаки имеют относительно низкий показатель полноты. Несмотря на это, результат обучения модели было решено признать надлежащим к первичному внедрению.

В дальнейшей работе предстоит минимизировать дисбаланс классов в исходных данных, а также дополнить новыми ключевыми словами, в соответствии с которыми модель

нейронной сети будет делать выводы о наличии признаков обслуживания.

Литература

1. Автоматическая телефонная станция АТС – принципы работы и применения | Телекоммуникационная компания «АСВА» - сетевое оборудование, системы связи и передачи данных URL: <https://asvagroup.com/2020/05/avtomaticheskaya-telefonnaya-stancziya-princziipy-raboty-i-primeneniya>
2. Как работает облачная АТС - статья от оператора New-Tel – URL: <https://new-tel.net/blog/kak-rabotaet-oblachnaya-ats/>
3. Что такое виртуальная АТС? URL: <https://landcomm.ru/blog/chto-takoe-virtualnaya-ats/>
4. Груздев А.В. Предварительная подготовка данных в Python: Том 1. Инструменты и валидация. М.: ДМК Пресс, 2023. 816 с.
5. Staudmeyer R.C., Morris E.R. Understanding LSTM - a tutorial into Long Short-Term Memory Recurrent Neural Networks. - arXiv:1909.09586v1, 2019. P. 42.

Поступила 11.04.2023; принята к публикации 16.06.2023

Информация об авторах

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

Тупицына Анна Сергеевна – специалист, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: anna.tupitsyna.00@yandex.ru

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

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

Зольников Константин Владимирович - канд. техн. наук, доцент, Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова (394087, Россия, г. Воронеж, ул. Тимирязева, 8), e-mail: wkz@rambler.ru

DEVELOPMENT OF A SYSTEM FOR RECOGNIZING CUSTOMER SERVICE QUALITY USING ARTIFICIAL NEURAL NETWORK TECHNOLOGY

D.A. Baranov¹, A.S. Tupitsyna¹, V.F. Barabanov¹, N.I. Grebennikova¹, K.V. Zolnikov²

¹Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

²Voronezh State University of Forestry and Technologies, Voronezh, Russia

Abstract: virtual automatic telephone exchanges are widely used by companies to communicate with customers and ensure sales of goods and services. However, the success of the company's work directly depends on the work of those employees who contact directly with the client: their productivity, understanding of the client, the absence of factors contributing to a decrease in customer loyalty. In this article we will talk about virtual PBX (hereinafter – VPBX). There is a VPBX with implemented speech analytics, but the question arose about its implementation through the use of machine learning technologies and artificial neural networks in particular. In modern business, VPBX is a comprehensive solution for the organization of office telephony, as well as an effective tool for establishing the sales process, improving customer service and optimizing business processes. In addition, VPBX allows you to solve the problem of remote employees and establish communication between all branches and divisions of the company, even if they are located in different countries. The article discusses the methods used for processing the text received as input, the process of cleaning and preparing data, the layers of the neural network used, as well as mathematical solutions working as part of the network. As a result of the work, an artificial neural network model was obtained that accepts a text vector as input and returns the identification number of a sign of poor service/sales at the output

Key words: speech analytics, topics of bad service, machine learning, neural networks, long-short time memory, natural language processing, PBX, HostedPBX

References

1. “Automatic telephone exchange ATE - principles of operation and application”, Telecommunication company "ASVA" - network equipment, communication and data transmission systems, available at: <https://asvagroup.com/2020/05/avtomaticheskaya-telefonnaya-stancziya-princziy-raboty-i-primeneniya>
2. “How the cloud PBX works - the article from New-Tel operator”, available at: <https://new-tel.net/blog/kak-rabotaet-oblchnaya-ats/>
3. “What is a virtual PBX?”, available at: <https://landcomm.ru/blog/chto-takoe-virtualnaya-ats/>
4. Gruzdev A.V. “Data Preconditioning in Python: volume 1, Tools and Validation” (“Predvaritel'naya podgotovka dannykh v Python: tom 1. Instrumenty i validatsiya”), Moscow, DMK Press, 2023, 816 p.
5. Staudmeyer R.C., Morris E.R. “Understanding LSTM - a tutorial into Long Short-Term Memory Recurrent Neural Networks”, arXiv:1909.09586v1, 2019, p. 42 .

Submitted 11.04.2023; revised 16.06.2023

Information about the authors

Dmitriy A. Baranov – Master’s student, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: div8@bk.ru

Anna S. Tupitsyna – Specialist, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: anna.tupitsyna.00@yandex.ru

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

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

Konstantin V. Zolnikov – Cand. of Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State University of Forestry and Technologies (8 Timiryazeva str., Voronezh 394087, Russia), e-mail: wkz@rambler.ru

РАЗРАБОТКА МАСШТАБИРУЕМЫХ КРОССПЛАТФОРМЕННЫХ ПРИЛОЖЕНИЙ QML С ИНТЕГРАЦИЕЙ МОДУЛЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПОСТРОЕНИЙ OPEN CASCADE

А.И. Ахлестин, А.Н. Юров, М.И. Чижов

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

Аннотация: рассматривается разработка масштабируемых кроссплатформенных приложений, реализованных при помощи QML с интеграцией модуля геометрических построений Open CASCADE. QML (Qt Meta-Object Language) является декларативным языком программирования, позволяющим создавать пользовательские интерфейсы на различных платформах. Open CASCADE, с другой стороны, предоставляет мощный инструментарий для геометрического моделирования и анализа. Исследование также описывает архитектуру масштабируемых приложений и преимущества кроссплатформенной разработки с использованием QML. Кроме того, в работе предложены пути интеграции модуля геометрических построений Open CASCADE в приложения на QML, обеспечивающие возможности для создания сложных трехмерных моделей и выполнения геометрических операций. В результате представлены примеры применения разработанных приложений, демонстрирующие их масштабируемость и функциональные возможности. Рассмотренный способ разработки приложений может быть использован в различных областях, таких как инженерное моделирование, архитектурное проектирование и медицинская визуализация. Реализация выполнена для операционных систем Windows с 64 разрядной архитектурой

Ключевые слова: QML, OpenCASCADE, масштабируемое приложение, MVC, интеграция модуля, платформа, кроссплатформенность

Введение

В современном мире разработка кроссплатформенных приложений является неотъемлемой частью программной индустрии. Благодаря возрастающему разнообразию устройств и операционных систем, разработчикам необходимо обеспечить безупречную работу своих приложений на различных платформах, чтобы достичь широкой аудитории пользователей. Однако, нередко встает проблема несовместимости и неэффективности разработанных приложений на разных платформах, что может привести к значительным затратам времени и ресурсов.

Возникает вопрос: как создать масштабируемое кроссплатформенное приложение, которое будет эффективно работать на различных операционных системах? Существующие традиционные методы разработки приложений часто не способны предложить удовлетворительное решение данной проблемы [1]. Некоторые подходы основаны на низкоуровневом программировании, что требует от разработчиков больших усилий и компетенций в различных технологиях. Другие решения могут ограничиваться только определенными платформами или не обладать достаточной гибкостью и производительностью.

Для устранения этой проблемы может

быть предложено решение, основанное на использовании QML (Qt Meta-Object Language) с интеграцией модуля геометрических построений Open CASCADE. QML является декларативным языком программирования, разработанным компанией Qt, который позволяет разрабатывать интерфейсы приложений с высокой гибкостью и масштабируемостью. Open CASCADE, в свою очередь, предоставляет мощный инструментарий для геометрического моделирования и анализа.

Использование QML с интеграцией модуля геометрических построений Open CASCADE позволяет создавать масштабируемые кроссплатформенные приложения с богатым функционалом и открытыми возможностями для работы с трехмерными моделями. Это решение устраняет проблемы несовместимости и неэффективности, предоставляя разработчикам универсальное средство для разработки приложений, которые легко масштабируются и работают на различных операционных системах.

Инструменты масштабируемости и кроссплатформенности

Qt и Open CASCADE предлагают мощные инструменты, которые способствуют масштабируемости и кроссплатформенности приложений.

1. QML является декларативным языком программирования, который позволяет разрабатывать пользовательские интерфейсы с помощью гибких компонентов. QML упрощает создание адаптивных пользовательских интерфейсов, которые могут эффективно работать на различных устройствах и платформах [2].

2. Qt Quick - это фреймворк для создания пользовательских интерфейсов с использованием QML. Он предоставляет широкий спектр компонентов и возможностей для создания интерактивных и анимированных интерфейсов. Qt Quick обеспечивает высокую производительность и гибкость, что является важным аспектом масштабируемости приложений [3].

Open CASCADE, мощная библиотека для геометрического моделирования и анализа, также предлагает инструменты, способствующие масштабируемости приложений:

1. Модуль геометрических построений: Open CASCADE предоставляет набор инструментов для создания и манипулирования трехмерными моделями. Это включает в себя функции для создания геометрических примитивов, операций булевой логики над объектами, анализа структуры модели и многое другое. Интеграция этого модуля с Qt позволяет создавать масштабируемые приложения с расширенными возможностями работы с трехмерными объектами.

2. Кроссплатформенность: OpenCASCADE предоставляет поддержку для различных операционных систем, включая Windows, macOS и Linux. Это позволяет создавать кроссплатформенные приложения, которые могут работать на разных платформах без необходимости внесения значительных изменений в код.

Разработка масштабируемого кроссплатформенного приложения

Разработка масштабируемого кроссплатформенного приложения требует глубокого планирования на основе концепций паттернов проектирования и организации проекта, а также учета особенностей используемых технологий.

Первым шагом является создание проекта с использованием среды разработки, которая поддерживает кроссплатформенность и интеграцию с QML и Open Cascade.

После создания проекта необходимо определить архитектурный шаблон приложения. Рекомендуется использовать паттерн Model-View-Controller (MVC) [4] или аналогичные архитектурные подходы, которые помогут разделить логику приложения, представление и взаимодействие с модулем геометрических построений Open CASCADE.

Компоновка файлов должна быть структурированной и понятной. Необходимо разделять код приложения на логические модули и пакеты, чтобы облегчить его поддержку и расширение в будущем. Например, можно создать отдельные пакеты для моделей данных, представлений QML, контроллеров и вспомогательных классов.

Описание используемых классов должно быть четким и информативным. Нужно отдельно описать классы, отвечающие за модели данных приложения, их свойства и методы. Также указать классы, отвечающие за представления QML, их интерфейсы и взаимодействие с модулем геометрических построений Open CASCADE. Также стоит разделить классы контроллеров, отвечающих за обработку пользовательских действий и взаимодействие с моделью и представлением.

При разработке кроссплатформенного приложения важно учесть различия в операционных системах и обеспечить их поддержку. Можно использовать условные конструкции и абстракции, чтобы обеспечить корректное отображение и функциональность приложения на разных платформах.

Важным аспектом масштабируемости приложения является его способность эффективно обрабатывать с различные объемы данных и адаптироваться к изменениям. При проектировании классов и компонентов необходимо уделить внимание их гибкости и возможности масштабирования.

В дополнение, стоит использовать принципы SOLID (Принцип единственной ответственности, Принцип открытости/закрытости, Принцип подстановки Барбары Лисков, Принцип разделения интерфейса и Принцип инверсии зависимостей) при разработке классов, чтобы обеспечить их гибкость и переиспользуемость. Это позволит легко добавлять новые функции, изменять поведение существующих классов и поддерживать код приложения на

разных платформах без необходимости полной переработки.

Интеграция модуля геометрических построений Open Cascade должна быть сделана с учетом требований кроссплатформенности, используя интерфейсы и абстракции, чтобы скрыть специфические детали реализации модуля и обеспечить его замену или модификацию в будущем. Взаимодействие с модулем Open Cascade происходит через классы, которые обеспечивают управление геометрическими объектами, их создание, модификацию и визуализацию.

На рис. 1 приведен пример классов масштабируемого приложения и их взаимодействия друг с другом.



Рис. 1. Взаимодействие компонентов

При разработке кроссплатформенного приложения с использованием Qt и Open Cascade, QML используется для создания пользовательского интерфейса и описания визуальных элементов приложения. В QML-файлах можно использовать компоненты, предоставляемые Qt Quick Controls, для создания пользовательских элементов интерфейса, таких как кнопки, поля ввода и окна.

Взаимодействие между QML и модулем геометрических построений Open Cascade осуществляется через биндинги и события.

Для разработки самого приложения на C++, можно выбрать паттерн "Abstract Factory".

Паттерн "Abstract Factory" позволяет создавать семейства связанных объектов без привязки к конкретным классам. Это означает, что можно создавать объекты, используя абстрактные интерфейсы и классы, вместо прямого вызова конструкторов конкретных классов [5]. Примерная схема использования классов с этим паттерном представлена на рис. 2.

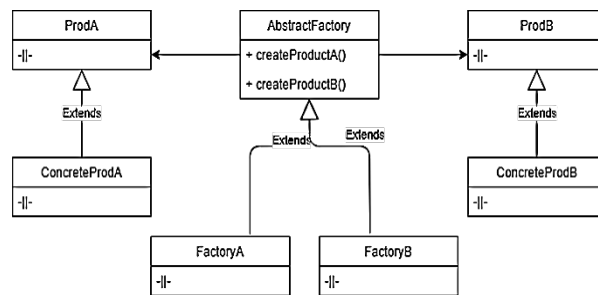


Рис. 2. Паттерн Abstract Factory

Абстрактная фабрика может быть реализована для каждой платформы, предоставляя специфические реализации объектов, соответствующие требованиям каждой платформы. Таким образом, получится легко добавлять поддержку новых платформ, добавляя конкретные реализации фабрик.

Также использование этого паттерна позволяет разделить создание объектов от их использования, упрощая добавление новых платформенных зависимостей и обеспечивая гибкость и расширяемость приложения.

В итоге получен концепт приложения, который можно легко расширять и переносить на любые платформы. Пример его архитектуры показан на рис. 3.



Рис. 3. Архитектура масштабируемого приложения

Заключение

Использование QML с интеграцией модуля геометрических построений Open CASCADE предлагает масштабируемое решение для создания кроссплатформенных приложений с богатым функционалом. Это позволяет разработчикам эффективно работать с трехмерными моделями и обеспечивает совместимость на различных операционных сис-

темах. Такое решение также предоставляет универсальность и гибкость разработки приложений, сокращает затраты времени и ресурсов, и удовлетворяет потребности широкой аудитории пользователей.

Литература

1. Чурсин А.Н., Мамедова Н.А., Нефедов Ю.В. Разработка кроссплатформенных мобильных приложений – перспективные методы и стандартные практики // При-

кладная информатика. 2021. С. 52-67.

2. Qt QML Class Reference // QT Documentation URL: <https://doc.qt.io/qt-6/qtqml-index.html> (дата обращения: 15.05.2023).

3. Qt Quick Class Reference // QT Documentation URL: <https://doc.qt.io/qt-6/qtquick-index.html> (дата обращения: 15.05.2023).

4. Jon G., Brad W., David M. ASP.NET MVC 5. 1 изд. - Indianapolis: John Wiley & Sons, Inc., 2014. 620 p.

5. Vijay K. Abstract factory and singleton design patterns to create decorator pattern objects in web application // IJAIT. 2011. № 5. Pp. 3-4.

Поступила 19.05.2023; принята к публикации 21.06.2023

Информация об авторе

Ахлестин Андрей Игоревич – студент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: ahlestin.and@yandex.ru, тел. +7(953)611-57-79

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

Чижов Михаил Иванович – д-р техн. наук, профессор, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: kitp@vorstu.ru, тел. +7(910)240-87-65

DEVELOPMENT OF SCALABLE CROSS-PLATFORM QML APPLICATIONS WITH INTEGRATION OF THE OPEN CASCADE GEOMETRIC CONSTRUCTIONS MODULE

A.I. Akhlestin, A.N. Yurov, M.I. Chizhov

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract: this paper considers the development of scalable cross-platform applications implemented using QML with the integration of the Open CASCADE geometric constructions module. QML (Qt Meta-Object Language) is a declarative programming language that allows you to create user interfaces on various platforms. Open CASCADE, on the other hand, provides powerful tools for geometric modeling and analysis. The study also describes the architecture of scalable applications and the advantages of cross-platform development using QML. In addition, the paper suggests ways to integrate the Open CASCADE geometric constructions module into QML applications, providing opportunities for creating complex three-dimensional models and performing geometric operations. As a result, examples of the application of the developed applications are presented, demonstrating their scalability and functionality. The considered method of application development can be used in various fields, such as engineering modeling, architectural design and medical imaging. The implementation is made for Windows operating systems with 64-bit architecture

Key words: QML, OpenCascade, scalable application, MVC, module integration, platform, cross-platform

References

1. Chursin A.N., Mammadova N.A., Nefedov Yu.V. “Development of cross-platform mobile applications - promising methods and standard practices”, *Applied Informatics (Prikladnaya informatika)*, 2021, pp. 52-67.

2. “Qt QML Class Reference, QT Documentation”, available at: <https://doc.qt.io/qt-6/qtqml-index.html> (accessed: 05.15.2023).

3. “Qt Quick Class Reference, QT Documentation”, available at: <https://doc.qt.io/qt-6/qtquick-index.html> (accessed: 05.15.2023).

4. Jon G., Brad W., David M. “ASP.NET MVC 5”, 1st edition, Indianapolis: John Wiley & Sons, Inc., 2014, 620 p.

5. Vijay K. “Abstract factory and singleton design patterns to create decorator pattern objects in web application”, *IJAIT*, 2011, no. 5, pp. 3-4.

Submitted 19.05.2023; revised 21.06.2023

Information about the authors

Andrey I. Akhlestin – Student, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: ahlestin.and@yandex.ru, tel.: +7(953)611-57-79

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

Mikhail I. Chizhov – Doctor of Sc. (Technical), Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: kitp@vorstu.ru, tel.: +7(910)240-87-65

ИЕРАРХИЧЕСКАЯ КВАЗИЛИНЕЙНАЯ МОДЕЛЬ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ СВОЙСТВ КЛИНКЕРА

А.П. Щербаков

Липецкий государственный технический университет, г. Липецк, Россия

Аннотация: рассматривается задача построения и оценки адекватности двухуровневой и трехуровневой иерархической регрессионной квазилинейной модели прогнозирования качества клинкера. Клинкер в цементном производстве получают обжигом сырьевой муки. Качество клинкера зависит от химического и минералогического состава сырьевой муки. Основными показателями качества являются модульные характеристики – силикатный модуль, глиноземный модуль и коэффициент насыщения. Показатели качества рассчитываются на основе химического анализа до и после обжига, то есть для исходной сырьевой муки и для клинкера. На основании имеющихся экспериментальных данных можно сделать вывод, что зависимость между показателями до и после обжига является сильно нелинейной. В данной работе нелинейная зависимость глиноземного модуля клинкера от химического состава сырьевой муки описывается с помощью иерархической квазилинейной модели. Схема построения модели имеет некоторое сходство со схемой построения интеграла Лебега, когда вместо разбиения области определения функции (как в интеграле Римана) рассматривается разбиение области значений этой функции. Адекватность построенной модели зависимости свойств клинкера от химического состава сырьевой муки подтверждается значительным снижением суммарной ошибки и приближением автокорреляционной функции остатков модели к уровню белого шума

Ключевые слова: квазилинейные модели, остаточные данные, кластеризация, иерархическое разбиение, схема Лебега

Введение

Производство цемента (например, [1], [2]) является сложным многостадийным процессом, центральным этапом которого является получение клинкера. Клинкер получают обжигом до спекания тонкодисперсной сырьевой муки, состоящей из известняка, глины, шлакового щебня и других материалов [1]. Качество клинкера характеризуется его химическим, минералогическим и фазовым составами.

По имеющимся измерениям химического состава сырья и клинкера рассчитываются так называемые модульные характеристики – n (силикатный модуль), p (глиноземный модуль), КН (коэффициент насыщения):

$$n = \frac{\text{SiO}_2\%}{\text{Al}_2\text{O}_3\% + \text{Fe}_2\text{O}_3\%}$$

$$p = \frac{\text{Al}_2\text{O}_3\%}{\text{Fe}_2\text{O}_3\%}$$

$$\text{КН} = \frac{\text{CaO}\% - 1,65 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3\% - 0,35 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3\%}{2,8 \cdot \text{SiO}_2\%}$$

Параметры n_M , p_M и КН_M сырьевой муки фиксируются ежедневно и подвержены колеба-

ниям вслед за колебанием химического состава сырьевой муки. Например, график изменения модуля n_M сырьевой муки за год (по данным производства) имеет вид

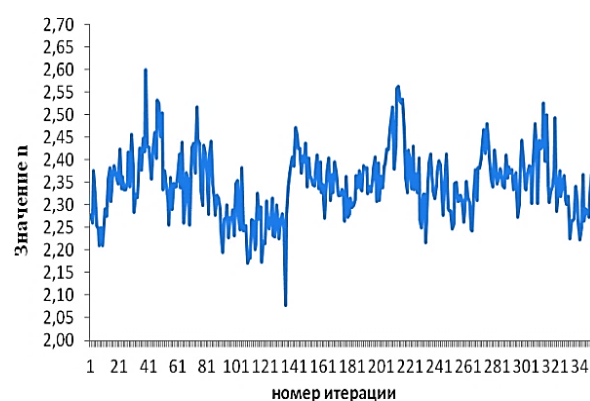


Рис. 1. Изменение силикатного модуля n_M

Важной задачей является построение математической модели зависимости качества клинкера от изменений химического состава сырьевой муки, то есть модели, позволяющей оценить модульные параметры n_K , p_K и КН_K клинкера заранее, до (а не после) процесса обжига.

Зависимость модульных характеристик клинкера n_K , p_K и КН_K от химического состава сырьевой муки, как показывают данные производства, является сильно нелинейной, при этом нелинейность связана, прежде всего, со слож-

ными изменениями химического состава в процессе обжига. Дополнительный вклад в нелинейность вносят колебания химического состава сырьевой муки (рис. 1) в случае использования при обжиге запасов, накопленных за предыдущий период времени (более одного дня).

В данной работе для построения математической зависимости характеристик клинкера от химического состава сырьевой муки применяется иерархическая регрессионная квазилинейная модель, описанная ранее в статье [3] как иерархическая L-модель (или модель Лебега).

L-схема иерархической идентификации квазилинейной модели

В работах [3], [4] были определены два класса многоуровневых иерархических регрессионных моделей, модели Римана и модели Лебега. Названия этих моделей указывали на некоторое сходство схем построения с определениями интегралов по Риману и Лебегу. Одноуровневые модели такого типа – это обычные линейные регрессионные модели, двухуровневые модели Римана (но не Лебега) имеют некоторое сходство с квазилинейными моделями, определенными в работах [5]-[7].

Иерархичность моделей в работе [3] определяется схемой параметрической идентификации (R-схема для моделей Римана и L-схема для моделей Лебега). Таким образом, иерархичность понимается иначе, чем в близкой по терминологии работе [8], в которой иерархичность связана, скорее, со структурной идентификацией (см. по этому поводу комментарии в [3]).

В работе [3] было высказано предположение, что оба класса моделей, и в особенности модель Лебега, могут быть полезны для описания сильно нелинейных зависимостей. Напомним (см. [3]), что в схеме Римана используется априори заданная иерархическая кластеризация в многомерном (в общем случае) пространстве входов.

В схеме Лебега, которую мы будем применять в данной работе, на каждом шаге кластеризуются невязки в одномерном пространстве выходов модели предыдущего уровня. Для каждого кластера находится его прообраз в пространстве входов и идентифицируется уточняющая линейная модель данного уровня (второго, третьего и т.д.).

В результате в многомерном пространстве входов возникает иерархическое разбиение, элементы которого на каждом уровне иерархии могут быть устроены сколь угодно сложно. В

частности, это разбиение, как правило, не является кластеризацией в обычном смысле этого термина [9].

Для моделирования зависимости свойств клинкера от химических характеристик сырьевой муки в данной работе предлагается использовать иерархическую квазилинейную модель Лебега. В работе применялись средства математического пакета Statistica и программа для работы с электронными таблицами Excel.

Построение двухуровневой модели (3 кластера)

Для наглядности, в рамках данной работы, выберем в качестве зависимой переменной значение глиноземного модуля клинкера p (обозначим как Y), а в качестве регрессоров – значения $Fe_2O_3\%$ и $Al_2O_3\%$ сырьевой муки (обозначим, соответственно, как x_1 и x_2).

В рамках исследования были использованы 300 наблюдений входных кортежей (двух переменных) и выходной зависимой переменной, значения которых снимались ежедневно в течение календарного года (с некоторыми технологическими перерывами). Диаграмма рассеяния совместного 3D-графика всех 3-х переменных (с аппроксимирующей подгонкой поверхности) представлены на рис. 2.

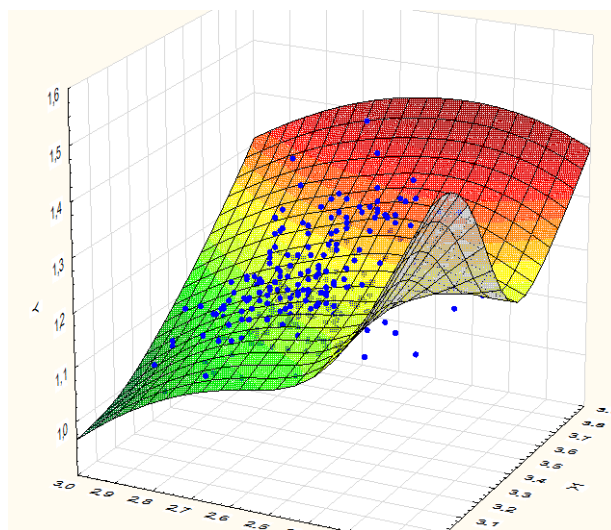


Рис. 2. 3D-диаграмма рассеяния данных x_1 , x_2 , Y

Линейная регрессионная модель, построенная по исходным данным имеет вид:

$$F^1(x) = 0,75 + 0,29x_1 - 0,2x_2. \quad (1)$$

Коэффициент множественной корреляции $R = 0,67778$, коэффициент детерминации $R^2 = 0,459386$, сумма квадратов остатков (невязок) равна $\sum e^2 = 0,745$.

Далее проводится кластеризация остатков линейной модели (L-схема) по 3 кластерам. Кластер №1 содержит 81 наблюдение, кластер №2 – 134 наблюдения, кластер №3 – 85 наблюдений. Кластеризация производилась по методу k-средних.

Сопоставляя кластеризованным значениям остатков их прообразы, то есть соответствующие значения входной величины $X = (x_1, x_2)$, получаем разбиение входов. Это разбиение представлено на рис. 3. Точки рассеяния входа для 1, 2 и 3 кластеров показаны соответственно в виде кружков, квадратиков и треугольников.

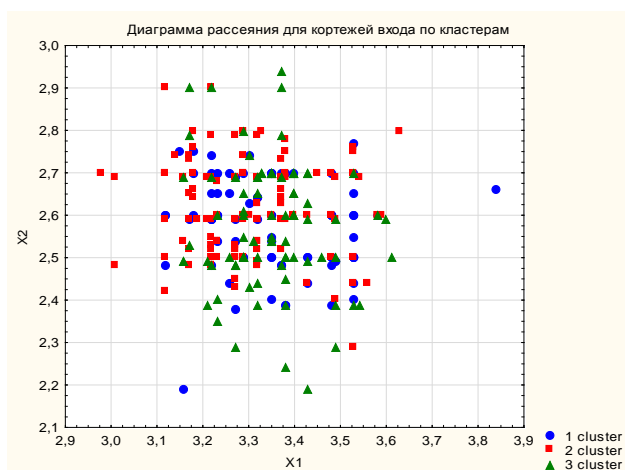


Рис. 3. Разбиение кортежей входа X , соответствующее кластеризации остатков e выхода Y

Далее построим линейные регрессионные модели для остатков (невязок) e в каждом из 3-х кластеров, используя соответствующее этим кластерам разбиение пространства входов. В итоге получаем квазилинейную модель с двухуровневой иерархией разбиения входных данных. Первый уровень – это все данные входов, второй уровень образован прообразами кластеров невязок линейной модели первого уровня.

Модель имеет вид

$$F(x) = F^1(x) + F_{i(x)}^2(x), \quad (2)$$

где $i(x)$ – выбор слагаемого второго уровня в зависимости от (x_1, x_2) и разбиения входов (подробнее см. [3]). Т.е. добавочная модель второго уровня $F_{i(x)}^2(x)$ «включается» в тот момент, когда значение невязки e выхода Y от ли-

нейной модели первого уровня $F^1(x)$ попадает в тот или иной кластер.

Линейные добавочные модели второго уровня представлены ниже.

$i(x)$	$F_i^2(x)$
1	$F_1^2(x) = 0,3035 - 0,0004x_1 - 0,0933x_2$
2	$F_2^2(x) = 0,0409 - 0,0033x_1 - 0,0115x_2$
3	$F_3^2(x) = -0,0875 - 0,0291x_1 + 0,0491x_2$

Сумма квадратов остатков двухуровневой модели (2) относительно исходных выходов Y равна $\sum e^2 = 0,132$, что уже существенно лучше, чем было у обычной линейной модели первого уровня.

Построение трехуровневой модели (3x2 кластера)

Для построения трехуровневой модели проводится кластеризация остатков квазилинейной модели второго уровня для каждого из трех случаев, то есть для каждой из трех подмоделей второго уровня. Количество кластеров в каждом случае возьмем равным двум, таким образом, общее количество подмоделей третьего уровня в итоговой модели будет равно шести.

В качестве примера, разбиение кортежей $X = (x_1, x_2)$, соответствующее двум кластерам кластера №1 второго уровня (кружки на рис. 3) представлено на рис. 4 (точки показаны в виде ромбов и звездочек).

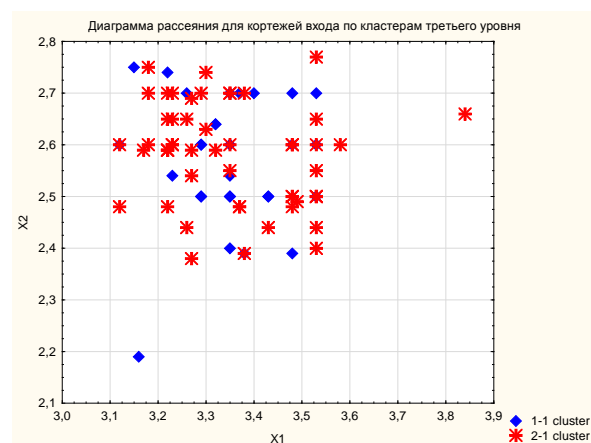


Рис. 4. Разбиение кортежей входа X , соответствующее последовательной кластеризации остатков e выхода Y для 1-го кластера второго уровня

Далее идентифицируем 6 линейных моделей, для каждого из 6 наборов данных кортежей входов и остатков двухуровневой модели. В итоге получаем трехуровневую иерархическую квазилинейную модель Лебега

$$F(x) = F^1(x) + F_{i(x)}^2(x) + F_{ji(x)}^3, \quad (3)$$

где $ji(x)$ – выбор кластера и соответствующей модели третьего уровня в зависимости от (x_1, x_2) , $i(x)$ – выбор кластера и соответствующей модели второго уровня в зависимости от (x_1, x_2) . Т.е. добавочные модели третьего уровня $F_{ji(x)}^3$ и второго уровня $F_{i(x)}^2(x)$ «включаются» в тот момент, когда значение невязки e выхода Y попадает в тот или иной кластер сначала для основной линейной модели, а потом и для двухуровневой модели (2).

Линейные добавочные модели третьего уровня представлены ниже.

$ji(x)$	$F_{ji}^3(x)$
11	$F_{11}^3(x) = 0,0098 + 0,0341x_1 - 0,0382x_2$
21	$F_{21}^3(x) = -0,1494 + 0,0008x_1 + 0,0513x_2$
12	$F_{12}^3(x) = 0,0315 - 0,0214x_1 + 0,0095x_2$
22	$F_{22}^3(x) = 0,0433 - 0,0055x_1 - 0,0039x_2$
13	$F_{13}^3(x) = 0,1011 + 0,0073x_1 - 0,0438x_2$
23	$F_{23}^3(x) = -0,3077 + 0,0606x_1 + 0,0311x_2$

Сумма квадратов остатков данной квазилинейной трехуровневой модели (3) относительно исходных выходов Y равна $\sum e^2 = 0,042$, что существенно лучше, чем было у линейной модели первого уровня (1), и квазилинейной двухуровневой модели (2).

Уменьшение суммы квадратов ошибки при переходе от линейной модели к двухуровневой квазилинейной и затем к трехуровневой квазилинейной, показано на рис. 5.

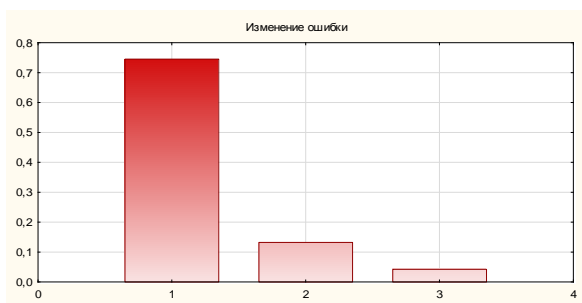


Рис. 5. Изменение суммы квадрата остатков $\sum e^2$ для последовательных моделей

Анализ остатков линейной модели и квазилинейных моделей второго и третьего уровней

В качестве оценки качества построенной модели, исследуем остатки (невязки) всех трех моделей (обычной линейной, квазилинейной двухуровневой и квазилинейной трехуровневой).

Для этого можно, в частности, использовать автокорреляционную функцию (АКФ), показывающую зависимость ряда данных и ее сдвинутой копией от величины временного сдвига (лага). График изменения АКФ в зависимости от лага τ называется коррелограммой. Коррелограммы исследуемого выхода (глиноземного модуля клинкера $p_{кл}$) и остатков от исходной линейной модели ($\tau = 1 \dots 15$) представлены на рис. 6. Штриховая линия на рис. 6 и 7 показывает критический уровень (уровень ошибки) распределения Стьюдента, рассчитываемый для данного ряда и лага τ , в соответствии с которым можно судить об уровне значимости автокорреляций для сдвига τ .

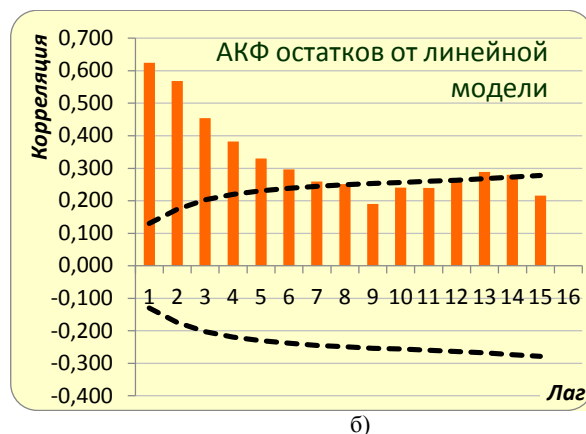
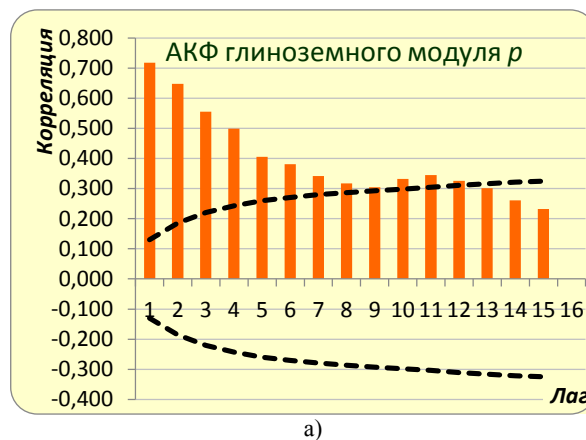


Рис. 6. Автокорреляционные функции выхода (а) и остатков от линейной модели (б)

Коррелограммы остатков квазилинейной модели второго уровня (с 3 кластерами) и остатков от квазилинейной модели третьего уровня (с 6 кластерами) ($\tau = 1 \dots 15$) представлены на рис. 7.

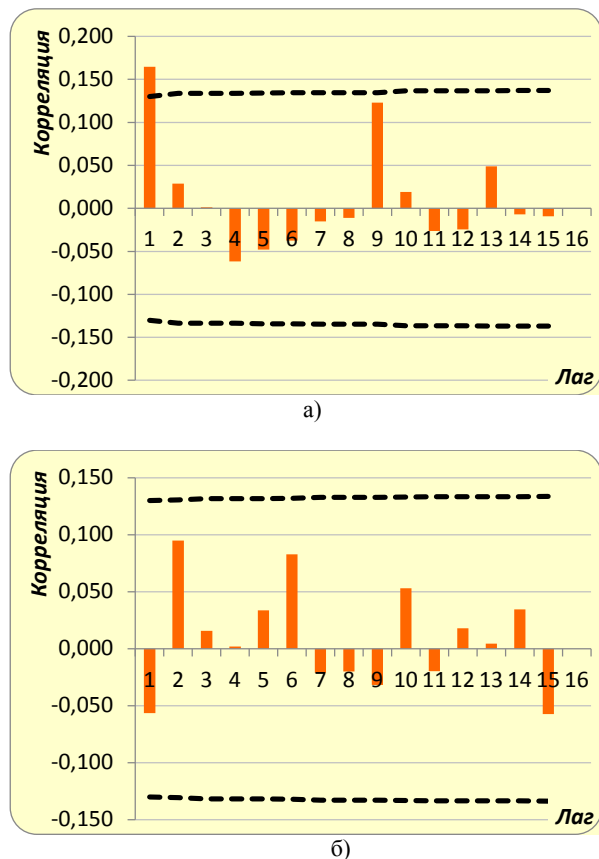


Рис. 7. Автокорреляционные функции остатков от квазилинейной модели второго уровня (а) и третьего уровня (б)

На данных коррелограммах видно, что квазилинейные модели имеют остатки, АКФ для которых мало отличима от АКФ для равномерного случайного распределения («белого шума»), т.е. не содержат тенденций и сезонных скачков ни для одного лага τ . При этом для остатков модели третьего уровня амплитуды автокорреляции в среднем меньше, чем для остатков модели второго уровня (заметим, что масштабы на вертикальных осях рисунков разные).

Поступила 05.04.2023; принята к публикации 16.06.2023

Информация об авторах

Щербаков Артем Петрович – старший преподаватель кафедры высшей математики, Липецкий государственный технический университет (398055, Россия, г. Липецк, ул. Московская, д. 30), e-mail: bdragon9@mail.ru

Заключение

Проведенное в работе исследование на конкретном примере (моделирование зависимости свойств клинкера от химического состава сырьевой муки) и конкретных данных подтвердило высказанное в статье [3] предположение о возможности и эффективности применения иерархической квазилинейной модели типа Лебега для описания сильно нелинейных зависимостей.

Литература

1. Голованова Л.В. Общая технология цемента: Учебник для средних проф.-техн. училищ. М.: Стройиздат, 1984. 118 с., ил.
2. Тейлор Х. Химия цемента. Пер. с англ. М.: Мир, 1996. 560 с.
3. Мишачев Н.М., Шмырин А.М., Щербаков А.П. Две схемы иерархической идентификации квазилинейных моделей // Вестник Воронежского государственного технического университета. Т. 19. № 1. 2023. С. 7-13.
4. Щербаков А.П. Генерирование тестовых данных для регрессионной идентификации квазилинейных иерархических моделей // Вестник Липецкого государственного технического университета. 2022. № 3(49) С. 41-47.
5. Канюгина А.С. О задаче управления температурным режимом стадии диффузии производства сахара // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2019. Т. 15. № 2. С. 51-63.
6. Семина В.В. Идентификация слабосвязанных окрестностных систем // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2019. Т.15. № 2. С. 69-76.
7. Takagi T., Sugeno M. Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control // IEEE transactions on systems, man, and cybernetics. 1985. Vol. 15. No. 1. P. 116–132.
8. Подвальный С.Л., Васильев Е.М. Иерархическая идентификация параметров нелинейных динамических систем // Сборник трудов XIII Всероссийского совещания по проблемам управления ВСПУ-2019. М.: Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН. 2019. С. 517-521.
9. Олдендерфер М.С., Блэшфилд Р.К. Факторный, дискриминантный и кластерный анализ / пер. с англ.; под ред. И.С. Енюкова. М.: Финансы и статистика, 1989. 215 с.

THREE-LEVEL HIERARCHICAL REGRESSION MODEL OF CLINKER PRODUCTION PROCESS

A.P. Shcherbakov

Lipetsk State Technical University, Lipetsk, Russia

Abstract: the paper considers the problem of constructing and evaluating the adequacy of a two-level and three-level hierarchical regression quasi-linear model for predicting clinker quality. Clinker in cement production is obtained by firing raw flour. The quality of clinker depends on the chemical and mineralogical composition of the raw flour. The main quality indicators are modular characteristics – silicate module, alumina module and saturation coefficient. Quality indicators are calculated on the basis of chemical analysis before and after firing, that is, for the initial raw flour and for clinker. Based on the available experimental data, it can be concluded that the relationship between the indicators before and after firing is highly nonlinear. In this paper, the nonlinear dependence of the clinker alumina module on the chemical composition of raw flour is described using a hierarchical quasi-linear Lebesgue model. In general, such hierarchical models were defined earlier in the work of the author and co-authors. The scheme of their construction has some similarity with the scheme of constructing the Lebesgue integral, when instead of splitting the domain of definition of a function (as in the Riemann integral), the partition of the domain of values of this function is considered. The adequacy of the constructed model of the dependence of clinker properties on the chemical composition of raw flour is confirmed by a significant reduction in the total error and the approximation of the autocorrelation function of the model residues to the white noise level

Key words: quasi-linear models, residual data, clustering, hierarchical partitioning, Lebesgue scheme

References

1. Golovanova L.V. “General cement technology” (“Obshchaya tekhnologiya tsementa”), Moscow, Stroyizdat, 1984, 118 p.
2. Taylor H. “Chemistry of cement” (“Khimiya tsementa”), Moscow Mir, 1996, 560 p.
3. Mishachev N.M., Shmyrin A.M., Shcherbakov A.P. “Two schemes of hierarchical identification of quasi-linear models”, *The Bulletin of the Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, vol. 19, no 1, 2023, pp. 7-13.
4. Shcherbakov A.P. “Generating test data for regression identification of quasi-linear hierarchical models”, *The Bulletin of Lipetsk State Technical University (Vestnik Lipetskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2022, no 3(49), pp. 41-47.
5. Kanyugina A.S. “On the task of controlling the temperature regime of the diffusion stage of sugar production”, *The Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2019, vol.15, no. 2, pp. 51-63.
6. Semina V.V. “Identification of loosely coupled neighborhood systems”, *The Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2019, Vol, 15, no. 2, pp. 69-76.
7. Takagi T., Sugeno M. “Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control”, *IEEE transactions on systems, man, and cybernetics*, 1985, vol. 15, no. 1, pp. 116-132.
8. Podvalny S.L., Vasiliev E.M. “Hierarchical identification of parameters of nonlinear dynamic systems”, *Proceedings of the XIII All-Russian Meeting on Management problems of VSPU-2019*, Moscow, V.A. Trapeznikov Institute of Management Problems of the Russian Academy of Sciences, 2019, pp. 517-521.
9. Oldenderfer M.S., Blashfield R.K. “Factorial, discriminant and cluster analysis”, trans. from Eng., ed. by I.S. Enyukov, Moscow, Finansy i statistika, 1989, 215 p.

Submitted 05.04.2023; revised 16.06.2023

Information about the authors

Artem P. Shcherbakov, Associate Professor, Department of Higher Mathematics, Lipetsk State Technical University (30 Moskovskaya str., 398055 Lipetsk, Russia), e-mail: 6dragon9@mail.ru

БЕСКОНТАКТНОЕ ДИАГНОСТИРОВАНИЕ РАБОТАЮЩЕГО АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

В.Л. Мурзинов, Ю.В. Мурзинов, П.В. Мурзинов, Д.В. Кочерженко

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

Аннотация: рассмотрены вопросы использования для работающего автоматизированного оборудования неразрушающего метода контроля его технического состояния. Показана возможность использования акустического метода для диагностирования автоматизированных промышленных объектов. Одна из решаемых задач – получение информации о наличии дефектных участков в конструкции работающего оборудования. Особенность акустического метода заключается в том, что он, используя акустический датчик, который воспринимает очень тихие звуки, получает качественную информацию о наличии дефектов в техническом состоянии промышленного оборудования. В акустическом датчике происходит механическое уплотнение звукового потока. Механический датчик является первичным преобразователем в системе контроля. Механическое уплотнение звукового потока основывается на использовании параболических отражателей. Звуковой поток от работающего оборудования является акустическим сигналом, содержащим информацию о техническом состоянии этого оборудования. Этот сигнал поступает на вибродатчик, который преобразует акустический сигнал в электрический сигнал и подает его в анализатор. Анализатор направляет полученную информацию в программный комплекс «Бесконтактная диагностика технологического оборудования». Программный комплекс содержит нейросетевой процессор обработки звукового сигнала и автоматизированную рабочую станцию. Полученная информация о наличии отклонения от нормального режима работы автоматизированного оборудования содержит данные локального расположения дефектного участка и отмечает степень дефекта. Показана эффективность использования параболических отражающих поверхностей в конструкции акустического датчика для получения качественной информации о техническом состоянии автоматизированного промышленного оборудования

Ключевые слова: автоматизированное оборудование, диагностика, акустический датчик, аускультация

Введение

В настоящее время различные отрасли промышленности насыщены большим количеством автоматизированного оборудования. Например, на технологических участках атомных станций в условиях повышенной опасности функционирует большое количество технологического оборудования – это насосы, электродвигатели, теплообменники, исполнительные механизмы и т.д.

Все эти технические устройства в процессе работы подвергаются нормальным механическим нагрузкам. Узлы этих технических устройств работают в нормальном режиме. Но если происходит, по каким-либо причинам, увеличение нагрузки, тогда возникает процесс изнашивания этих конструктивных элементов. Это может привести к разрушению и созданию аварийной ситуации. Исключить аварийную ситуацию можно, если использовать оперативное диагностирование (мониторинг) технического состояния работающего оборудования. В настоящее время для диагностирования используют такие методы, как останов оборудо-

вания и разбор его элементов и конструкций. Иногда на действующее оборудование устанавливают дополнительные элементы (датчики) для контроля входных и выходных параметров. Недостатками этих методов являются временные затраты и дополнительные расходы. Среди методов мониторинга наиболее эффективным является акустический метод или метод бесконтактного диагностирования работающего оборудования.

Акустические методы не разрушающего контроля в технических устройствах

В настоящее время акустические методы широко используются в промышленности благодаря универсальности и компактности оперативного оборудования. Например, в Республике Беларусь акустические методы используются для диагностирования автомобильных бензиновых двигателей [1]. В качестве датчиков акустического сигнала используется микрофон, располагающийся на расстоянии одного метра от двигателя. Кроме того, совместно с микрофоном применяется датчик электромагнитной индукции. Их совместная работа позволяет устанавливать сбои и ошибки в работе двигателя.

Акустические методы диагностики находят применение для контроля эксплуатационных характеристик силовых трансформаторных подстанций [2]. В процессе диагностирования силовые трансформаторные подстанции сохраняют подачу силового напряжения, при этом определяется в них наличие дефекта или ошибки.

Существует метод неразрушающего акустического контроля деталей и узлов оборудования по определению наличия внутренних микротрещин [3]. В этом методе используется преобразователь, определяющий скорость акустической волны, которая зависит от числа циклов нагружения деталей и узлов.

Использование ультразвука в акустической диагностике позволяет получать положительные результаты в режиме неразрушающего контроля [4]. Этот метод называют ультразвуковая дефектоскопия. В ультразвуковой дефектоскопии основным преобразователем является пьезокерамика, которая позволяет выявлять дефекты в твердых материалах.

Обоснование использования метода аускультации для технических устройств

Акустический метод диагностирования был применен во врачебной практике и получил название аускультация [5]. Приборы аускультации позволяли услышать очень тихие звуки, исходящие от органов человека. По этим звукам определялось состояние отдельных органов человека [6]. Выдавалось заключение о наличии отклонения от нормы функционирования органов или давали заключение о нормальной работе органов человека. Эффективность устройств аускультации в значительной степени зависит от способности уплотнять звуковой поток, исходящий от объекта исследования.

Авторами был разработан уплотнитель звукового потока для устройства аускультации [7]. Особенностью этого устройства является создание уплотненного звукового потока, несущего информацию об очень тихих звуках. Получаемая звуковая картинка является качественной, благодаря тому, что в уплотнителе звукового потока отсутствуют области сингулярности, т.е. звуковой поток не проходит через точку в пространстве в процессе отражения.

Было предложено использовать устройство аускультации для использования акустического метода бесконтактного диагностирования работающего оборудования [8].

Звуковой поток в акустическом датчике подвергается отражению от параболических жестких элементов и уплотняется. При этом отраженный звуковой поток сохраняет структуру потока, исходящего от работающего оборудования. В акустическом датчике, в уплотненном звуковом потоке тихие звуки становятся громче, увеличивается их интенсивность, и для системы мониторинга они становятся заметны [6].

Общий вид акустического датчика показан на рис. 1.

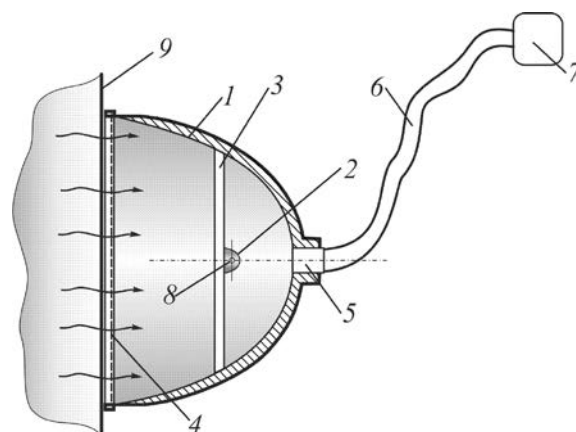


Рис. 1. Акустический датчик. Основные элементы: 1 – параболический отражатель; 2 – уменьшенный параболический отражатель; 3 – опора; 4 – защитная перегородка; 5 – центральное отверстие; 6 – звуковод; 7 – виброакустический датчик; 8 – место фокуса параболических отражателей; 9 – объект исследования

На рис. 1 показан акустический датчик, установленный на поверхности работающего оборудования. Основными элементами конструкции акустического датчика является параболический отражатель 1, уменьшенный параболический отражатель 2, защитная перегородка 4, звуковод 6 и виброакустический датчик 7. На рис. 1 схематично изображены звуковые потоки, исходящие от конструктивных элементов работающего технологического оборудования.

Применение этого метода для контроля технического состояния действующего технологического оборудования позволяет исключить аварийные ситуации и, соответственно, уменьшить энергозатраты [9].

Электронная схема бесконтактного диагностирования показана на рис. 2. Функционирование этой схемы происходит следующим образом. Звуковой поток работающего оборудования воспринимается акустическим датчиком 1, который передает сигнал на виброаку-

стический датчик 2 и анализатор 3, который связан с программным комплексом 4, встроенным в систему управления. Сигнал от акустического датчика содержит характерные признаки наличия возникающих дефектов в работе оборудования.

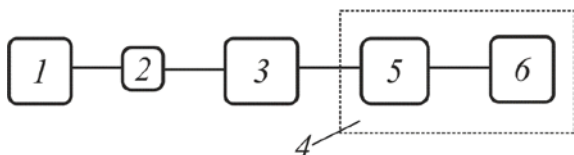


Рис. 2. Принципиальная электронная схема бесконтактного диагностирования работающего оборудования:

- 1 – акустический датчик; 2 – виброакустический датчик (ICP (IEPE), DeltaTron, ISOTRON); 3 – анализатор звукового потока (A19-U2); 4 – программный комплекс «Бесконтактная диагностика технологического оборудования»; 5 – нейросетевой процессор обработки звукового сигнала; 6 – автоматизированная рабочая станция

Схема бесконтактного мониторинга происходит в следующей последовательности. Звуковые потоки от работающего оборудования воспринимаются акустическим датчиком 1, в котором звуковой поток уплотняется и далее попадает на виброакустический датчик 2, который преобразует акустический сигнал в электрический сигнал. В качестве виброакустического датчика используются конструкции: ICP (IEPE), DeltaTron, ISOTRON. С виброакустического датчика 2 электрический сигнал подается на анализатор 3 – A19-U2, который используется для вибрационных и акустических измерений, непрерывного мониторинга, диагностики состояния механизмов и работающего оборудования. Полученный спектр от анализатора 3 подается в программный комплекс 4 «Бесконтактная диагностика технологического оборудования», где нейросетевой процессор 5 обрабатывает полученный сигнал и передает результат на автоматизированную рабочую станцию 6.

Результат сортировки представляется в устройстве цифрового изображения и воспринимается системой управления.

Механизм уплотнения звукового потока

В устройстве акустического датчика уплотнение звукового потока происходит следующим образом.

Звуковой поток от работающего оборудования попадает на параболический отражатель 1 (рис. 1). При этом считается, что звуко-

вой поток, проходящий через защитную перегородку 4, становится плоскопараллельным. Дальнейшее поведение этого потока происходит в соответствии с лучевой теорией. Отраженный поток от параболической поверхности 1 устремляется в фокус 8. Но достичь фокуса 8 не может, так как попадает на поверхность уменьшенного параболического отражателя 2, отражаясь от которого попадает в центральное отверстие 5 и далее в звуковод 6. Полученный звуковой поток значительно плотнее исходного звукового потока. Из звуковода 6 уплотненный звуковой поток попадает на виброакустический датчик 7. Информационная структура уплотненного звукового потока соответствует структуре исходного потока. Поэтому виброакустический датчик 7 получит качественную информацию о наличии возможных дефектов в конструкции работающего оборудования.

Описание поведения звукового потока и его уплотнение на основе лучевой теории представлен на рис. 3.

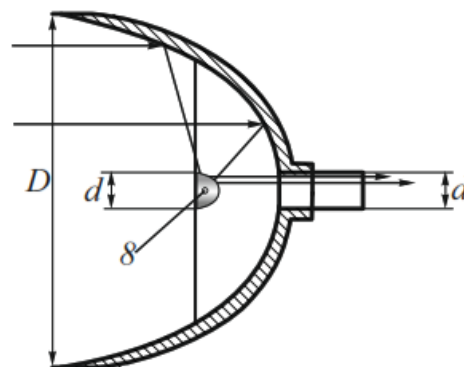


Рис. 3. Акустический датчик. Конструктивные элементы, обеспечивающие уплотнение звукового потока:

- D – диаметр входного сечения для звукового потока;
 d – диаметр выходного сечения звукового потока и диаметр уменьшенного параболического отражателя;
 8 – место фокуса параболических отражателей

На основе понятия энергетической плотности звукового потока и учёта отношение диаметра D входного сечения к диаметру d выходного сечения, получим формулу для определения степени увеличения громкости звукового потока

$$\Delta L = 10 \cdot \lg \left(\frac{D^2}{d^2} - 1 \right).$$

Формула определяет повышение интенсивности звукового давления в уплотненном потоке для различных соотношений диаметров входного и выходного сечений.

Увеличение интенсивности звукового давления в уплотненном потоке в акустическом датчике

D/d	$\Delta L, dB(A)$	D/d	$\Delta L, dB(A)$
4	11,8	10	19,9
5	13,8	12	21,5
8	18,0	15	23,5

Из таблицы видно, что даже при достаточно малом соотношении $\frac{D}{d}$ получается заметное увеличение уровня интенсивности звукового давления в потоке. Поэтому, применив в устройстве уплотнителя звукового потока соотношение диаметров $\frac{D}{d}=15$, получают чувствительную систему для выявления дефектов в техническом состоянии работающего оборудования.

Высокая степень уплотнения звукового потока позволяет выявлять очень слабые звуки, характеризующие наличие возможного появления дефекта или отклонения от нормального режима работы действующего оборудования.

Заключение

1. Для работающего автоматизированного промышленного оборудования применен акустический метод бесконтактного диагностирования, в основе которого лежит метод аускультации, заимствованный из медицинской практики.

2. Показан механизм работы акустического датчика и уплотнителя звукового потока.

3. Составлена электронная схема с указанием возможных приборов и процессоров для получения результатов мониторинга о скрытом дефекте для своевременного предотвращения аварийной ситуации.

Литература

1. Уваров Г.А. Совершенствование акустического метода диагностирования автомобильных бензиновых двигателей // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В. Промышленность. Прикладные науки. 2014. № 3. С. 95-98.
2. Еркебаев А.Ж. Контроль технического состояния силовых трансформаторов методом акустического диагностирования // Мир транспорта. 2022. Т. 20. № 1 (98). С. 13-22.
3. Пискарев В.Д. Неразрушающий контроль остаточного ресурса металлических деталей и узлов для объектов машиностроения // Технология легких сплавов. 2011. № 1. С. 81-85.
4. Коновалов С.И., Кузьменко А.Г. Влияние демпфера и контактного слоя на длительность акустического импульса, излучаемого в твердую среду // Дефектоскопия. 2004. № 5. С. 3-8.
5. Авторское свидетельство 1202553 РФ. Устройство для аускультации / Еременко С.В., Зинкович И.И., Шляхвер В.Е. Опубл. 07.01.1986. Бюл. № 1.
6. Мурзинов В.Л., Мурзинов П.В., Мурзинов Ю.В. Механический усилитель звукового потока для диагностирования методами аускультации // Безопасность труда в промышленности. 2021. № 8. С. 15-19.
7. Патент 192449 РФ. 17.09.2019. Устройство уплотнителя звукового потока для аускультации / Мурзинов В.Л., Мурзинов П.В., Мурзинов Ю.В. и др. Бюл. № 26.
8. Intensifying the sonic flow in the auscultation device / V.L. Murzinov, P.V. Murzinov, Yu.V. Murzinov, S.A. Popov. Akustika. 2021. Т. 39. С. 246.
9. Система бесконтактного диагностирования технических устройств для энергосбережения / В.Л. Мурзинов, П.В. Мурзинов, Ю.В. Мурзинов, С.В. Попов // Энергоэффективность и энергосбережение в современном производстве и обществе: материалы междунар. науч.-практ. конф. Воронеж, 2022. С. 410-415.

Поступила 19.03.2023; принята к публикации 13.06.2023

Информация об авторах

Мурзинов Валерий Леонидович – д-р техн. наук, доцент, профессор кафедры электропривода, автоматики и управления в технических системах, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: dr.murzinov@yandex.ru, тел. (951) 547-51-36

Мурзинов Юрий Валерьевич – канд. техн. наук, доцент кафедры электропривода, автоматики и управления в технических системах, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: kampf87@yandex.ru, тел. (951) 561-19-94

Мурзинов Павел Валерьевич – канд. техн. наук, доцент кафедры электропривода, автоматики и управления в технических системах, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: ashton.pasha@yandex.ru, тел. (951) 561-90-26

Кочерженко Денис Викторович – аспирант кафедры электропривода, автоматики и управления в технических системах, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: kocherzhenko.den@mail.ru, тел. (951) 561-85-08

CONTACTLESS DIAGNOSTICS OF WORKING AUTOMATED PROCESS EQUIPMENT

V.L. Murzinov, Yu.V. Murzinov, P.V. Murzinov, D.V. Kocherzhenko

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract: the issues of using a non-destructive method of monitoring its technical condition for working automated equipment are considered. The possibility of using the acoustic method for diagnosing automated industrial facilities is shown. One of the tasks to be solved is to obtain information about the presence of defective areas in the structure, working equipment. The peculiarity of the acoustic method is that, using an acoustic sensor that perceives very quiet sounds, it receives high-quality information about the presence of defects in the technical condition of industrial equipment. A mechanical sealing of the sound stream occurs in the Acoustic sensor. The mechanical sensor is the primary converter in the control system. Mechanical sealing of the sound stream is based on the use of parabolic reflectors. The sound stream from the operating equipment is an acoustic signal containing information about the technical condition of this equipment. This signal is sent to the vibration sensor, which converts the acoustic signal into an electrical signal, and feeds it to the analyzer. The analyzer sends the received information to the software package "Contactless diagnostics of technological equipment". The software package contains a neural network processor for processing an audio signal and an automated workstation. The received information on the presence of a deviation from the normal operation of automated equipment contains data on the local location of the defective area and notes the degree of the defect. The efficiency of using parabolic reflecting surfaces in the design of an acoustic sensor to obtain high-quality information about the technical condition of automated industrial equipment is shown

Key words: automated equipment, diagnostics, acoustic sensor, auscultation

References

1. Uvarov G.A. "Improvement of the acoustic method for diagnosing automobile gasoline engines", *The Bulletin of Polotsk State University. Series C. Industry Applied Science (Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya V. Promyshlennost'. Prikladnyye nauki)*, 2014, no. 3, pp. 95-98.
2. Erkebaev A.Zh. "Control of the technical condition of power transformers by acoustic diagnostics", *World of Transport (Mir transporta)*, 2022, vol. 20, no. 1 (98), pp. 13-22.
3. Piskarev V.D. "Non-destructive testing of the residual life of metal parts and assemblies for machine-building objects", *Technology of light alloys (Tekhnologiya legkikh splavov)*, 2011, no. 1, pp. 81-85.
4. Kononov S.I., Kuzmenko A.G. "Influence of a damper and a contact layer on the duration of an acoustic pulse emitted into a solid medium", *Defectoscopy (Defektoskopiya)*, 2004, no. 5, pp. 3-8.
5. Eremenko S.V., Zinkovich I.I., Shlyahover V.E. "Device for auscultation" ("Ustroystvo dlya auskul'tatsii"), Author's certificate of RF no1202553, publ. 01.07.1986, bull. no. 1.
6. Murzinov V.L., Murzinov P.V., Murzinov Yu.V. "Mechanical amplifier of sound flow for diagnosing by auscultation methods", *Safety of labor in industry (Bezopasnost' truda v promyshlennosti)*, 2021, no. 8, pp. 15-19.
7. Murzinov V.L., Murzinov P.V., Murzinov Yu.V. et al. "Device for sealing the sound stream for auscultation" ("Ustroystvo uplotnitelya zvu-kovogo potoka dlya auskul'tatsii"), patent of RF no 192449, publ. 09.17.2019, bull. no. 26.
8. Murzinov V.L., Murzinov P.V., Murzinov Yu.V., Popov S.A. "Intensifying the sonic flow in the auscultation device", *Akustika*, 2021, vol. 39, p. 246.
9. Murzinov V.L., Murzinov P.V., Murzinov Yu.V., Popov S.V. "System for non-contact diagnostics of technical devices for energy saving", *Energy Efficiency and Energy Saving in Modern Production and Society (Energoeffektivnost' i energosberezheniye v sovremennom proizvodstve i obshchestve)*: Proceedings of the Intern. scientific-practical. conf., Voronezh, 2022, pp. 410-415.

Submitted 19.03.2023; revised 13.06.2023

Information about the authors

Valery L. Murzinov, Doct. Sc. (Technical), Associate Professor, Professor of the Department of Electric Drive, Automation and Control in Technical Systems, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: dr.murzinov@yandex.ru, tel.: +7(951)547-51-36

Yuri V. Murzinov, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Department of Electric Drive, Automation and Control in Technical Systems, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: kampf87@yandex.ru, tel.: +7(951) 561-19-94

Pavel V. Murzinov, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Department of Electric Drive, Automation and Control in Technical Systems, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: ash-ton.pasha@yandex.ru, tel.: (951) 561-90-26

Denis V. Kocherzhenko, Postgraduate student, Department of Electric Drive, Automation and Control in Technical Systems, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: kocherzhenko.den@mail.ru, tel.: +7(951) 561-85-08

СТРУКТУРА СИСТЕМЫ УДАЛЕННОГО МОНИТОРИНГА МИКРОКЛИМАТА НА БАЗЕ ЯЧЕЙСТОЙ ТОПОЛОГИИ

К.Ю. Филатов, В.В. Воробьев, Д.С. Булчевский, В.Ф. Барабанов, Н.И. Гребенникова

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

Аннотация: учитывая, что выбор оптимальной архитектуры беспроводной сети и ее параметров является сложной задачей, в данной статье рассматривается один из методов построения архитектуры ячеистой топологии, который предусматривает подключение к интернету устройств для обмена данными между собой и с другими системами, используя безопасные протоколы сетевой связи. Задача является актуальной, поскольку ее решение создает новые возможности для сбора и обработки данных, управления и автоматизации процессов, а также повышения удобства и комфорта жизни людей. Рассмотрено использование технологии беспроводных сетей. Проведено исследование с целью сравнения «классической» работы с датчиками в LAN и работы с использованием технологии MESH. Было создано приложение, работающее с мобильной группой узлов для отправки данных на агрегирующий их сервер, к которому будет подключаться нативное Android-приложение. В итоге проведенных исследований сделан вывод, что выбор между стандартным подключением датчиков к сети Wi-Fi и ячеистой топологией с использованием Mesh Wi-Fi зависит от конкретных потребностей и ограничений. Сравнение технологий беспроводных сетей проводилось по результатам работы приложения по мониторингу погодных условий. Данный проект позволит обеспечить бесперебойную работу приложения, позволяющего на базе сети Wi-Fi организовать систему мониторинга микроклимата заданных зон

Ключевые слова: Java, Kotlin, ячеистая топология, Wi-Fi mesh network, Mobile App, ESP, Raspberry Pi, IoT

Введение

За последние годы глобальный интернет-трафик значительно вырос, так, в 2002 году глобальный интернет-трафик составил 100 гигабайт в секунду. В 2017 году интернет-трафик достиг показателя более 45 000 ГБ в секунду, а сейчас по данным Cisco Visual Networking Index мировой трафик вырос еще более значительно и трафик достиг 294 экзабайта в месяц.

Количество подключений интернет-трафика также растет из года в год (на рис. 1 приведена статистика по увеличению объема трафика с 2017 года по 2022), и сейчас сложно представить полноценную, интегрированную общественную жизнь без подключения к сети интернет.

Использование ячеистой топологии (Wi-Fi MESH)

Все большая часть людей, напрямую или косвенно, сталкивалась с интернетом вещей, доля трафика которого растет из года в год, и согласно отчету Cisco VNI 2017-2022 составляет 51 процент от общего количества [1].

Интернет вещей (Internet of Things, IoT) - это сеть подключенных к интернету устройств, которые могут обмениваться данными между

собой и с другими системами, используя безопасные протоколы сетевой связи. Концепция IoT заключается в том, чтобы связать воедино устройства, которые ранее существовали отдельно друг от друга, и обеспечить их связь с помощью общего интернета. Это создает новые возможности для сбора и обработки данных, управления и автоматизации процессов, а также повышения удобства и комфорта жизни людей. Интернет вещей находит применение во многих сферах, включая производство, транспорт, здравоохранение, сельское хозяйство, умный дом, городская инфраструктура и другие. Согласно исследованию MarketsandMarkets [2] за 2022 год, глобальный рынок IoT был оценен в 300,7 миллиарда долларов в 2020 году и прогнозируется, что к 2026 году он достигнет 1,4 триллиона долларов.

Потребители «Интернета вещей» сильно различаются, такими могут быть многие девайсы, начиная от носимых вещей и «умной» техники, например, умных часов и модулей умного дома, который умеет контролировать, например, контролировать и автоматически менять степень освещения и отопления, так и сложной техники на высокотехнологичном предприятии. Некоторые примеры применения интернета вещей в различных сферах жизни приведены на рис. 2.

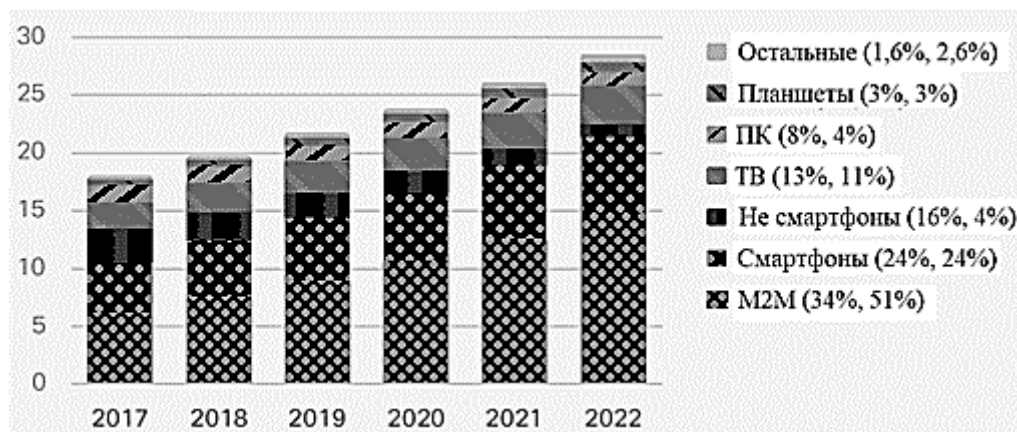


Рис. 1. Статистика увеличения трафика (источник - Cisco Visual Networking Index: Forecast and Trends, 2017-2022)

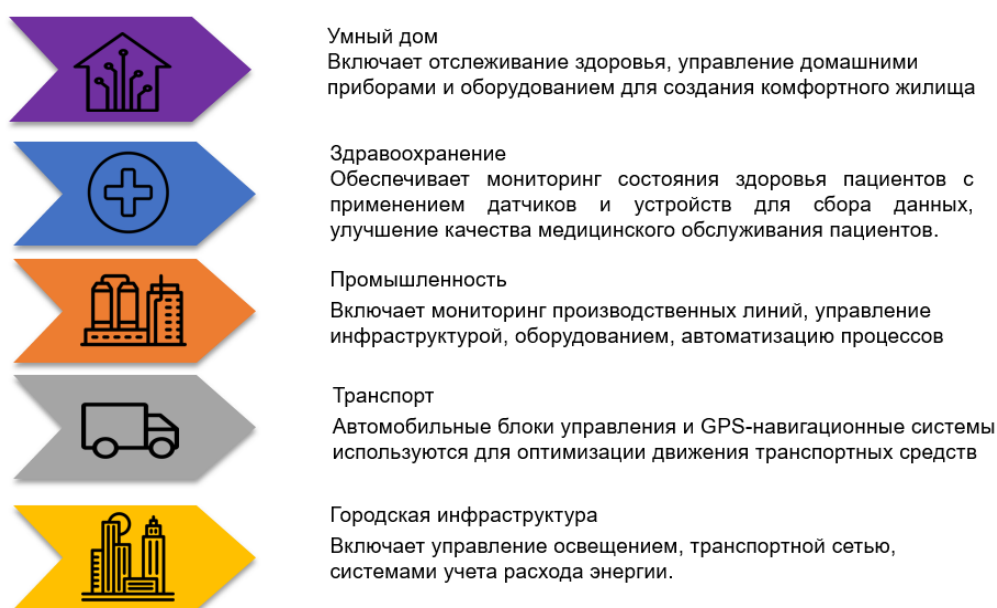


Рис. 2. Использование IoT

Однако, следует учитывать, что IoT также вызывает опасения в плане конфиденциальности данных и безопасности, поэтому в развитии этой технологии важно уделять особое внимание защите информации.

В основе многих современных устройств для M2M (Machine-to-Machine) взаимодействия лежит протокол сетевого взаимодействия Wi-Fi (Wireless Fidelity), но такое взаимодействие не лишено довольно объемного минуса, а именно - ограниченная территория покрытия сигнала роутера.

Задачей данного проекта стало решение этой проблемы. Выбранный подход предполагает проведение сравнительного анализа работы модулей до и после внедрения технологии MESH.

Ячеистая сеть определяется как тип топологии локальной вычислительной сети (LAN), в

которой несколько устройств или узлов подключены неиерархическим образом, так что они могут сосуществовать, взаимодействовать и обеспечивать комплексное покрытие сети на более широкой территории, чем это возможно с помощью одного маршрутизатора. Данная система содержит в своей основе принцип, заключающийся в том, что каждый участник в сети посылает свои собственные сигналы и ретранслирует информацию с других узлов. Каждый узел в ячеистой сети соединен с другим узлом по выделенному каналу связи. Это соединение позволяет передавать информацию от узла к узлу без задержек или сбоев. Ячеистые сети также называются "самонастраивающимися" сетями, поскольку новый узел автоматически становится частью существующей структуры сети.

Существует несколько вариантов архитектуры ячеистой топологии [3]:

1. Полносвязанная ячеистая топология (Full Mesh Topology) - каждый узел в сети подключен напрямую ко всем остальным узлам. Этот тип топологии является наиболее надежным, так как любой узел в сети может быть достигнут через несколько маршрутов. Однако, он требует большого количества соединений и может быть очень затратным, если в сети большое число узлов. Пример использования: вычислительные кластеры. Плюсы: высокая надежность, быстрое время ответа. Минусы: высокие затраты на структурирование сети. Технологии: TCP/IP, Ethernet.

2. Ячеистая топология с ретрансляцией (Mesh Topology with Relays) - в этом типе топологии узлы не обязательно подключены напрямую к другим узлам. Вместо этого маршруты могут проходить через несколько интермедиатов, которые выполняют функцию передачи сообщений. Это позволяет уменьшить количество соединений и сделать сеть более экономичной. Пример использования: системы видеонаблюдения. Плюсы: уменьшенное количество соединений, экономичность. Минусы: возможны проблемы с сохранением исходного сигнала. Технологии: Wi-Fi, LoRaWAN, Zigbee.

3. Ячеистая топология с возможностью изменения маршрута (Mesh Topology with Dynamic Routing) - в этом типе топологии узлы могут изменять маршруты в зависимости от изменения условий сети. Это позволяет более эффективно использовать ресурсы сети и обеспечить более быструю и надежную передачу данных. Пример использования: сети связи. Плюсы: эффективное использование ресурсов, быстрая и надежная передача данных. Минусы: сложная настройка. Технологии: BGP, OSPF.

4. Ячеистая топология с использованием кластеров (Cluster Mesh Topology) - в этом типе топологии узлы группируются в кластеры, каждый из которых имеет собственный головной узел. Головные узлы затем обмениваются данными между кластерами, что позволяет уменьшить количество соединений и сделать сеть более эффективной. Пример использования: системы управления зданием. Плюсы: уменьшенное количество соединений, эффективность. Минусы: дополнительные вычислительные затраты. Технологии: CAN (Controller Area Network), DeviceNet.

В проекте использована архитектура ячеистой топологии с ретрансляцией. Реализация этой архитектуры производится с применением беспроводных технологий. Такой подход может быть реализован с использованием:

- точек доступа;
- мобильных устройств;
- стандарта 802.16.

С использованием точек доступа. В этом типе топологии точки доступа являются узлами сети, которые соединяются между собой в ячеистую сеть. Этот тип топологии часто используется в беспроводных локальных сетях (Wi-Fi), где точки доступа соединяются в ячейки, покрывающие значительную территорию. Пример использования: беспроводные сети коммерческих зданий. Плюсы: простота в установке и настройке, масштабируемость. Минусы: ограниченная дальность передачи и скорость, возможность перегрузки сети. Технологии: Wi-Fi, IEEE 802.11.

С использованием мобильных устройств. В этом типе топологии мобильные устройства (смартфоны, планшеты, ноутбуки и т. д.) являются узлами сети, которые могут соединяться между собой в ячеистую сеть. Это позволяет создать гибкую и подвижную сеть, которая может приспосабливаться к изменяющимся условиям. Пример использования: мобильные безопасные сети. Плюсы: гибкость, мобильность. Минусы: ограничения по мощности и скорости передачи данных, нестабильность связи. Технологии: Bluetooth, Near Field Communication (NFC).

Ячеистая топология, основанная на стандарте 802.16. Этот стандарт, также известный как WiMAX, позволяет создавать широкополосные беспроводные сети на больших расстояниях. В этом типе топологии базовые станции соединяются между собой в ячеистую сеть, которая может покрывать сотни километров. Пример использования: беспроводные интернет-провайдеры. Плюсы: возможность передачи данных на большие расстояния, большая пропускная способность. Минусы: высокая стоимость оборудования, ограниченное количество устройств, поддерживающих стандарт. Технологии: WiMAX, IEEE 802.16.

Реализация архитектуры ячеистой топологии с ретрансляцией произведена с подходом по использованию точек доступа. Технология Mesh Wi-Fi использует несколько протоколов для обеспечения оптимальной связи между узлами (устройствами), которые создают беспроводную сеть. Некоторые из наиболее распространенных протоколов, используемых в Mesh Wi-Fi, представлены на рис. 3. Каждый из этих протоколов играет свою роль в обеспечении эффективного и безопасного функционирования Mesh Wi-Fi сети.



Рис. 3. Некоторые из распространенных протоколов в Mesh Wi-Fi

Популярными протоколами для создания крупных беспроводных сетей являются протоколы CJDNS, B.A.T.M.A.N., DTN, Netukuku и OSP. Это протоколы для создания и управления различными типами сетей, включая мобильные беспроводные сети, децентрализованные сети в Интернете, Mesh-сети и т. д. Эти протоколы также могут использоваться для создания локальных сенсорных сетей, но они предназначены для более широкого спектра приложений. Сравнительный анализ данных протоколов приведен в таблице.

В данном проекте обмен между датчиками производится по сетевому протоколу «ESP-MESH», построенному на основе протокола Wi-Fi. [4]. «ESP-MESH» – это сетевой протокол, построенный на основе протокола Wi-Fi. ESP-MESH позволяет нескольким устройствам (так называемым нодам), распределенным по большой области в пространстве, соединяться в рамках одной WLAN (беспроводной локальной сети).

Протокол ESP-MESH является сетевым протоколом для беспроводных сенсорных сетей. Он работает на устройствах, оснащенных микроконтроллерами ESP32 или ESP8266. В отличие от других протоколов ESP-MESH не используется для создания глобальных сетей, а скорее для создания локальных сенсорных сетей, например, для управления освещением и кондиционированием в зданиях.

Однако, ESP-MESH использует некоторые механизмы, подобные механизмам, используемым в других протоколах. Например, ESP-MESH использует механизм мультиплексирования, который напоминает механизмы мультиплексирования в протоколах B.A.T.M.A.N. и OSPF. Все эти протоколы используются для управления маршрутизацией в сетях и обеспечения надежности связи.

ESP-MESH является самоорганизующейся и самовосстанавливающейся, что означает, что сеть может быть построена и поддерживаться автономно.

Кроме того, ESP-MESH использует механизм шифрования, который напоминает механизм шифрования, используемый в протоколе CJDNS. Это помогает защитить данные, передаваемые в локальной сенсорной сети, от несанкционированного доступа.

В целом, протокол ESP-MESH предназначен для создания локальных сенсорных сетей, которые обладают низкой скоростью и невысокой пропускной способностью. Он использует некоторые механизмы, которые также присутствуют в других протоколах, например, механизмы мультиплексирования и шифрования, но в целом это отдельный протокол, не имеющий широкого применения в области управления сетями, но достаточно просто настраиваемый и обеспечивающий все нужды для развертывания небольшой экосистемы для мониторинга климата.

Структура системы удаленного мониторинга микроклимата

Для сравнения походов работы была придумана концепция экосистемы мониторинга микроклимата и различные метрики для выяснения эффективности работы сети [5].

Задачей проекта является разработка IoT приложения, обрабатывающего показания группы метеорологических датчиков с данными о влажности, температуре и давления в заранее установленной экосистеме и передающего эти данные на сервер для дальнейшего агрегирования данных и выдачи их клиентам [6].

Потребителем данных будет являться Android-приложение.

Сравнение протоколов для построения беспроводной ячеистой топологии

Сравнительный анализ протоколов связи					
Протоколы	CJDNS	B.A.T.M.A.N.	DTN	Netukuku	OSPF
Авто-назначение адреса	Да	Нет	Нет	Да	Нет
Авто-конф. Маршрутизация	Да	Да	Да	Да	Частично
Распределенная маршрутизация	Да	Да	Да	Да	Частично
Объединение сетей	Да	Нет	Нет	Нет	Нет
IPv4/v6	Только IP v6	Да	Да	Нет	Нет
Шифрование трафика	Да	Нет	Нет	Нет	Нет
Авто-настройка	Да	Да	Да	Нет	Да
Разработка	Активная	Завершена	Да	Нет	Завершена
Поддержка UNIX/Linux/OpenWRT	Да	Да	Да	Да	Да
Поддержка Windows	Да	Нет	Нет	Нет	Нет
Поддержка Mac OS	Да	Да	Да	Да	Да
Потребление ресурсов	Да	Да	Да	Нет	Да
Оверлейный режим работы	Да	Нет	Нет	Нет	Нет
Интеграция в ядро Linux	Нет	Да	Нет	Нет	Да

Функциональность поставки данных подразумевает, что приложение может работать с несколькими разновидностями данных:

- работа осуществляется с узлами данных, данные узлы могут быть получены, добавлены и их конфигурация может быть изменена;

- работа может быть организована непосредственно с самими данными, поставляемыми узлами, для соблюдения целостности данных с такими данными можно работать только на чтение.

Вне зависимости от того, какие существуют потребители данных, приложение работает по клиент-серверному принципу. Именно поэтому в структуре выделяют следующие компоненты:

- клиентская часть — отвечает за действия, выполняемые пользователем;

- серверная часть — отвечает за процессы, происходящие на сервере;

- база данных — структура для упорядоченного хранения информации и доступа к ней.

Мобильное приложение представляет из себя один из вариантов клиентской части эко-

системы. Приложение получает и отправляет данные посредством REST API.

Структура приложения представлена на рис. 4. Топология сети представлена на рис. 5.

Взаимодействие с устройствами, соединенными в беспроводную сеть, происходит через радиоволновую связь. Датчики образующие сеть mesh объединяются в одну сеть и через корневой узел подключаются к серверу размещаемому через хостинг у провайдера, что обеспечивает беспрепятственный обмен из любой точки, в которой доступен интернет [7], [8]. У сервиса есть клиенты, Устройства, такие как смартфоны, планшеты, ноутбуки и пр., подключаются к беспроводной сети через сеть.

В качестве основного клиента в данной реализации используется Android-приложение. Интерфейс приложения представлен на рис. 6.

Сравнение созданного приложения производилось с «классическим» подключением модулей к сети Wi-Fi.



Рис. 4. Взаимодействие между компонентами приложения вне локальной сети

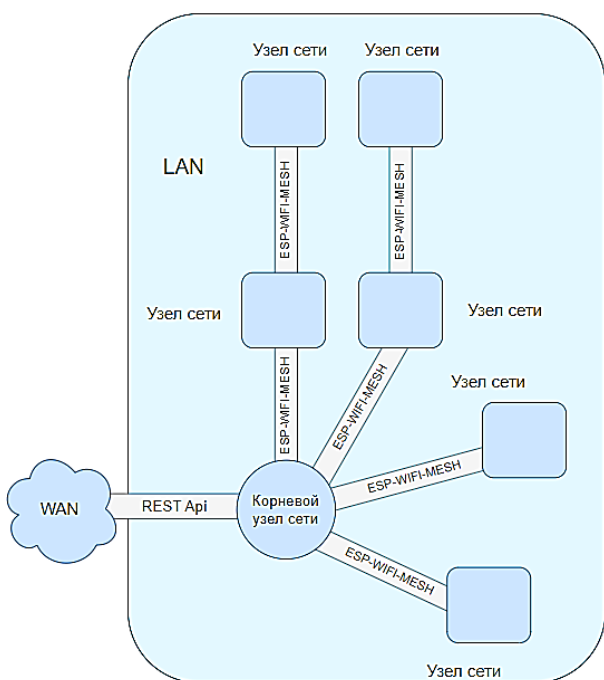


Рис. 5. Топология сети

По результату работы созданных реализаций выяснено, что при использовании ESP-MESH дальность подключения модулей ESP8266 при прямой видимости и отсутствии препятствий составила приблизительно 50 метров, при наличии нескольких бетонных препятствий передача данных прерывалась приблизительно на 13 метрах. Наличие нескольких узлов обеспечивает покрытие зоны в 150 м².

При использовании «классического» подключения через Wi-Fi зона покрытия составит 90 м² с неоднородной зоной покрытия, которая сконцентрирована на пересечении областей узлов.



Рис. 6. Интерфейс Android-приложения

Заключение

На основе проведенного анализа было выявлено, что использование технологии Mesh Wi-Fi позволяет обеспечивать бесперебойное покрытие гораздо большей площади из-за распродоточности узлов, которые менее привязаны к маршрутизатору и за счет ретрансляции возможен охват большего пространства.

Несмотря на то, что Mesh Wi-Fi может обеспечивать бесперебойное покрытие и ряд дополнительных функций, у такого подхода есть некоторые потенциальные недостатки. Одним из основных недостатков ячеистой Wi-Fi является стоимость, такая система может быть дороже традиционных маршрутизаторов, особенно для больших домов или офисов, которым требуется несколько точек доступа. Кроме того, ячеистые сети Wi-Fi более сложны в настройке и управлении, что требует от пользователей настройки нескольких устройств и, возможно, навигации по более сложному пользовательскому интерфейсу.

Поставленные эксперименты показали, что использование технологии ячеистой топологии Mesh Wi-Fi актуально при условиях требования покрытия больших площадей и высоких требований к бесперебойности покрытия сигнала, но при использовании в пределах площадей небольших размеров, разница не столь существенна.

Таким образом, выбор между стандартным подключением датчиков к сети Wi-Fi и ячеистой топологией с использованием Mesh Wi-Fi

зависит от конкретных потребностей и ограничений. Если необходимо обеспечить подключение небольшого количества устройств в небольшой области, то стандартное подключение может быть наиболее подходящим вариантом. Если же требуется обеспечить подключение большого количества устройств в более широкой области, то ячеистая топология с использованием Mesh Wi-Fi может быть более эффективным решением.

Литература

1. Cisco Visual Networking Index: Forecast and Trends, 2017–2022
URL: <https://twiki.cern.ch/twiki/pub/HEPIX/TechwatchNetwork/HtwNetworkDocuments/white-paper-c11-741490.pdf>
2. IoT Market by Component (Hardware, Software Solutions and Services), Organization Size, Focus Area (Smart Manufacturing, Smart Energy and Utilities, and Smart Retail) and Region - Global Forecasts to 2026 URL:

<https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/internet-of-things-market-573.html>

3. Уэнделл О. Официальное руководство Cisco по подготовке к сертификационным экзаменам CCENT/CCNA ICND1 1 00-101, акад. изд.: пер. с англ. М.: ООО "И.Д. Вильямс", 2015. 912 с.
4. Описание технологии ESP-MESH URL: <https://www.espressif.com/en/products/sdks/esp-wifi-mesh/overview>
5. Ушаков Ю. А., Ушакова М.В. Исследование работы беспроводных интернет устройств с различными протоколами ячеистой маршрутизации // Современные информационные технологии и ИТ-образование. 2018. Т. 14. Вып. 3. С. 686-691.
6. Джошуа Б. Java: эффективное программирование, 3-е изд.: пер. с англ. СПб.: ООО "Диалектика", 2019. 464 с.
7. Дэвис К. Шаблоны проектирования для облачной среды: пер. с англ. Д. А. Беликова. М.: ДМК Пресс, 2020. 388 с.
8. Миняев А. А. Метод оценки эффективности системы защиты информации территориально-распределенных информационных систем персональных данных: Дис. ... канд. тех. наук: 05.13.19 / А. А. Миняев. СПб., 2021. 216 с.

Поступила 24.04.2023; принята к публикации 15.06.2023

Информация об авторах

- Филатов Кирилл Юрьевич** – бакалавр, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: fillontino@gmail.com
- Воробьев Владимир Васильевич** – бакалавр, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: worobev2001@gmail.com
- Булучевский Дмитрий Сергеевич** – бакалавр, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: buluchevski@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
- Гребенникова Наталия Ивановна** – канд. техн. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: g-naty@yandex.ru

THE STRUCTURE OF THE MICROCLIMATE REMOTE MONITORING SYSTEM BASED ON CELLULAR TOPOLOGY

K.Yu. Filatov, V.V. Vorobyov, D.S. Buluchevsky, V.F. Barabanov, N.I. Grebennikova

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract: considering that choosing the optimal architecture of a wireless network and its parameters is an extremely difficult task, this article discusses one of the methods for constructing a cellular network architecture, which provides for connecting devices to the Internet to exchange data between themselves and with other systems using secure network communication protocols. The task is relevant because its solution creates new opportunities for data collection and processing, management and automation of processes, as well as improving the convenience and comfort of people's lives. The use of wireless network technology is considered. A study was conducted to compare the "classical" work with sensors in LAN and work using MESH technology. An application was created that works with a mobile group of nodes to send data to an aggregating server, to which a native Android application will connect. As a result of the conducted research, it was concluded that the choice between a standard connection of sensors to a Wi-Fi network and a mesh topology using Mesh Wi-Fi depends on specific needs and limitations. The comparison of wireless network technologies was carried out based on the results of the weather monitoring application. This project will ensure the uninterrupted operation of the application, which allows organizing a microclimate monitoring system based on a Wi-Fi network from specified zones

Key words: Java, Kotlin, Mesh topology, Wi-Fi mesh network, Mobile App, ESP, Raspberry Pi, IoT

References

1. “Cisco Visual Networking Index: Forecast and Trends, 2017–2022”, available at: <https://twiki.cern.ch/twiki/pub/HEPIX/TechwatchNetwork/HtwNetworkDocuments/white-paper-c11-741490.pdf>
2. “IoT Market by Component (Hardware, Software Solutions and Services), Organization Size, Focus Area (Smart Manufacturing, Smart Energy and Utilities, and Smart Retail) and Region - Global Forecasts to 2026”, available at: <https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/internet-of-things-market-573.html>
3. Wendell O. “Cisco's official guide to preparing for certification exams CCENT/CCNA ICND1 1 00-101” (“Ofitsial'noye rukovodstvo Cisco po podgotovke k sertifi-katsionnym ekzamenam CCENT/CCNA ICND1 1 00-101”), trans. from Eng., Moscow, I.D. Williame, 2015, 912 p.
4. “Description of ESP-MESH URL technology”, available at: <https://www.espressif.com/en/products/sdks/esp-wifi-mesh/overview>
5. Ushakov Y.A., Ushakova M.V. “Investigation of the operation of wireless Internet devices with various cellular routing protocols”, *Modern Information Technologies and IT Education (Sovremennyye informatsionnyye tekhnologii i IT-obrazovaniye)*, 2018, vol. 14, no. 3, p. 686-691.
6. Joshua B. “Java: Effective Programming” (“Java: effektivnoye programmirovaniye”), 3rd ed., trans. from Eng., St. Petersburg, Dialectica, 2019, 464 p.
7. Davis K. “Design patterns for the cloud environment” (“Shablony proyektirovaniya dlya oblachnoy sredy”), trans. from Eng., Moscow: DMK Press, 2020, 388 p.
8. Minyaev A.A. “Method of evaluating the effectiveness of the information protection system of geographically distributed personal data information systems” (“Metod otsenki effektivnosti sistemy zashchity informa-tsii territorial'no-raspredeleennykh informatsionnykh sistem personal'nykh dannykh”): Diss. Can. Tech. Sci., St. Petersburg, 2021, 216 p.

Submitted 24.04.2023; revised 15.06.2023

Information about the authors

Kirill Yu. Filatov - Bachelor, Voronezh State Technical University (11 Plekhanovskaya str., Voronezh 394018, Russia), e-mail: fillontino@gmail.com

Vladimir V. Vorobyov - Bachelor, Voronezh State Technical University (11 Plekhanovskaya str., Voronezh 394018, Russia), e-mail: worobev2001@gmail.com

Dmitry S. Buluchevsky - Bachelor, Voronezh State Technical University (11 Plekhanovskaya str., Voronezh 394018, Russia), e-mail: buluchevski@yandex.ru

Vladimir F. Barabanov - Dr. Sc. (Technical), Professor, Voronezh State Technical University (11 Plekhanovskaya str., Voronezh 394018, Russia), e-mail: bvf@list.ru

Nataliya I. Grebennikova - Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (11 Plekhanovskaya str., Voronezh 394018, Russia), e-mail: g-naty@yandex.ru

ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ КОММУНИКАЦИИ БАКТЕРИАЛЬНОЙ ПОПУЛЯЦИИ ПРИ ЭВОЛЮЦИИ ДОЧЕРНИХ КОЛОНИЙ: КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ**И. Шуай, А.Г. Масловская****Амурский государственный университет, г. Благовещенск, Россия**

Аннотация: современный уровень междисциплинарных исследований позволяет рассматривать и формализовать процессы, происходящие в сообществах микроорганизмов. В частности, важнейшим свойством многих бактериальных видов является способность коммуницировать – взаимодействовать между собой и коллективно реагировать на внешние воздействия. В работе представлены результаты конечно-элементного моделирования ключевых характеристик межклеточной коммуникации в процессе эволюции колонии бактерий. Базовая детерминированная математическая модель формализуется в виде начально-граничной задачи для системы полулинейных уравнений реакционно-диффузионного типа. Модель модифицирована за счет введения механизма образования дочерних подвижных колоний в процессе эволюции колонии с общей многофазной динамикой: медленный рост, логарифмический рост, релаксация и деградация. Конечно-элементное решение задачи получено с помощью программного обеспечения COMSOL Multiphysics. Проведена серия вычислительных экспериментов по оценке пространственно-временного изменения концентраций химических соединений, характеризующих кворум для бактерий вида *Pseudomonas putida*. Результаты расчетов показывают, что отделившиеся дочерние колонии не теряют связи с материнской колонией, хотя уровень кворума внутри дочерних колоний значительно выше. Напротив, фермент лактоназа действует локально и вызывает деградацию кворума в концентрированных областях, занимаемых дочерней и родительской колониями

Ключевые слова: сообщество бактерий, эволюция бактериальной колонии, реакционно-диффузионная модель коммуникации бактерий, метод конечных элементов, вычислительные эксперименты

Благодарности: работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, проект № 122082400001-8

Введение

В непрерывных процессах дифференциации и интеграции научного знания к настоящему моменту самостоятельный статус приобрели такие междисциплинарные направления, как математическая биология и *in silico* исследования. В фокусе внимания указанных направлений оказываются процессы, происходящие в сообществах микроорганизмов, в частности, биологическая активность различных бактериальных видов.

Важнейшим свойством многих бактерий, в том числе патогенных групп, является способность коммуницировать – взаимодействовать между собой и коллективно реагировать на внешние воздействия. «Чувство кворума» (quorum sensing) рассматривается многими учеными как один из ключевых механизмов бактериальной коммуникации [1–3]. Чувство кворума реализуется на основе способности бактерий координировать экспрессию генов и физиологическое поведение в зависимости от плотности клеток за счет выработки специальных сигнальных молекул (для многих грамотрицатель-

ных бактерий химической субстанции AHL – N-ацил гомосеринлактонов) [1]. Накопление сигнальных молекул происходит пропорционально количеству бактерий. Когда концентрация сигнальных молекул достигает порога, гомологичные рецепторы связываются с сигнальными молекулами и запускают трансдукцию сигнала, что приводит к фенотипической экспрессии чувства кворума, следствиями чего часто являются разнообразные эффекты: образование биопленок, биолюминесценция, конъюгативный перенос плазмид и развитие факторов вирулентности [2–4].

Другим сателлитным эффектом коммуникации является подавление кворума (quorum quenching), которое относится к ингибированию экспрессии генов путем снижения синтеза AHL, деградации AHL и блокирования взаимодействий AHLs-LuxR. Для бактерий рода *Pseudomonas* характерна выработка фермента лактоназы, ответственного за подавление кворума. С точки зрения системного анализа, лактоназа отвечает за возникновение отрицательной обратной связи в биосистеме. В современной практике известен широкий ряд математических и компьютерных моделей такого сложного и многоаспектного явления как процесс

бактериальной коммуникации [5].

В настоящей работе рассмотрен детерминированный подход к математическому моделированию процесса коммуникации бактерий, предложенный в работе [6]. Модель формализуется в концепции реакционно-диффузионного подхода и описывается начально-граничной задачей для системы полулинейных уравнений реакционно-диффузионного типа, определяющих пространственно-временную динамику концентраций сигнальных молекул AHL и лактоназы.

В серии совместных работ представлено развитие этой концепции на основе разнообразных модификаций модели: учет запаздывания, эффекты памяти, многофазный характер динамики популяции, действие антибиотиков и др. [7–10]. При проведении моделирования важным этапом является позиционирование колоний бактерий, и изменение их положения в процессе эволюции. Экспериментальные наблюдения динамики характеристик чувства кворума у бактерий рода *Pseudomonas* [11] свидетельствуют о росте популяций, преимущественно сопровождающимся отделением дочерних колоний от материнских. Подобные эволюционные изменения будут вносить изменения в пространственно-временную динамику основных химических субстанций, характеризующих кворум. Концепцией настоящего исследования является модификация дифференциальной модели коммуникации бактерий на основе формализации механизма образования дочерних подвижных колоний. Методологическая основа вычислительной реализации модели представлена методом конечных элементов. Вычислительные эксперименты ориентированы на применение платформы COMSOL Multiphysics.

Базовая модель процесса бактериальной коммуникации и ее модификация

Математическая модель чувства кворума бактерий описывает циклический процесс, в который включены: динамика изменения концентраций AHL и лактоназы, диффузия, естественная деградация и генерация этих субстанций [7]. Математическая постановка представлена начально-краевой задачей для системы полулинейных уравнений типа «реакция-диффузия» (для определенности приведен двумерный по пространству случай):

$$\begin{cases} \frac{\partial u}{\partial t} = D_u \Delta u - \gamma_u u - \gamma_{L \rightarrow u} Lu + F_1, \\ \frac{\partial L}{\partial t} = D_L \Delta L - \gamma_L L + F_2, \end{cases}$$

$$0 < x < l, 0 < y < l, 0 < t \leq \bar{t}; \quad (1)$$

$$u(x, y, 0) = 0, \quad L(x, y, 0) = 0,$$

$$0 \leq x \leq l, 0 \leq y \leq l; \quad (2)$$

$$D_u \frac{\partial u}{\partial \mathbf{n}} \Big|_{\Gamma} + g(u|_{\Gamma} - u_b) = 0,$$

$$D_L \frac{\partial L}{\partial \mathbf{n}} \Big|_{\Gamma} + q(L|_{\Gamma} - L_b) = 0, \quad 0 < t \leq \bar{t}; \quad (3)$$

где $u(x, y, t)$ – концентрация AHL, моль/л; $L(x, y, t)$ – концентрация фермента лактоназы, моль/л; Γ – граница области решения $[0, l] \times [0, l]$; l – линейный размер области, мкм; \bar{t} – время наблюдения процесс, час; $D_u, D_L, \gamma_u, \gamma_L, \gamma_{L \rightarrow u}, g, q, u_b, L_b$ являются положительными параметрами, ответственными за процессы диффузии и деградации веществ.

Система (1) включает функции F_1 и F_2 , которые определяют плотность биомассы и положение каждой бактериальной колонии в расчетной области. В базовой математической модели [6–7] бактериальной коммуникации эти члены задаются с помощью функции Хилла и нормального распределения бактериальной плотности.

В принципе, в популяционной динамике бактерий наблюдают четыре фазы эволюции: лаг-фаза (бактерии адаптируются к среде и физическим условиям), логарифмическая фаза (более быстрый рост), стационарная фаза (количество новых клеток равно количеству мертвых клеток) и фаза смерти (гибель клеток происходит быстрее, чем восстановление популяции). Более того, поскольку условия, которые поддерживают постоянный рост бактерий, редко встречаются в природе, многие виды бактерий переходят в динамическое непролиферативное состояние или длительную стационарную фазу [12].

В общем случае генерационные слагаемые могут быть заданы в виде:

$$F_j = N(t) f_j(u) \sum_{i=1}^N \exp\left(-\frac{(x-A_i)^2 + (y-B_i)^2}{\sigma}\right),$$

$$j=1,2; \quad (4)$$

$$f_1(u) = \alpha_u + \beta_u \frac{u^n}{u_{th}^n + u^n},$$

$$f_2(u) = \beta_L \frac{u^n}{(u_{th} + \varepsilon)^n + u^n}; \quad (5)$$

$$N(t) = \begin{cases} [1 + \exp(-\mu(t-b_1))]^{-1}, & t \leq t_N, \\ a + b[1 + \exp(-\mu(t-b_2))]^{-1}, & t > t_N, \end{cases} \quad (6)$$

где α_u , β_u , β_L , u_{th} , ε , σ , n являются положительными параметрами модели, описанными ниже; $N(t)$ – нормализованная функция бактериальной плотности; a , b – безразмерные параметры, отвечающие за уровень концентрации бактерий в длительно-стационарной фазе; b_1 , b_2 – параметры времени, отвечающие за моменты смены фаз, час; μ – параметр скорости роста/деградации. 1/час; t_N – старт времени ингибирования, час.

В базовой модели (1) – (5) позиции колоний A_i , B_i фиксированы в определенной геометрической области домена и имеют определенный размер, который связан с параметром σ . Рассмотрим модификацию данного подхода, в которой примем функциональную зависимость от времени положений бактериальных колоний $A_i(t)$, $B_i(t)$.

Формализуем процесс отделения дочерних колоний от материнских в процессе эволюции биосистемы, включая в функции $A_i(t)$, $B_i(t)$, управляющие параметры скорости движения и деления колоний в разных направлениях и предельное расстояние продвижения колоний. Будем считать, что скорость $v(t)$ изменяется по линейному закону.

Важно отметить, что деление является случайным процессом, и не все новые колонии происходят из начального состояния. Вновь разделенная колония также может быть использована в качестве начального состояния для последующих колоний. Начальное положение материнской колонии определим в центре расчетной области:

$$A_1(t) = l/2, \quad B_1(t) = l/2, \quad t = t_0. \quad (7)$$

Далее введем дискретный массив времени $\{\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_s\}$, каждый элемент которого θ_s будет соответствовать акту деления. Будем считать, что деление возможно только вдоль одной из координатных осей, при этом материнская клетка будет продолжать существование.

Каждый акт деления будет соответствовать появлению новой $(i+1)$ -ой дочерней колонии в позиции $(A^{new}(t), B^{old}(t))$ или в позиции $(A^{old}(t), B^{new}(t))$ (в начальный момент времени примем $A^{old}=A_1$, $B^{old}=B_1$). Схема для определения текущей позиции колонии будет выглядеть следующим образом:

$$A^{new} = A_{s+1}(t - \theta_s) = \begin{cases} 0, & t \leq \theta_s, \\ A^{old} \pm \delta v(t - \theta_s), & t > \theta_s; \end{cases} \quad (8)$$

$$B^{new} = B_{s+1}(t - \theta_s) = \begin{cases} 0, & t \leq \theta_s, \\ B^{old} \pm \delta v(t - \theta_s), & t > \theta_s; \end{cases} \quad (9)$$

где параметр δ эмпирически задается с помощью генератора случайных чисел.

Вычислительные эксперименты

Введенная в рассмотрение математическая модель (1) – (9) реализована численно, методом конечных элементов с использованием инструментальных возможностей среды научных и инженерных расчетов COMSOL Multiphysics v5.1. Пакет COMSOL предоставляет функционал для решения дифференциальных задач и обладает важным преимуществом – исследователю всегда доступно в явном виде задание уравнений, начальных и граничных условий, а также геометрических примитивов.

Постановка и проведение вычислительных экспериментов требует инициализации объекта моделирования. В контексте данного исследования рассмотрим бактериальный вид *P. putida*, чувство кворума для которого исследовалось неоднократно с использованием различных подходов. Численные значения параметров детерминированной модели (1) – (6) заимствованы из работ [6–7], которые сведены в таблице.

Переменные и параметры математической модели

Переменная/параметр	Описание	Значение / единица измерения
$u(x,t)$	концентрация аминокислоты	моль/л
$L(x,t)$	концентрация фермента лактоназы	моль/л
l	линейный размер объекта	100 мкм
D_u	коэффициент диффузии аминокислоты	100 мкм ² /час
D_L	коэффициент диффузии лактоназы	1 мкм ² /час
F_i	функция, описывающая источник генерации аминокислоты и реакционное слагаемое	ед. актив. ферм. /л
γ_u	абиотическое (обусловленное внешними факторами) снижение скорости образования аминокислоты	0.005545 1/час
$\gamma_{L \rightarrow u}$	скорость деградации аминокислоты за счет действия лактоназы	$0.65 \cdot 10^9$ л/(моль·час)
γ_L	абиотическое снижение скорости образования лактоназы	0.5 1/час
α_u	базовая производительность аминокислоты	$1.058 \cdot 10^{-7}$ моль/(л·час)
β_u	производительность аминокислоты	$1.058 \cdot 10^{-6}$ моль/(л·час)
β_L	продуцирование лактоназы	$1.38 \cdot 10^{-6}$ моль/(л·час)
u_{th}	пороговое значение концентрации аминокислоты	70 нмоль/л
n	степенной параметр Хилла	2.5
ε	параметр, отвечающий за запаздывание	$5 \cdot 10^{-9}$ нмоль/л
μ	темп роста колоний	1 час ⁻¹
a	параметр аппроксимации	0.5
b	параметр аппроксимации	0.5
b_1	параметр аппроксимации	10 час
b_2	параметр аппроксимации	50 час
t_N	время старта деградации	40 час
δ	параметр	[0, 1]
v	скорость передвижения дочерней колонии	l·0.05 мкм/час

Представим результаты численного расчета характеристик бактериального кворума. В качестве первой задачи рассмотрим реализацию одномерной модели. Примем од-

нородные граничные условия Дирихле, как частный случай условий вида (3), $g = 10^5 D_u$, $q = 10^5 D_L$, $u_b = 0$ и $L_b = 0$, предполагая, что бактериальные колонии находятся достаточно далеко от границ и краевые эффекты не влияют на распределение основных веществ, характеризующих кворум.

Для определенности в начальный момент времени зададим одну бактериальную колонию, расположенную в фиксированной позиции 50 мкм с линейным размером 10 мкм. Время наблюдения установим $\bar{t} = 100$ час.

Результаты компьютерного моделирования пространственно-временной динамики ключевых химических субстанций представлены на рис. 1. Примем, что через $\theta_1 = 1$ час от начала симуляции материнская бактериальная колония отделяет одну дочернюю колонию в отрицательном направлении оси Ox . Во второй час ($\theta_1 = 2$ час) вторая дочерняя колония отделяется в положительном направлении x . Обе колонии перемещаются по линейному закону с параметром $\delta = 0.2$, в 20 часов движение останавливается. Динамика концентрации лактоназы показана на рис. 1,б.

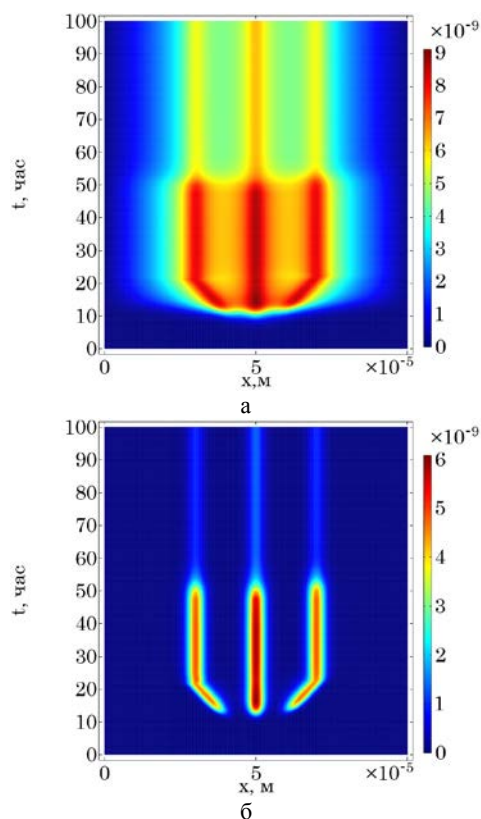


Рис. 1. Пространственно-временные распределения концентрации AHL – а и лактоназы – б

Концентрации двух субстанций (АНЛ и лактоказы) отвечают особенностям временной зависимости концентрации бактериальной популяции – период до $b_1=10$ час соответствует фазе медленного роста, после $b_2=50$ час наблюдается фаза длительной деградации с падением плотности популяции на 50%.

Следует отметить, что мы можем наблюдать два конкурирующих процесса, которые заключаются в увеличении концентрации АНЛ при снижении концентрации лактоказы из-за отрицательной обратной связи, а также снижение концентрации АНЛ с падением плотности популяции при $t>50$ часов. В следующем

вычислительном эксперименте представим результаты реализации двумерной по пространственным координатам модели. Двумерная визуализация позволяет наблюдать более наглядно процесс отделения дочерних колоний от материнской. Рис. 2 демонстрирует изменение концентрации АНЛ в процессе эволюции с учетом отделения двух дочерних колоний (одной – в первый час – $\theta_1 = 1$ час, другой – во второй – $\theta_1 = 2$ час). В первые 7 часов мы не наблюдаем заметного изменения концентрации АНЛ в силу диффузионного характера распространения этой субстанции.

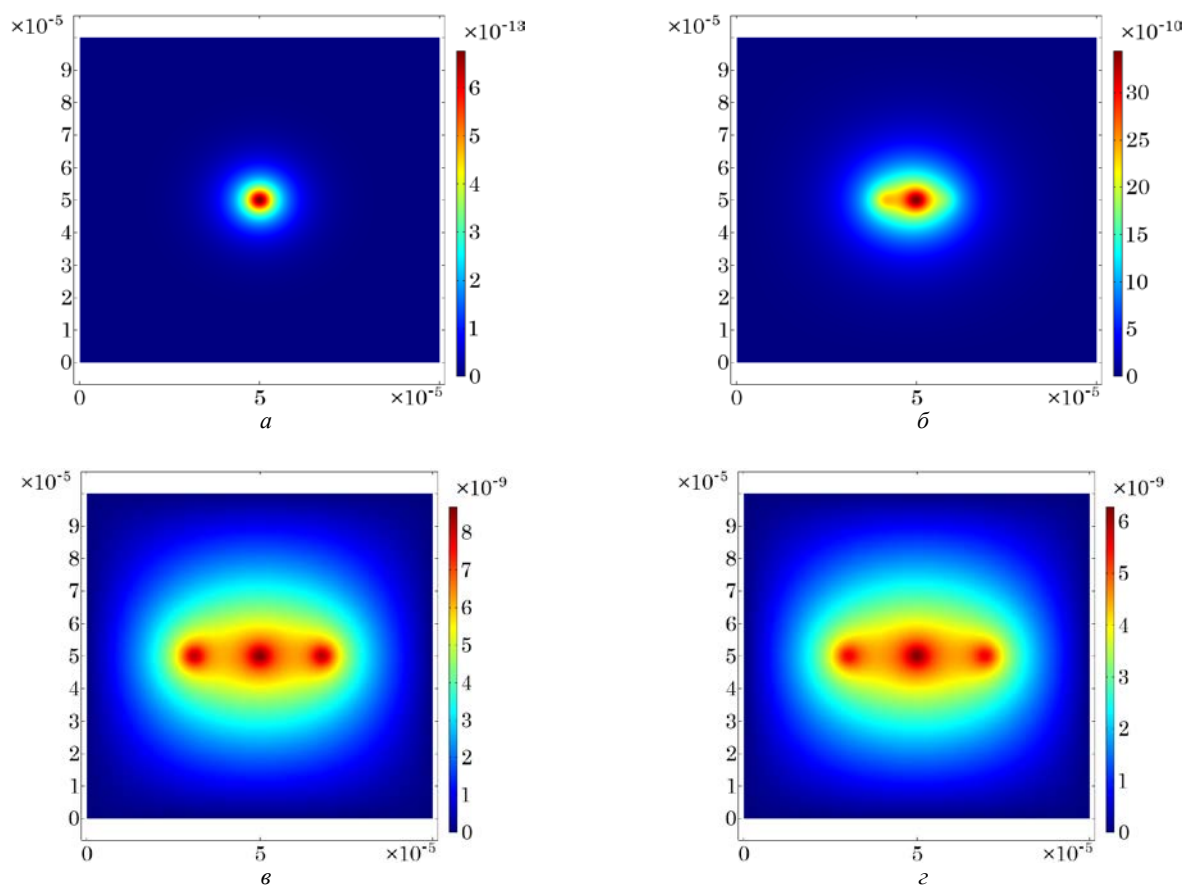


Рис. 2. Пространственные распределения концентрации АНЛ в моменты времени: 1 час – а, 10 час – б, 20 час – в, 100 час – г

Можно сказать, что в этом периоде уровень концентрации АНЛ для одной колонии не отличим от уровня концентрации АНЛ для материнской и отделившейся дочерней колоний. В момент времени 12 часов мы можем наблюдать асимметричное смещение в силу роста дочерней колонии и приближения обеими колониями к периоду достижения

максимального значения концентрации бактериальной плотности (примерно к 20 часам).

Уровень концентрации АНЛ (уровень бактериального кворума) в области нахождения материнской колонии (колонии первого поколения) выше в течение всего процесса наблюдения по сравнению с уровнем

аминокислоты для локаций дочерних колоний. Это обусловлено суперпозицией вкладов, предоставляемых отдельными колониями, при этом на уровень концентрации AHL также влияет деградирующей эффект от действия лактоназы.

Характеризуя коллективный уровень концентраций ключевых субстанций можно отметить, что отделившиеся дочерние колонии не теряют коммуникации с материнской колонией, хотя уровень кворума «внутри» вновь образовавшейся колонии значительно выше. Напротив, фермент лактоназа действует локально и способствует деградации сигнальных молекул в «эпицентре» позиционирования актуальной дочерней или материнской колонии.

Заключение

Таким образом, в работе представлены результаты математического и компьютерного моделирования ключевых характеристик бактериальной коммуникации в процессе пространственно-временного популяционного роста, реализуемого за счет отделения дочерних колоний. Формальное описание алгоритма образования дочерних подвижных колоний введено в базовую модель, которая описывается начально-краевой задачей для системы полулинейных уравнений реакционно-диффузионного типа.

Компьютерная реализация проведена методом конечных элементов на платформе COMSOL Multiphysics. Вычислительные эксперименты на примере бактериального вида *P. putida* позволяют заключить, что отделившиеся дочерние колонии не теряют коммуникации с материнской колонией, хотя уровень кворума «внутри» вновь образовавшейся колонии значительно выше. Напротив, фермент лактоназа действует локально и способствует деградации сигнальных молекул в «эпицентре» позиционирования актуальной дочерней или материнской колонии.

Перспективы развития данной тематики направлены на введение гибридного подхода, основанного на объединении дифференциальных моделей эволюции бактериальной популяции и пространственно-временной динамики характеристик кворума этой популяции.

Литература

1. Quorum sensing in Gram-negative bacteria / N.A. Whitehead, A.M.L. Barnard, H. Slater, N.J.L. Simpson, G.P.C. Salmond // FEMS Microbiol. Rev. 2001. Vol. 25. P. 365–404.
2. Fuqua C., Parsek M.R., Greenberg E.P. Regulation of gene expression by cell-to-cell communication: acyl-homoserine lactone quorum sensing // Annual Review of Genetics. 2001. Vol. 35(1). P. 439–468.
3. Quorum sensing in gram -negative bacteria: small-molecule modulation of AHLs and AI-2 quorum sensing pathways / W.R. Galloway, J.T. Hodgkinson, S.D. Bowden, M. Welch, D.R. Spring // Chemical Reviews. 2011. Vol. 111 (1). P. 28–67.
4. Atkinson S., Williams P. Quorum sensing and social networking in the microbial world // J R Soc Interface. 2009. Vol. 6(40). P. 959–978.
5. Perez-Velazquez J., G'olgeli M., Garcia R. Contreras. Mathematical modelling of bacterial quorum sensing: a review // Bull. Math. Biol. 2016. Vol. 78(8). P. 1585–1639.
6. Kuttler Ch. Reaction-diffusion equations and their application on bacterial communication // Handbook of Statistics (Chapter 4), 2017. P. 55–91.
7. Shuai Y., Maslovskaya A., Kuttler C. 2D reaction-diffusion model of quorum sensing characteristics during all phases of bacterial growth // Far Eastern Mathematical Journal. 2022. Vol. 22. No 2. P. 232–237.
8. Kuttler C., Maslovskaya A. Wave effects in stochastic time lagging reaction-diffusion model of quorum-sensing in bacterial populations // Proc. Int. Conf. Days on Diffraction. 2020. P. 62–67.
9. Kuttler C., Maslovskaya A. Hybrid stochastic fractional-based approach to modeling bacterial quorum sensing // Applied Mathematical Modelling. 2021. Vol. 93. P. 360–375.
10. Kuttler C., Maslovskaya A. Computer-assisted modelling of quorum sensing in bacterial population exposed to antibiotic // Frontiers in Appl. Math & Statistics. 2022. Vol. 8. P. 951783.
11. Dynamic of AHL mediated quorum sensing under flow and non-flow conditions / A. Meyer, J.A. Megerle, C. Kuttler, J. Muller, C. Aguilar, L. Eberl, B.A. Hense, J.O. Radler // Phys. Biol. 2012. Vol. 9. P. 026007.
12. Lorens J.M.N., Tormo A., Martnez-Garcna E. Stationary phase in gram-negative bacteria // FEMS Microbiol. Rev. 2010. Vol. 34. P. 476–495.

Поступила 28.04.2023; принята к публикации 15.06.2023

Информация об авторах

Шуай Исюань – аспирант, кафедра математического анализа и моделирования, Амурский государственный университет (675027, Россия, г. Благовещенск, Игнатьевское шоссе, 21), e-mail: 706603568@qq.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3465-7030>

Масловская Анна Геннадьевна – д-р физ.-мат. наук, профессор кафедры математического анализа и моделирования, Амурский государственный университет (675027, Россия, г. Благовещенск, Игнатьевское шоссе, 21), e-mail: maslovskayaag@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5628-3519>

DIFFERENTIAL MODEL OF BACTERIAL COMMUNICATION DURING THE EVOLUTION OF DAUGHTER COLONIES: FINITE ELEMENT IMPLEMENTATION

I. Shuai, A.G. Maslovskaya

Amur State University, Blagoveshchensk, Russia

Abstract: the current level of interdisciplinary research allows us to consider and formalize the processes occurring in microbial communities. In particular, the most important property of many bacterial species is the ability to communicate or interact with each other and collectively respond to external influences. The paper reports the results of finite element simulation of the key characteristics of cell-to-cell communication in the evolution of bacterial colonies. The basic deterministic mathematical model is formalized as an initial-boundary value problem for a system of semi-linear equations of reaction-diffusion type. The model is modified by introducing a mechanism for the formation of mobile daughter colonies in the process of bacterial colony evolution with general multiphase dynamics: lag-growth, log-growth, relaxation and degradation. The finite element solution of the problem was obtained using the COMSOL Multiphysics software. A series of computational experiments was performed to assess the change in the spatial-temporal concentrations of chemical compounds characterizing the bacterial quorum sensing for the *Pseudomonas putida* species. The computations indicate that the separated sub-colonies do not lose the communication with the mother colony, although the quorum within the newly formed colony is much higher. On the contrary, Lactonase enzymes act locally and cause quorum degradation in compact domain occupied by actual daughter or parent colonies

Key words: bacterial community, evolution of a bacterial colony, reaction-diffusion model of bacterial communication, finite element method, computational experiments

Acknowledgments: the study is supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, project No. 122082400001-8

References

1. Whitehead N.A., Barnard A.M.L., Slater H., Simpson N.J.L., Salmond G.P.C. "Quorum sensing in Gram-negative bacteria", *FEMS Microbiol. Rev.*, 2001, vol. 25, pp. 365–404.
2. Fuqua C., Parsek M.R., Greenberg E.P. "Regulation of gene expression by cell-to-cell communication: acyl-homoserine lactone quorum sensing", *Annual Review of Genetics*, 2001, vol. 35(1), pp. 439–468.
3. Galloway W.R., Hodgkinson J.T., Bowden S.D., Welch M., Spring D.R. "Quorum sensing in gram -negative bacteria: small-molecule modulation of AHLs and AI-2 quorum sensing pathways", *Chemical Reviews*, 2011, vol. 111 (1), pp. 28–67.
4. Atkinson S., Williams P. "Quorum sensing and social networking in the microbial world", *J R Soc Interface*, 2009, vol. 6(40), pp. 959–978.
5. Perez-Velazquez J., G'olgeli M., Contreras G.R. "Mathematical modelling of bacterial quorum sensing: a review", *Bull. Math. Biol.*, 2016, vol. 78(8), pp. 1585–1639.
6. Kuttler Ch. "Reaction-diffusion equations and their application on bacterial communication", *Handbook of Statistics (Chapter 4)*, 2017, pp. 55–91.
7. Shuai Y., Maslovskaya A., Kuttler C. "2D reaction-diffusion model of quorum sensing characteristics during all phases of bacterial growth", *Far Eastern Mathematical Journal*, 2022, vol. 22, no 2, pp. 232–237.
8. Kuttler C., Maslovskaya A. "Wave effects in stochastic time lagging reaction-diffusion model of quorum-sensing in bacterial populations", *Proc. Int. Conf. Days on Diffraction*, 2020, pp. 62–67.
9. Kuttler C., Maslovskaya A. "Hybrid stochastic fractional-based approach to modeling bacterial quorum sensing", *Applied Mathematical Modelling*, 2021, vol. 93, pp. 360–375.
10. Kuttler C., Maslovskaya A. "Computer-assisted modelling of quorum sensing in bacterial population exposed to antibiotics", *Frontiers in Appl. Math & Statistics*, 2022, vol. 8, pp. 951783.
11. Meyer A., Megerle J.A., Kuttler C., Muller J., Aguilar C., Eberl L., Hense B.A., Radler J.O. "Dynamic of AHL mediated quorum sensing under flow and non-flow conditions", *Phys. Biol.*, 2012, vol. 9, pp. 026007.
12. Lorens J.M.N., Tormo A., Mart'nez-Garc'na E. "Stationary phase in gram-negative bacteria", *FEMS Microbiol Rev.*, 2010, vol. 34, pp. 476–495.

Submitted 28.04.2023; revised 15.06.2023

Information about the authors

Yixuan Shuai – ostgraduate student, Department of Mathematical Analysis and Modeling, Amur State University (21, Ignatyevskoe Shosse, Blagoveshchensk 675027, Russia), e-mail: 706603568@qq.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3465-7030>
Anna G. Maslovskaya – Dr. Sc. (Physical and Mathematical), Professor of the Department of Mathematical Analysis and Modeling, Amur State University (21, Ignatyevskoe Shosse, Blagoveshchensk 675027, Russia), e-mail: maslovskayaag@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5628-3519>

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПЕРФОРАЦИИ СТАБИЛИЗИРУЮЩИХ РАСШИРЯЮЩИХСЯ «ЮБОК» ДЛЯ УЛУЧШЕНИЯ АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

В.Т. Калугин, М.Д. Калугина, А.Ю. Луценко, Д.К. Назарова, Д.М. Слободянюк

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, г. Москва, Россия

Аннотация: рассмотрены результаты экспериментальных и численных исследований дозвукового обтекания летательных аппаратов (ЛА) с двумя типами стабилизирующих аэродинамических юбок: со сплошной и перфорированной. Данные стабилизирующие устройства представлены в виде усеченных конических поверхностей, расположенных в донной области летательного аппарата цилиндрической формы. Рассмотрены варианты полусферического и торцевого затуплений головной части корпуса аппарата. Проанализированы полученные зависимости аэродинамических коэффициентов в широком диапазоне углов атаки от 0 до 30° и структуры обтекания моделей. Экспериментальные исследования проведены в дозвуковой аэродинамической трубе с открытой рабочей частью МГТУ им. Н.Э. Баумана при скорости набегающего потока 25 м/с. В экспериментах измерены аэродинамические силы, действующие на модели, при помощи шестиканальных тензOMETрических весов. Численное моделирование проведено в программном комплексе FlowVision в соответствии с условиями эксперимента. В результате проведенных исследований выявлено влияние формы головной части корпуса летательного аппарата и параметров перфорации стабилизирующей аэродинамической юбки на структуры обтекания и аэродинамические характеристики исследуемых тел. Получено, что форма затупления существенно влияет на структуру течения и аэродинамические характеристики летательных аппаратов с юбкой. Перфорация же оказывает незначительное влияние на аэродинамические характеристики и структуры обтекания ЛА при рассмотренной ее степени 10 %. Применение перфорированных стабилизирующих юбок позволяет уменьшить вес летательного аппарата, обеспечивая при этом аэродинамические характеристики, равные характеристикам аппарата со сплошной юбкой

Ключевые слова: летательный аппарат, стабилизирующая юбка, полусферическое затупление, торцевое затупление, перфорация, дозвуковая аэродинамическая труба, FlowVision

Введение

Одним из способов обеспечения статической устойчивости летательного аппарата (ЛА) является использование расширяющихся кормовых частей – стабилизирующих юбок [1, 2]. Обтекание ЛА такой конфигурации практически всегда сопровождается отрывом потока. Структуру течения определяют форма стабилизирующего устройства и головной части аппарата, его удлинение, а также параметры набегающего потока, в особенности числа Маха и Рейнольдса. В зависимости от этих параметров поверхность стабилизирующих юбок может частично или полностью находиться в отрывной зоне [1, 2]. За донным срезом летательного аппарата с расширяющейся кормовой частью также формируется обширная отрывная область. Как известно, срыв вихрей при отрыве может приводить к нежелательной раскачке ЛА [3]. В качестве одного из способов борьбы с этим отрицательным явлением и управления обтеканием аппарата может быть предложена

перфорация поверхности юбки, которая также позволит облегчить конструкцию.

Ранее авторами статьи рассмотрено применение перфорации плоских стабилизирующих устройств и показана эффективность такого способа управления обтеканием ЛА. Установлено, что перфорация способствует ликвидации области отрыва перед стабилизаторами [4]. Рассмотрено применение перфорации не только плоских пластин, но и поверхностей, имеющих коническую форму. В статье [5] установлено, что при обтекании перфорированного конуса с углом полураствора $\beta_k = 30^\circ$ наблюдается безотрывная структура течения без формирования вихревого следа. При этом увеличение степени перфорации (диаметра отверстий перфорации) приводит к ликвидации вихрей в донной области за конусом по сравнению со случаем непроницаемой поверхности, что уменьшает раскачку конуса в потоке воздуха.

Аналогичные выводы получены и в многочисленных зарубежных и отечественных работах. Перфорация закрылков ослабляет бафтинг, тем самым способствуя существенному улучшению аэродинамических свойств самолета [6]. Перфорация поверхности тормозного

щитка истребителя позволяет раздробить срывающиеся с него вихри и уменьшить пульсационные нагрузки на киль, что сохраняет его обшивку в рабочем состоянии [7]. Применение перфорированных закрылков Герни, установленных на крыле самолета, уменьшает размер вихрей и снижает неустойчивость течения в донной области за закрылками [8]. В работе [9] рассмотрено обтекание сплошных и перфорированных пластин большого удлинения, установленных на плоской поверхности, выявлено, что перфорация поверхности пластин в данном случае также ликвидирует масштабные вихревые структуры.

Перфорация может быть применена не только в дозвуковом диапазоне скоростей набегающего потока, но и при транс- и сверхзвуковых скоростях в качестве способа управления обтеканием. Например, перфорация обшивки крыла [10, 11] для ликвидации областей отрыва, а также перфорация стенок рабочих частей аэродинамических труб для снижения их влияния [12-14].

Таким образом, проведение экспериментальных и численных исследований по определению эффективности применения перфорированных стабилизирующих юбок при различных конфигурациях летательного аппарата является актуальной задачей.

Модели исследуемых летательных аппаратов

Выбраны четыре экспериментальные модели, которые представляли собой осесимметричные тела с различными формами головной и кормовой частей. Рассмотрены полусферическая головная часть и плоский торец, сплошная и перфорированная стабилизирующие юбки.

Корпус модели, головные части и модель сплошной стабилизирующей юбки изготовлены из стали, перфорированная юбка напечатана на 3D-принтере методом селективного лазерного спекания. Отверстия перфорации выполнены сквозными с постоянным диаметром d по нормали к поверхности (рис. 1). Степень перфорации юбки $\sigma = \frac{S_{отв} \cdot n}{S_{бок}} \cdot 100\%$, где $S_{отв}$ – площадь одного отверстия, n – количество отверстий, $S_{бок}$ – боковая площадь стабилизатора, составляла 10 %.

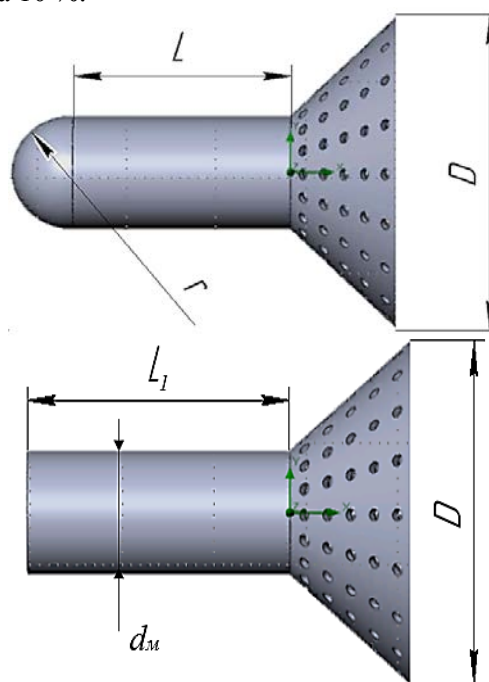


Рис. 1. Модели летательных аппаратов с перфорированной юбкой

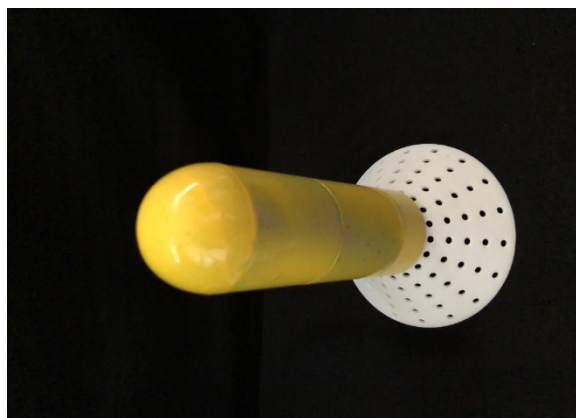
Геометрические параметры экспериментальных моделей представлены в табл. 1.

Таблица 1

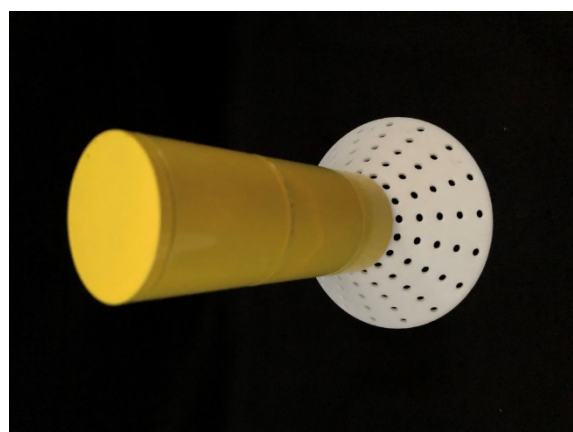
Основные геометрические параметры исследуемых моделей

Параметр	Модель 1	Модель 2	Модель 3	Модель 4
Тип закругления	Полусфера		Плоский торец	
Тип юбки	Сплошная	Перфорированная	Сплошная	Перфорированная
L , м	0,070		-	
L_1 , м	-		0,075	
d_m , м	0,050		0,050	
D , м	0,116		0,116	
r , м	0,025		-	
d , м	0	0,004	0	0,004

На рис. 2 представлены готовые экспериментальные модели с двумя типами затупления головной части и перфорированной стабилизирующей юбкой.



а)



б)

Рис. 2. Экспериментальные модели летательных аппаратов с перфорированной юбкой: а) полусферическое затупление; б) торцевое затупление

Экспериментальные исследования

Эксперимент проводился в МГТУ им. Н.Э. Баумана в аэродинамической трубе Т-500 малых дозвуковых скоростей замкнутого типа с открытой рабочей частью. Скорость набегающего потока составляла $V = 25$ м/с; угол атаки изменялся в диапазоне $\alpha = 0..30^\circ$ с шагом $\Delta\alpha = 5^\circ$. В рабочей части трубы модель ЛА устанавливалась на донной державке (рис. 3). Для измерения аэродинамических сил, действующих на исследуемые модели при продувках, использовались тензометрические весы, сигнал с которых передавался на персональный компьютер. Степень загромождения рабочей части трубы в экспериментах не превышала 5 %.



Рис. 3. Экспериментальная модель с полусферическим затуплением и перфорированной юбкой в рабочей части аэродинамической трубы

По полученным экспериментальным данным, параметрам набегающего воздушного потока и площади миделя моделей ЛА $S = \frac{\pi D^2}{4}$

вычислены аэродинамические коэффициенты продольной c_x и нормальной c_y сил. Зависимости аэродинамических коэффициентов для исследуемых тел с полусферическим и торцевым затуплением и различными вариантами стабилизирующих юбок от угла атаки α представлены на рис. 4.

Характер зависимостей коэффициентов продольной и нормальной сил моделей ЛА с перфорированной юбкой аналогичен характеру соответствующих зависимостей моделей со сплошной стабилизирующей юбкой при условии совпадения типа затупления головной части (рис. 4 а, б). При углах атаки $\alpha < 15^\circ$ значения коэффициентов c_x и c_y модели с полусферической головной частью и перфорированной юбкой превышают значения аналогичных коэффициентов модели ЛА со сплошной юбкой. При $\alpha > 15^\circ$ коэффициенты продольных сил моделей со сферическим затуплением и различными типами юбок практически совпадают между собой, а коэффициенты нормальной силы модели с перфорированной юбкой меньше коэффициентов c_y модели со сплошным стабилизатором. При торцевом затуплении корпуса в диапазоне углов атаки от 0 до 5° аэродинамические коэффициенты c_x и c_y моделей ЛА с перфорированной и сплошной юбками одинаковы, при $\alpha > 5^\circ$ c_x и c_y модели с перфорированной юбкой меньше соответствующих коэффициентов модели со сплошной юбкой.

Исследованный в работе вариант перфорации юбки не приводит к значительным отличиям как в характере зависимостей от угла атаки, так и в величинах коэффициентов c_x и c_y моде-

лей ЛА. При этом коэффициенты продольной и нормальной сил моделей ЛА с торцевым затуплением и обоими типами юбок практически во всем диапазоне углов атаки имеют большие значения, чем коэффициенты моделей со сферической головной частью. При угле атаки $\alpha > 20^\circ$ коэффициенты нормальных сил моделей ЛА с разными типами затупления и перфорирован-

ными юбками становятся равными между собой. В случае торцевой головной части вне зависимости от типа юбки при небольших углах атаки $\alpha \approx 0$ коэффициенты продольной силы минимальны, в районе $\alpha \approx 10^\circ$ наблюдается наличие экстремума у зависимостей $c_x(\alpha)$. Для случая использования полусферической головной части графики имеют более пологий характер.

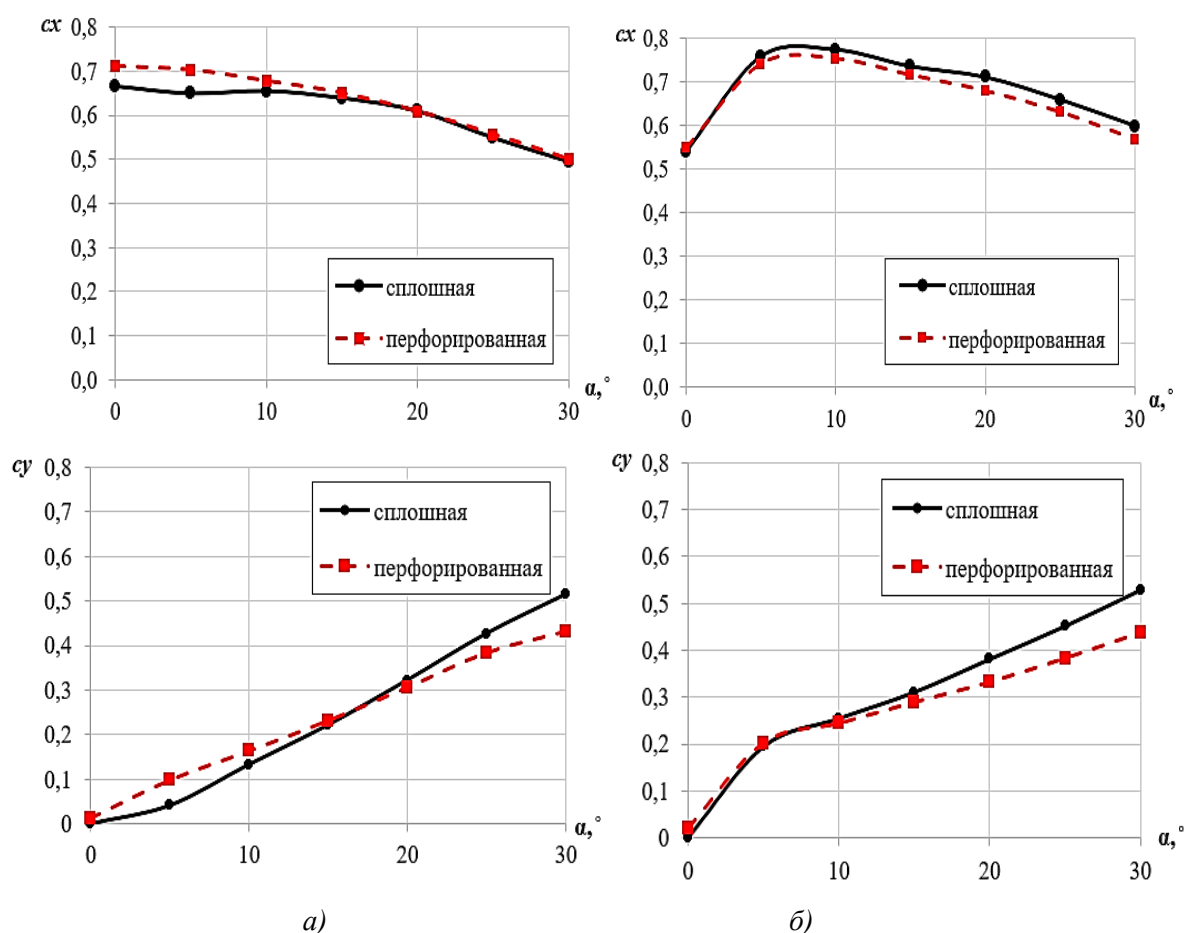


Рис. 4. Экспериментальные значения аэродинамических коэффициентов продольной и нормальной сил моделей: а) с полусферической головной частью; б) с торцевой головной частью

Численное моделирование

Математическое моделирование дозвукового обтекания ($M_\infty < 0.3$) летательных аппаратов с перфорированными стабилизирующими юбками может осуществляться на основе нестационарной модели вязкого несжимаемого газа с использованием уравнений Навье-Стокса осредненных по Рейнольдсу. Такой подход применяется в различных вычислительных программных комплексах, использующих метод контрольного объема. Одним из наиболее широко используемых сегодня в России программных комплексов для численного моделирования является FlowVision [15].

Данный продукт успешно применяется в решении задач аэродинамики ЛА как авиационной [16], так и ракетно-космической техники [17, 18]. Однако для получения достоверных значений аэродинамических характеристик необходимо проводить валидацию и верификацию расчетной методики. Хорошее воспроизведение экспериментальных данных в вычислительном пакете [18] позволяет в дальнейшем численно моделировать схожие задачи и проводить комплексные параметрические исследования.

Указанные выше различия в аэродинамических характеристиках ЛА можно объяснить существенным влиянием типа затупления

корпуса летательного аппарата со стабилизирующей юбкой на структуру его обтекания. В связи с этим для анализа экспериментально полученных зависимостей аэродинамических коэффициентов моделей ЛА со стабилизирующими юбками от угла атаки было проведено математическое моделирование в программном комплексе FlowVision, позволившее визуализировать структуры течения. Расчетная область представляла собой параллелепипед размером $10L \times 7L \times 7L$. В области модели было выполнено сгущение сетки, а также проведена адаптация по стенке модели 3 уровня (рис. 5). Минимальный размер ячейки составил порядка $4 \cdot 10^{-4}$ м. В качестве модели турбулентности была принята модель $k-\omega$ SST. При расчетах использовалась неявная схема второго порядка аппроксимации, при этом число Куранта-Фридрихса-Леви задавалось равным $CFL = 10$.

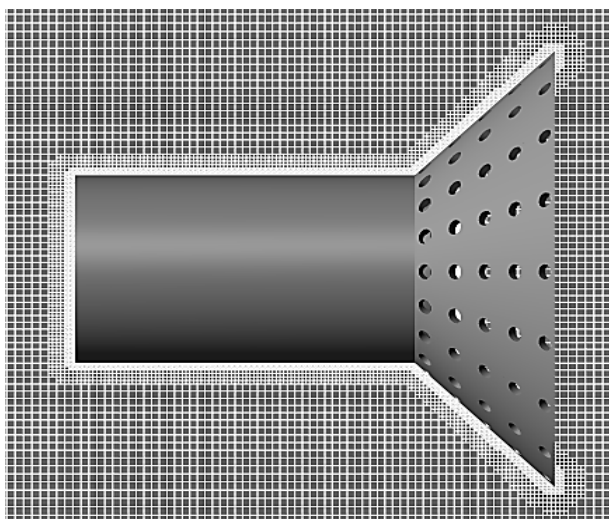


Рис. 5. Расчетная сетка вблизи модели

При численном моделировании параметры набегающего потока воздуха, геометрические размеры исследуемых тел и углы атаки соответствовали эксперименту.

На рис. 6 показаны цветовые контуры скорости и линии тока вблизи летательных аппаратов с различными типами закругления головной части, со сплошными и перфорированными аэродинамическими стабилизаторами в донной области.

При обтекании летательного аппарата со сферическим закруглением отрыв в носовой части корпуса отсутствует (рис. 6, а, в). Перед стабилизирующей юбкой наблюдается существование отрывной области небольшого размера, причем наличие перфорации юбки не

оказывает существенного влияния на структуру течения, однако приводит к некоторому видоизменению пары вихрей в донной области аппарата (рис. 6, а).

Обтекание модели ЛА с торцевым закруглением на малых углах атаки сопровождается отрывом потока с излома образующей носовой части, весь корпус аппарата в случае его небольшого удлинения находится в отрывной зоне, которая распространяется и на поверхность стабилизирующей юбки (рис. 6, б, г). Перед сплошной аэродинамической юбкой наблюдается обширная отрывная зона (рис. 6, б). В случае наличия перфорации юбки поток частично протекает сквозь отверстия в зону ближнего следа за моделью ЛА, зона отрыва, расположенная перед стабилизатором, при этом уменьшается. Вне зависимости от типа головной части и наличия перфорации стабилизирующей юбки на малых углах атаки в ближнем следе ЛА возникает пара симметричных вихрей.

В случае увеличения угла атаки структура обтекания всех исследованных вариантов ЛА изменяется, наблюдается отрыв потока с боковой поверхности корпуса. При этом наличие перфорации обеспечивает снижение интенсивности вихреобразования в зоне ближнего следа для моделей с обоими типами закругления головной части (рис. 6, в, г). Для аппарата с торцевым закруглением при $\alpha > 10^\circ$ зона отрыва сохраняется на подветренной поверхности и ликвидируется на наветренной (рис. 6, г).

При наличии отрывного течения на малых углах атаки давление на корпусе ЛА с торцевым закруглением и стабилизирующей юбке пониженное. Этот факт объясняет меньшие значения коэффициентов c_x моделей с торцевым закруглением по сравнению с c_x моделей со сферическим закруглением при $\alpha \approx 0$, несмотря на более высокое давление на торце. На углах атаки $\alpha > 10^\circ$ различия в коэффициентах c_x и c_y аппаратов с различными типами закруглений можно объяснить особенностями обтекания сферического носка и плоского торца.

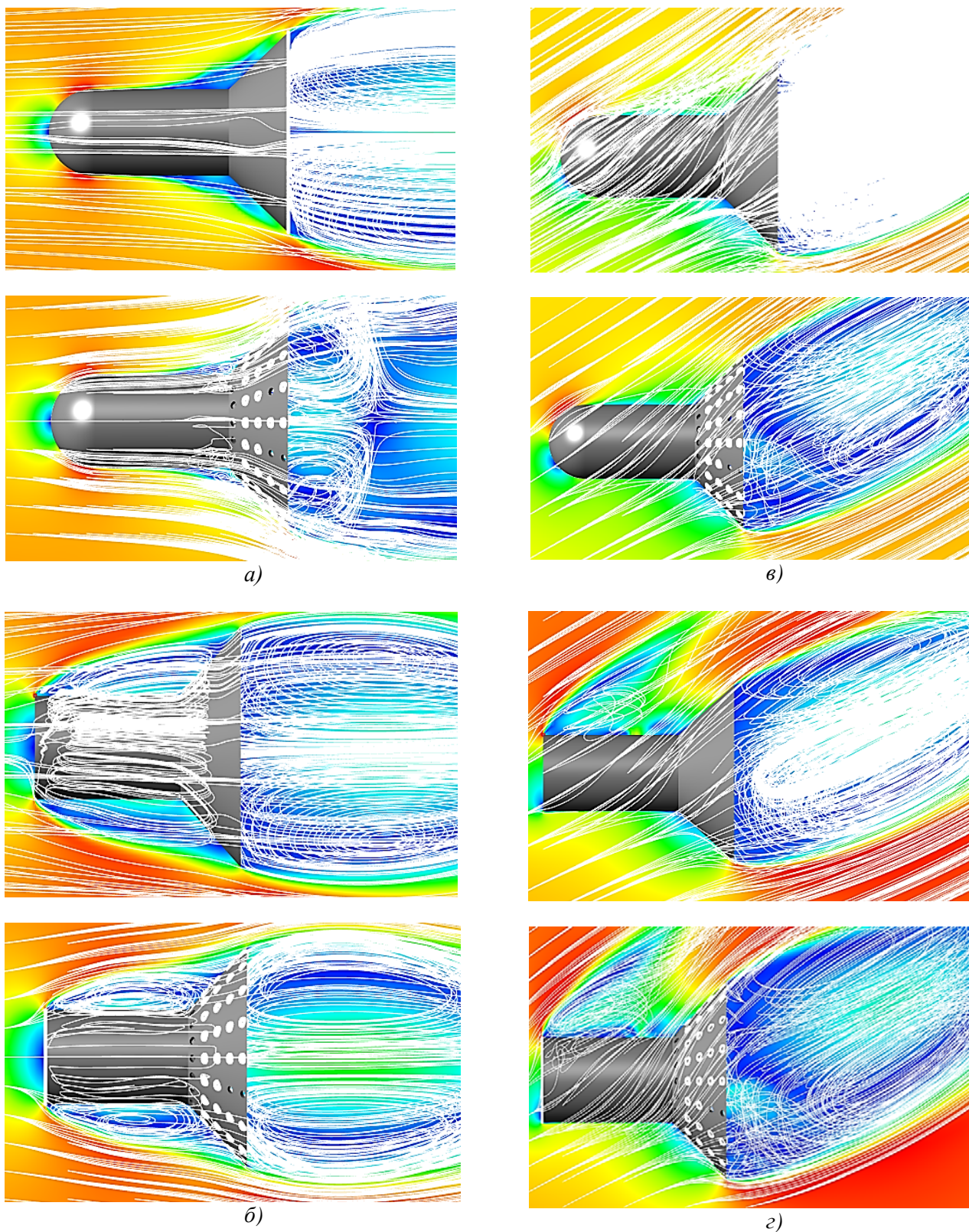


Рис. 6. Примеры структур течения возле моделей ЛА со сплошными и перфорированными стабилизирующими юбками при:
 а) сферическом затуплении и $\alpha = 0^\circ$; б) торцевом затуплении и $\alpha = 0^\circ$; в) сферическом затуплении и $\alpha = 30^\circ$;
 г) торцевом затуплении и $\alpha = 30^\circ$

Заключение

Таким образом, выполнены экспериментальные и численные исследования обтекания летательных аппаратов со сплошной и перфорированной стабилизирующими юбками, рассмотрены различные типы затуплений головной части ЛА. На основании полученных результатов можно сделать вывод, что форма затупления существенно влияет на структуру течения и аэродинамические характеристики летательных аппаратов с юбкой. Перфорация оказывает незначительное влияние на аэродинамические характеристики и структуры обтекания ЛА со стабилизатором при степени его перфорации менее 10 %, для управления обтеканием аппарата необходимо использовать степень перфорации $\sigma > 10$ %. Применение перфорированных стабилизирующих юбок позволяет уменьшить вес летательного аппарата, обеспечивая при этом аэродинамические характеристики, равные характеристикам аппарата со сплошной юбкой.

Литература

1. Калугин В.Т., Соболев В.Ю. Влияние формы головной части на аэродинамические характеристики стабилизирующих устройств при отрывном обтекании летательных аппаратов // Научный Вестник МГТУ ГА, серия Аэромеханика и прочность. 2006. № 97. С. 54-57.
2. Калугин В.Т., Соболев В.Ю. Аэродинамическое сопротивление стабилизирующих устройств при отрывных режимах обтекания летательных аппаратов // Научный Вестник МГТУ ГА. Серия Аэромеханика и прочность. 2006. № 81. С. 54-57.
3. Епихин А.С., Калугин В.Т., Чернуха П.А. Аэродинамические характеристики стабилизирующих поверхностей при дозвуковом вихревом обтекании // Научный Вестник МГТУ ГА. 2013. № 2 (188). С. 19-23.
4. Особенности в аэродинамических характеристиках и структурах обтекания летательного аппарата с перфорированными стабилизирующими устройствами / В.Т. Калугин, М.Д. Калугина, А.Ю. Луценко, Д.К. Назарова, Д.М. Слободянюк // Актуальные проблемы прикладной математики, информатики и механики: сб. тр. Междунар. науч. конф. Воронеж, 2022. С. 1424-1431.
5. Калугин В.Т., Киндяков Е.Б., Чернуха П.А. Особенности обтекания перфорированных устройств системы стабилизации грузов на внешней подвеске летательных аппаратов // Научный Вестник МГТУ ГА. 2010. № 151. С. 23-27.
6. Purser P.E., Turner T.R. Wind-tunnel investigation of perforated split flaps for use as dive brakes on a rectangular NACA 23012 airfoil // NACA Report. 1941. L-445. 48 P.
7. Калугин В.Т., Епихин А.С., Чернуха П.А. Исследование влияния перфорации для снижения пульсационных нагрузок, действующих на аэродинамические управляющие поверхности // Научный Вестник МГТУ ГА. 2016. № 223 (1). С. 51-56.
8. Lee T. Aerodynamic Characteristics of Airfoil with Perforated Gurney-Type Flaps // Journal of Aircraft. 2009. № 46. Pp. 542-548.
9. Phong V., Papamoschou D. High frequency acoustic transmission loss of perforated plates at normal incidence // The journal of the acoustical society of America. 2013. № 134. Pp. 1090-1101.
10. Патент № 0002656918 Российская Федерация. Перфорированная конструкция обшивки летательного аппарата с комбинированными отверстиями и демпфирующей полостью. Плоткина В.А., Стародубцев П.А. 2018.
11. Patent № 5263667A USA. Horstman R.H. Perforated wing panel with variable porosity. 1993.
12. Патент № 1867631/40-23 СССР. Перфорированная рабочая часть аэродинамической трубы. Бертынь В.Р., Подмазов А.В. 1978.
13. Нейланд В.М. Проницаемость перфорированных стенок аэродинамической трубы при околосвуковых скоростях // Ученые записки ЦАГИ. 1988. № 5. С. 142-146.
14. Исследование поля потока газа в рабочей части аэродинамической трубы с регулируемой проницаемостью стенок ($M = 0,4$ 1,6) / В.Р. Бертынь, В.П. Верховский, Н.К. Михайлов, Д.Е. Смирнов // Ученые записки ЦАГИ. 2001. № 3-4. С. 115-126.
15. Аксенов А.А. FlowVision: индустриальная вычислительная гидродинамика // Компьютерные исследования и моделирование. 2017. Т. 9. № 1. С. 5-20.
16. Аксенов А.А., Акимов В.С., Бывальцев П.М. Применение программного комплекса FLOWVISION для расчета аэродинамических характеристик модели крыла самолета с посадочной конфигурацией крыла // Материалы XXIX научно-технической конференции по аэродинамике. 2018. С. 22.
17. Математическое моделирование обтекания возвращаемого аппарата с работающей посадочной двигательной установкой / А.А. Дядькин, М.К. Михайлова, В.П. Сухоруков, А.Е. Щеляев // «Инженерные системы-2011»: тр. междунар. науч.-практ. конф. М., 2011. С. 160-164.
18. Особенности аэрогазодинамики отделяемого головного блока системы аварийного спасения с работающими двигательными установками / В.Н. Андреев, А.И. Боровков, И.Б. Войнов, С.М. Дроздов, А.А. Дядькин, М.И. Казаков, М.В. Михайлов // Космическая техника и технологии. 2014. № 4 (7). С. 10-20.

Поступила 28.04.2023; принята к публикации 15.06.2023

Информация об авторах

Калугин Владимир Тимофеевич – д-р техн. наук, профессор, декан факультета «Специальное машиностроение», профессор кафедры динамики и управления полетом ракет и космических аппаратов, Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (105005, Россия, г. Москва, ул. 2-я Бауманская, 5, стр. 1), e-mail: kaluginvt@bmstu.ru

Калугина Мария Денисовна – аспирант кафедры динамики и управления полетом ракет и космических аппаратов, Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (105005, Россия, г. Москва, ул. 2-я Бауманская, 5, стр. 1), e-mail: kaluginamd@student.bmstu.ru

Луценко Александр Юрьевич – канд. техн. наук, доцент кафедры динамики и управления полетом ракет и космических

аппаратов, Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (105005, Россия, г. Москва, ул. 2-я Бауманская, 5, стр. 1), e-mail: lutsenko@bmstu.ru

Назарова Динара Камилевна – канд. техн. наук, доцент кафедры динамики и управления полетом ракет и космических аппаратов, Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (105005, Россия, г. Москва, ул. 2-я Бауманская, 5, стр. 1), e-mail: dknazarova@bmstu.ru

Слободянюк Дмитрий Михайлович – канд. техн. наук, старший преподаватель кафедры динамики и управления полетом ракет и космических аппаратов, Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (105005, Россия, г. Москва, ул. 2-я Бауманская, 5, стр. 1), e-mail: slobodyanyuk@bmstu.ru

PERFORATION OF THE STABILIZING DIVERGENT «SKIRT» FOR IMPROVING AIRCRAFT AERODYNAMIC CHARACTERISTICS

V.T. Kalugin, M.D. Kalugina, A.Yu. Lutsenko, D.K. Nazarova, D.M. Slobodyanyuk

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

Abstract: the paper considers the results of experimental and numerical studies of subsonic flow around aircraft with two types of stabilizing aerodynamic skirts: solid and perforated. These stabilizing devices are presented in the form of truncated conical surfaces located in the bottom region of the cylindrical apparatus. Variants of hemispherical and end bluntness are considered as the head part of the apparatus. The obtained dependences of the aerodynamic coefficients are analyzed in a wide range of angles of attack and the structure of the flow around models with hemispherical and end blunting of the head part. Experimental studies were carried out in a subsonic wind tunnel with an open test section of the Moscow State Technical University. N.E. Bauman at an oncoming flow velocity of 25 m/s. To measure the aerodynamic forces acting on the models during blowdowns, a six-channel strain-gauge balance was used. Numerical simulation was carried out in the FlowVision software package in accordance with the experimental conditions. As a result of the conducted studies, the influence of the shape of the head part of the aircraft body and the perforation parameters of the stabilizing aerodynamic skirt on the flow structures and aerodynamic characteristics of the studied bodies was revealed. It was found that the form of blunting significantly affects the flow structure and aerodynamic characteristics of aircraft with a skirt. Perforation, on the other hand, has a negligible effect on the aerodynamic characteristics and flow structures of the aircraft at its considered degree of 10%. The use of perforated stabilizing skirts allows you to reduce the weight of the aircraft, while providing aerodynamic characteristics equal to the characteristics of the device with a solid skirt

Key words: aircraft, stabilizing skirt, hemispherical bluntness, end bluntness, perforation, subsonic wind tunnel, FlowVision

References

1. Kalugin V.T., Sobolev V.Yu. "Influence of the shape of the head part on the aerodynamic characteristics of stabilizing devices during separated flow around aircraft", *Scientific Bulletin of MSTU GA, Aeromechanics and Strength series (Nauchnyy vestnik MGTU GA, seriya Aeromekhanika i prochnost')*, 2006, no. 97, pp. 54-57.
2. Kalugin V.T., Sobolev V.Yu. "Aerodynamic resistance of stabilizing devices in separated modes of flow around aircraft", *Scientific Bulletin of MSTU GA, series Aeromechanics and strength (Nauchnyy vestnik MGTU GA, seriya Aeromekhanika i prochnost')*, 2006, no. 81, pp. 54-57.
3. Epikhin A.S., Kalugin V.T., Chernukha P.A. "Aerodynamic characteristics of stabilizing surfaces under subsonic vortex flow", *Scientific Bulletin of MSTU GA (Nauchnyy vestnik MGTU GA)*, 2013, no. 2 (188), pp. 19-23.
4. Kalugin V.T., Kalugina M.D., Lutsenko A.Yu., Nazarova D.K., Slobodyanyuk D.M. "Peculiarities in aerodynamic characteristics and flow structures around an aircraft with perforated stabilizing devices", *Actual Problems of Applied Mathematics, Informatics and Mechanics (Aktual'nyye problemy prikladnoy matematiki, informatiki i mekhaniki)*, proc. of the International Scientific Conference, Voronezh, December 13-15, 2021, pp. 1424-1431.
5. Kalugin V.T., Kindyakov E.B., Chernukha P.A. "Flow peculiar properties around perforate part of regulating system of car-goes on the aircraft external suspension", *Scientific Bulletin of MSTU GA (Nauchnyy vestnik MGTU GA)*, 2010, no 151, pp. 23-27.
6. Purser P.E., Turner T.R. "Wind-tunnel investigation of perforated split flaps for use as dive brakes on a rectangular NACA 23012 airfoil", *NACA Report*, 1941, L-445. 48 p.
7. Kalugin V.T., Epikhin A.S., Chernukha P.A. "Research of influence of perforation to reduce pulsation loads acting on the aerodynamic control surfaces", *Scientific Bulletin of MSTU GA (Nauchnyy vestnik MGTU GA)*, 2016, no 223 (1), pp. 51-56.
8. Lee T. "Aerodynamic Characteristics of Airfoil with Perforated Gurney-Type Flaps", *Journal of Aircraft*, 2009, no. 46. pp. 542-548.
9. Phong V., Papamoschou D. "High frequency acoustic transmission loss of perforated plates at normal incidence", *The journal of the acoustical society of America*, 2013, no. 134, pp. 1090-1101.
10. Plotkina V.A., Starodubtsev P.A. "Perforated aircraft skin structure with combined holes and damping cavity" ("Perforirovannaya konstruktsiya obshivki letatel'nogo apparata s kombinirovannymi otverstiyami i dempfiru-yushchey polost'yu"), patent of RF no. 0002656918, 2018.
11. Horstman R.H. "Perforated wing panel with variable porosity", patent of US no 5263667A, 1993.
12. Bertyn V.R., Podmazov A.V. "Perforated working part of the wind tunnel" ("Perforirovannaya rabochaya chast' aerodinamicheskoy trubyy"), patent of RF no. 1867631/40-23, 1978.

13. Neiland V.M. "Permeability of Perforated Wind Tunnel Walls at Near-Light Speeds", *TsAGI Science Journal (Uchenyye zapiski TSAGI)*, 1988, no. 5, pp. 142–146.
14. Bertyn V.R., Verkhovskiy V.P., Mikhailov N.K., Smirnov D.E. "Investigation of the gas flow field in the working part of a wind tunnel with adjustable wall permeability ($M = 0,4$ 1,6)", *TsAGI Science Journal (Uchenyye zapiski TSAGI)*, 2001, no. 3-4, pp. 115–126.
15. Aksenov A.A. "FlowVision: industrial computational fluid dynamics", *Computer research and modeling (Komp'yuternyye issledovaniya i modelirovaniye)*, 2017, vol. 9. no. 1, pp. 5-20.
16. Aksenov A.A., Akimov V.S., Byvaltsev P.M. "Application of the FLOWVISION software package for calculating the aerodynamic characteristics of an aircraft wing model with a wing landing configuration", *proc. of the XXIX scientific and technical conference on aerodynamics (XXIX nauchno-tehnicheskaya konferentsiya po aerodinamike)*, 2018, pp. 22-22.
17. Dyadkin A.A., Mikhailova M.K., Sukhorukov V.P., Shcheliaev A.E. "Mathematical modeling of the flow around a reentry vehicle with a working landing propulsion system", *Engineering Systems-2011 (Inzhenerye sistemy-2011)*, proc. of the International Scientific and Practical Conference, Moscow, 2011, pp. 160-164.
18. Andreev V.N., Borovkov A.I., Voinov I.B., Drozdov S.M., Dyadkin A.A., Kazakov M.I., Mikhailov M.V. "Features of aerogas dynamics of the detachable head unit of the emergency rescue system with operating propulsion systems", *Space Engineering and Technologies (Kosmicheskaya tekhnika i tekhnologii)*, 2014, no. 4 (7), pp. 10-20.

Submitted 28.04.2023; revised 15.06.2023

Information about the authors

Vladimir T. Kalugin – Dr. Sc. (Technical), Professor, Dean of the Faculty of Special Mechanical Engineering, Professor of the Department of Dynamics and Flight Control of Rockets and Spacecraft, Bauman Moscow State Technical University (5 2-ya Baumanskaya st., building 1, Moscow 105005, Russia), e-mail: ka-luginvt@bmstu.ru

Maria D. Kalugina – Post-graduate student of the department "Dynamics and flight control of rockets and space vehicles", Bauman Moscow State Technical University (5 2-ya Baumanskaya st., building 1, Moscow 105005, Russia), e-mail: kaluginamd@student.bmstu.ru

Alexander Yu. Lutsenko – Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Department of Dynamics and Flight Control of Rockets and Spacecraft, Bauman Moscow State Technical University (5 2-ya Baumanskaya st., building 1, Moscow 105005, Russia), e-mail: lutsenko@bmstu.ru

Dinara K. Nazarova – Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Department of Dynamics and Flight Control of Rockets and Spacecraft, Bauman Moscow State Technical University (5 2-ya Baumanskaya st., building 1, Moscow 105005, Russia), e-mail: dknazarova@bmstu.ru

Dmitry M. Slobodyanyuk – Cand. Sc. (Technical), Senior Lecturer, Department of Dynamics and Flight Control of Rockets and Spacecraft, Bauman Moscow State Technical University (5 2-ya Baumanskaya st., building 1, Moscow 105005, Russia), e-mail: slobodyanyukdm@bmstu.ru

РЕАЛИЗАЦИЯ ПРОЦЕССОВ СОЗДАНИЯ 3D-АНИМАЦИЙ ДЛЯ ЦИФРОВЫХ МАКЕТОВ ИЗДЕЛИЙ СРЕДСТВАМИ OPEN CASCADE

А.И. Ахлестин, А.Н. Юров, М.И. Чижов

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

Аннотация: 3D-моделирование и анимация необходимы в современных производственных процессах, особенно при создании цифровых макетов изделий. Однако, несмотря на обширные возможности программного обеспечения Open Cascade в области 3D-моделирования, в функционале геометрического ядра отсутствует создание анимации. Рассмотрены методики, позволяющие реализовать процессы создания 3D-анимаций с помощью вспомогательного программного обеспечения – Qt. Создание анимации основано на необходимости постоянного конечного представления объекта. Это означает, что каждое изменение на сцене – будь то перемещение объекта или изменение его свойств – требует немедленного отображения на экране. Это задача требует значительной вычислительной мощности и оптимизации алгоритмов рендеринга. Важным аспектом процесса создания 3D-анимаций для цифровых макетов изделий является синхронизация работы между Open Cascade и Qt. Указанные инструменты были выбраны из-за их гибкости и функциональности. Однако их взаимодействие требует детального контроля и управления. Приводятся примеры сложностей, которые возникли в ходе работы, и предлагаются возможные пути их решения. Это включает в себя вопросы, связанные с совместимостью данных между двумя системами, различия в методах обработки 3D-моделей, а также сложности в визуализации и создании плавной анимации. Также подчеркивается значимость реализации стабильного и эффективного алгоритма конечного представления изображений цифровых моделей, что критично для достижения реалистичного и плавного воспроизведения анимации. Рассматриваются различные подходы к решению этой проблемы, включая использование буферизации и методов оптимизации производительности. Реализация выполнена для операционных систем Windows с 64 разрядной архитектурой

Ключевые слова: 3D-моделирование, анимация, цифровые макеты изделий, Open Cascade, Qt, рендеринг, синхронизация, интеграция, визуализация, алгоритм рендеринга, оптимизация производительности

Введение

В современном мире, где цифровые технологии играют все более важную роль, возникает необходимость в создании усовершенствованных и реалистичных 3D-моделей. Одним из ключевых инструментов в этом процессе является Open Cascade, графическая библиотека, обеспечивающая широкий спектр возможностей для 3D-моделирования. Однако, несмотря на все свои преимущества, Open Cascade сталкивается с ограничением – отсутствием функциональности, необходимой для создания 3D-анимаций.

Анимация в 3D-моделировании дает возможность визуализировать процессы перемещения и обеспечить функциональность моделируемого изделия, что может быть критически важно во многих областях применения, например, в машиностроении, архитектуре, медицинской сфере при изготовлении подвижных протезов и т. д. Вследствие этого, проблема отсутствия инструментов для создания анимаций в Open Cascade требует своего решения.

В данной статье предлагается инноваци-

онный подход к решению этой проблемы, основанный на использовании Open Cascade в связке с Qt - популярной платформой для разработки программного обеспечения. С помощью встроенного в Qt таймера возможно анимировать движение объектов на экране, что открывает новые горизонты для использования Open Cascade.

Стоит отметить, что реализация процессов создания 3D-анимаций требует особого подхода к рендерингу. Он должен быть непрерывным, чтобы обеспечивать плавность анимации и предотвращать скачки изображений. Более того, важно учитывать, что процесс рендеринга должен быть оптимизирован, чтобы обеспечить максимальную производительность.

В целом, использование Open Cascade в сочетании с Qt для создания 3D-анимаций открывает широкие возможности для применения цифровых макетов изделий. Это не только упрощает процесс демонстрации работы изделий, но и позволяет создавать более точные и информативные модели.

Инструменты геометрического ядра для проектного решения

Для создания анимации в функции использован следующий набор классов, входящих в состав Open Cascade и Qt, которые облегчают процесс анимации объектов.

Класс AIS_Shape представляет геометрическую форму для отображения и взаимодействия. Объекты типа AIS_Shape используются для представления отображаемых объектов в контексте визуализации [1].

Класс gp_Vec представляет трехмерный вектор и используется для работы с координатами объектов. В реализации объекты gp_Vec используются для определения начального и конечного положений объектов во время анимации [2].

Класс gp_Trsf представляет преобразование в трехмерном пространстве. gp_Trsf используется для обновления положения объекта во время анимации [3].

Класс QTimer предоставляет функционал для управления временными интервалами и сигналами. Он используется для запуска анимации и обновления положения объектов с определенным временным интервалом [4].

Классы std::random_device, std::mt19937

[5] и std::uniform_real_distribution используются для генерации случайных чисел. Они применяются для генерации случайной точки на поверхности сферы, куда перемещается каждый объект.

Проектирование модуля

Для реализации анимации деталей в цифровых макетах изделий с использованием средств Open Cascade был разработан соответствующий алгоритм. В процессе реализации анимации были задействованы различные инструменты и методы.

Вначале было осуществлено получение всех отображаемых объектов в сцене с помощью функции DisplayedObjects класса AIS_InteractiveContext. Затем произошла итерация по полученной коллекции объектов, и с использованием классов AIS_Shape и AIS_InteractiveObject были выделены только трехмерные модели, которые необходимо было анимировать.

Схема [6] представления визуальных объектов при помощи классов AIS_Shape и AIS_InteractiveObject, изображена на рис. 1.

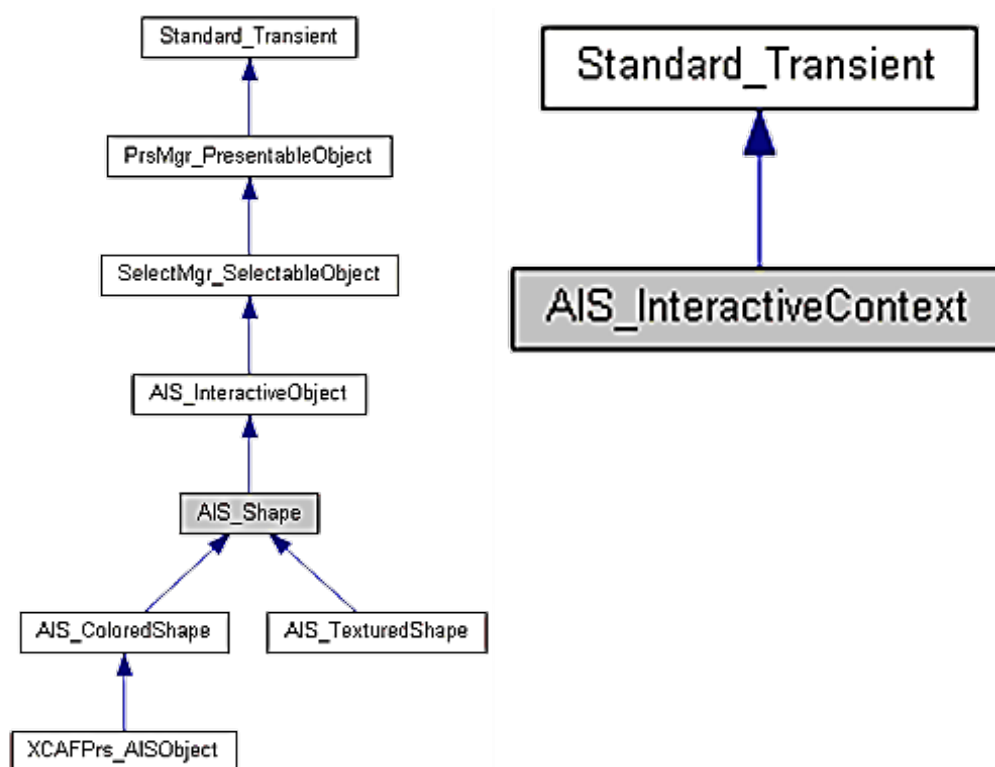


Рис. 1. Представление визуальных объектов

Для создания эффекта разборки было решено перемещать каждую деталь по случайным направлениям. Для этого был использован генератор случайных чисел из стандартной библиотеки C++. Генератор был инициализирован с использованием аппаратного источника случайности, и для каждой детали были сгенерированы случайные координаты точки на поверхности сферы. [7]

Результат работы генератора случайных точек изображен на рис. 2. Для наглядности точки были представлены в виде сфер.

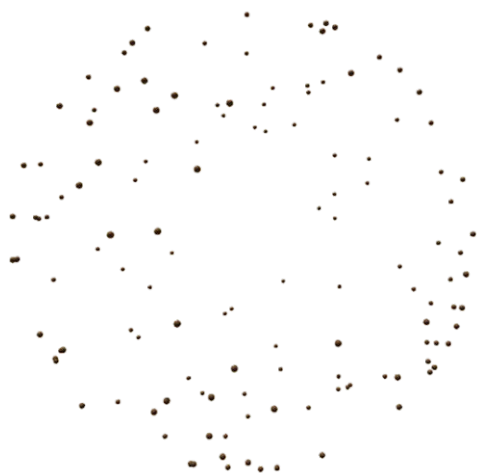


Рис. 2. Визуальное представление случайных точек

Для перемещения деталей в анимации использовался класс `gr_Vec`, который представляет трехмерный вектор и обеспечивает операции над векторами, такие как сложение и умножение на скаляр. С помощью вычисленных случайных координат и операций с векторами детали последовательно перемещались от своих исходных позиций к случайным конечным точкам на поверхности сферы.

Для обновления позиции каждой детали во время анимации использовался класс `gr_Trnsf`, представляющий трехмерное преобразование. Класс `AIS_Shape` содержит методы для работы с локальным преобразованием объекта, и с использованием данных методов позиция каждой детали обновлялась на каждом

шаге анимации.

Для управления временными интервалами и обновления анимации был задействован класс `QTimer`. `QTimer` предоставляет возможность создания таймеров и запуска функций по истечении определенного времени.

В рамках реализации анимации деталей, объект `QTimer` был создан и связан с функцией, отвечающей за обновление позиции детали. По истечении определенного временного интервала, таймер срабатывал и вызывал функцию-обработчик, которая обновляла позицию текущей детали и проверяла условия для перехода к следующей детали.

Использование `QTimer` позволило создать плавную анимацию, где каждая деталь перемещалась постепенно от своего исходного положения к новой позиции на поверхности сферы.

Для корректного отображения анимации в Open Cascade с использованием Qt был внедрен потоковый рендеринг. Потоковый рендеринг позволяет выполнять рендеринг сцены в отдельном потоке, что предотвращает блокировку пользовательского интерфейса и обеспечивает более плавную и отзывчивую анимацию.

В процессе инициализации OpenGL контекста в классе был создан и активирован отдельный поток рендеринга с помощью класса `QThread`. Это позволило осуществить рендеринг сцены в фоновом режиме, не блокируя основной поток выполнения.

Для синхронизации работы между основным потоком и потоком рендеринга использовался механизм сигналов и слотов Qt. В основном потоке был определен сигнал, который сигнализировал о необходимости обновления окна. В классе потока рендеринга был определен соответствующий слот, который принимал сигнал и выполнял обновление сцены и отрисовку.

Упрощенная схема всей функции представлена на рис. 3.

На рис. 4 можно увидеть сборку до применения алгоритма анимации, а на рис. 5 – после.

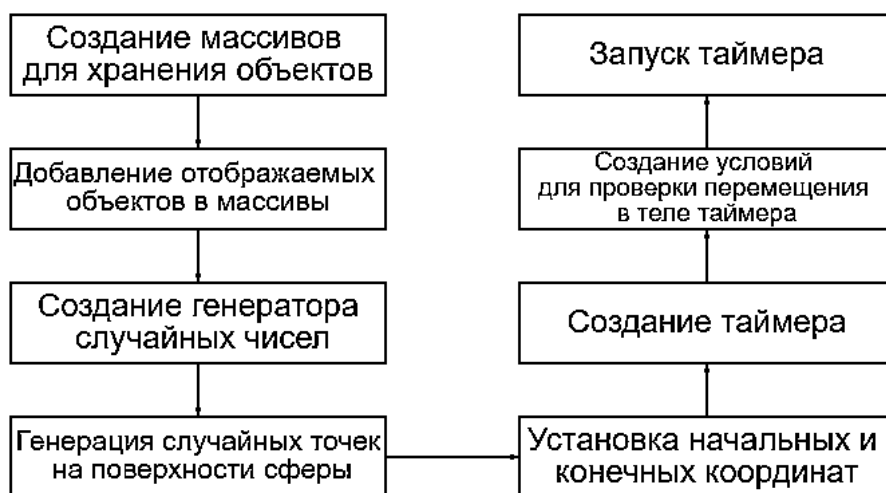


Рис. 3. Схема алгоритма



Рис. 4. Целевая сборка



Рис. 5. Целевая сборка после применения анимации разборки

Заключение

Разработанная функция предоставляет возможность создавать усовершенствованные и реалистичные анимации, работу и функциональность моделируемых изделий в динамике.

С помощью данной функции и интеграции Open Cascade с платформой Qt, пользователи получают широкие возможности для эффективного и гибкого создания 3D-анимаций, упрощая процесс демонстрации работы изделий и создавая более точные и информативные модели.

Литература

1. AIS_Shape Class Reference // Open CASCADE Technology URL: https://dev.opencascade.org/doc/refman/html/class_a_i_s__shape.html (дата обращения: 15.05.2023).
2. gp_Vec Class Reference // Open CASCADE Technology URL: https://dev.opencascade.org/doc/refman/html/class_gp__vec.html (дата обращения: 15.05.2023).
3. gp_Trsf Class Reference // Open CASCADE Technology URL: https://dev.opencascade.org/doc/refman/html/class_gp__trsf.html (дата обращения: 15.05.2023).
4. QTimer Class Reference // QT Documentation URL: <https://doc.qt.io/qt-6/qtimer.html> (дата обращения: 15.05.2023).
5. Matsumoto, M., Kurita, Y. Twisted GFSR Generators // Research Institute for Mathematical Sciences Kyoto University. - 1992. - С. 179-194.
6. AIS_InteractiveContext Class Reference // Open CASCADE Technology URL: https://dev.opencascade.org/doc/refman/html/class_a_i_s__interactive_context.html (дата обращения: 15.05.2023).
7. Копытов Н.П. Равномерное распределение точек на поверхностях и его применение в исследованиях структурно-неоднородных сред: дис. кандидата физ. мат. наук: 05.13.18. Екатеринбург, 2015. 121 с.

Информация об авторах

Ахлестин Андрей Игоревич – студент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: ahlestin.and@yandex.ru, тел. +7(953)611-57-79

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

Чижов Михаил Иванович – д-р техн. наук, профессор, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: kitp@vorstu.ru, тел. +7(910)240-87-65

IMPLEMENTATION OF 3D ANIMATION CREATION PROCESSES FOR DIGITAL PRODUCT LAYOUTS BY MEANS OF OPENCASCADE

A.I. Akhlestin, A.N. Yurov, M.I. Chizhov

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract: 3D modeling and animation are necessary in modern production processes, especially when creating digital product layouts. However, despite the extensive capabilities of the Open Cascade software in the field of 3D modeling, there is no animation creation in the functionality of the geometric core. The paper considers techniques that allow to implement the processes of creating 3D animations using the auxiliary software - Qt. The creation of animation is based on the need for a constant final representation of the object. This means that every change in the scene- whether it's moving an object or changing its properties-requires immediate display on the screen. This is a task that requires significant computing power and optimization of rendering algorithms. Additionally, an important aspect of the process of creating 3D animations for digital product layouts is the synchronization of work between Open Cascade and Qt. These tools were chosen for their flexibility and functionality. However, their interaction requires detailed control and management. The article provides examples of difficulties that have arisen in the course of work, and suggests possible ways to solve them. This includes issues related to data compatibility between the two systems, differences in 3D model processing methods, as well as difficulties in visualizing and creating smooth animations. The importance of implementing a stable and efficient algorithm for the final representation of digital model images is also emphasized, which is critical for achieving realistic and smooth animation reproduction. The article discusses various approaches to solving this problem, including the use of buffering and performance optimization methods. The implementation is made for Windows operating systems with 64-bit architecture

Key words: 3D modeling, animation, digital product layouts, Open Cascade, Qt, rendering, synchronization, integration, visualization, rendering algorithm, performance optimization

References

1. “AIS_Shape Class Reference”, *Open CASCADE Technology*, available at: https://dev.opencascade.org/doc/refman/html/class_a_i_s_shape.html (accessed: 15.05.2023).
2. “gp_Vec Class Reference”, *Open CASCADE Technology*, available at: https://dev.opencascade.org/doc/refman/html/classgp_vec.html (accessed: 05/15/2023).
3. “gp_Trnsf Class Reference”, *Open CASCADE Technology*, available at: https://dev.opencascade.org/doc/refman/html/classgp_trnsf.html (accessed: 15.05.2023).
4. QTimer Class Reference // QT Documentation URL: <https://doc.qt.io/qt-6/qtimer.html> (accessed: 05/15/2023).
5. Matsumoto M., Kurita Y. “Twisted GFSR Generators”, Research Institute for Mathematical Sciences Kyoto University, 1992, pp. 179-194.
6. “AIS_InteractiveContext Class Reference”, *Open CASCADE Technology*, available at: https://dev.opencascade.org/doc/refman/html/class_a_i_s_interactive_context.html (accessed: 15.05.2023).
7. Kopytov N.P. “Uniform distribution of points on surfaces and its application in studies of structurally inhomogeneous media” (“Ravnomernoye raspredeleniye tochek na poverkhnostyakh i yego primeneniye v issledovaniyakh strukturno-neodnorodnykh sred”): Cand. of Physical and Math. Sci. diss., 05.13.18, Yekaterinburg, 2015, 121 p.

Submitted 19.05.2023; revised 21.06.2023

Information about the authors

Andrey I. Akhlestin – Student, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: ahlestin.and@yandex.ru , tel.: +7(953)611-57-79

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

Mikhail I. Chizhov – Doctor of Technical Sciences, Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: kitp@vorstu.ru , tel.: +7(910)240-87-65

КОНЦЕПЦИЯ ОБОБЩЕННЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ СОСТОЯНИЙ В ОЦЕНКЕ ВЫНУЖДЕННЫХ ДВИЖЕНИЙ МЕХАНИЧЕСКИХ КОЛЕБАТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

А.В. Елисеев^{1,2}, Н.К. Кузнецов², А.С. Миронов¹

¹Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Россия

²Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия

Аннотация: основная цель – развитие системного подхода в рамках структурного анализа и математического моделирования для решения задач, связанных с обеспечением безопасности и эффективности работы технических систем, подлежащие расчету с помощью механических колебательных структур с сосредоточенными параметрами. Под структурным подходом понимается методология решения задач, основанная на сопоставлении колебательным структурам схем динамически эквивалентных систем автоматического управления. Подход предполагает разбиение объекта на составляющие элементы и определение связей. Элементами системы являются твердые тела и пружины. Рассматриваются системы, обладающие линейными свойствами. В качестве внешних возмущающих факторов выступают связные силовые колебания. Оценка состояния системы производится на основе податливости, изменяющейся в зависимости от частоты силового воздействия. Показано, что в механических колебательных системах множество обобщенных динамических состояний, связанных с характеристиками внешних сил и с координатами точек, определяющих динамическое соответствие, может быть выражено в виде карты динамических инвариантов. Одним из ключевых результатов работы является то, что задача оценки, контроля и формирования динамических состояний системы может быть проведена с помощью декомпозиции полной совокупности состояний на конечное число классов динамических состояний, обладающих фиксированными динамическими инвариантами, что позволяет реализовать системный подход к оценке системы с учетом несколькими параметров

Ключевые слова: структурные методы математического моделирования, динамическое гашение колебаний, динамическая податливость, связность силовых возмущений, колебание твердого тела, обобщенные динамические состояния, динамические инварианты

Введение

Обеспечение безопасности технологических и транспортных объектов, находящихся в условиях динамических нагрузок, является одной из ключевых проблем, на разрешение которых направлено развитие научно-методологических основ решения широкого круга задач по управлению техническими объектами. Задачи, связанные с динамикой вынужденных колебаний технических объектов, достаточно сложны и их решения зависят от выбора расчетных схем, основных допущений и методов [1-6].

В ряде случаев для отображения существенных динамических особенностей технических объектов, подверженных интенсивным вибрационным воздействиям, получили широкое применение механические структуры с конечным числом степеней свободы, совершающие малые установившиеся колебания в предположении несущественности сил трения.

Вынужденные колебания системы в ряде постановок задач могут быть вызваны функционально зависимыми синфазными гармониче-

скими силовыми возмущениями, зависимость которых в простейшем случае может быть задана с помощью коэффициента связности. В физическом смысле связные возмущения могут отображать характер воздействия со стороны вибраторов, обеспечивающих реализацию режимов движений рабочих органов вибрационных технологических машин [7].

Массоинерционные параметры твердого тела, коэффициенты упругих элементов, связность силовых возмущений, частоты внешних воздействий определяют амплитуды вынужденных колебаний механической системы. В зависимости от набора фиксированных параметров системы установившаяся форма движений точки твердого тела в сравнении с внешним возмущением определяет динамическое состояние, которое может быть охарактеризовано с помощью динамической податливости. Для фиксированного набора параметров динамическая податливость в точке твердого тела определяется частотой внешних возмущений. Нулевое значение динамической податливости обозначает обнуление координаты колебания точки твердого тела; бесконечное значение динамической податливости связано с эффектом резонанса. Динамическая податливость может

принимать не только нулевые и бесконечные значения, которые отображают критические состояния, но также положительные и отрицательные значения, которые могут приводить к различным формам динамического взаимодействия между элементами механической колебательной системы.

Положительные значения динамической податливости интерпретируются как положительная форма динамического взаимодействия, отображающая совпадение направлений изменения смещения точки твердого тела с изменением внешнего силового возмущения; отрицательные значения интерпретируются как отрицательная форма динамических взаимодействий, обозначающая, что изменения смещения точки твердого тела происходят в противоположном направлении по сравнению с изменением внешнего силового возмущения.

В рамках обобщенных представлений динамическая податливость системы может быть охарактеризована не только через количество критических состояний и интервалов знакоопределенных форм динамических взаимодействий, но и с помощью совокупности динамических состояний, которые отражает существенные характеристики податливости на частотном интервале. Изменение показателей, отражающих влияние внешних факторов на систему с учетом положение точки, на основе которой оценивается податливость, приводит к изменению обобщенных динамических состояний, которые определяют количество резонансов, частот обнуления, положительных и отрицательных форм.

Некоторые исследования показывают, что изменение коэффициента связности внешних возмущений в системе при наличии двух степеней свободы может приводить к эффекту совпадения частоты динамического гашения и собственной частоты. Когда соответствующие частоты совпадают, системы с двумя степенями свободы приобретает признаки системы с одной степенью свободы. Возможен и обратный эффект, когда система с одной степенью свободы в результате изменения связности внешних возмущений приобретает признаки системы, обладающей двумя степенями свободы, что выражается в появлении частоты динамического гашения и дополнительного резонанса.

В рамках представлений об обобщенных динамических состояниях эффекты изменения признаков, свойственных системам с одной и двумя степенями свободы, могут быть интерпретированы как переходы системы из одного обобщенного динамического состояния в другое.

Разбиение всевозможных динамических состояний на классы, обладающие динамической спецификой, может быть рассмотрено как регуляризация достаточно сложной совокупности динамических состояний. Наличие общего метода разбиения сложной совокупности динамических состояний на конечное число классов может быть рассмотрено как развитие системного подхода к разработке технологии управления динамикой технических объектов с помощью специальных методов и средств. Это особенно актуально для систем, находящихся в условиях связанных нагружений силового характера, где необходимо варьировать настроечные параметры для обеспечения динамических эффектов.

Особенности анализа технических объектов на основе механических колебательных систем заключается в том, что свойства элементов системы начинают реагировать по-разному на различные частоты внешнего воздействия.

В рамках структурного подхода динамические состояния технического объекта могут быть оценены на основе отношения амплитуд смещений и сил, представляющего собой частотно-зависимую податливость [8-11]. Учет связности силовых возмущений с помощью коэффициента, размещенного в правой части алгебраической системы, позволяет охватить более широкий класс задач и включить в анализ настроечные параметры для проявления специфических динамических эффектов. В рамках структурных представлений передаточные функции отображают динамические податливости, чувствительные к коэффициентам связности и частотам внешних синфазных возмущений силовой природы. Динамическая податливость механических систем может изменяться в зависимости от частоты внешних возмущений и принимать различные значения: нулевые, обратные к нулевым, положительные и им противоположные. Множество частот, для которых определены динамические податливости, разбивается на интервалы и точки, в которых податливости, либо равны нулю, либо равны бесконечности, либо принимают положительные или отрицательные значения. Упорядоченный набор числа частотных интервалов и граничных частот представляет собой характеристику совокупности динамических состояний, не зависящую от частоты. Эти обобщенные характеристики состояний могут сохраняться при изменении силовых особенностей и положений точек измерений твердого тела, что делает их инвариантами семейств механических колебательных систем

[12]. Представления об инвариантах определяют критерии разбиения бесконечного семейства установившихся форм движений и критических состояний на конечное число классов с фиксированным количеством динамических особенностей в виде резонансов, частот обнуления и форм динамических взаимодействий. В свою очередь количество динамических особенностей в зависимости, либо от коэффициента связности, либо от координаты точки, используемой для определения динамической податливости, представляют собой кусочно-постоянную интегральную характеристику семейства механических колебательных систем [13].

В ряде работ уже нашли отражения методы определения обобщенных состояний цепных механических колебательных систем. Одним из таких методов является использование частотной функции обнуления, которая позволяет разделить параметрическое семейство динамических состояний на классы с различным числом динамических особенностей, таких как резонансы, частоты обнуления и знакоопределенные формы. Эти классы не пересекаются и могут сохраняться при изменении особенностей силовых возмущений и измерительных точек твердого тела, что делает их своеобразными инвариантами или индикаторами локальных свойств системы [14].

Однако, для механических колебательных систем, состоящих из твердых тел, которые находятся на упругих опорах и подвержены связным силовым возмущениям, методология определения обобщенных динамических состояний в зависимости от двух параметров все еще не разработана достаточно полно.

Статья посвящается развитию понятий и методов, позволяющих оценивать совокупность динамических состояний, отличающихся количеством резонансов, частот обнуления и форм динамических взаимодействий.

Общие положения. Постановка задачи

Предполагается, что динамический расчет технического объекта может быть произведен на основе механической колебательной системы в виде твердого тела, установленного на пружины. При воздействии двух внешних гармонических силовых возмущений одинаковой фазы и частоты твердое тело совершает установившиеся малые вертикальные поступательные и угловые вращательные колебательные движения в окрестности статического положения

равновесия (рис. 1). Внешние силовые возмущения функционально

$$Q_2 = \gamma Q_1, \quad (1)$$

где γ – коэффициент связности. Точки A и B крепления упругих элементов находятся на расстояниях l_1 и l_2 от центра тяжести $t.O$ твердого тела. На линии AB выбирается точка $t.H$ с координатой h , которая используется для оценки динамической податливости системы. Для фиксированного коэффициента связности γ частота ω внешних возмущений определяет динамическое состояние твердого тела.

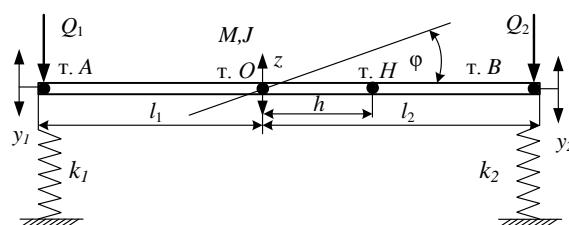


Рис. 1. Механическая колебательная система: M – масса тела, J – момент инерции, k_1, k_2 – жесткости пружин, Q_1, Q_2 – силовые возмущения

Внешние возмущения, зависящие от частоты, могут вызывать различные динамические режимы, которые отличаются наличием неподвижных точек, сонаправленностью движений пар точек, расположенных на твердом теле, наличием критических амплитуд. Перечисленные особенности движений могут быть охарактеризованы с помощью отношения амплитуд установившихся форм движений точек твердых тел к амплитудам силовых возмущений, отображающего понятие податливости.

Задача состоит в разработке метода оценки совокупностей состояний на основе динамических податливостей систем, образованных твердыми телами, отличающегося тем, что совокупность динамических состояний разбивается на группы с фиксированным числом особенностей, которые характеризуются числом критических состояний и числом форм динамических взаимодействий.

Математическая модель

Движение твердого тела рассматривается одновременно в двух системах обобщенных координат $\{y_1, y_2\}$ и $\{\varphi, z\}$, где y_1 и y_2 – смещения точек твердого тела, φ – угол поворота,

z – отклонение центра тяжести (рис. 1). Системы координат $\{, y_{12}\}$ и $\varphi\{, z\}$ связаны равенствами:

$$\begin{cases} z = ay_1 + by_2 \\ \varphi = cy_2 - cy_1 \end{cases}, \quad (2)$$

$$\begin{cases} y_1 = z - \varphi l_1 \\ y_2 = z + \varphi l_2 \end{cases}, \quad (3)$$

где $a = l_2/(l_1 + l_2); b = l_1/(l_1 + l_2); c = 1/(l_1 + l_2)$.

Потенциальная и кинетическая энергий:

$$\Pi = k_1 y_1^2 / 2 + k_2 y_2^2 / 2, \quad (4)$$

$$T = M \dot{z}^2 / 2 + J \varphi^2 / 2. \quad (5)$$

Уравнения Лагранжа 2-ого рода в обобщенных координатах $\{y_1, y_2\}$ имеет вид:

$$\begin{cases} [Ma^2 + Jc^2] \ddot{y}_1 + k_1 y_1 + [Mab - Jc^2] \ddot{y}_2 = Q_1 \\ [Mab - Jc^2] \ddot{y}_1 + [Mb^2 + Jc^2] \ddot{y}_2 + k_2 y_2 = Q_2 \end{cases}. \quad (6)$$

Система дифференциальных уравнений (6) после преобразований Лапласа:

$$\begin{cases} [Ma^2 p^2 + Jc^2 p^2 + k_1] \bar{y}_1 + [Mab p^2 - Jc^2 p^2] \bar{y}_2 = \bar{Q}_1 \\ [Mab p^2 - Jc^2 p^2] \bar{y}_1 + [Mb^2 p^2 + Jc^2 p^2 + k_2] \bar{y}_2 = \bar{Q}_2 \end{cases}. \quad (7)$$

Алгебраическая система (7) на основе известных методов может быть преобразована в структурную схему (рис. 2), где $p = j\omega$ – комплексная переменная, $j = \sqrt{-1}$, изображение Лапласа представлено символом «-» над переменными [15].

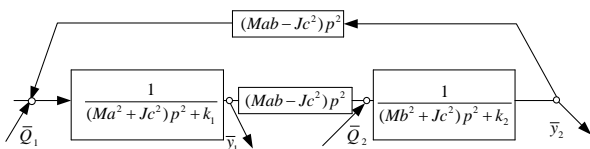


Рис. 2. Структурная схема механической колебательной системы на рис. 1

Передаточные функции, отображающие динамические податливости, имеют вид:

$$W_{11}(p, \gamma) = \frac{\bar{y}_1}{Q_1} \Big|_{\bar{Q}_1 \neq 0} = \frac{[(Mb^2 + Jc^2)p^2 + k_2] - \gamma}{- \gamma (Mab - Jc^2)p^2} / A(p), \quad (8)$$

$$W_{21}(p, \gamma) = \frac{\bar{y}_2}{Q_1} \Big|_{\bar{Q}_1 \neq 0} = \frac{[(Ma^2 + Jc^2)p^2 + k_1] \gamma - \gamma}{- (Mab - Jc^2)p^2} / A(p), \quad (9)$$

$$A(p) = ((Ma^2 + Jc^2)p^2 + k_1)((Mb^2 + Jc^2)p^2 + k_2) - ((Mab - Jc^2)p^2)^2$$

характеристический многочлен с корнями σ_1, σ_2 .

На основе передаточных функций (8)-(9) может быть определена динамическая податливость произвольной точки твердого тела.

Оценка динамических состояний в зависимости от параметров системы

Для анализа динамической податливости твердого тела с учетом т. Н построена передаточная функция, зависящая от координаты h :

$$W_h(p) \Big|_{\bar{Q}_1=0} = \frac{\bar{y}_h}{Q_1} = (a - ch) \frac{\bar{y}_1}{Q_1} + (b + ch) \frac{\bar{y}_2}{Q_1}. \quad (10)$$

Передаточная функция (10), зависящая от коэффициента γ и координаты h , отображает распределение динамических состояний по точкам твердого тела с учетом характера связности:

$$A_h(\omega, \gamma, h) = \frac{\bar{y}_h}{Q_1}(p, \gamma, h) \Big|_{p=j\omega}. \quad (11)$$

Для каждого значения γ и h амплитудно-частотная характеристика (11) представляет собой совокупность положительных ветвей, частот обнуления и частот резонансов, которая может быть отображена графом, представляющим собой своеобразный динамический инвариант, не меняющийся при выполнении определенных условий на параметры системы (рис. 3) [14].

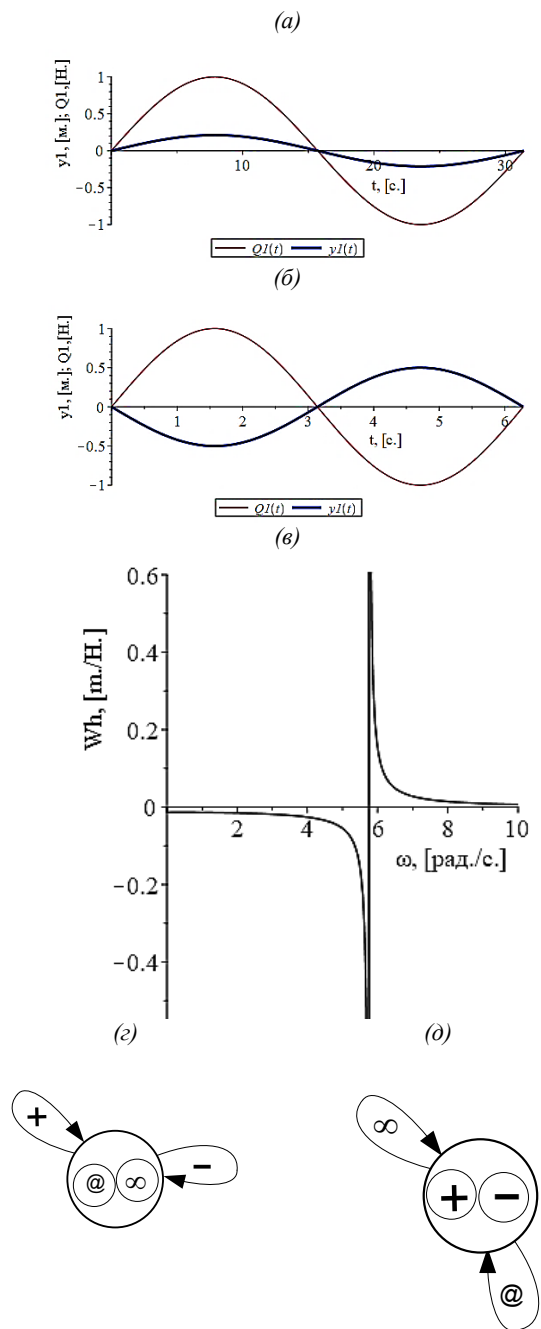


Рис. 3. Представление динамических состояний в виде графов: (а) положительная сонаправленная форма; (б) отрицательная разнонаправленная форма; (в) отрицательная и положительная ветви; (г) динамический инвариант, отображающий знакопостоянные формы; (д) динамический инвариант, отображающий резонанс

Существенные особенности динамических состояний отображаются с помощью количества частот обнуления амплитуд, резонансов и знакоопределенных форм динамических взаимодействий. Положительная форма динамических взаимодействий отображает сонаправленность смещений и силовых возмущений

(рис. 3,а). Отрицательная форма отображает противоположную направленность смещений и силовых возмущений (рис. 3,б). На графе, отображающем динамический инвариант, соответствующие положительная и отрицательная формы взаимодействий представляются условно «положительными» и «отрицательными» петлями (рис. 3, г) [13-14].

Все возможные динамические состояния механической колебательной системы, зависящей от параметров, могут быть представлены в виде объединения непересекающихся множеств, обладающих фиксированными динамическими инвариантами. Построение системы таких множеств может быть выполнено на основе функции, представляющую собой частоту обнуления числителя передаточной функции:

$$\omega^2(\gamma, h) = \frac{h(k_1 c \gamma - c k_2) + (b k_1 \gamma + a k_2)}{h(M a c \gamma - M b c) + (J c^2 \gamma + J c^2)}. \quad (12)$$

Функция (12) позволяет построить совокупности динамических состояний, обладающих фиксированными динамическими инвариантами (рис. 4).

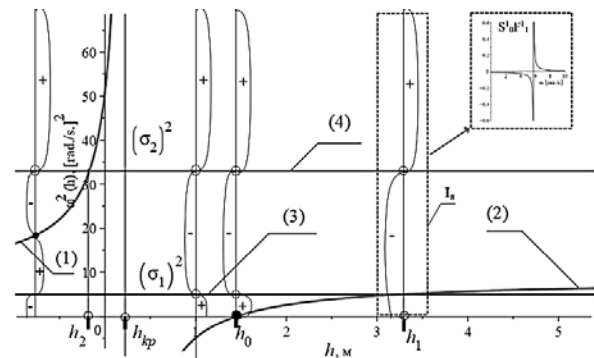


Рис. 4. Определение граничных значений координат для коэффициента связности $\gamma = 0$: h_1, h_2, h_0, h_{kp} – граничные значения координаты точки Н, 1 – левая ветвь частотной функции обнуления, 2 – правая ветвь частотной функции обнуления, 3 – первая собственная частота, 4 – вторая собственная частота

На основе частотной функции может быть построено разбиение множества координат h точек твердого тела интервала и точки, характеристики динамических инвариантов которой остаются неизменными (таблица). Динамический инвариант может быть представлен характеристикой $S_l^k F_n^m$, где k, l, m, n – количества частот резонансов, частот обнуления амплитуд, положительных и отрицательных форм, соответственно.

Распределение динамических инвариантов по координате h точки твердого тела

	I	II	III	IV	V
I_1	$h < h_2$			$S_1^2 F_2^2$	J_7
I_2	$h = h_2$			$S_0^1 F_1^1$	J_3
I_3	$h_2 < h < h_{kp}$			$S_1^2 F_2^2$	J_7
I_4	$h = h_{kp}$			$S_0^2 F_1^2$	J_3
I_5	$h_{kp} < h < h_0$			$S_0^2 F_1^2$	J_3
I_6	$h = h_0$			$S_1^2 F_1^2$	J_6
I_7	$h_0 < h < h_1$			$S_1^2 F_2^2$	J_7
I_8	$h = h_1$			$S_0^1 F_1^1$	J_3
I_9	$h_1 < h$			$S_1^2 F_2^2$	J_7

Для фиксированного коэффициента связности γ динамический инвариант может быть охарактеризован с помощью графиков частотных характеристик k, l, m, n или их суммы, рассматриваемых как функций аргумента h (рис. 5,а).

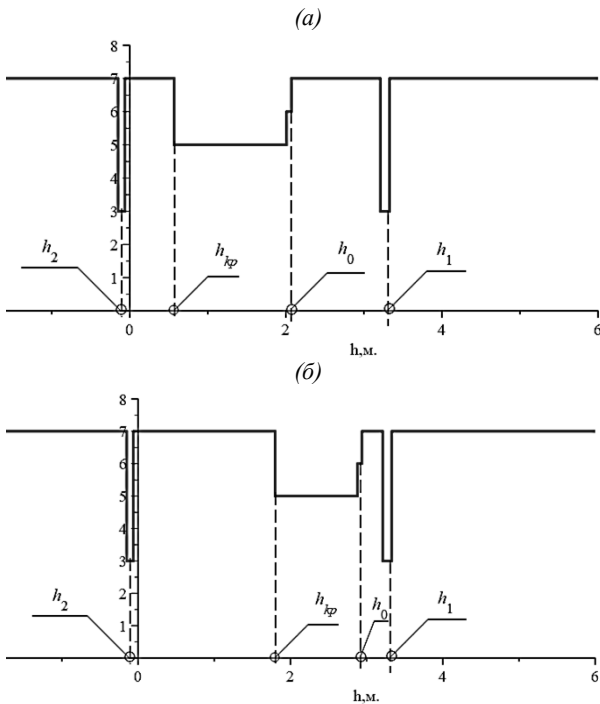


Рис. 5. Характеристики динамических особенностей твердого тела в зависимости от коэффициента связности: а) $\gamma = 0$; б) $\gamma = 0,3$

Варьирование связности внешних возмущений приводит к перестройке совокупности динамических состояний системы (рис. 5,б).

Построение карты динамических инвариантов

Для каждой пары коэффициента связности и координаты точки твердого тела можно определить совокупность особенностей, что позволяет построить распределение динамических инвариантов по точкам плоскости параметров, представляющее собой своеобразную карту динамических инвариантов. Карта динамических инвариантов (рис. 6) содержит области $\{\Omega_{ij}\}$, границы $\{\Gamma_{ij}\}$ и узлы $\{A_{ij}\}$, в которых количества динамических особенностей в виде резонансов, режимов обнулений и знакоопределенных форм остаются неизменными.

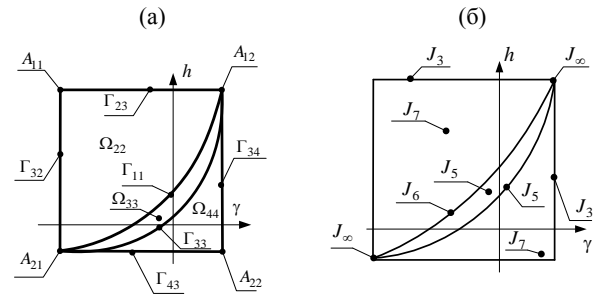


Рис. 6. Карта динамических инвариантов: (а) – фрагмент карты динамический инвариантов, образованной областями Ω_{ij} , границами Γ_{kl} и точками A_{mn} ; (б) – распределение интегральных характеристик по областям, границам и точкам плоскости параметров

Границы $\Gamma_{11}, \Gamma_{33}, \Gamma_{23}, \Gamma_{43}$ карты динамических инвариантов могут быть определены графиками функций $h_0(\gamma), h_{kp}(\gamma), h_1(\gamma), h_2(\gamma)$, полученных на основе частотной функции (12):

$$h_0(\gamma) = -(bk_1\gamma + ak_2)/c(k_1\gamma - k_2), \quad (13)$$

$$h_{kp}(\gamma) = -Jc^2(\gamma + 1)/Mc(a\gamma - b), \quad (14)$$

$$h_1(\gamma) = -\frac{(Jc^2\gamma + Jc^2)\sigma_1^2 - (bk_1\gamma + ak_2)}{(Mac\gamma - Mbc)\sigma_1^2 - (k_1\gamma c - k_2c)}, \quad (15)$$

$$h_2(\gamma) = -\frac{(Jc^2\gamma + Jc^2)\sigma_2^2 - (bk_1\gamma + ak_2)}{(Mac\gamma - Mbc)\sigma_2^2 - (k_1\gamma c - k_2c)}. \quad (16)$$

Функция $h_0(\gamma)$ сопоставляет коэффициенту связности γ координату твердого тела, для которой частота обнуления амплитуды колебания равна нулю; $h_{kp}(\gamma)$ определяет координату твердого тела, для которой частота обнуления амплитуды колебания неограниченно велика; $h_1(\gamma)$ определяет координату твердого тела, для которой частота обнуления совпадает с первой

собственной частотой σ_2 , а $h_1(\gamma)$ – со второй σ_2 . Относительное положение графиков функций $h_0(\gamma)$, $h_{кр}(\gamma)$, $h_1(\gamma)$, $h_2(\gamma)$ на плоскости параметров (γ, h) позволяет определить карту распределения динамических особенностей.

Можно показать, что функции $h_1(\gamma)$, $h_2(\gamma)$, независимой переменной γ представляют собой константы.

Теорема. Пусть $\omega^2(\gamma, h)$ частотная функция обнуления, σ_1, σ_2 – собственные частоты, тогда функции $h_1(\gamma)$, $h_2(\gamma)$, определяемые неявно $\omega^2(\gamma, h_1(\gamma)) = \sigma_1^2$, $\omega^2(\gamma, h_2(\gamma)) = \sigma_2^2$, могут быть представлены в виде констант:

$$h_1(\gamma) = \frac{a - \lambda_1 b}{c(1 + \lambda_1)}, \quad (17)$$

$$h_2(\gamma) = \frac{a - \lambda_2 b}{c(1 + \lambda_2)}, \quad (18)$$

где

$$\lambda_1 = \frac{\sigma_1^2 (Mab - Jc^2)}{\sigma_1^2 (Mb^2 + Jc^2) - k_2}, \quad (19)$$

$$\lambda_2 = \frac{\sigma_2^2 (Mab - Jc^2)}{\sigma_2^2 (Mb^2 + Jc^2) - k_2}. \quad (20)$$

Доказательство. Собственные частоты σ_1, σ_2 системы могут быть определены из условия равенства нулю определителя:

$$\begin{vmatrix} k_1 - \sigma^2 (Ma^2 + Jc^2) & -\sigma^2 (Mab - Jc^2) \\ -\sigma^2 (Mab - Jc^2) & k_2 - \sigma^2 (Mb^2 + Jc^2) \end{vmatrix} = 0. \quad (21)$$

Равенство определителя нулю (21) может быть интерпретировано как линейная зависимость столбцов матрицы для частоты σ_1 :

$$k_1 - \sigma_1^2 (Ma^2 + Jc^2) = -\lambda_1 \sigma_1^2 (Mab - Jc^2), \quad (22)$$

$$-\sigma_1^2 (Mab - Jc^2) = \lambda_1 (k_2 - \sigma_1^2 (Mb^2 + Jc^2)) \quad (23)$$

или для частоты σ_2 :

$$k_1 - \sigma_2^2 (Ma^2 + Jc^2) = -\lambda_2 \sigma_2^2 (Mab - Jc^2), \quad (24)$$

$$-\sigma_2^2 (Mab - Jc^2) = \lambda_2 (k_2 - \sigma_2^2 (Mb^2 + Jc^2)). \quad (25)$$

Функция (10) представляется в виде:

$$W_h(j\omega) = \frac{\begin{vmatrix} (a - ch) & 1 & -\omega^2 (Mab - Jc^2) \\ \gamma & -\omega^2 (Mb^2 + Jc^2) + k_2 & \\ + (b + ch) & -\omega^2 (Ma^2 + Jc^2) + k_1 & 1 \\ & -\omega^2 (Mab - Jc^2) & \gamma \end{vmatrix} +}{\begin{vmatrix} -\omega^2 (Ma^2 + Jc^2) + k_1 & -\omega^2 (Mab - Jc^2) \\ -\omega^2 (Mab - Jc^2) & -\omega^2 (Mb^2 + Jc^2) + k_2 \end{vmatrix}} \quad (26)$$

Функция $\omega^2(\gamma, h)$ неявно определяется путём приравнивания числителя амплитудно-частотной характеристики (26) к нулю:

$$\begin{vmatrix} (a - ch) & 1 & -\omega^2(\gamma, h)(Mab - Jc^2) \\ \gamma & -\omega^2(\gamma, h)(Mb^2 + Jc^2) + k_2 & \\ + (b + ch) & -\omega^2(\gamma, h)(Ma^2 + Jc^2) + k_1 & 1 \\ & -\omega^2(\gamma, h)(Mab - Jc^2) & \gamma \end{vmatrix} + = 0. \quad (27)$$

Функции $h_i(\gamma)$, $i = 1, 2$, выраженные из условий (27), принимают явный вид:

$$h_i(\gamma) = \frac{\begin{vmatrix} a & 1 & -\sigma_i^2 (Mab - Jc^2) \\ \gamma & k_2 - \sigma_i^2 (Mb^2 + Jc^2) & \\ + b & k_1 - \sigma_i^2 (Ma^2 + Jc^2) & 1 \\ & -\sigma_i^2 (Mab - Jc^2) & \gamma \end{vmatrix} +}{\begin{vmatrix} c & 1 & -\sigma_i^2 (Mab - Jc^2) \\ \gamma & k_2 - \sigma_i^2 (Mb^2 + Jc^2) & \\ -c & k_1 - \sigma_i^2 (Ma^2 + Jc^2) & 1 \\ & -\sigma_i^2 (Mab - Jc^2) & \gamma \end{vmatrix} -} \quad (28)$$

Учитывая линейную зависимость столбцов (22)-(25) запишем (28) в виде:

$$h_i(\gamma) = \frac{\begin{vmatrix} a & 1 & -\sigma_i^2 (Mab - Jc^2) \\ \gamma & k_2 - \sigma_i^2 (Mb^2 + Jc^2) & \\ + b & -\lambda_i \sigma_i^2 (Mab - Jc^2) & 1 \\ & \lambda_i (-\sigma_i^2 Mb^2 + Jc^2) + k_2 & \gamma \end{vmatrix} +}{\begin{vmatrix} c & 1 & -\sigma_i^2 (Mab - Jc^2) \\ \gamma & k_2 - \sigma_i^2 (Mb^2 + Jc^2) & \\ -c & -\lambda_i \sigma_i^2 (Mab - Jc^2) & 1 \\ & \lambda_i (k_2 - \sigma_i^2 (Mb^2 + Jc^2)) & \gamma \end{vmatrix} -} \quad (29)$$

После сокращения числителя и знаменателя на множитель:

$$\begin{vmatrix} 1 & (Mab - Jc^2)p_i^2 \\ \gamma & (Mb^2 + Jc^2)p_i^2 + k_2 \end{vmatrix} \quad (30)$$

выражения (29) принимают вид:

$$h_1(\gamma) = \frac{a - \lambda_1 b}{c(1 + \lambda_1)}, \quad h_2(\gamma) = \frac{a - \lambda_2 b}{c(1 + \lambda_2)}, \quad (31)$$

где λ_1 и λ_2 определяются условиями (23) и (25) соответственно.

Таким образом, показано, что функции $h_i(\gamma)$, $i=1,2$ (31) не зависят от γ . Теорема доказана.

На основании доказанной теоремы можно сделать предположение о том, о том, что плоскость параметров γ и h разбивается на области с одинаковыми динамическими инвариантами посредством границ, которые являются гиперболами $h_0(\gamma)$, $h_{кр}(\gamma)$, горизонтальными линиями $h_1(\gamma)$, $h_2(\gamma)$ и вертикальными прямыми, проходящими через точки пересечения графиков $h_0(\gamma)$, $h_{кр}(\gamma)$.

Построенная для локальной области параметров γ и h , являющейся окрестностью нуля, карта динамических инвариантов (рис. 6) позволяет отображать специфические особенности взаимодействий в рамках представлений об обобщенных динамических состояниях, отражающих существенные особенности в виде числа режимов обнуления амплитуд, частот резонансов и форм взаимодействий.

Характерным примером использования карты динамических инвариантов может служить задача определения координаты точки динамического гашения на фиксированной частоте в зависимости от связности внешних возмущений.

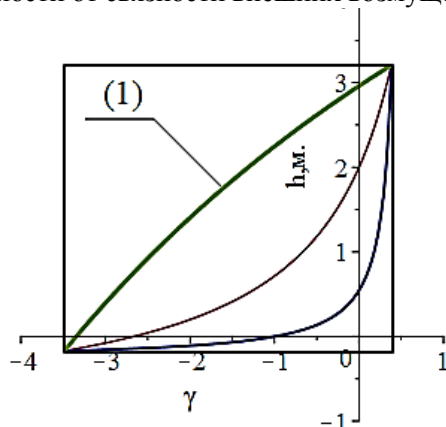


Рис. 7. Локальная карта динамических инвариантов. 1 – множество параметров (γ, h) обеспечивающих режим обнуления для фиксированной частоты

На фиксированной частоте внешних возмущений каждому коэффициенту связности γ

может быть сопоставлена точка h твердого тела, для которой обнуляется амплитуд колебания (рис. 7, линия 1). В частности, согласно локальной карте динамических инвариантов, кривая параметров (рис. 7, линия 1), обеспечивающих реализацию режимов динамического гашения может принадлежать только множествам параметров Ω_{22}, Ω_{44} и Γ_{11} , допускающих реализацию режимов динамического гашения. Можно полагать, что построенная локальная карта динамических инвариантов формирует представление о разнообразии специфических режимов движения элементов рассматриваемых механических колебательных систем.

Заключение

Рассмотрен подход к решению задач оценки разнообразия состояний технических объектов, которые подвергаются интенсивным вибрационным нагрузкам. В качестве модельной задачи рассмотрена механическая система с двумя степенями свободы, образованная твердым телом, которое совершает установившиеся колебания в условиях связанных силовых возмущений.

Для оценки динамических состояний системы использована динамическую податливость, которая определяется как отношение величины возмущения смещения к соответствующему изменению внешнего силового возмущения. Для разбиения полной совокупности динамических состояний на классы с фиксированными характеристиками используется частотная функция обнуления, которая может быть задана в неявной форме путем обнуления числителя передаточной функции, в рамках рассматриваемой задачи интерпретируемой как динамическая податливость. Частотная функция обнуления сопоставляет вариационным параметрам системы частоту внешних силовых возмущений, на которой реализуется обнуление динамической податливости; в предположении, что частота обнуления не совпадает с собственной частотой колебания системы.

В рамках развитой методологии показано, что изменение одного из вариационных параметров определяет совокупность различных динамических инвариантов, распределение которых по значениям параметра может быть отображено с помощью кусочно-постоянной интегральной характеристики, сопоставляющей каждому значению вариационного параметра общее число динамических особенностей.

Развиты элементы концепции обобщенных динамических состояний, в представлений которой показано, что совокупность динамиче-

ских состояний, соответствующая одновременному варьированию двух параметров системы, может быть отображена с помощью карты динамических инвариантов, разбивающей плоскость двух вариационных параметров на конечную совокупность непересекающихся областей, границ и точек перекрещивания границ, потенциально обладающих различными динамическими инвариантами. Доказана теорема о структуре границ карты динамических инвариантов.

Одним из ключевых результатов работы является то, что задача оценки, управления и формирования динамических состояний системы может быть выполнена путем разложения полного набора состояний на конечное число классов динамических состояний, у которых фиксированные динамические инварианты. Это позволяет использовать системный подход к оценке системы с учетом множества параметров.

Таким образом, работа представляет собой разработку научно-методологических основ в рамках структурного математического моделирования для решения задач, связанных с обеспечением безопасности и эффективности технических объектов, чьи расчетные схемы являются механическими колебательными системами. Можно полагать, что предложенный подход позволит эффективно решать задачи оценки динамических состояний системы в условиях интенсивных вибрационных нагрузок.

Литература

1. De Silva C.W. Vibration. Fundamentals and Practice. Boca Raton, London, New York, Washington, D.C.: CRC Press, 2000.
2. Jauregui Correa J. C., Lozano Guzman A. Mechani-

cal vibrations and condition monitoring. United Kingdom: Academic Press, 2020.

3. Onwubolu G.C. Mechatronics. Principles and Applications. Elsevier Butterworth – Heinemann. Oxford. UK. 2005. 417 p.

4. Banakh L., Kempner M. Vibrations of Mechanical Systems with Regular Structure, Berlin: Springer, 2010.

5. Вейц В.Л., Коловский М.З., Качура А.Е. Динамика управляемых машинных агрегатов. М.: Наука, 1984. 351 с.

6. Антипов В.А. Подавление вибрации агрегатов и узлов транспортных систем: монография. М.: Маршрут, 2006. 264 с.

7. Блехман И.И., Джанелидзе Г.Ю. Вибрационное перемещение. М.: Наука, 1964. 410 с.

8. Kolovsky M.Z. Nonlinear Dynamics of Active and Passive Systems of Vibration Protection. Berlin: Springer, 1999.

9. Динамический синтез в обобщенных задачах виброзащиты и виброизоляции технических объектов / С.В. Елисеев [и др.]. Иркутск: ИГУ, 2008. 523 с.

10. Eliseev S.V., Eliseev A.V. Theory of Oscillations. Structural Mathematical Modeling in Problems of Dynamics of Technical Objects, Cham: Springer, 2020.

11. Karnovsky I.A., Lebed E. Theory of Vibration Protection, Switzerland: Springer International Publishing, 2016.

12. Елисеев А.В., Кузнецов Н.К., Московских А.О. Динамика машин. Системные представления, структурные схемы и связи элементов. М.: Инновационное машиностроение, 2019. 381 с.

13. Елисеев А.В., Кузнецов Н.К. Технология структурного математического моделирования технических объектов в условиях вибрационного нагружения: формы взаимодействий и динамические инварианты // iPolytech Journal. 2022. Т. 26. № 3. С. 368-385.

14. Елисеев А.В., Миронов А.С., Кузнецов Н.К. Некоторые предложения по развитию концепции динамических инвариантов механических колебательных систем на основе частотной функции обнуления // VIII Международная конференция проблемы механики современных машин: сб. ст. конф. Улан-Удэ, 2022. С. 243-250.

15. Лурье А.И. Операционное исчисление и применение в технических приложениях. М.: Наука. 1959. 368 с.

Поступила 27.04.2023; принята к публикации 15.06.2023

Информация об авторах

Елисеев Андрей Владимирович – канд. техн. наук, доцент кафедры математики, Иркутский государственный университет путей сообщения (664074, Россия, г. Иркутск, ул. Чернышевского, 15); доцент кафедры конструирования и стандартизации в машиностроении, Иркутский национальный исследовательский технический университет (664074, Россия, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83), e-mail: eavsh@ya.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0222-2507>

Кузнецов Николай Константинович – д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой конструирования и стандартизации в машиностроении, Иркутский национальный исследовательский технический университет (664074, Россия, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83), e-mail: knik@istu.edu, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3083-0182>

Миронов Артем Сергеевич – соискатель НОЦ современных технологий, системного анализа и моделирования, Иркутский государственный университет путей сообщения (664074, Россия, г. Иркутск, ул. Чернышевского, 15), e-mail: art.s.mironov@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0921-0915>

THE CONCEPT OF GENERALIZED DYNAMIC STATES IN THE EVALUATION OF FORCED MOVEMENTS OF MECHANICAL OSCILLATORY SYSTEMS

A.V. Eliseev^{1,2}, N.K. Kuznetsov², A.S. Mironov¹

¹Irkutsk State Transport University, Irkutsk, Russia

²Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

Abstract: the work is aimed at developing a systemic approach within the framework of the methodology of structural mathematical modeling to solve problems related to ensuring the safety and efficiency of technical objects, whose calculation schemes can be represented by mechanical oscillatory systems with concentrated parameters. The structural approach involves solving problems based on the comparison of mechanical oscillatory systems with structural diagrams of equivalent automatic control systems in dynamic terms. The approach involves breaking down the object into component parts and determining their connections. The elements of the system are solid bodies and springs, while connected force oscillations act as external disturbing factors. The evaluation of the system's state is based on dynamic compliance, which depends on the frequency of external disturbances. It is shown that in mechanical oscillatory systems, the set of generalized dynamic states, which depend on the coefficients of connection of external force disturbances and the coordinates of points determining dynamic correspondence, can be expressed in the form of a map of dynamic invariants. One of the key results of the work is that the task of evaluating, controlling, and forming the dynamic states of the system can be carried out by decomposing the full set of states into a finite number of classes of dynamic states that have fixed dynamic invariants. This allows for a systemic approach to evaluating the system taking into account multiple parameters

Key words: structural methods of mathematical modeling, dynamic damping of vibrations, dynamic malleability, connectivity of force perturbations, solid body oscillation, generalized dynamic states, dynamic invariants

References

1. De Silva C.W. "Vibration. Fundamentals and Practice", Boca Raton, London, New York, Washington, D.C., CRC Press. 2000.
2. Jauregui Correa J.C., Lozano Guzman A. "Mechanical vibrations and condition monitoring", United Kingdom: Academic Press, 2020.
3. Onwubolu G.C. "Mechatronics. Principles and Applications", Oxford, Elsevier Butterworth – Heinemann, 2005, 417 p.
4. Banakh L., Kempner M. "Vibrations of Mechanical Systems with Regular Structure", Berlin, Springer, 2010.
5. Veic V.L., Kolovskij M.Z., Kachura A.E. "Dynamics of controlled machine units" ("Dinamika upravlyaemyh mashinnyh agregatov"), Moscow, 1984, 351 p.
6. Antipov V.A. "Vibration suppression of aggregates and nodes of transport systems" ("Podavlenie vibracii agregatov i uzlov transportnyh system"), Moscow, Marshrut, 2006, 264 p.
7. Blekhman I.I., Dzhanelidze G.Yu. "Vibrational displacement" ("Vibracionnoe peremeshchenie"), Moscow, Nauka, 1964, 410 p.
8. Kolovsky M.Z. "Nonlinear Dynamics of Active and Passive Systems of Vibration Protection" Berlin: Springer 1999.
9. Eliseev S.V., Reznik Yu.N., Homenko A.P., Zasyadko A.A. "Dynamic synthesis in generalized problems of vibration protection and vibration isolation of technical objects" ("Dinamicheskij sintez v obobshchennyh zadachah vibrozashchity i vibroizolyacii tekhnicheskikh ob"ektov"), Irkutsk, IGU, 2008.
10. Eliseev S.V., Eliseev A.V. "Theory of Oscillations. Structural Mathematical Modeling in Problems of Dynamics of Technical Objects", Cham, Springer, 2020.
11. Karnovsky I.A., Lebed E. "Theory of Vibration Protection", Switzerland, Springer International Publishing, 2016.
12. Eliseev A.V., Kuznetsov N.K., Moskovskih A.O. "Dynamics of machines. System representation, block diagrams and relationships of elements" ("Dinamika mashin. Sistemnye predstavleniya, strukturnye skhemy i svyazi elementov"), Moskva, Innovacionnoe mashinostroenie, 2019.
13. Eliseev A.V., Kuznetsov N.K. "Technology of structural mathematical modelling for engineering objects under vibrational loading: Interaction forms and dynamic invariants" ("Tekhnologiya strukturnogo matematicheskogo modelirovaniya tekhnicheskikh ob"ektov v usloviyah vibracionnogo nagruzheniya: formy vzaimodejstvij i dinamicheskie invarianty"), *iPolytech Journal*, 2022, vol. 26, no 3, pp. 368-385, DOI: 10.21285/1814-3520-2022-3-368-385.
14. Eliseev A.V., Mironov A.S., Kuznetsov N.K. "Methods of structural mathematical modeling in the development of the concept of dynamic invariants of mechanical oscillatory systems" ("Nekotorye predlozheniya po razvitiyu koncepcii dinamicheskikh invariantov mekhanicheskikh kolebatel'nyh sistem na osnove chastotnoj funkcii obnuleniya"), *VIII International Conference Mechanics of modern machines (Problemy mekhaniki sovremennyh mashin)*, Ulan-Ude, 2022, pp. 243-250, DOI: 10.53980/9785907599055_243
15. Lur'e A.I. "Operational calculus and its application in technical appls" ("Operacionnoe ischislenie i primeneniye v tekhnicheskikh prilozheniyah"), Moscow, Nauka 1959, 368 p.

Submitted 27.04.2023; revised 15.06.2023

Information about the authors

Andrey V. Eliseev, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor of the Department of Mathematics, Irkutsk State Transport University (15 Chernyshevskogo str., Irkutsk 664074, Russia), Associate Professor of the Department of Design and Standardization in Mechanical Engineering, Irkutsk National Research Technical University (83 Lermontova str., Irkutsk 664074, Russia), e-mail: eavsh@ya.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0222-2507>

Nikolay K. Kuznetsov, Dr. Sc. (Technical), Professor, Head of the Department of Design and Standardization in Mechanical Engineering, Irkutsk National Research Technical University (83 Lermontova str., Irkutsk 664074, Russia), e-mail: knik@istu.edu, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3083-0182>

Artem S. Mironov, Applicant of the Scientific and Educational Center of Modern Technologies, System Analysis and Modeling, Irkutsk State Transport University (15 Chernyshevskogo str., Irkutsk 664074, Russia), e-mail: art.s.mironov@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0921-0915>

РАЗРАБОТКА РЕГУЛЯТОРА УРОВНЯ В КОМПЕНСАТОРЕ ДАВЛЕНИЯ ПЕРВОГО КОНТУРА АЭС

В.Л. Бурковский, И.А. Болдырев, У.А. Щеглова, А.С. Кожин, А.А. Голиков

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

Аннотация: в современных отраслях промышленности, связанных с высокой степенью безопасности труда и экологической безопасностью, существует определенный консерватизм в подходах проектирования систем автоматического управления (САУ), который не позволяет проникать в эту область не только современным теоретическим разработкам, но и ограничивает использование современной элементной базы. К таким отраслям можно отнести атомную энергетику, которая сформировалась во второй половине XX века и сохранила в себе идеологический подход того времени. Приведена структура реализованной и ныне функционирующей системы автоматического управления, используемой для поддержания уровня в компенсаторе давления первого контура ядерного реактора Балаковской АЭС (БалАЭС). Предложена и обоснована математическая модель системы управления для поддержания уровня в компенсаторе давления первого контура ядерного реактора БалАЭС, построенная с применением современных методов теории автоматического управления и с возможностью её реализации на современной элементной базе. Определены параметры и ограничения, показывающие возможности работы предлагаемой системы автоматического управления, в рамках которых предложенная САУ дает детерминированное качество переходных процессов, но при этом не выходит за рамки уже сложившейся технологии датчиков и исполнительных механизмов. Полученный результат учитывает особенности и сложности эксплуатации систем управления на объектах с повышенной опасностью и сводит к минимуму пуско-наладочную часть работы, что является основой для дальнейшего тиражирования данного подхода на системах с высокими требованиями к качеству и безопасности САУ

Ключевые слова: компенсатор давления, система автоматического управления, Балаковская АЭС, условие реализуемости закона управления, отрицательная обратная связь, положительная обратная связь

Введение

Атомный реактор на АЭС представляет собой очень мощный источник тепловой энергии, которая впоследствии преобразуется в электрическую. В технологической цепочке АЭС из трех контуров первый замкнутый контур заполнен циркулирующим в нем жидким теплоносителем, который при изменении температурного режима работы может значительно изменять свой объем, и, как следствие, давление теплоносителя внутри контура [1].

Для поддержания стабильного давления внутри первого контура применяется устройство, называемое «компенсатор объема» или «компенсатор давления» (КД) [2]. В совокупности оба эти названия дают нам понять, что компенсация отклонения давления внутри замкнутого контура от требуемого значения происходит за счет перетока теплоносителя из контура в компенсатор и обратно, то есть за счет изменения массы теплоносителя внутри контура.

Описание функциональной схемы работы КД

Рассмотрим общую схему работы КД. Начальным условием для работы КД является нахождение в нем заданного уровня теплоносителя, который соответствует текущему тепловому режиму работы контура. Из/в «горячей» нитки петли (часть контура, в которой теплоноситель нагревается) в/из КД поступают излишки теплоносителя, перекачиваемые подпиточным насосом из/в первого контура в КД из-за увеличения/уменьшения объема (следствие роста/падения температуры). По известной зависимости при увеличении/уменьшении температуры соответственно увеличивается/уменьшается заданное значение уровня жидкости в КД, а поэтому между контуром и КД в ту или иную сторону будет перекачиваться определенное количество теплоносителя, что и обеспечит стабильность давления внутри контура не зависимо от его температуры [3].

Принцип функционирования САУ КД, используемой на БалаЭС

На рис. 1 изображена упрощенная функциональная схема КД, из которой видно, что компенсатор давления (КД УР10В01) пред-

ставляет собой емкость, в которую жидкость из первого контура поступает от насосов подпитки 1 контура ТК21-23D02 и с напора ГЦН-1, а в обратном направлении выходит по соединительному трубопроводу Ф426 к «горячей» нитке петли N4 [4].

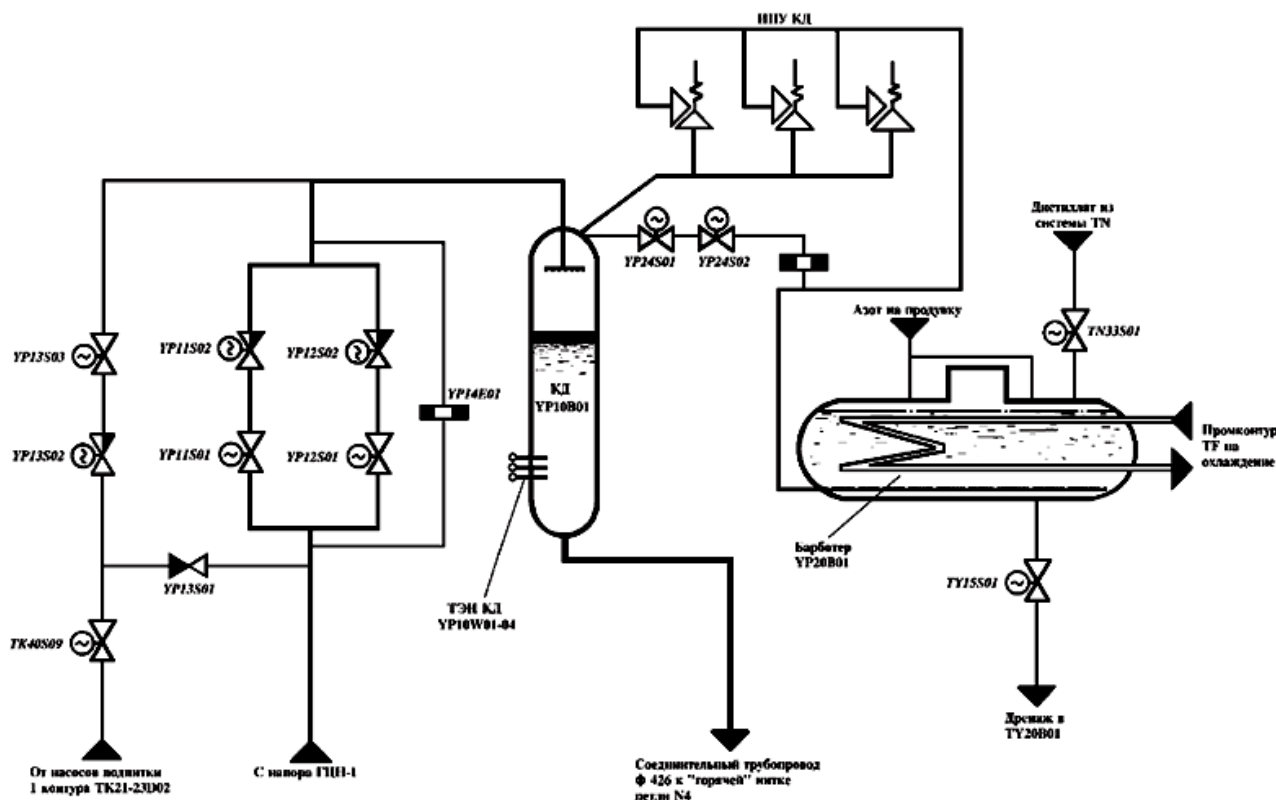


Рис. 1. Упрощенная функциональная схема КД

На рис. 2 изображена математическая модель САУ уровнем жидкости в КД, функционирующая в настоящее время на БалаЭС. Изображенная на рис. 2 модель зависимости уровня жидкости Y в КД от режимов работы насосов представляет собой два последовательно соединенных звена, одно из которых является интегратором (Integrator), а другое – усилителем (Gain4), где P – площадь поперечного сечения емкости КД. Величина U представляет собой производительность подаваемой в емкость КД из контура ($U > 0$) или откачиваемой из КД в контур жидкости ($U < 0$). Понятно, что интегратор, как и емкость, является накопителем, а величина $1/P$ определяет динамику зависимости уровня жидкости в КД от производительности (Gin) питательного насоса

и производительности (-Gout) продувочного насоса. Задание S_p на текущее значение уровня жидкости в КД формируется в соответствии с таблицей 1-D Lookup Table (рис. 2), выходное значение которой формируется в соответствии с входным значением T_{sr} , которое является текущим значением температуры теплоносителя в первом контуре. Ошибка управления $E = S_p - Y$, от величины и знака которой, в соответствии со схемой регулятора включается подпиточный или продувочный насос. В соответствии с «моделью релейной схемы управления насосами подпитки и продувки» (рис. 2) данные насосы либо выключены, либо включены на полную мощность, но при этом никогда не включаются одновременно.

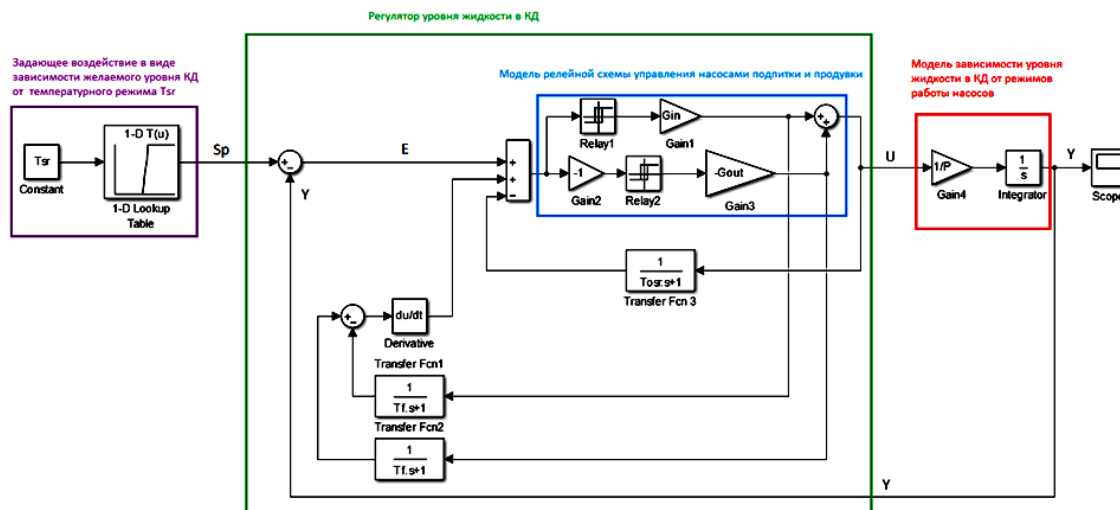


Рис. 2. Математическая модель САУ уровнем жидкости в КД, функционирующая в настоящее время на БалаЭС

Принцип функционирования САУ КД, которая может быть реализована на БалаЭС

На рис. 3 изображена математическая модель САУ уровнем жидкости в КД, которая может быть реализована на БалаЭС. Изображенная на рис. 3 модель зависимости уровня жидкости Y в КД от режимов работы насосов представляет собой два последовательно соединенных звена, одно из которых является интегратором (Integrator), а другое – усилителем (Gain4), где P – площадь поперечного сечения емкости КД. Величина U представляет собой

производительность подаваемой в емкость КД из контура ($U > 0$) или откачиваемой из КД в контур жидкости ($U < 0$). Понятно, что интегратор, как и емкость, является накопителем, а величина $1/P$ определяет динамику зависимости уровня жидкости в КД от производительности (G_{in}) питательного насоса и производительности ($-G_{out}$) продувочного насоса. Задание Sp на текущее значение уровня жидкости в КД формируется в соответствии с таблицей 1-D Lookup Table (рис. 3), выходное значение которой формируется в соответствии с входным значением T_{sr} , которое является текущим значением температуры теплоносителя в первом контуре.

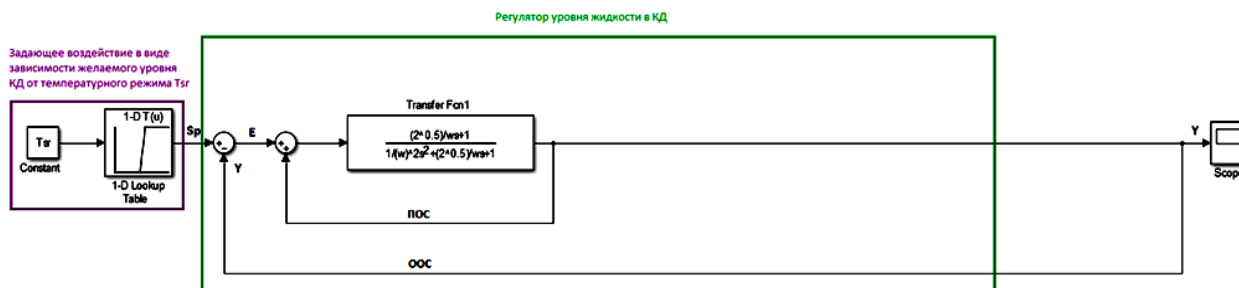


Рис. 3. Математическая модель усовершенствованной САУ уровнем жидкости в КД, которая может быть реализована на Балаковской АЭС

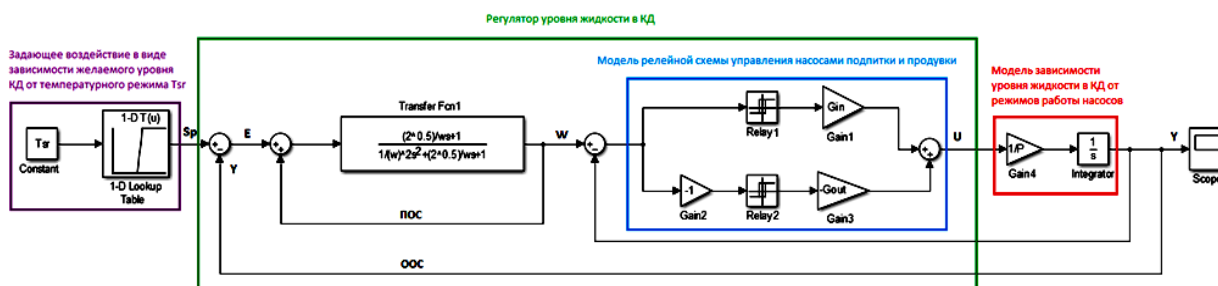


Рис. 4. Математическая модель усовершенствованной САУ уровнем жидкости в КД, при выполнении УРЗУ

Ошибка управления $E = Sp - Y$, от величины и знака которой, в соответствии со схемой регулятора включается подпиточный или продувочный насос. В соответствии с «моделью релейной схемы управления насосами подпитки и продувки» (рис. 3) данные насосы либо выключены, либо включены на полную мощность, но при этом никогда не включаются одновременно.

В соответствии с рис. 3 «Модель зависимости уровня жидкости в КД от режимов работы насосов» и «модель релейной схемы управления насосами подпитки и продувки» при определенных условиях в совокупности представляют собой усилитель с коэффициентом 1. Назовем это условие условием реализуемости закона управления (УРЗУ).

Предположим, УРЗУ имеет место быть. В этом случае САУ, изображенная на рис. 3 примет вид САУ, изображенной на рис. 4. В соответствии с рис. 4 ООС (отрицательная обратная связь) и ПОС (положительная обратная связь) компенсируют друг друга, после чего модель поведения исходной САУ сводится к передаточной функции Transfer Fcn1, которая определяется на этапе проектирования САУ. Таким образом выполнение УРЗУ гарантирует поведение проектируемой САУ в соответствии с желаемой передаточной функцией Transfer Fcn1.

В нашем случае Transfer Fcn1 имеет вид:

$$\frac{\left(\frac{\sqrt{2}}{w}\right)s+1}{\left(\frac{1}{w^2}\right)s^2+\left(\frac{\sqrt{2}}{w}\right)s+1} \quad (1)$$

Из вида (1) можно сделать вывод, что Transfer Fcn1 представляет собой устойчивую передаточную функцию, знаменатель которой

является знаменателем передаточной функции фильтра Баттерворта. Если учесть, что при выполнении УРЗУ передаточная функция (1) – это модель замкнутой системы САУ, то числитель подобран таким образом, чтобы разомкнутая САУ имела бы в знаменателе общий множитель s^2 , что дает возможность на основе передаточной функции вида (1) построить САУ с астатизмом второго порядка [5]. В случае нашей системы астатизм второго порядка позволит подавлять возмущающие воздействия не только вида const, но и вида ramp, что означает способность подстраивать работу подпиточного и продувочного насосов даже в том случае, когда идет непрерывное увеличение или уменьшение уровня жидкости в КД. В передаточной функции вида (1) параметр w играет роль величины «частоты среза», увеличивая которую можно добиваться уменьшения времени переходного процесса. Поэтому УРЗУ представляет собой неравенство, ограничивающее максимальное значение величины w .

После взаимной компенсации ООС и ПОС в системе, изображенной на рис. 3, приходим к эквивалентной структурной схеме САУ рис. 5.

Из рис. 5 видим, что условием работоспособности САУ является воспроизводимость «релейной схемой» (последовательное соединение «модели релейной схемы управления насосами подпитки и продувки» и «модели зависимости уровня жидкости в КД от режимов работы насосов» (рис. 3) разгонной характеристики Z на выходе передаточной функции Transfer Fcn1 (рис. 3), возникшей в виде реакции на скачкообразное воздействие с амплитудой Sp .

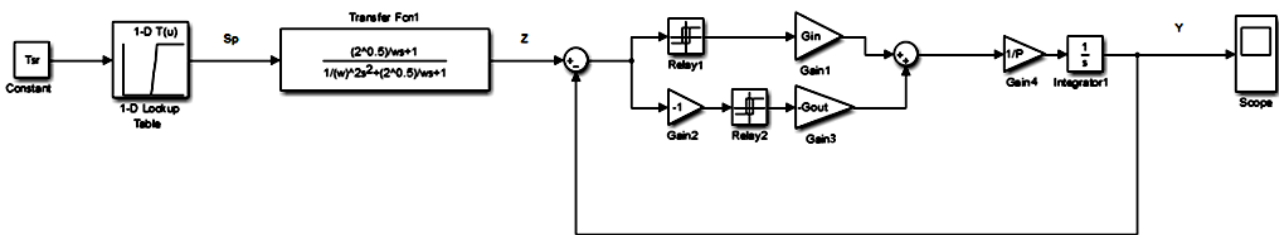


Рис. 5. (см. рис. 2) после взаимокompенсации внешней ООС и внутренней ПОС

Сравним максимальную скорость изменения разгонной характеристики передаточной функции Transfer Fcn1 и «релейной схемы». Если считать, что Sp – это амплитуда скачка, то максимальное значение скорости переходного процесса достигается в момент данного скачка с амплитудой Sp .

Если рассмотреть производную от Transfer Fcn1, то получим Transfer Fcn2.

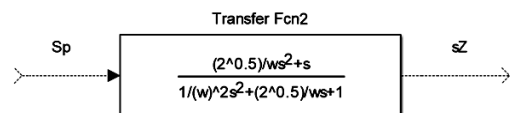


Рис. 6. Производная Transfer Fcn2 от Transfer Fcn1

Из структуры Transfer Fcn2, изображенной на рис. 6 можно установить, что максимальное значение sZ , получаемое на выходе Transfer Fcn2 в начальный момент разгонной характеристики, будет определяться пропорциональной частью Transfer Fcn2, полученной как частное коэффициентов при старших степенях числителя и знаменателя Transfer Fcn2, которая будет иметь коэффициент передачи $\sqrt{2} \cdot w$. С учётом амплитуды скачка Sp , максимальная скорость будет равна $\sqrt{2} \cdot w \cdot Sp$, а максимальную скорость изменения величины Y на выходе «релейной схемы» примем равной Gn/P ($Gn = \min(Gin, Gout)$, $Gin, Gout$ - производительность насосов подпитки и продувки), откуда видно, что условие работоспособности САУ, изображенной на рис. 3, будет иметь вид

$$\sqrt{2} \cdot w \cdot Sp \leq \frac{Gn}{P}, \quad (2)$$

откуда получаем ограничение на величину w :

$$w \leq \frac{Gn}{P \cdot Sp \cdot \sqrt{2}}. \quad (3)$$

Таким образом, ограничение на w вида (3) и является УРЗУ.

Сравнительный анализ моделей САУ уровнем КД на основе численного эксперимента

На рис. 7, 8 изображены по два переходных процесса, первые (0-100 сек.) – реакция на задание, вторые (100-200 сек.) – реакция на возмущающее воздействие вида гапр. Из графиков переходных процессов, изображенных на рис. 7, 8 видно, что предложенная в работе САУ обеспечивает точное выполнение задания и подавляет возмущающее воздействие, тогда как САУ, функционирующая в данный момент на БалаЭС имеет статическую ошибку, как в случае отработки задания, так и в случае подавления возмущающего воздействия.

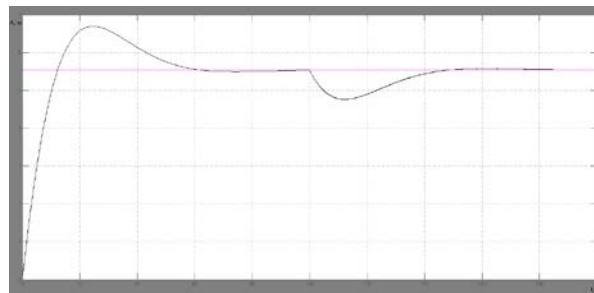


Рис. 7. Переходные процессы, предлагаемой в работе модели САУ (реакция на задание 0-100 сек, реакция на возмущающее воздействие 100-200 сек.)

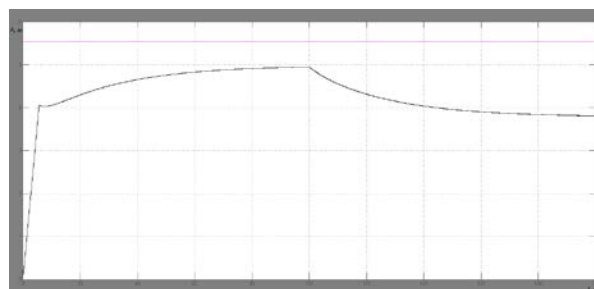


Рис. 8. Переходные процессы модели САУ, функционирующей в данный момент на БалаЭС (реакция на задание 0-100 сек. реакция на возмущающее воздействие 100-200 сек.)

Заключение

Предложена и обоснована математическая модель системы управления для поддержания уровня в компенсаторе давления первого контура ядерного реактора БалаЭС, построенная с применением современных методов теории автоматического управления и с возможностью её реализации на современной элементной базе. Определены параметры и ограничения, показывающие возможности работы предлагаемой системы автоматического управления, в рамках которых предложенная САУ дает детерминированное качество переходных процессов, но при этом не выходит за рамки уже сложившейся технологии датчиков и исполнительных механизмов. Полученный в работе результат учитывает особенности и сложности эксплуатации систем управления на объектах с повышенной опасностью и сводит к минимуму пуско-наладочную часть работы, что является основой для дальнейшего тиражирования данного подхода на системах с высокими требованиями к качеству и безопасности САУ.

Приложение

%Содержание m-файла инициализирующего параметры моделей;
 $G_n=5; G_{in}=G_n; G_{out}=G_n$; %массовый расход подпиточного и продувочного насосов;
 $P=(\pi \cdot 1.5^2)$; %площадь горизонтального сечения емкости КД;
 $S_p=5.545$; %амплитуда скачка задающего воздействия
 $T_f=3$; % постоянная времени фильтра САУ БалАЭС
 $T_{osr}=20$; %постоянная времени фильтра САУ БалАЭС
 $T_{sr}=296$; %температура теплоносителя первого контура
 $w=(G_n/(P \cdot S_p \cdot 2^{0.5}))$; %частота среза эталонной модели предложенной % в работе САУ с учетом выполнения УРЗУ
 $dt = 0,001s$ [с] – квант времени, определяющий время рабочего цикла управляющего контроллера;
 $G_n = 5$ [кг/с] – массовый расход подпиточного и продувочного насосов;

Литература

1. Шальман М.П., Плютинский В.И. Контроль и управление на атомных электростанциях. М.: Энергия, 1979. 272 с.
2. Справочник по наладке автоматических устройств контроля и регулирования / А.Д. Нестеренко, В.А. Дубровский, Е.И. Забокрицкий. Киев: Наукова думка, 1976. 840 с.

Поступила 18.03.2023; принята к публикации 13.06.2023

Информация об авторах

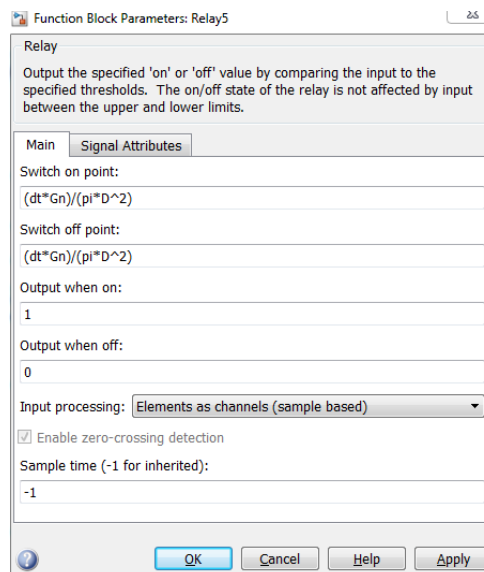
Бурковский Виктор Леонидович – д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой электропривода, автоматики и управления в технических системах, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: bvl@vorstu.ru, тел. 8(473)243-77-20
Болдырев Игорь Александрович – канд. техн. наук, доцент кафедры электропривода, автоматики и управления в технических системах, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: boldyrev_igor@mail.ru, тел. 8(473)243-77-20
Щеглова Ульяна Александровна – студент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: play4170@mail.ru, тел. 8(920)429-58-56
Кожин Алексей Сергеевич – канд. техн. наук, доцент кафедры электропривода, автоматики и управления в технических системах, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: ellex@mail.ru, тел. 8(473)243-77-20
Голиков Алексей Анатольевич – канд. техн. наук, доцент кафедры электропривода, автоматики и управления в технических системах, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: galexey@yandex.ru тел. 8(473)243-77-20

DEVELOPMENT OF LEVEL REGULATOR IN THE PRESSURE COMPENSATOR OF THE NPP FIRST CIRCUIT

V.L. Burkovsky, I.A. Boldyrev, U.A. Shcheglova, A.S. Kozhin, A.A. Golikov

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

$\pi \cdot D^2 = 1,5^2$ [м²] площадь горизонтального сечения емкости КД.



Настройка блоков Relay в модели Simulink

3. Клюев А.С, Товарнов А.Г. Наладка систем автоматического регулирования котлоагрегатов. М.: Энергия, 1970. 280 с.
4. Справочник по наладке автоматических устройств контроля и регулирования / В.А. Дубровский, Е.И. Забокрицкий, В.Г. Трегуб, Б.А. Холодовский. 2-е изд., испр. и доп. Киев: Наук. думка, 1981. 462 с.
5. Клюев А.С. Автоматическое регулирование. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Энергия, 1973.

Abstract: in modern industries associated with a high degree of labor safety and environmental safety, there is a certain conservatism in the approaches to designing automatic control systems (ACS), which does not allow penetration into this area not only of modern theoretical developments, but also limits the use of modern element base. Such industries include nuclear energy, which was formed in the second half of the 20th century and retained the ideological approach of that time. This article presents the structure of the implemented and still functioning automatic control system used to maintain the level in the pressure compensator of the primary circuit of the nuclear reactor of the Balakovo NPP (BalNPP). Also, the paper proposes and substantiates a mathematical model of the control system for maintaining the level in the pressure compensator of the primary circuit of the BalNPP nuclear reactor, built using modern methods of automatic control theory and with the possibility of its implementation on a modern element base. Parameters and limitations are determined that show the possibilities of the proposed automatic control system, within which the proposed ACS gives a deterministic quality of transient processes, but does not go beyond the already established technology of sensors and actuators. The result obtained in the work takes into account the features and complexity of the operation of control systems at facilities with increased danger and minimizes the commissioning part of the work, which is the basis for further replication of this approach on systems with high requirements for the quality and safety of ACS

Key words: pressure compensator, automatic control system, Balakovo NPP, condition for the implementation of the control law, negative feedback, positive feedback

References

1. Shalman M.P., Plyutinsky V.I. "Control and management at nuclear power plants" ("Kontrol' i upravleniye na atomnykh elektrostantsiyakh"), Moscow, Energiya, 1979, 272 p.
2. Nesterenko A.D., Dubrovny V.A., Zabokritsky E.I. "Handbook on setting up automatic control and regulation devices" ("Spravochnik po naladke avtomaticheskikh ustroystv kontrolya i regulirovaniya"), Kiev, Naukova dumka, 1976, 840 p.
3. Klyuev A.S., Tovarnov A.G. "Adjustment of automatic control systems for boiler units" ("Naladka sistem avtomaticheskogo regulirovaniya kotloagregatov"), Moscow, Energiya, 1970, 280 p.
4. Dubrovny V.A., Zabokritsky E.I., Tregub V.G., Kholodovskiy B.A. "Handbook on setting up automatic control and regulation devices" ("Spravochnik po naladke avtomaticheskikh ustroystv kontrolya i regulirovaniya"), Kiev, Naukova dumka, 1981, 462 p.
5. Klyuev A.S. "Automatic regulation" ("Avtomaticheskoye regulirovaniye"), Moscow, Energiya, 1973.

Submitted 18.03.2023; revised 13.06.2023

Information about authors

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

Igor A. Boldyrev - Cand. Sc. (Technical), Associate professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: boldyrev_igor@mail.ru, tel.: +7(473)243-77-20

Uliana A. Shcheglova – Student, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: play4170@mail.ru, tel.: +7(920)429-58-56

Alexey S. Kozhin - Cand. Sc. (Technical), Associate professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: ellex@mail.ru, tel.: +7(473)243-77-20

Aleksey A. Golikov - Cand. Sc. (Technical), Associate Professor of the Department of Electric Drive, Automation and Control in Technical Systems, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: galixey@yandex.ru tel.: +7(473)243-77-20

Радиотехника и связь

DOI 10.36622/VSTU.2023.19.3.011

УДК 621.396

**КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА РАДИОЛИНИИ МЕТЕОРНОЙ СВЯЗИ
НА УЛЬТРАКОРОТКИХ ВОЛНАХ****В.И. Дорошенко, Ю.Г. Ксенофонтов, В.Л. Мартынов****Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова,
г. Санкт-Петербург, Россия**

Аннотация: показана возможность многопараметрической и, соответственно, многокритериальной многофазной оперативной комплексной оценки качества радиолинии метеорной связи на ультракоротких волнах, состоящая в том, что оперативная технологическая оценка качества высокочастотного аналогового канала связи должна быть выполнена в течение нескольких микросекунд, а образовавшегося дискретного канала передачи данных – в течение нескольких миллисекунд. Так как процесс многофазный, время выработки интегрального критерия о пригодности радиолинии метеорной связи к телекоммуникации и возможности её использования в инфотелекоммуникациях строго ограничено в каждой фазе этого процесса, поэтому оперативный технологический контроль и комплексная оценка качества позволяют выработать интегральную оценку за минимально возможное время с минимально возможной погрешностью. Предложен вариант структурно-функциональной схемы радиолинии метеорной связи на ультракоротких волнах, обеспечивающей фрагментацию-дефрагментацию потока передаваемых информационных данных. Также подробно рассмотрен такой из качественных показателей, как помехоустойчивость радиолинии, от которого непосредственно зависит пропускная способность канала, приведены соотношения, из которых следует, что вероятность ошибки при заданной скорости передачи может быть уменьшена более чем на порядок или во столько же раз может быть увеличена средняя скорость передачи при заданной помехоустойчивости

Ключевые слова: инфотелекоммуникации, радиолиния метеорной связи, оперативная оценка качества связи, системный подход, показатели и критерии качества связи, помехоустойчивость, вероятность ошибки

Постановка задачи

Радиолиния метеорной связи (РМС) на ультракоротких волнах (УКВ) является каналом-образующим компонентом телекоммуникаций, который формирует статистически устойчивый прерывистый энергетический контакт (ЭК) на УКВ между корреспондентами, расположенными на просторах инфраструктуры Арктики России и удалёнными на расстояния до 2000 км друг от друга. Эти РМС используются для технологического обслуживания Северного морского пути Российской Федерации. Одно из важнейших достоинств РМС состоит в том, что она наиболее рационально использует частотный ресурс Арктики России [1]. В инфраструктуре малонаселённого арктического региона страны РМС выполняет роль статистически устойчивой телекоммуникации между абонентами инфотелекоммуникаций, расположенными на разных расстояниях друг от друга [2, 3]. Стохастическая прерывистость метеорной связи вынуждает оперативно осуществлять постоянный непрерывный контроль качества РМС для поддержания её работоспособности.

Этот контроль осложняется тем, что в структуре РМС постоянно комплексно сочетаются аналоговый канал связи на УКВ и дискретный канал передачи данных (КПД). Оба они стохастически прерываются и восстанавливаются. Их качество оценивается по разным параметрам. При этом стохастичность появления и пропадания ЭК на УКВ вынуждает непрерывно оперативно вырабатывать оценку качества как аналоговой части РМС, так образующегося дискретного КПД.

Сложность оперативного технологического контроля качества РМС состоит ещё и в том, что каждый новый ЭК на УКВ может образовываться как через ненасыщенный след метеороида на время от 100 до 200 мс [4]. Образующиеся при этом дискретные КПД используются по-разному для различных целей, а, соответственно, и качество образовавшейся при этом РМС оценивается по-разному. Так качество РМС через ненасыщенный след может быть оценено на приёме в течение нескольких микросекунд по амплитуде принятого продетектированного сигнала УКВ. В этом случае прогнозируется возможность передачи данных в течение 100-200 мс. То есть время выработки оцен-

ки качества ЭК на УКВ образовавшейся РМС не превышает 1 % от длительности прогнозируемого ЭК. Качество ЭК на УКВ через насыщенный след метеороида более точно оценивается по соотношению мощностей принятого сигнала УКВ и помех в точке приёма в полосе принимаемых частот. Время такой оценки составляет от одной до нескольких миллисекунд. Необходимость такой оценки качества РМС объясняется тем, что ЭК на УКВ через плазменные следы это случайный подарок природы. В ионосфере земли периодически образуются естественный стохастический энергетический ресурс в форме сгустков электронов как следов вспыхнувших метеороидов. Под воздействием гравитации земли метеороиды влетают в ионосферу земли и сгорают, превращаясь в плазму из электронов и протонов. Метеороиды обладают большой кинетической энергией, которая при встрече вещества метеороида с атмосферой земли преобразуется в тепловую энергию за счёт трения молекул вещества метеороида с молекулами атмосферы земли. Эта тепловая энергия трения преобразует твёрдое вещество метеороида (железо, цинк, кальций и др.) в плазму, состоящую из электронов и протонов, которая внешним наблюдателем воспринимается как вспышка метеороида. Если масса вспыхнувшего метеороида достаточна для образования следа с плотностью электронов не более 10^{14} электронов на один метр следа, то такой след называют *ненасыщенным*. Он существует в течение 100-200 мс, а затем исчезает, так как сгусток электронов и протонов превращается в сгусток молекул уносимых ветрами ионосферы. Если на ненасыщенный след направить узкий луч электромагнитных УКВ, то этот сгусток электронов играет роль резонатора этих УКВ и под воздействием проникающих в него электромагнитных УКВ превращается во вторичный генератор УКВ, которые распространяются от него во всех направлениях, в том числе и на корреспондента. Если масса вспыхнувшего метеороида достаточна для образования длинного следа метеороида с плотностью превышающей более 10^{14} электронов на один метр следа, то такой след после вспышки метеороида приобретает форму расширяющегося цилиндра с начальным радиусом порядка 0,5 м. Длина такого сгустка электронов (плазмы) может достигать 25 километров и более. Насыщенный след не пропускает внутрь себя электромагнитные УКВ. Такие волны отражаются от него во всех направлениях, в том числе и на

корреспондента. Особенность метеорных следов состоит в том, что ненасыщенные следы стохастически появляются более часто (в среднем через каждые 1-2 с), а насыщенные следы появляются значительно реже (через интервалы времени от нескольких секунд до многих минут). Время существования насыщенного следа стохастически колеблется от нескольких секунд до 200-300 секунд, а время оперативной выработки технологической оценки качества РМС пригодной для передачи данных не превышает нескольких миллисекунд. Поэтому предлагается оценивать качество каждой вновь образованной РМС как путём косвенного измерения прогнозируемой продолжительности ЭК на УКВ по амплитуде (после детектора) принятого аналогового высокочастотного сигнала от каждого ненасыщенного следа, так и путём прямого измерения соотношения мощностей сигналов УКВ, принятых через насыщенный след и помех в точке приёма в полосе рабочих частот. Это соотношение традиционно оценивается в децибелах. Качество образовавшегося дискретного канала оценивается по показателю вероятности правильного приёма каждого символа. Для телекоммуникаций между ЭВМ вероятность искажения символа не должна превышать величины 10^{-6} .

Актуальность исследований состоит в том, что освоение Северного морского пути Арктики России связано с необходимостью создания и совершенствования инфотелекоммуникаций (ИТК) обеспечивающих устойчивую связь между ЭВМ различных абонентов размещённых на большой территории и на значительных удалениях друг от друга [5, 6]. РМС является статистически устойчивым элементом в структуре ИТК. Непрерывный оперативный контроль качества её функционирования обеспечивает высокое качество информационного обмена между абонентами ИТК.

Целью исследований является повышение достоверности и устойчивости передачи информационных данных между абонентами ИТК.

Новизна исследований состоит в обосновании целесообразности многокритериальной многофазной оперативной комплексной оценки качества РМС.

Практическая значимость выполненных исследований состоит в том, что предложенный метод интегральной оценки качества РМС позволяет улучшить процесс адаптации передачи данных ИТК к потенциальным возможностям

прерывистых стохастических энергетических контактов РМС на УКВ.

Введение

Северный морской путь – это главная морская транспортная магистраль на севере России, функционирующая в сложных климатических и экологических условиях и имеющая огромное экономическое, политическое и военно-стратегическое значение для Российской Федерации (РФ) [6]. Для его безопасного функционирования необходима современная система инфотелекоммуникаций, в структуру которой входит подсистема связи, обеспечивающая непрерывный оперативный технологический контроль качества радиолинии метеорной связи на ультракоротких волнах. Любая автоматизированная система должна иметь девять видов обеспечения, одним из которых является информационное обеспечение, передачу информации в котором и должна выполнить РМС. Как правило, метеорная связь осуществляется сеансами связи при появлении следов метеороидов. Сложность оценки качества РМС состоит в том, что РМС представляет собой сочетание коротких стохастических отрезков первичной сети связи на УКВ и передачи данных (ПД) по вторичной прерывистой сети между ЭВМ обслуживающих ИТК. Традиционно качество каждой из этих сетей оценивалось по различным параметрам и критериям. Сущность метеорной связи состоит в том, что она обеспечивает прерывистые энергетические контакты на УКВ за счёт отражения УКВ радиоволн от стохастически появляющихся метеорных следов вспыхнувших метеороидов. Мощность отраженных сигналов УКВ на приёме стохастически изменяется как по амплитуде и длительности, так по частоте их появления и интервалов между ними [4]. Стохастический характер продолжительности ЭК на УКВ и интервалов между ними вынуждают применять различные методы измерения этого времени. Важность решения задачи непрерывного контроля и оперативной оценки качества РМС на УКВ состоит в том, что РМС является статистически устойчивым энергетическим ресурсом телекоммуникаций в прерывистом канале метеорной связи. Прерывистость ЭК между корреспондентами на УКВ компенсируется статистической устойчивостью появления этих ЭК. Сложность решения задачи интегрального контроля качества телекоммуникаций в РМС на УКВ состоит в том, что РМС комплексно соче-

тает в себе высокочастотный аналоговый и среднескоростной дискретный канал ПД, которые оцениваются по разным параметрам.

Методы исследования

Контроль качества радиолинии метеорной связи на ультракоротких волнах по частным показателям и критериям. Измерение мощности радиосигнала ультракоротких волн (УКВ) отражённого от следа метеороида P_c производится в токе приёма с применением типовых приборов измерения высокочастотных или сверхвысокочастотных колебаний. Мощность помех в этом диапазоне частот P_n измеряется этими же приборами. Критерием оценки эффективности РМС, показывающим возможность и целесообразность применения этого сигнала для телекоммуникаций, является превышение мощности сигнала над мощностью помех не ниже $P_{пор}$:

$$P_{пор} > P_c / P_n . \quad (1)$$

Эта оценка качества РМС производится непрерывно и свидетельствует о возможности начала очередного сеанса связи, используя сигнал УКВ принятый через вновь появившийся метеорный след. Соотношение (1) выбирается таким образом, чтобы оно позволяло правильно демодулировать принятый аналоговый сигнал и восстановить дискретный сигнал на приёме, а затем и декодировать кодовые комбинации данных телекоммуникаций, с достоверностью $P_{пр}$ не ниже требуемой $P_{тр}$ [7]:

$$P_{пр} > P_{тр} . \quad (2)$$

Поскольку уровень помех в течение сеанса связи, как правило, не изменяется, а уровень и мощность сигнала со временем уменьшается, то непрерывный контроль соотношения (1) позволяет при наступлении момента нарушения соотношения (1) прекращать передачу данных, не допуская их искажений. Следовательно, особенность метеорной связи состоит в том, что необходимо непрерывно осуществлять контроль качества как аналогового сигнала по соотношению (1), так и дискретного канала по соотношению (2). Соотношения (1) и (2) задаются требованиями телекоммуникаций. Приведённые частные показатели и критерии качества являются частью технологического процесса телекоммуникаций.

Они необходимы для обеспечения функционирования технологического процесса передачи данных, но недостаточны для интегральной оценки качества РМС как элемента ИТК.

Особенность метеорной связи состоит ещё и в том, что для обеспечения передачи информационных данных необходимо передавать большой объём служебных данных. На передачу служебных данных тратится значительный ресурс пропускной способности РМС. Поэтому, если скорость передачи кодовых блоков по дискретной линии метеорной связи обозначить $V_{пл}$, а скорость передачи информационных кодовых блоков $V_{и}$, то относительная скорость передачи информационных данных составит $V_{ио}$:

$$V_{ио} = V_{и} / V_{пл} . \quad (3)$$

Параметр $V_{ио}$ характеризует степень использования ресурса пропускной способности РМС. Чем больше этот параметр, тем большее количество информационных данных может быть передано по одной РМС. Таким образом, параметр $V_{ио}$ может быть использован для характеристики качества РМС. Он является функцией многих переменных: методов модуляции – демодуляции аналогового сигнала, методов защиты от ошибок в дискретном канале РМС, мощности РПДУ, чувствительности РПУ, параметров передающих и приёмных антенн, инфокоммуникационных технологий и др. Поэтому его можно использовать в качестве интегральной оценки качества радиолинии метеорной связи.

Оценка качества аналогового (высокочастотного) участка РМС. Метеорная связь осуществляется сеансами связи при появлении следов метеороидов. Дистанционная автоматическая передача данных по РМС начинается в ЭВМ – отправителе, а заканчивается в ЭВМ – получателе. Таким образом, осуществляется дистанционный обмен информационными данными между ЭВМ, то есть – телекоммуникация. Информацию отправитель формирует, а получатель получает в виде данных в коде ЭВМ – ASC II [9]. На участке от ЭВМ до радиопередающих устройств УКВ (РПДУ) и от радиоприёмных устройств УКВ (РПУ) до ЭВМ дискретные сигналы данных передаются по местным, как правило, проводным цепям. В РПДУ дискретные сигналы преобразуются в аналоговые и по радиоканалу передаются получателю в РПУ. В качестве переносчика сигнала используются высокочастотные электро-

магнитные колебания. Для того, чтобы переносчик переносил информационные данные на требуемое расстояние в модуляторе РПДУ они модулируют сигнал-переносчик различными видами модуляции. От вида и скорости модуляции зависит полоса частот, которую необходимо передать от отправителя к получателю в РПУ. Поскольку эти сигналы излучаются и принимаются направленными антеннами УКВ, то параметры этих антенн должны быть согласованы с полосами частот. Особенность метеорной радиосвязи состоит в том, что от качества работы этих антенн зависит качество метеорной радиосвязи. Антенны УКВ могут быть как пассивными, так и активными (особенно на приёме). Поэтому качество метеорной радиосвязи определяется не только классическим соотношением уровней и мощностей сигналов и помех, но и методами обработки этих сигналов на передаче и приёме. Различные методы модуляции требуют различных полос для передачи сигналов, а также различного соотношения уровней и мощностей сигналов и помех в точке приёма. Для передачи УКВ сигналов применяют не только простые виды модуляции (частотной или фазовой), но всё чаще начинают применять сложные виды модуляции такие как: ОФМСФ – относительная фазовая многопозиционная синфазная модуляция, ЧМНФ – частотная многопозиционная несинфазная модуляция, КАФМ – квадратурная амплитудно-фазовая модуляция, ДФМ (КАМ) – двоичная фазовая модуляция (квадратурная амплитудная модуляция) [7, 8].

Метеорная радиосвязь осуществляется на ультракоротких волнах сеансами связи при появлении следов метеороидов, которые используются в качестве естественных ретрансляторов сигналов УКВ. Для передачи и приёма этих сигналов применяются антенны УКВ типа «бегающая волна». Отраженные от таких ретрансляторов сигналы возбуждают в принимающей антенне сигнал с мощностью P_c . В антенне присутствуют шумы со спектральной плотностью мощности шума N_0 . Различные типы антенн по-разному влияют на требуемый уровень принимаемого отражённого сигнала УКВ, от которого зависит вероятность возникновения ошибок при приёме данных с различной скоростью манипуляции. Если обозначить h_0 – отношение энергии $E_э$ – элемента цифрового сигнала к спектральной плотности мощности шума N_0 , то:

$$h_0 = E_3 / N_0. \quad (4)$$

Тогда

$$h_0 = \frac{E_3}{N_0} = \frac{P_c \cdot T_3}{N_0}, \quad (5)$$

где $T_3 = 1/B$ – длительность элемента T_3 , с;
 B – скорость передачи бит/с;
 P_c – мощность принятого сигнала Вт;
 N_0 – спектральная плотность мощности шума.

Спектральная плотность мощности шума N_0 определяется по формуле

$$s(f) = \lim_{\Delta f \rightarrow 0} \frac{\Delta P(f)}{\Delta f} = \left[\frac{\text{Вт}}{\text{Гц}} \right]. \quad (6)$$

Из формулы (5) видно, что чем выше мощность принятого сигнала, тем больше h_0 . Оперативно измерять мощность короткого сигнала УКВ принятого через ненасыщенный след весьма сложно, но зато достаточно просто измерять уровень (амплитуду) этого сигнала. Уровень шума в точке приёма – $U_{\text{пор}}$ (на выходе из антенны УКВ и сопротивление входа РПУ – $R_{\text{вх}}$) практически не изменяются (без внешних преднамеренных воздействий). Максимальную амплитуду принимаемого сигнала A_0 мы можем легко измерить, тогда:

$$A_0 = \frac{P_c}{R_{\text{вх}}} = [B]. \quad (7)$$

Зная A_0 можно определить продолжительность энергетического контакта (ЭК) – $t_{\text{ЭК}}$ на УКВ через данный след от сгоревшего метеороида [4]:

$$t_{\text{ЭК}} = \tau \ln \frac{A_0}{U_{\text{пор}}}. \quad (8)$$

Формула (7) пригодна для определения продолжительности ЭК при появлении ненасыщенного (неуплотнённого) следа [8]. Ненасыщенные следы от сгоревших метеороидов появляются намного чаще (на два-три поряд-

ка), чем насыщенные, но их длительности хватает только для односторонней передачи коротких формализованных сообщений.

Оценка качества РМС при использовании часто появляющихся ненасыщенных метеорных следов. Ненасыщенные метеорные следы появляются чаще, чем насыщенные. Соответственно и кратковременные ЭК на УКВ через эти следы появляются сравнительно чаще. Это их свойство используется для частой передачи коротких формализованных сообщений (КФС). При этом обеспечивается только односторонняя (симплексная) связь по РМС. Пример технологии передачи КФС через ненасыщенные следы метеороидов представлен на рис. 1.

Качество РМС в этом случае характеризуется вероятностью приёма КФС при его однократной передаче. Повышение вероятности доведения КФС до адресата (как элемента ИТК) достигается путём многократных передач этого КФС в течение времени не более допустимого в ИТК – $t_{\text{кфсд}}$. Показателями качества такой образовавшейся РМС будут: время задержки КФС – $t_{\text{кфс}}$ и вероятность доведения КФС до адресата – $P_{\text{кфс}}$ при его однократной передаче. Критериями оценки качества РМС в этом случае будет время задержки КФС в РМС не более допустимого $t_{\text{кфсд}}$ и вероятность доведения КФС не ниже требуемой ИТК $P_{\text{кфсд}}$. Требуемую вероятность доведения $P_{\text{кфсд}}$ и время задержки КФС в РМС не более допустимого $t_{\text{кфсд}}$ определяет пользователь ИТК. Задача РМС – за кратчайшее время $t_{\text{мс}}$ обнаружить метеорный след, который возможно использовать в качестве пассивного ретранслятора радиосигнала УКВ несущего КФС. Если время доведения КФС не превышает допустимого $t_{\text{кфс}} < t_{\text{кфсд}}$, а вероятность доведения КФС не ниже требуемой $P_{\text{кфс}} > P_{\text{кфсд}}$, то качество РМС считается нормальным. В противном случае оценка качества РМС – ниже нормы и требуется вмешательство оператора для приведения РМС в заданную норму.

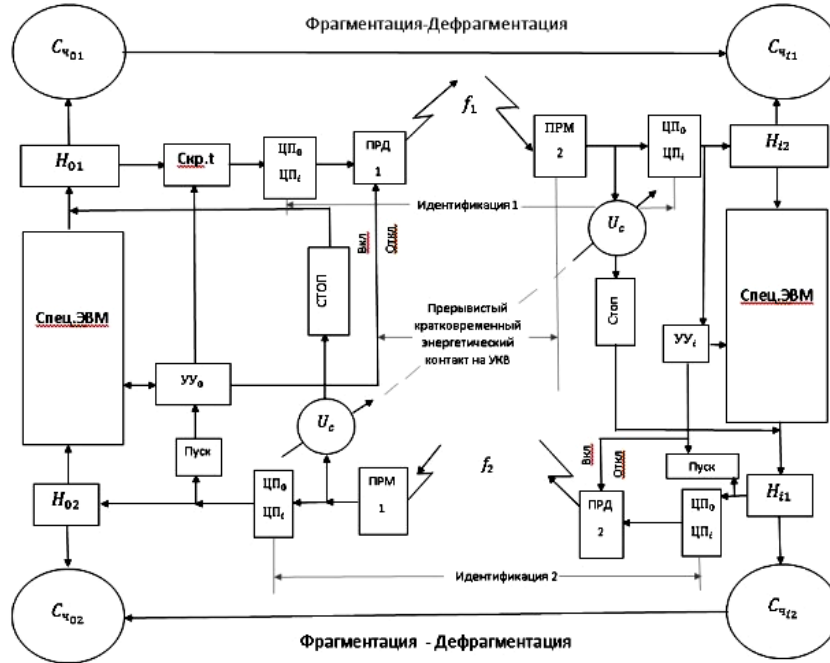


Рис. 2. Структурно-функциональная схема радиолинии метеорной связи на ультракоротких волнах, обеспечивающая фрагментацию-дефрагментацию (сшивку) потока передаваемых информационных данных

После получения сигнала о достаточном уровне сигнала для устойчивой работы демодулятора, блок контроля уровня принимаемого сигнала вырабатывает сигнал о наличии энергетического контакта и выдает его в УУ_i ведомой станции.

Помехоустойчивость РМС. При определении помехоустойчивости и эффективности систем метеорной связи мы будем исходить из того, что статистические характеристики сигнала и помехи известны. В реальных условиях эти характеристики могут быть определены экспериментально [10, 11]. Рассмотрим случай, когда амплитуда сигнала изменяется по закону Рэлея, а помеха имеет характер «белого шума». Эти условия для многих систем связи максимально близки к реальным. Пусть $p(S)$ – плотность вероятности отношения S сигнала к помехе, а $p_0(S)$ – вероятность ошибочного приёма элемента сигнала при данном способе передачи и данном значении S . Тогда при достаточно медленном изменении амплитуды сигнала по сравнению со скоростью передачи можно записать следующее равенство:

$$\overline{P_0} \int_{S_t}^{\infty} p(S) dS = \int_{S_t}^{\infty} P_0(S) p(S) dS, \quad (9)$$

где $\overline{P_0}$ – средняя вероятность ошибки в РМС;
 S_t – пороговое значение отношения сигнала

к помехе (при $S < S_t$ информация не передаётся). В реальности, обычно порог устанавливается не по величине S , а по суммарному уровню сигнала и помехи. Интеграл в правой части равенства определяет совместную вероятность двух событий – наличия связи и ошибки приёма. Отсюда вероятность ошибки в РМС можно вычислить по формуле

$$\overline{P_0} = \frac{\int_{S_t}^{\infty} P_0(S) p(S) dS}{\int_{S_t}^{\infty} p(S) dS}. \quad (10)$$

Средняя скорость передачи в элементарных посылках в секунду будет равна:

$$M = w \int_{S_t}^{\infty} p(S) dS. \quad (11)$$

Соответственно, в двоичных единицах за секунду:

$$R = MH = wH \int_{S_t}^{\infty} p(S) dS, \quad (12)$$

где H – количество информации, приходящееся на один элемент сигнала.

Интегральная функция распределения

вероятности сигнала по закону Рэлея определяется известным выражением:

$$P(U) = e^{-\frac{U^2}{2\sigma_c^2}}. \quad (13)$$

При наличии флуктуационных помех типа «белого шума» отношение среднеквадратических значений сигнала σ_c^2 и помехи σ_n^2 обратно пропорционально скорости передачи w (так как полоса пропускания канала пропорциональна скорости передачи), то есть:

$$S_0 = \frac{\sigma_c^2}{\sigma_n^2} \equiv \frac{\sigma_c^2}{w\sigma^2} \equiv \frac{w_0}{w}, \quad (14)$$

где S_0 – среднее значение отношения S сигнала к помехе;

$$w_0 = \frac{\sigma_c^2}{\sigma^2} - \text{постоянная для данной системы}$$

величина;

σ^2 – удельная мощность (интенсивность) помехи на входе приёмника.

Средняя вероятность ошибки в РМС соответственно равна:

$$\bar{P}_0 = \frac{1}{2 + S_0} e^{-\frac{S_0}{2}} = \frac{1}{2 + \frac{w}{w_0}} e^{-\frac{S_0}{2}}. \quad (15)$$

При этом средняя скорость передачи, вычисленная как среднее число элементарных посылок в секунду, с учетом формулы (11) равна:

$$M = w e^{-\frac{S_0}{2}} = w e^{-\frac{S_0 w}{w_0}}. \quad (16)$$

Графики функций $\frac{M}{w}$, рассчитанные по формуле (16) при различных значениях S_0 , приведены на рис. 3.

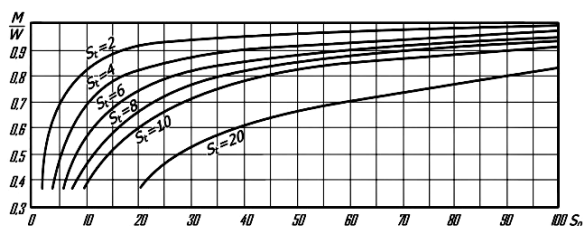


Рис. 3. Графики зависимости $\frac{M}{w}$ от S_0 при различных значениях S_0

Обсуждение

Анализируя данный материал можно сказать, что повысить помехоустойчивость РМС в условиях изменений амплитуды сигнала в рабочие интервалы времени существования насыщенного метеорного следа представляется возможным либо уменьшением вероятности ошибки, либо повышением средней скорости передачи данных при заданной вероятности ошибки. В традиционных системах связи для уменьшения вероятности ошибки при заданной скорости передачи может быть использовано увеличение мощности передатчика, что на сегодняшний день не является рациональным способом.

Увеличение длительности рабочих промежутков времени, соответственно, приводит к уменьшению времени задержки передачи и к увеличению средней скорости без увеличения мгновенной скорости передачи и, следовательно, без расширения полосы пропускаемых частот. Таким образом, при заданной вероятности ошибки необходимая средняя скорость M может быть обеспечена либо путём увеличения мгновенной скорости w при сравнительно большом значении порога S_0 , либо путём снижения S_0 при сравнительно малом значении w . Иными словами, передачу можно вести с большой мгновенной скоростью в течение относительно небольшого времени либо с малой скоростью в течение относительно большого интервала времени. Выбор того или другого режима передачи зависит от реальных условий работы системы: статистических свойств сигнала, характера помех, условий распространения радиоволн и т.д. В частности, при наличии многолучевого распространения радиоволн выбор режима с большой мгновенной скоростью ограничен минимально допустимой величиной длительности элементарного сигнала. Очевидно, что наиболее выгодным режимом передачи будет такой, при котором мгновенная скорость передачи автоматически изменяется с изменением уровня сигнала. Такая система позволит эффективно использовать как сильные, так и слабые сигналы путём увеличения мгновенной скорости передачи при сильных сигналах и уменьшения – при слабых.

Выводы

1. Стохастическая прерывистость радиолинии метеорной связи на ультракоротких волнах вынуждает производить оценку качества каждого вновь образовавшегося энергетического контакта с целью определения пригодности

Литература

его для передачи данных с требуемыми качественными характеристиками.

2. Кратковременность каждого энергетического контакта на УКВ заставляет осуществлять такую оценку за минимально возможное время, так как эта оценка отнимает время и без того кратковременного энергетического контакта необходимого для передачи информационных данных.

3. Разработанные оперативный технологический контроль, многопараметрическая и, соответственно, многокритериальная многофазная оперативная комплексная оценка качества радиолинии метеорной связи на УКВ позволяют выработать интегральную оценку за минимально возможное время с минимально возможной погрешностью.

4. Соотношения, представленные в статье, позволяют дать приближенную оценку радиолиний метеорной связи: определить вероятность ошибки и скорость передачи при некоторых идеализированных условиях (рэлеевском распределении амплитуд сигнала и флуктуационной помехе).

5. Радиолинии метеорной связи представляют большой практический интерес. В них скорость передачи при заданной помехоустойчивости может быть увеличена не путём усложнения системы кодирования, а путём использования ёмкости канала обратной связи при сравнительно простых кодирующих устройствах. В пределе скорость передачи в прямом направлении может быть увеличена до пропускной способности канала. Также вероятность ошибки при заданной скорости передачи может быть уменьшена более чем на порядок или во столько же раз может быть увеличена средняя скорость передачи при заданной помехоустойчивости.

1. Антропов Д.А. Проблемы эксплуатации множества группировок радиоэлектронных средств различного назначения в ходе формирования современной информационно-телекоммуникационной инфраструктуры арктических регионов страны // Арктика: экология и экономика. 2014. №2 (14). С. 67-78.

2. Мирошников В.И., Бутко П.А., Жуков Г.А. Основные направления развития метеорной связи // Научные технологии в космических исследованиях Земли. 2019. Т. 11. № 4. С. 30-47.

3. Мирошников В.И., Бутко П.А., Жуков Г.А. Составной тракт доведения информации до работотехнических комплексов в северных морях // Техника средств связи. 2019. № 3 (147). С. 2-26.

4. Сидоров А.В., Орехов А.О. Рассеяние радиоволн на насыщенных метеорных следах // Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. 2013. № 12-1. С. 129-133.

5. Дорошенко В.И., Воронин С.В., Ксенофонтов Ю.Г. Радиолинии метеорной связи в телекоммуникационной сети Северного морского пути // Труды учебных заведений связи. 2019. Т. 5. № 3. С. 102-107.

6. Указ Президента Российской Федерации от 31.07.2022 № 512 «Об утверждении Морской доктрины Российской Федерации».

7. Основы построения телекоммуникационных систем и сетей: учебник для вузов / Под ред. В.Н. Гордиенко и В.В. Крухмалёва. М.: Горячая линия – Телеком, 2004. 510 с.

8. Томаси У. Электронные системы связи. М.: Техносфера, 2007. 1360 с.

9. Кульгин М. Технологии корпоративных сетей. Энциклопедия – СПб.: Издательство «Питер», 1999. 704 с.

10. Благов Д.С., Волвенко С.В. Повышение скорости передачи информации в метеорных системах связи путем использования сигналов переменной длительности // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление. 2010. № 5. С. 7-13.

11. Волвенко С.В., Макаров С.Б. Имитационная модель метеорной радиотехнической системы передачи сообщений // Проблемы информационной безопасности. 2007. № 1. С. 73-85.

Поступила 17.01.2023; принята к публикации 13.06.2023

Информация об авторах

Дорошенко Виктор Иванович – д-р техн. наук, профессор кафедры радиосвязи на морском флоте, Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова (198035, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7), e-mail: morechod1954@yandex.ru, тел. +7-911-170-23-55, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9119-1337>

Ксенофонтов Юрий Геннадьевич – канд. техн. наук, доцент кафедры радиосвязи на морском флоте, Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова (198035, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7), e-mail: ksenofontov.ura@mail.ru, тел. +7-911-264-96-90, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3174-8885>

Мартынов Виктор Леонидович – д-р техн. наук, профессор кафедры радиосвязи на морском флоте, Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова (198035, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7), e-mail: martynovvoenmeh@mail.ru, тел. +7-921-327-92-11, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7505-9301>

QUALITY CONTROL OF METEOR COMMUNICATION RADIO LINK ON ULTRASHORT WAVES

V.I. Doroshenko, Yu.G. Ksenofontov, V.L. Martynov

Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, St. Petersburg, Russian Federation

Abstract: the paper shows the possibility of multi-parameter and, consequently, multi-criteria multiphase rapid complex quality assessment of meteor radio communication line at ultra-short waves. It is that the operational technological quality assessment of the high-frequency analog communication channel should be worked out within a few microseconds, and the formed discrete data transmission channel – within a few milliseconds. As process is multiphase, time of development of integral criterion of suitability of meteor communication radio line for telecommunication and possibility of its use in infotelecommunication is strictly limited in each phase of this process, therefore operational technological control and comprehensive quality assessment allow to develop an integral assessment for the minimum possible time with the minimum possible error. The article proposes a variant of the structural and functional diagram of the meteor communication radio line on ultrashort waves, which provides fragmentation-defragmentation of the stream of transmitted information data. The authors also focus on such a qualitative parameter as noise immunity of radio line, which directly influences on the channel bandwidth, ratios are given, from which it follows that the probability of error at a given transmission rate can be reduced by more than an order of magnitude or the average transmission rate can be increased by the same number of times at a given interference immunity

Key words: infotelecommunications, meteor communication radio line, rapid complex quality assessment of communication, system approach, indicators and criteria of communication quality, noise immunity, error probability

References

1. Antropov D.A. “Problems of operation of many groups of electronic means for various purposes during the formation of the modern information and telecommunication infrastructure of the Arctic regions of the country”, *Arctic: Ecology and Economics (Arktika: ekologiya i ekonomika)*, 2014, no. 2 (14), pp. 67-78.
2. Miroshnikov, V.I., Butko P.A., Zhukov G.A. “The main directions of development of meteor communications”, *Science-intensive technologies in space exploration of the Earth (Naukoemkie tekhnologii v kosmicheskix issledovaniyax Zemli)*, 2019, vol. 11, no. 4, pp. 30-47. DOI: 10.24411/2409-5419-2018-10277.
3. Miroshnikov, V.I., Butko P.A., Zhukov G.A. “Integrated communication path to operational systems in the northern seas”, *Communication equipment (Tekhnika sredstv svyazi)*, 2019, no. 3 (147), pp. 2-26.
4. Sidorov A.V., Orexov A.O. “Scattering of radio waves on saturated meteor traces”, *Current problems of the humanities and natural sciences (Aktualnye problemy gumanitarnykh i estestvennykh nauk)*, 2013, no. 12-1, pp. 129-133.
5. Doroshenko V.I., Voronin S.V., Ksenofontov Yu.G. “Radio lines of meteor communication in the telecommunication network of the Northern Sea Route”, *Proceedings of educational institutions of communication (Trudy uchebnykh zavedeniy svyazi)*, 2019, vol. 5, no. 3, pp. 102-107. DOI: 10.31854/1813-324X-2019-5-3-102-107.
6. Decree of the President of the Russian Federation on 31.07.2022, no. 512 “On Approval of the Maritime Doctrine of the Russian Federation” (*Ukaz Prezidenta Rossijskoj Federacii ot 31.07.2022 № 512 “Ob utverzhdenii Morskoj doktriny` Rossijskoj Federacii”*).
7. Kruxmalyov V.V., Gordienko V.N., “Basics of building telecommunication systems and networks: textbook for universities” (“Osnovy postroyeniya telekommunikatsionnykh sistem i setey: uchebnik dlya vuzov”), ed. by Gordienko V.N. and Kruxmalyova V.V., Mochenov A.D. et. al., Moscow, Goryachaya liniya-Telekom, 2004, 510 p.
8. Tomasi U. “Electronic communication systems” (“Elektronnyye sistemy svyazi”), Moscow, Texnosfera, 2007, 1360 p.
9. Kulgin M. “Enterprise networking technologies: encyclopedia” (“Tekhnologii korporativnykh setey, entsiklopediya”), S-Petersburg, Izdatelstvo “Piter”, 1999, 704 p.
10. Blagov D.S., Volvenko S.V. “Increasing the speed of information transmission in meteor communication systems by using variable duration signals”, *Scientific and technical statements of SPbGPU. Informatics. Telecommunications. Management (Nauchno-tekhnicheskie vedomosti SPbGPU. Informatika. Telekommunikacii. Upravlenie)*, 2010, no. 5, pp. 7-13.
11. Volvenko S.V., Makarov S.B. “Simulation model of the meteor radio communication system”, *Information security problems (Problemy informacionnoj bezopasnosti)*, 2007, no. 1, pp. 73-85.

Submitted 17.01.2023; revised 13.06.2023

Information about the authors

Victor I. Doroshenko, Dr. Sc. (Technical), Professor, Professor of Maritime Radio communication department, Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping (5/7 Dvinskaya str., St. Petersburg 198035, Russia), e-mail: morechod1954@yandex.ru, tel.: +7-911-170-23-55, ORCID <https://orcid.org/0000-0002-9119-1337>

Yuriy G. Ksenofontov, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Associate Professor of Maritime Radio communication department, Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping (5/7 Dvinskaya str., St. Petersburg 198035, Russia), e-mail: ksenofontov.ura@mail.ru, tel.: +7-911-264-96-90, ORCID <https://orcid.org/0000-0002-3174-8885>

Victor L. Martynov, Dr. Sc. (Technical), Associate Professor, Professor of Maritime Radio communication department, Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping (5/7 Dvinskaya str., St. Petersburg 198035, Russia), e-mail: martynovvoenmeh@mail.ru, tel.: +7-921-327-92-11, ORCID <https://orcid.org/0000-0002-7505-9301>

ИСТОЧНИК ОПОРНОГО НАПРЯЖЕНИЯ НА ШИРИНЕ ЗАПРЕЩЕННОЙ ЗОНЫ ДЛЯ ОТЕЧЕСТВЕННОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА

А.В. Русанов¹, Л.В. Сопина²

¹Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

²АО «Научно-исследовательский институт электронной техники», г. Воронеж, Россия

Аннотация: описывается источник опорного напряжения, который формирует высокостабильное напряжение 1,259 В для источника питания 8,6-15 В. Источник опорного напряжения генерирует термостабильное выходное напряжение, которое не зависит от колебаний входного напряжения. Так как параметры комплиментарных металл оксид полупроводник (КМОП) приборов сильно зависят от температуры, то единственным способом снизить ее является комбинация приборов с разными по знаку коэффициентами температурной зависимости – сложение напряжения с отрицательным температурным коэффициентом (СТАТ (например, переход база-эмиттер биполярного транзистора в диодном включении (U_{BE})) с напряжением с положительным температурным коэффициентом (РТАТ (источник тока, ток которого возрастает прямо пропорционально температуре)). Для того чтобы получить нулевой температурный коэффициент источника опорного напряжения (ИОН) необходимо, чтобы температурный коэффициент РТАТ генератора сравнялся по модулю с температурным коэффициентом перехода U_{BE} . Важным достоинством разработанного ИОН являются предельно низкие значения коэффициента температурной нестабильности в диапазоне от -60 до 125°C и коэффициента нестабильности по напряжению. Разработка схемы и моделирование проводились на отечественном технологическом процессе с проектными нормами 3 мкм, также разработана топология схемы. Моделирование проводилось в системе автоматизированного проектирования (САПР) разработки интегральных схем

Ключевые слова: источник опорного напряжения, IP блок, аналоговый СФ блок, интегральная схема, микросхема, ИОН

Введение

Источник опорного напряжения (ИОН) – элемент силовой микроэлектроники, формирующий напряжение, независимое от изменений напряжения питания, температуры и нагрузки. Необходимость в таком источнике, в частности, возникает при разработке линейного стабилизатора напряжения, в которых он применяется для создания эталонного опорного напряжения. Таким образом, данная схема широко применяется в области радиоэлектронных систем для построения схем преобразования аналоговых сигналов.

Описание работы схемы

Принцип работы предлагаемой схемы ИОН основан на сложении двух напряжений: возрастающее напряжение называется пропорциональным абсолютной температуре (РТАТ), а уменьшающее – дополнительным к абсолютной температуре (СТАТ) (рис. 1). Величины наклонов напряжений должны быть равными. При сложении двух напряжений результирующая величина будет независимой от температуры. Реализация такого принципа возможна по-

сле разработки источников напряжений РТАТ и СТАТ.

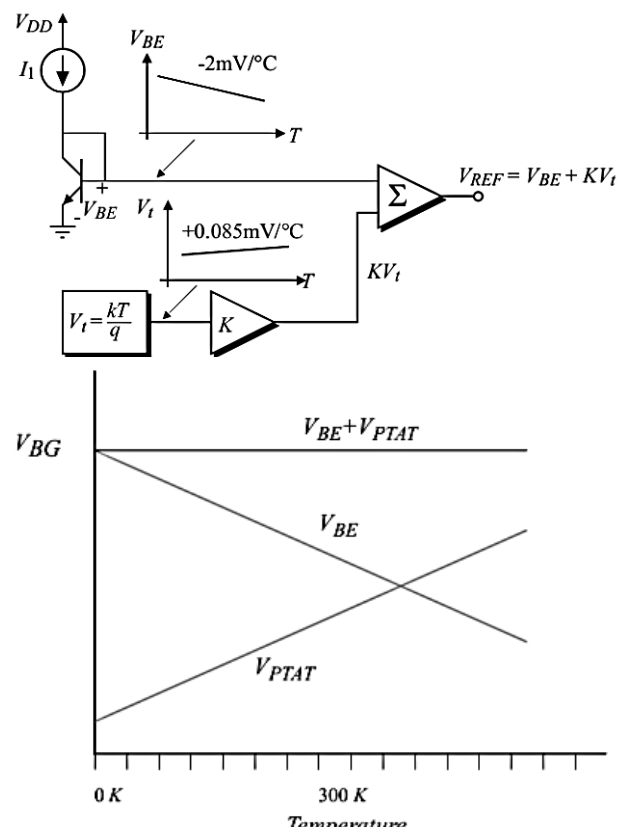


Рис. 1. Принцип работы схемы ИОН [1]

Получить напряжение с отрицательным температурным коэффициентом возможно при использовании диода, работающего в области прямого смещения. В качестве диода может

использоваться биполярный транзистор с коллектором, объединенным с базой. Зависимость напряжения $U_{БЭ}$ от температуры представлена на рис. 2.

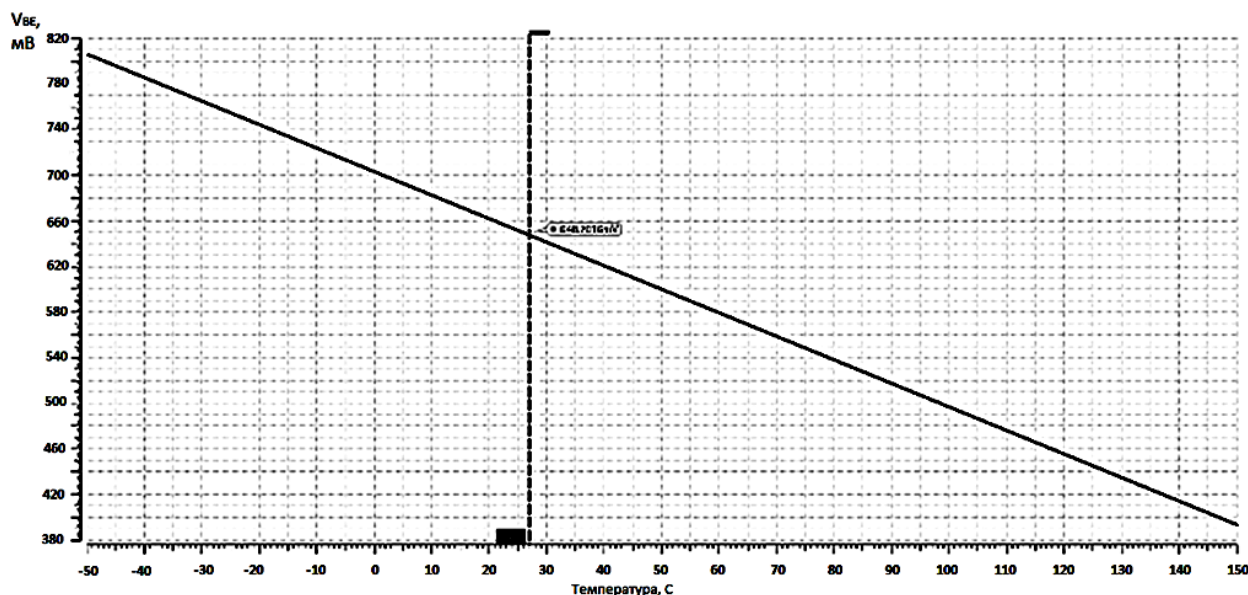


Рис. 2. Зависимость напряжения $U_{БЭ}$ от температуры

РТАТ-генератор формирует напряжение с положительным температурным коэффициентом (рис. 3), являясь при этом источником тока с прямо пропорциональной зависимостью от температуры. Плотность тока одного из транзисторов должна быть больше плотности тока другого. Отношение плотностей тока является неизменной величиной.

Из зависимости на рис. 2 видно, что:

$$\Delta U_{БЭ} = 649\text{мВ} - 584\text{мВ} = 65\text{мВ}. \quad (1)$$

Схема РТАТ – генератора тока приведена на рис. 4:

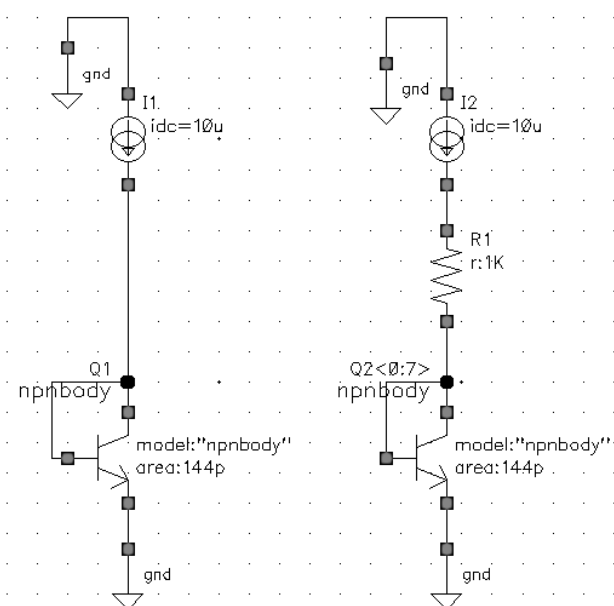


Рис. 3. Схема исследования напряжения $\Delta U_{БЭ}$ на резисторе R

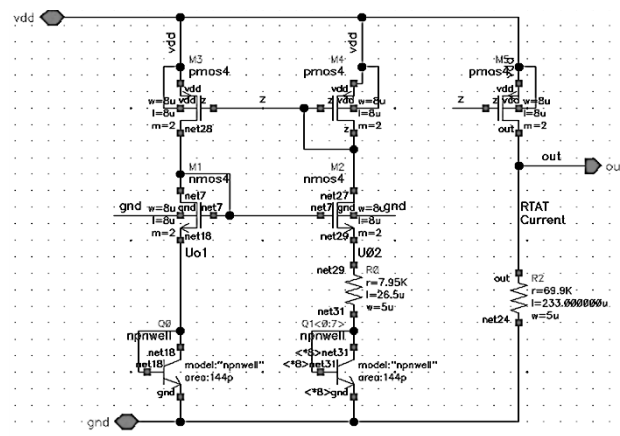


Рис. 4. Схема РТАТ – генератора тока

Для формирования равных напряжений в ветвях используются токовые зеркала. Токи, протекающие через транзистор M5 и через транзисторы M3–M4 равны между собой. Ток, протекающий через резистор R_2 формирует напряжение РТАТ и определяется по формуле:

$$U_2 = \frac{R_2}{R_1} \cdot V_T \cdot \ln(n). \quad (2)$$

Из рис. 5 видно, что напряжение U_2 складывается с напряжением база-эмиттер транзистора Q_3 , таким образом, формируется U_{REF} , равное:

$$U_{REF} = U_{БЭ} + \frac{R_2}{R_1} \cdot V_T \cdot \ln(n). \quad (3)$$

Для того чтобы получить нулевой температурный коэффициент ИОН необходимо, чтобы температурный коэффициент РТАТ генератора сравнялся по модулю с температурным коэффициентом перехода $U_{БЭ}$, соответственно напряжение РТАТ нужно увеличить в несколько раз.

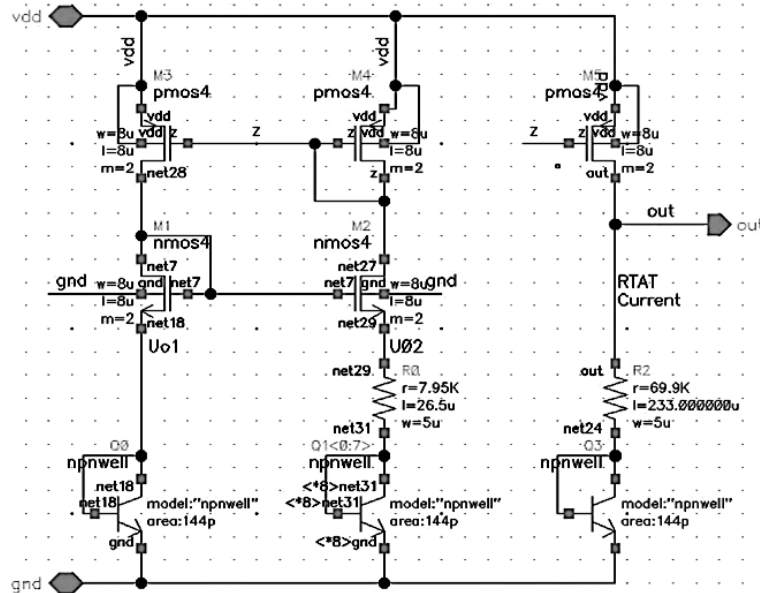


Рис. 5. Схема ИОН

Для уменьшения зависимости выходного напряжения схемы от колебаний входного напряжения в схеме используются высокоомные

каскадные генераторы тока, представленные транзисторами M6-M8, M9-M10 [2] (рис. 6).

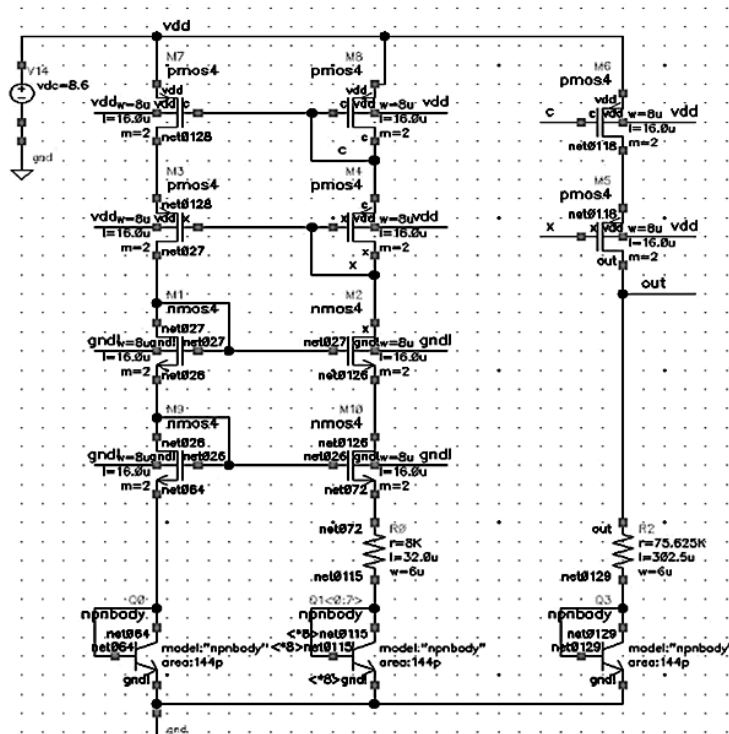


Рис. 6. Схема ИОН с использованием каскадов

Результаты моделирования

Графики зависимости опорного напряжения при изменении напряжения питания и температуры приведены ниже (рис. 7–9).

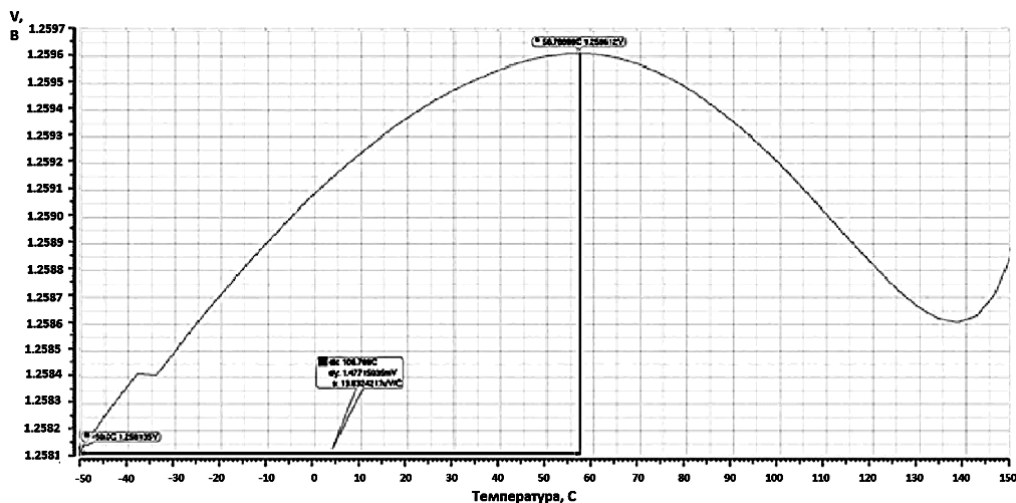


Рис. 7. Температурная зависимость выходного напряжения ИОН

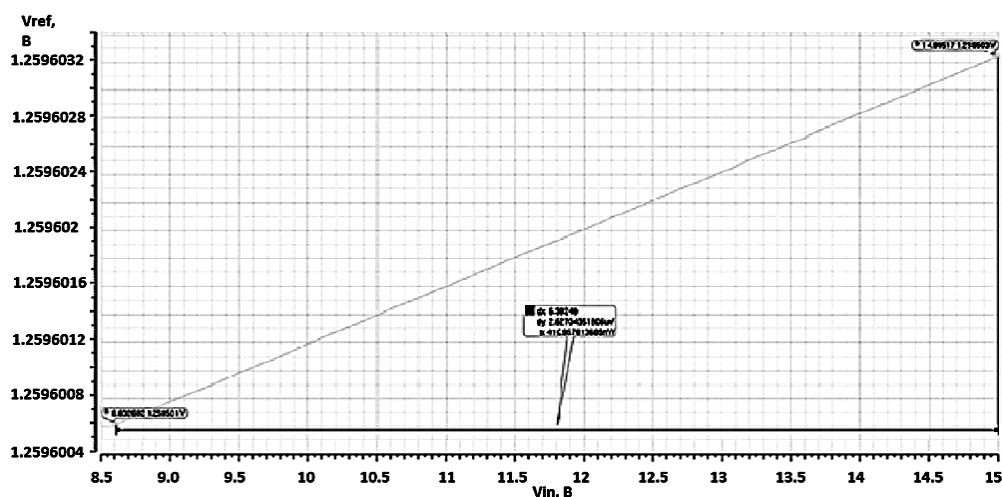


Рис. 8. Зависимость выходного напряжения ИОН от источника питания

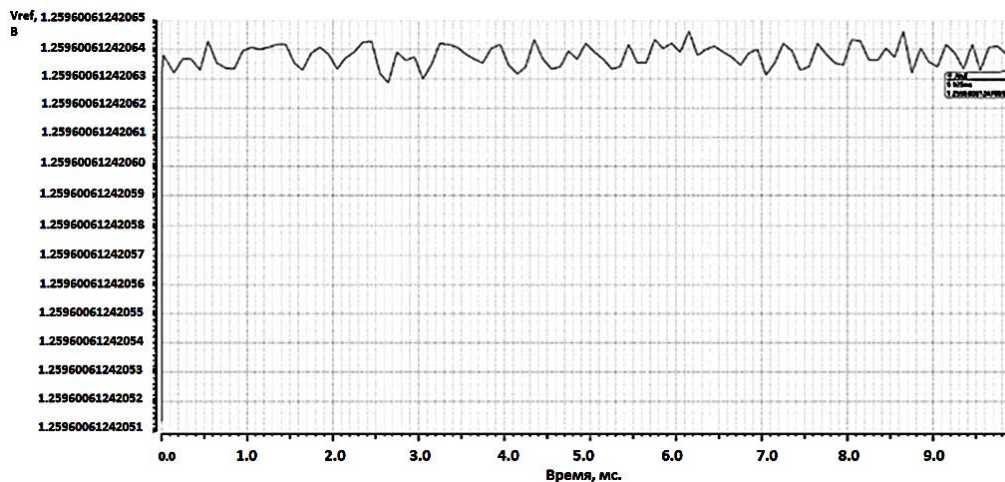


Рис. 9. Полученное значение выходного напряжения

Разработка топологии

В ходе проведения технологического процесса из-за несовершенства оборудования, погрешностей в ходе проведения технологических операций, а также из-за внутренних и внешних электрических полей в пластине возникает разброс технологических параметров

[3-5]. Для уменьшения отклонения выходных параметров аналоговых блоков применяются специальные приемы топологического проектирования, такие как согласование элементов и их симметричное расположение. Для обеспечения согласования резисторы выполнены в виде наборов на основе однотипных резисторов с равным сопротивлением (рис. 10).

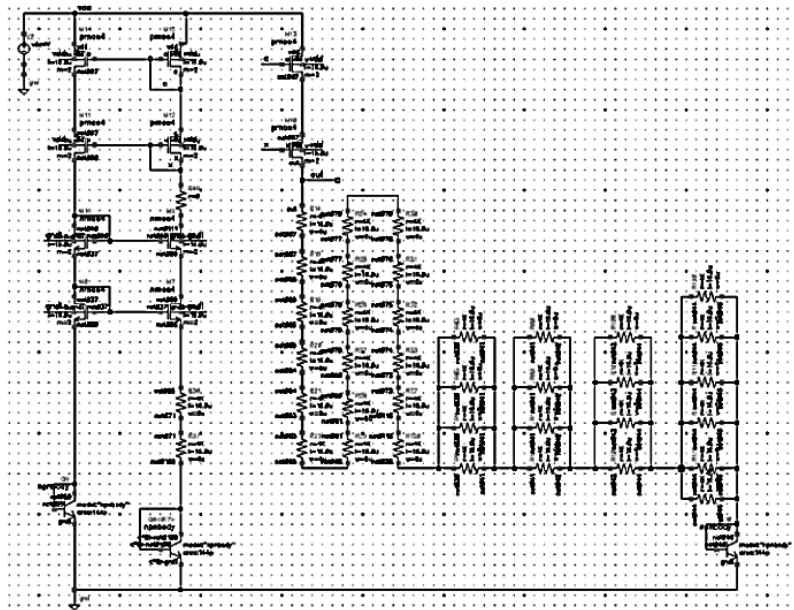


Рис. 10. Схема ИОН с согласованными резисторами

Разработана топология схемы (рис. 11).

Заключение

IP блок разработан на отечественном БиКМОП технологическом процессе с проектными нормами 3 мкм. ИОН формирует выходное напряжение 1,259 В, которое не зависит от колебаний входного напряжения (диапазон входного напряжения 8-16 В) и от колебаний температуры (-60 – 125 °С).

Полученные параметры схемы источника опорного напряжения приведены в таблице.

Параметры ИОН

Параметры	Значение	Единицы измерения
VDD	Напряжение питания	8,6-15 В
U_{REF}	Выходное напряжение	1,2595 В
K_U	Коэффициент неустойчивости по напряжению	0,0001 %
K_T	Коэффициент температурной неустойчивости	0,001 %
$I_{П}$	Ток потребления	33 мкА
T	Температурный диапазон	-60-125 °С
HxL	Габариты топологии	440,5x457 мкм x мкм

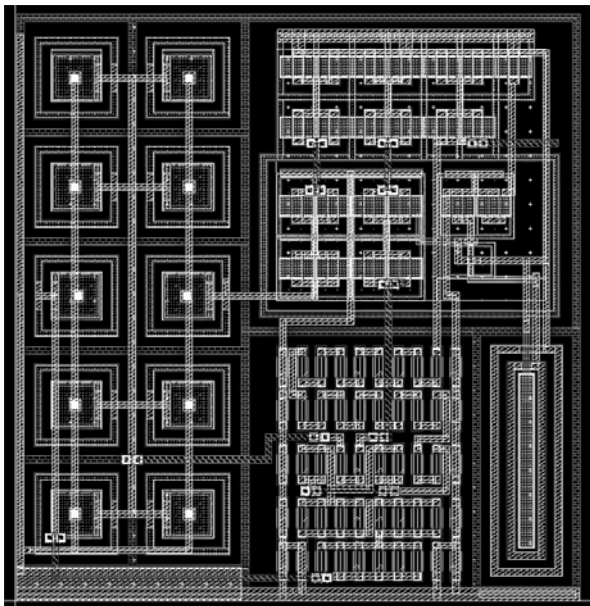


Рис. 11. Топология ИОН

Литература

1. Ракитин В.В. Интегральные схемы на КМОП-транзисторах: учебное пособие. М., 2007. 95 с.
2. Суханова Н.В. Основы электроники и цифровой схемотехники: учеб. пособие. Воронеж: ВГУИТ, 2017. 95 с.
3. Прохоров С.Г., Шиндор О.В. Аналоговая электроника в приборостроении. Руководство по решению задач: учебное пособие. СПб.: Лань, 2022. 244 с.

4. Allen P.E., Holberg D.R. CMOS Analog Circuit Design (The Oxford Series in Electrical and Computer Engineering). – 3rd edition, – Oxford University Press: USA, 2011. 757 p.
5. Негадаев В.А. Силовая электроника: учебное пособие. Кемерово: КузГТУ имени Т.Ф. Горбачева, 2020. 126 с.

Поступила 30.03.2023; принята к публикации 13.06.2023

Информация об авторах

Русанов Александр Валерьевич – канд. техн. наук, ассистент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: ralval@rambler.ru.

Сопина Лилия Вячеславовна – инженер, АО «Научно-исследовательский институт электронной техники» (394033, Россия, г. Воронеж, ул. Ст. Большевиков, д. 5), e-mail: sopina1803@gmail.com.

BANDGAP REFERENCE VOLTAGE SOURCE FOR A DOMESTIC TECHNOLOGICAL PROCESS

A.V. Rusanov¹, L.V. Sopina²

¹Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

²Research Institute of Electronic Technology, Voronezh, Russia

Abstract: this paper describes a reference voltage source that generates a stable voltage of 1.259 V for a 8.6-15 V power supply. The reference voltage source generates a thermostable output voltage that is independent of input voltage fluctuations. Since the parameters of complementary metalloid semiconductor devices strongly depend on temperature, the only way to reduce it is a combination of devices with temperature dependence coefficients of different sign – the addition of a voltage with a negative temperature coefficient (STAT). It can be the base-emitter junction of a bipolar transistor in diode switching (U_{BE})) with a voltage with a positive temperature coefficient (PTAT) (a current source whose current increases in direct proportion to the temperature). In order to obtain a zero temperature coefficient of the reference voltage source (RVS), it is necessary that the temperature coefficient of the PTAT generator is equal in modulus to the temperature coefficient of the transition U_{BE} . An important advantage of the developed RVS is the extremely low values of the temperature instability coefficient in the range from -60 to 125 °C and the voltage instability coefficient. The development of the scheme and modeling were carried out on a domestic technological process with design standards of 3 microns, the topology of the scheme was also developed. The simulation was carried out in the computer-aided design (CAD) system for the development of integrated circuits

Key words: reference voltage source, IP block, integrated circuit, microcircuit, RVS

References

1. Rakitin V.V. “Integrated circuits based on CMOS transistors” (“Integral’nyye skhemy na KМOP-tranzistorakh”), Moscow, 2007, 95 p.
2. Sukhanova N.V. “Fundamentals of electronics and digital circuitry” (“Osnovy elektroniki i tsifrovoy skhemotekhniki”), Voronezh, VGUIT, 2017, 95 p.
3. Prokhorov S.G., Shindor O.V. “Analog electronics in instrumentation. A guide to problem solving” (“Analogovaya elektronika v priborostroyenii. Rukovodstvo po resheniyu zadach”) - St. Petersburg, Lan, 2022, 244 p.
4. Allen P.E., Holberg D.R. “CMOS Analog Circuit Design” (The Oxford Series in Electrical and Computer Engineering), Oxford University Press, USA, 2011, 757 p.
5. Negadaev V.A. “Power electronics” (“Silovaya elektronika”), Kemerovo: KuzGTU, 2020, 126 p.

Submitted 30.03.2023; revised 13.06.2023

Information about the authors

Alexander V. Rusanov – Cand. Sc. (Technical), assistant, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: ralval@rambler.ru

Liliya V. Sopina – Engineer, JSC Research Institute of Electronic Technology (5 St. Bolshevnikov str., Voronezh 394033, Russia), e-mail: sopina1803@gmail.com

РАЗРАБОТКА ВЫСОКОПРОИЗВОДИТЕЛЬНОГО LDPC-ДЕКОДЕРА С КОНВЕЙЕРНОЙ ОБРАБОТКОЙ ДАННЫХ

А.В. Башкиров, М.В. Хорошайлова, К.Д. Ципина

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

Аннотация: разработан эффективный алгоритм декодирования суммы произведений (MSPA), который не только сокращает задержку критического пути, но и улучшает использование аппаратных средств и пропускную способность декодера при сохранении погрешности алгоритма декодирования. Алгоритм min-sum (MS) и его варианты заменяют сложные вычисления контрольных узлов (CN) в SPA простыми операциями сложения и сравнения, но это приводит к потере производительности до 1 дБ по сравнению с SPA для более высоких длин кодовых слов, кодовых скоростей и степеней узла. Представлены три полностью параллельные архитектуры низкоплотностного декодера, основанные на структуре проекционной геометрии (PG) полей Галуа LDPC-кодов. Эти конструкции отличаются архитектурами битового узла (BN) и контрольного узла (CN). Схема 9-битного квантования с фиксированной точкой используется для достижения лучшей производительности при исправлении ошибок. Другим значительным вкладом этой работы является конвейеризация предлагаемых архитектур декодера для дальнейшего повышения общей пропускной способности. Эти параллельные и конвейерные архитектуры реализованы для 73-битных (скорость 0,616) и 1057-битовых (скорость 0,769) кодов PG-LDPC с регулярной структурой на программируемой логической интегральной схеме (ПЛИС) Xilinx Virtex-6 LX760. Предлагаемые конструкции также являются гибкими с точки зрения квантования, степени узла, коэффициента параллельности и длины кодового слова

Ключевые слова: коды с низкой плотностью проверки четности (LDPC), моделирование, алгоритм декодирования суммы произведений (SPA), ПЛИС, поля Галуа (GF)

Введение

Кодирование с контролем ошибок имеет большое значение в современных системах цифровой связи для обнаружения и исправления ошибок в принимаемых потоках данных. Коды с низкой плотностью проверки четности (LDPC) представляют собой особый класс линейных блочных кодов, впервые введенных Галлагером [1] в 1962 году. Они являются конкурентами турбокодов [2] для контроля ошибок в цифровых системах хранения данных и связи. Однако турбокоды имеют ограниченное применение по сравнению с LDPC кодами из-за их низкого коэффициента усиления при кодировании, высокой задержки декодирования и необходимости проведения очень сложных вычислений. LDPC-коды играют заметную роль в современных системах связи, которые требуют не только превосходных характеристик ошибок, близких к пределу Шеннона, по сравнению с обычными каналами [3, 4]. Эти две особенности продвигают использование LDPC-кодов как одних из наиболее подходящих кандидатов для различных стандартов связи [5]. Однако коды LDPC с более высокими скоростями кодирования в основном по-

лезны для стандартов с низким уровнем шума и высокой пропускной способностью, таких как мультиплексирование с ортогональным частотным разделением (от англ. orthogonal frequency-division multiplexing, OFDM).

Среди различных классов LDPC-кодов LDPC-коды проекционной геометрии (PG) с алгоритмом декодирования суммы произведений (SPA) имеют большое минимальное расстояние, которое демонстрирует наилучшую производительность по ошибкам и более быструю сходимость. Однако высокопроизводительные конвейерные системы с высокой пропускной способностью PG-LDPC декодера, разработанные с использованием SPA, по-прежнему являются большой проблемой (большим вызовом) из-за более высокой взаимосвязи и вычислительной сложности. Многие из существующих аппаратных реализаций LDPC-кодов используют последовательные или частично параллельные архитектуры с общим доступом к памяти, где площадь микросхемы и стоимость оборудования вызывают большие ограничения.

Итак, для решения этих проблем в этой статье предлагаем высокопроизводительные, с высокой пропускной способностью, ресурсоэффективные конструкции полностью параллельных и конвейерных декодеров PG-

LDPC, которые способны обеспечивать пропускную способность в диапазоне гигабит в секунду (Gbps) при умеренной длине блока.

Структурированные LDPC-коды на основе проекционной геометрии

Код LDPC полностью описывается $M \times N$ разреженной матрицей проверки четности H , где M строк представляют ограничения проверки четности, а N столбцов, каждый из которых соответствует определенному биту из которых соответствует определенному биту кодированного слова. Кодовое слово длиной N

$$H = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (a)$$

бит содержит K бит сообщения и M контрольных битов. Кодовая скорость R равна

$$R = K/N = 1 - M/N.$$

В обычном коде LDPC матрица H содержит ровно W_c единиц в каждом столбце (вес столбца) и ровно W_r единиц в каждой строке (вес строки); в противном случае это называется неправильным кодом. Например, на рис. 1 (а) показана LDPC-матрица H для $(2, 3)$ обычного кода с $W_c = 2$ и $W_r = 3$ длиной 6 бит.

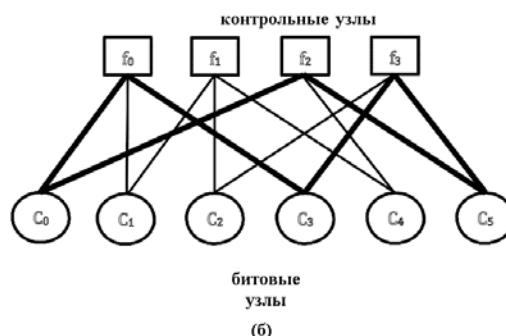


Рис. 1. Матрица H и ее граф Таннера для $(2, 3)$ регулярного кода

Двудольный граф Таннера может быть использован для графического представления LDPC кодов. Граф состоит из двух типов узлов – битовых узлов (BN) и контрольных узлов (CN), и два узла разного типа могут соединяться друг с другом только через ребро. Ребра графа Таннера могут быть представлены ненулевыми элементами “1” в матрице H . Существует N битовых узлов, по одному для каждого бита кодированного слова c_i и M контрольных узлов, по одному для каждого набора ограничений проверки четности. Граф Таннера, соответствующий матрице H на рис. 1 (а), проиллюстрирован на рис. 1 (б), где N представлены кружками, а M - квадратами.

Квантование сообщения LDPC-кода в течение проекционной геометрии $(2, 2^s)$

Граф Таннера такой же, как граф падения точечных линий проективной плоскости размерности m над $PG(m, GF(2^s))$, где $m = 2$ и $s = 3$. Здесь BNs / CNs представляют точки / линии геометрии соответственно, и соответственно столбцы / строки матрицы проверки четности H . Кодовое слово LDPC-кода над $GF(2^s)$ содержит символы из поля Галуа $GF(p = 2) - \{0,1\}$, где ограничения определе-

ны арифметически по модулю 2, а p обозначает простое число.

Выбор квантования сообщений влияет не только на сложность и производительность модели, но и на пропускную способность. Однако это зависит от ресурсов, доступных для хранения и вычислений на ПЛИС. Для повышения производительности мы рассматриваем 9-битную схему квантования в формате знак-величина с фиксированной точкой (SM), где наиболее значимый бит (MSB) представляет знак, а остальные 8 бит - величину. В части величины наиболее значимые 3 бита представляют целое число, а остальные 5 битов - дробную часть. Чтобы разместить дополнительные биты для расширения знака и переполнения из-за накопления, внутренний канал передачи данных сделан шириной 13 бит для BN и шириной 12 бит для CN.

Функциональные блоки предлагаемого LDPC-декодера

Декодер LDPC состоит из трех основных компонентов – элементов обработки (BNs/CNs), содержащих канал передачи данных, модулей памяти для хранения битовых / контрольных обновлений во время итераций и

сети соединений для маршрутизации обновлений между узлами различного типа.

Для предлагаемых конструкций рассматриваем 73-битные (скорость 0,616) и 1057-битные (скорость 0,769) LDPC-коды с регулярной структурой, основанные на $PG(2,GF(2^8))$. Основными вычислительными блоками в BNs и CNs являются многовходовые многоразрядные сумматоры, вычитатели и умножители / LUTs. Обновления битов / проверок вычисляются с использованием метода total-sum-first. Вычисления «сначала общая сумма» (для обновлений BN / CN) реализованы с использованием развернутой параллельной архитектуры для сканирования с накоплением, которая обеспечивает более высокую степень параллелизма и, следовательно, подходит для приложений с высокой пропускной способностью. В конструкции декодера используются два типа запоминающих устройств: битовая память (BMs) и контрольная память (CMs).

На рис. 2 показана архитектура полностью параллельного BN. BN считывает сообщения проверки бит и данные из встроенной памяти; выполняет преобразование дополнения SM в на принятых входных данных, выполняет сканирование накопления с использованием многобитового дерева сумматора вместе с отдельными входными сообщениями, которые хранятся отдельно на соответствующих регистрах (L-Regs), выполняет сканирование выходных данных (вычисление остатка) путем вычитания отдельных входных данных из накопленной суммы с использованием многобитовых полных вычитателей, и, наконец, выходные данные (обновления битов) преобразуются в 9-битный формат SM, и записываются обратно в BM.

CNs вычисляют сообщения проверки на бит таким же образом, как и их аналоги, но с двумя существенными отличиями – вычисления CN выполняются в логарифмической и гиперболической областях касательных. Кроме того, величина и знаковая часть обновлений вычисляются с помощью различных путей данных. В пути значения 9-разрядных входных данных SM, полученных от BM, подвергаются преобразованию $\phi(x)$, прежде чем оставшиеся величины вычисляются с использованием того же подхода «сначала общая сумма», которая используется в обновлениях битов. Наконец, оставшиеся значения повторно преобразуются обратно путем применения к ним обратной функции $\phi^{-1}(x)$ ($\phi(x)$ является самоинверсионной функцией). Для реализации $\phi(x)$ можно

использовать метод линейной аппроксимации по частям. Одним из прямых способов реализации $\phi(x)$ является использование LUT. Поскольку функция $\phi(x)$ сильно нелинейна, ее квантование приведет к большой потере производительности. Следовательно, для достижения надлежащей производительности декодирования прямая реализация с использованием LUT потребовала бы гораздо большего объема памяти, особенно доля кодов, имеющих более высокие степени узла, и биты квантования.

Опять же, для полностью параллельного проектирования каждому CN потребуется свой собственный LUT, чтобы ускорить работу и избежать конфликтов доступа к памяти.

Для полностью параллельных и конвейерных конструкций LDPC-декодеров нам потребуется по крайней мере 657 ($73 \cdot 9$) элементов цифровых сигнальных процессоров (Digital Signal Processing, DSP) для 73-битного кода. Если количество узлов увеличивается, то требуется больше элементов DSP, что затрудняет их размещение на новейших ПЛИС. Это сравнительно увеличивает сложность и площадь аппаратного обеспечения, и стоимость проектирования. Здесь описаны два разных подхода к полностью параллельному проектированию CN:

- Первая конструкция (CN_A) состоит из блоков MAC $2w_r$, как показано на рис. 3. Они обозначаются как – PH-MACs и IN-MACs. Значения w_r PH-MAC используются для вычисления функции $\phi(x)$, тогда как значения w_r IN-MAC используются для вычисления функции $\phi^{-1}(x)$. Выходные данные из PH-MACs уменьшаются до 12 бит для вычисления величины в блоке суммирования (total-sum-first) аналогично вычислению BN, используя развернутую параллельную архитектуру. После преобразования величины $\phi^{-1}(x)$ выходные данные насыщаются, объединяются с их аналогом знака и, наконец, сохраняются в CMs. Логика знака реализована с использованием дерева элементов XOR (логическая операция Exclusive OR (XOR) gate), которое работает одновременно с обработкой величины.

- Вторая конструкция (CN_B) аналогична первой – за исключением того, что единицы измерения MAC и насыщенности повторно используются через канал обратной связи, как показано на рис. 4. Однако в конструкцию введен один мультиплексор (MUX) на входе каждого блока MAC для выбора между операциями $\phi(x)$ и $\phi^{-1}(x)$; и один демультиплексор (DeMUX) на выходе каждого блока насыщения.

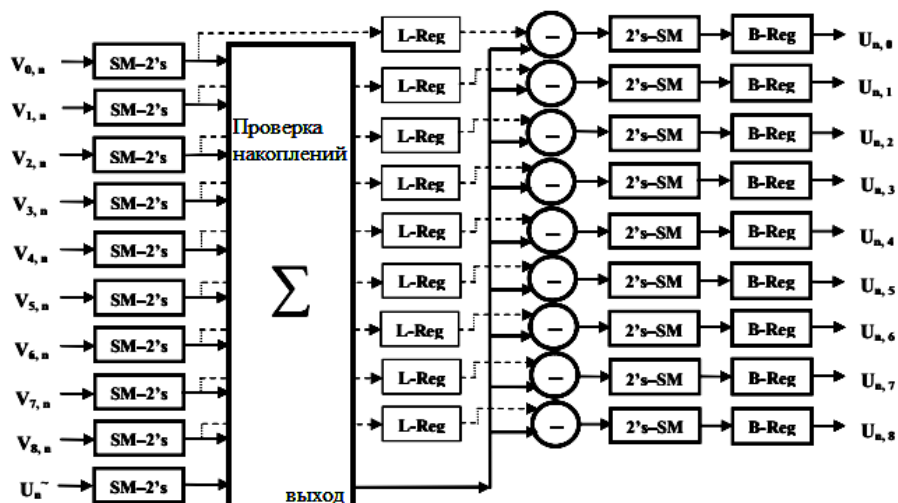


Рис. 2. Полностью параллельная архитектура блока битового узла (BN)

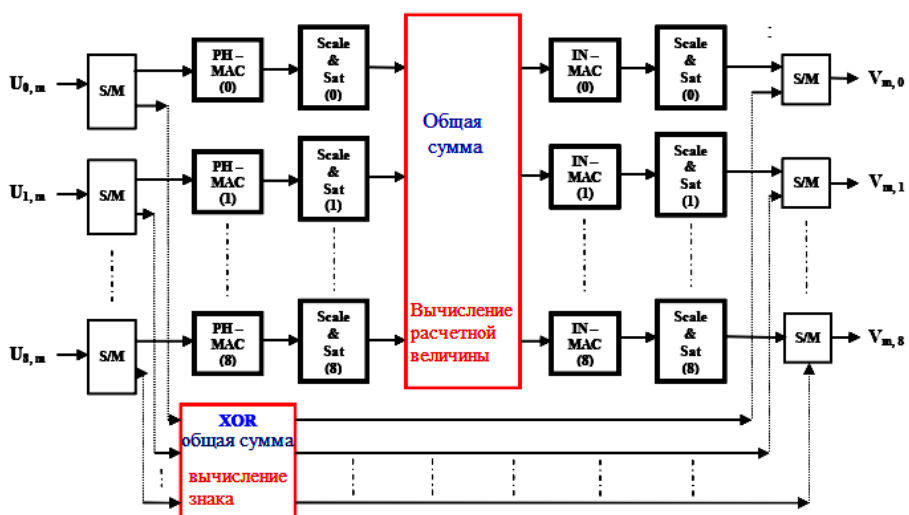


Рис. 3. Полностью параллельная архитектура CN без обратной связи (CN_A)

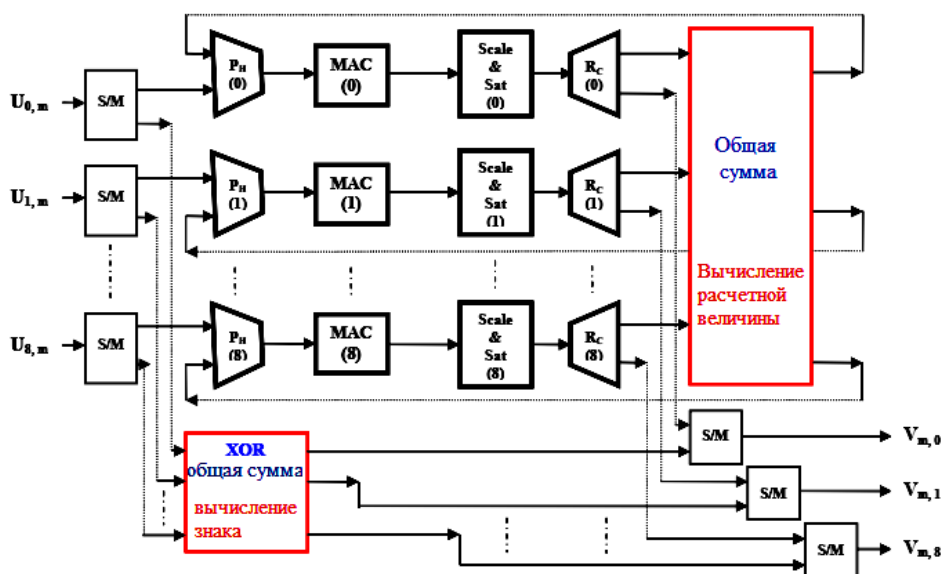


Рис. 4. Полностью параллельная архитектура CN с обратной связью (CN_B)

System Generator использует блок компилятора конечной импульсной характеристики, который помогает использовать выделенные аппаратные ресурсы, доступные в устройствах Virtex, для создания оптимизированных реализаций ПЛИС разработанной модели

Модифицированная архитектура декодера SPA (MSPA)

Две конструкции параллельных декодеров на основе SPA, имеют несбалансированные вычислительные сложности и каналы передачи данных между BN и CN. Это, в свою очередь, влияет на задержку критического пути и количество циклов, требуемых на итерацию. Эти эффекты могут быть сведены к минимуму с помощью метода декодирования MSPA, который изменяет этапы обновления BN /CN в SPA для достижения аппаратной балансировки между BN и CN. Метод декодирования MSPA описан в следующих шагах:

- этап обновления BN – для метода декодирования MSPA вычисления BN может быть изменено следующим образом:

$$u_{n,m} = u_n^{\sim} + \sum_{m' \in \mu(n) \sim m} \phi^{-1}(v_{m',n}), \quad (1)$$

где все входящие сообщения в BN n от всех его соседних CNs сначала преобразуются в $\phi^{-1}(x)$ перед повторным сканированием.

- этап обновления CN – вычисления CN может быть изменено следующим образом:

$$v_{m,n} = \left(\prod_{n' \in \sigma(m) \sim n} \text{sgn}(u_{n',m}) * (-1)^{|\sigma(m)|} \right) * \left[\sum_{n' \in \sigma(m) \sim n} \phi(u_{n',m}) \right]. \quad (2)$$

Пусть $v_{m,n} = P * S$; где P – часть величины, а S – часть знака. Часть величины P может быть определен как:

$$P = \left[\left(\sum_{n' \in \sigma(m) \sim n} \phi(u_{n',m}) \right) \right] = \left[\left(\sum_{n' \in \sigma(m)} \phi(u_{n',m}) \right) - \phi(u_{n,m}) \right]. \quad (3)$$

В конструкции декодера MPSA, называемого decoder-3, вводим аппаратную балансировку между BN и CN для минимизации задержек с помощью уравнений (1) и (2) соответственно. Для его аппаратной реализации рассмотрим рис. 3 полностью параллельного CN без обратной связи (CN_A). Если все входные значения (входные адреса) на выходной стороне ($\phi^{-1}(x)$) и блоки насыщения этого CN удалить и поместить на входной стороне соответствующего BN, то мы получим оптимизированный BN (BN_C) и оптимизированный CN (CN_C). Это действительно обеспечивает аппаратную балансировку между BNs и CNs без ущерба для производительности оригинального SPA-декодера. Декодирование MSPA имеет следующие преимущества:

- в соответствии с наибольшей задержкой в конвейере может быть определен критический путь, который ограничит общую пропускную способность. Однако в конструкции декодера-3, после балансировки критического пути, оптимизированные BNs и CNs будут иметь одинаковую задержку пути. Это, в свою очередь, сокращает время простоя, повышает тактовую частоту и, следовательно, пропускную способность;

- в конструкции CN_A блоки ввода-вывода ($\phi^{-1}(x)$) и насыщения остаются незамечены до последнего временного интервала вычисления CN. Поэтому перемещение этих блоков в BN определенно обеспечит эффективное использование оборудования без влияния на производительность декодера;

- для кодов с высокой скоростью, где декодирование $w_r \gg w_c$ MSPA будет более выгодным с точки зрения сокращения аппаратного обеспечения (например, количество встроенных MAC-адресов, уровень дерева суммирования).

Архитектура конвейерного декодера

На рис. 5(а) показана вышеупомянутая не конвейерная последовательная структура синхронизации для реализаций декодера-1 / декодера-3 между этапами обновления BNs и CNs.

Как указывалось ранее, архитектура основана на PG(2,GF(2*)). Структурированное свойство кодов PG-LDPC и использование элементов распределенной памяти для хранения обновлений BN(CN) позволяют группам BN и CN работать конвейерным образом. Эти конструкции получены путем перекрытия этапов обновления BN и CN для реализаций декодера-1 / декодера-3 с целью повышения об-

щей пропускной способности. На рис. 5(б) показана структура синхронизации конвейера для декодера-1р, основанная на архитектуре декодера-1 с несбалансированными вычислительными сложностями между BNs и CNs. Здесь пунктирная часть на этапах обновления BN показывает период простоя. На рис. 5(в) показана синхронизация конвейера для декодера-3р на основе архитектуры декодера-3 со сбалансированными путями передачи данных между BNs и CNs.

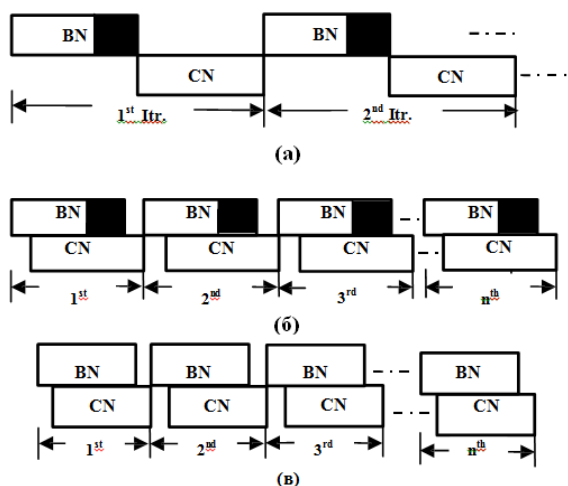


Рис. 5. Временная структура конвейера: (а) не конвейерная временная структура для декодера-1/2; (б) несбалансированная временная структура конвейера для декодера-1р/2р; (в) сбалансированная временная структура конвейера для декодера-3р

Для двух случаев, показанных на рис. 5(б) и 5 (в), первая группа BN завершает свои вычисления в первом тактовом цикле, а в последующих тактах $[N/p] - 1$ той же итерации последовательно обрабатываются остальные группы BN.

Группы CN начинают свои вычисления сразу после первого тактового цикла вычисления BNs последовательным образом. Таким образом, последняя группа CN завершит свои вычисления через один цикл после завершения всех вычислений BNs. Следовательно, тактовая задержка между этапами обновления BN / CN теперь сокращена только до одного такта, и, следовательно, для одной итерации декодирования требуется всего $[N/p] + 1$ такт. Здесь вычисления BN и CN перекрываются для $[N/p] - 1$ циклов. На следующей итерации BNs может начать свои вычисления сразу после того, как CNs завершит свои вычисления на текущей итерации. Следовательно, прирост пропускной способности составляет $\text{Gain} = 2[N/p]/([N/p] + 1) \approx 2$.

Результаты моделирования

Предлагаемые конструкции полностью параллельных и конвейерных LDPC декодеров были реализованы и ориентированы на ПЛИС Xilinx Virtex-6 LX760.

Коды PG сходятся очень быстро при декодировании SPA. Более быстрая конвергенция является одним из важных факторов для достижения более высокой пропускной способности. Было обнаружено, что предлагаемые конструкции могут быть способны декодировать ошибки в среднем менее чем за восемь итераций, при практических SNRs (> 2). Все моделирование проводилось в предположении, что канал AWGN имеет схему модуляции BPSK. На рис. 6 представлена производительность BER в сравнении с SNR для двух различных длин кодовых слов. Из графиков на рис. 6 ясно, что производительность BER значительно улучшается при увеличении длины кодового слова.

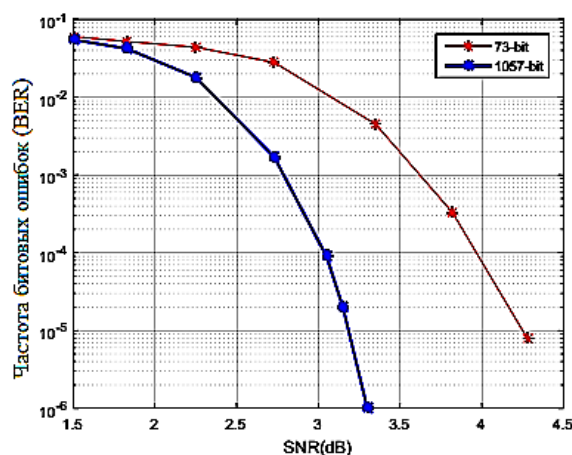


Рис. 6. Производительность BER в сравнении с SNR для разной длины кодового слова

В табл. 1 показан сравнительный анализ между тремя параллельными архитектурами в соответствии с отчетом о синтезе с точки зрения использования различных ресурсов, анализа времени, маршрута размещения сообщений и пропускной способности. Аналогично, для 1057-битного (скорость 0,769) кода PG-LDPC с регулярной структурой с коэффициентом параллельности -73.

Таблица 1
Результаты реализации ПЛИС для 73-битного кода (скорость 0.616)

Параметры	Декодер-1	Декодер -2	Декодер -3
Защелки	72851 (7.7 %)	70828 (7.5 %)	73294 (7.73 %)
6-вход LUTs	66585 (14 %)	61283 (13 %)	66585 (14 %)
Параллельный фактор		73	
Тактовая частота (МГц)	1.55	145.8	170.3
Количество циклов	2	2	2
Пропускная способность (Gbps)	1.84	1.77	2

В табл. 2 приведен сравнительный анализ предлагаемых параллельных и конвейерных конструкций с использованием тех же параметров, которые обсуждались выше. Поскольку декодер-1р и декодер-3р являются конвейерными версиями декодера-1 и декодера-3 соответственно; они используют те же ресурсы, что и декодер-1 и декодер-3 соответственно.

Таблица 2
Результаты реализации ПЛИС для 1057-битного (скорость 0,769) кода с коэффициентом параллельности – 73

Параметры	Декодер-1	Декодер -2	Декодер -3	Декодер -1р	Декодер -3р
Защелки	72851 (7.7 %)	70828 (7.5 %)	73294 (7.73 %)	72851 (7.7 %)	73294 (7.73 %)
6-вход LUTs	66585 (14 %)	61283 (13 %)	66585 (14 %)	66585 (14 %)	66585 (14 %)
Тактовая частота (МГц)	151.55	145.8	170.3	151.55	170.3
Количество циклов	30	30	30	16	16
Пропускная способность (Gbps)	1.8	1.71	2	3.34	3.75

Заключение

В этой статье представлен эффективный метод декодирования, MSPA, для декодирования кодов PG-LDPC, который не только сокращает задержку критического пути, оптимизирует функциональные блоки декодера, но и улучшает пропускную способность декодера. Параллельные конструкции LDPC декодеров были реализованы для 73-битных и 1057-битных кодов PG-LDPC с регулярной структурой, использующих традиционное SPA и предлагаемое декодирование MSPA отдельно. Исходя из этих конструкций, показано, что декодирование MSPA сводит к минимуму последствия несбалансированных вычислительных сложностей между BN и CN, которые существуют в декодере SPA, путем введения аппаратной балансировки. Предлагаемые конструкции дополнительно конвейеризируются путем перекрытия этапов обновления BN и CN для достижения почти оптимальной пропускной способности и эффективного использования оборудования. Эти оптимизированные конвейерные конструкции декодеров в среднем экономят 45 % от количества циклов, необходимых для каждой итерации.

При 9-битном квантовании с использованием метода декодирования MSPA и конвейер-

ной обработки максимальная достижимая пропускная способность составляет 6,5 Гбит/с, что в два раза больше, чем при традиционном декодировании SPA, а также сопоставимо с существующими стандартами IEEE 802.11 ac / ad / ax WLAN. Архитектуры превосходят другие современные декодеры с точки зрения задержки обработки и быстродействия при частоте битовых ошибок (BER) 10^{-5} . Предлагаемые конструкции также являются гибкими с точки зрения квантования, степени узла, коэффициента параллельности и длины кодового слова.

Литература

1. Memory system optimization for FPGA based implementation of Quasi-Cyclic LDPC codes decoders / X. Chen, J. Kang, S. Lin, V. Akella // IEEE Transactions on Circuits and Systems-I: Regular Papers. 2011. 58(1). Pp. 98–111.
2. A 3.0 Gb/s throughput hardware-efficient decoder for cyclically-coupled QC-LDPC codes / Q. Lu, J. Fan, C.W. Sham, W.M. Tam, F.C.M. Lau // IEEE Transactions on Circuits and Systems-I: Regular Papers. 2016. 63(1). Pp. 134–145.
3. Хорошайлова М.В. Архитектура для стохастических LDPC-декодеров с использованием эффективной площади кристалла на основе ПЛИС // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2018. Т. 14. № 1. С. 95-100.
4. A 2.0 Gb/s throughput decoder for QC-LDPC convolutional codes / C.W. Sham, X. Chen, F.C.M. Lau, Y. Zhao, W.M. Tam // IEEE Transactions on Circuits and Systems-I: Regular Papers. 2013. 60(7). Pp. 1857–1869.

5. Хорошайлова М.В. Архитектура канального кодирования на основе ПЛИС для 5G беспроводной сети с использованием высокоуровневого синтеза // Вестник

Воронежского государственного технического университета. 2018. Т. 14. № 2. С. 99-105.

Поступила 03.04.2023; принята к публикации 13.06.2023

Информация об авторах

Башкиров Алексей Викторович – д-р техн. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: fabi7@mail.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-0939-722X>
Хорошайлова Марина Владимировна – канд. техн. наук, старший преподаватель, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: pmv2205@mail.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-9167-9538>

Ципина Ксения Дмитриевна – студент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: ksutsipina@mail.ru

DEVELOPMENT OF A HIGH-PERFORMANCE LDPC DECODER WITH PIPELINED DATA PROCESSING

A.V. Bashkirov, M.V. Khoroshailova, K.D. Tsipina

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract: this paper develops an efficient sum-of-products (MSPA) decoding algorithm that not only reduces the critical path delay, but also improves hardware utilization and decoder throughput while maintaining decoding algorithm error. The min-sum (MS) algorithm and its variants replace the complex control node (CN) calculations in SPA with simple addition and comparison operations, but this results in a performance loss of up to 1 dB compared to SPA for higher codeword lengths, code rates, and powers node. Three fully parallel low-density decoder architectures based on the projection geometry (PG) structure of the Galois fields of LDPC codes are presented. These designs differ in bit node (BN) and control node (CN) architectures. A 9-bit fixed-point quantization scheme is used to achieve better error correction performance. Another significant contribution of this work is the pipelining of proposed decoder architectures to further improve overall throughput. These parallel and pipelined architectures are implemented for 73-bit (rate 0.616) and 1057-bit (rate 0.769) regular structure PG-LDPC codes on the Xilinx Virtex-6 LX760 field-programmable logic integrated circuit (FPGA). The proposed designs are also flexible in terms of quantization, node degree, parallelism factor, and codeword length

Key words: Low Density Parity Check (LDPC) Codes, Simulation, Sum Product Decoding Algorithm (SPA), FPGA, Galois Fields (GF)

References

1. Chen X., Kang J., Lin S., Akella V. “Memory system optimization for FPGA based implementation of Quasi-Cyclic LDPC codes decoders”, *IEEE Transactions on Circuits and Systems-I: Regular Papers*, 2011, no 58(1), pp. 98–111.
2. Lu Q., Fan J., Sham C.W., Tam W.M., Lau F.C.M. “A 3.0 Gb/s throughput hardware-efficient decoder for cyclically-coupled QC-LDPC codes”, *IEEE Transactions on Circuits and Systems-I: Regular Papers*, 2016, no 63(1), pp. 134–145.
3. Khoroshailova M.V. “Architecture for stochastic LDPC decoders using the effective crystal area based on FPGA”, *The Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2018, vol. 14. no. 1, pp. 95-100.
4. Sham C.W., Chen X., Lau F.C.M., Zhao Y., Tam W.M. “A 2.0 Gb/s throughput decoder for QC-LDPC convolutional codes”, *IEEE Transactions on Circuits and Systems-I: Regular Papers*, 2013, no 60(7), pp. 1857–1869.
5. Khoroshailova M.V. “Architecture of FPGA based channel coding for 5G wireless network using high-level synthesis” (“Arhitektura kanalnogo codirovaniya na osnove PLIS dlja 5G besprovodnoy seti s ispolzovaniem visocoyrovnevoogo sinteza”), *The Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2018, vol. 14, no. 2, pp. 99-105.

Submitted 03.04.2023; revised 13.06.2023

Information about the authors

Alexey V. Bashkirov – Doctor Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: fabi7@mail.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-0939-722X>

Marina V. Khoroshailova – Cand. Sc. (Technical), Senior Lecturer, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: pmv2205@mail.ru, tel.: 8-910-732-66-13, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-9167-9538>

Ksenia D. Tsipina – Student, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: ksutsipina@mail.ru

ГИБРИДНАЯ МНОГОСКАЧКОВАЯ СИСТЕМА АТМОСФЕРНОЙ ОПТИЧЕСКОЙ СВЯЗИ С ПРОСТРАНСТВЕННЫМ РАЗНЕСЕНИЕМ

Р.П. Краснов

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

Аннотация: исследована модель многоскачковой радиооптической системы атмосферной связи, работающей с применением кооперативного разнесения с несколькими ретрансляторами в каждом из каналов. В качестве резервного используется радиоканал, задействуемый при снижении отношения сигнал/шум ниже заданного порога во всех оптических каналах. Выбор рабочего канала производится на основании анализа состояния канала по минимаксному критерию. При дальнейшем снижении отношения сигнал/шум до предельного порога наступает состояние отказа системы. Для описания статистики оптических каналов применена экспоненциальная модель Вейбулла, для радиоканала – m -распределение Накагами. Приведены выражения для расчета величины битовой ошибки и вероятности отказа гибридной системы и атмосферной оптической линии связи (АОЛС), для расчета использована обобщенная квадратурная функция Гаусса-Лагерра. Аналогично представлены выражения для радиоканала, основанные на вычислении коэффициентов полиномиального разложения. Показаны зависимости битовой ошибки от среднего отношения сигнал/шум в каналах для различных атмосферных условий передачи, а также для различных сочетаний числа каналов и ретрансляторов в каждом из них. Сделан вывод о преобладающем влиянии на качество связи числа ретрансляторов в канале по сравнению с общим количеством каналов разнесения. Приведены зависимости вероятности отказа гибридной системы и АОЛС. Сделан вывод о возможностях повышения качества связи в системах такого типа

Ключевые слова: гибридная система, атмосферная оптическая линия связи, радиоканал, вероятность отказа, битовая ошибка

Введение

К современным коммерческим коммуникационным системам за последнее десятилетие добавилась быстро развивающаяся область – атмосферные оптические линии связи (АОЛС). Для сетей доступа это отличная альтернатива традиционным радиоканалам на последней миле. Высокая скорость передачи, нелицензируемый диапазон длин волн, быстрое развертывание и высокая степень защищенности данных позволяют использовать такие линии в системах мобильной связи, городских оптоволоконных сетях и им подобных приложениях.

Современные коммерческие АОЛС обеспечивают пропускную способность свыше 10 Гбит/с [1], что дает возможность применения в качестве Ethernet – мостов корпоративных сетей. Быстрое развертывание и высокая степень скрытности передачи создает перспективу применения АОЛС в системах военной связи.

Однако, несмотря на кажущуюся универсальность, внедрение систем АОЛС должно проводиться с учетом сильного влияния атмосферных условий в канале передачи на качество связи. Сильные туманы, дожди и снегопады приводят к рассеянию излучения, снижению отношения сигнал/шум, а следовательно, скорости передачи [2]. Из-за малого диаметра пуч-

ка при колебаниях зданий за счет влияния ветра и температурных перепадов, в АОЛС могут возникать ошибки наведения [3]. Даже в условиях чистой атмосферы из-за неоднородностей показателя преломления, вызванного турбулентным течением газов, в оптическом пучке возникает сцинтилляция [3].

Естественными путями для преодоления таких проблем оказались методы помехоустойчивого кодирования [5], пространственного разнесения по типу массива сигналов на входе и выходе (MIMO) [6], использование резервных каналов и применение ретрансляторов [7].

Методы пространственного разнесения позволяют повысить пропускную способность АОЛС при задействовании пространственно некоррелированных каналов. Но их развертывание требует задействования сравнительно большой площади, занимаемой аппаратурой, а также приводит к росту стоимости системы в целом. Еще одним естественным ограничением в такой АОЛС выступает необходимость наличия прямой видимости, что в условиях городской застройки далеко не всегда реализуемо.

В качестве альтернативы здесь может выступать АОЛС, в которой применена топология с ретрансляторами [7]. При такой реализации получается система связи, в которой сигналы поступают в пункт назначения по независимым каналам, а пространственное разнесение реализуется за счет использования канала ретрансля-

ции. При этом ретрансляторы могут использоваться также для расширения зоны покрытия.

Совместная передача в ретрансляционных линиях улучшает качество связи, создавая разнесение с использованием антенн, доступных в других узлах сети. Было показано [8]–[9], что такое взаимодействие узлов является эффективным способом обеспечения разнесения в беспроводных сетях с замираниями.

Все вышеизложенное позволяет сделать вывод, что при разработке систем АОЛС необходимо иметь в распоряжении точную модель влияния замираний и сцинтилляции в атмосферном канале на оптический сигнал.

Наиболее распространенными в литературе являются лог-нормальное и гамма-гамма распределения [3]. Оба они, тем не менее, не обеспечивают корректных результатов моделирования на всех типах турбулентности и при любых условиях усреднения апертуры [4]. В [10] предложено более универсальное распределение, известное как экспоненциальное распределение Вейбулла. Оно дает более адекватно соотносящиеся с результатами экспериментов результаты моделирования флуктуаций интенсивности оптического сигнала при степени атмосферной турбулентности от слабой до сильной.

Поэтому в дальнейшем анализе при моделировании воздействия атмосферного канала на линию АОЛС будет использоваться экспоненциальное распределение Вейбулла, а для радиочастотной (РЧ) линии задействуем m -распределение Накагами [7].

Наличие ретрансляторов приводит к увеличению пропускной способности, но в оптических каналах по-прежнему возможно полное прекращение работы из-за воздействия атмосферы. При возникновении таких условий передачи многими авторами предложено использование резервных радиочастотных (РЧ) каналов. Они являются хорошей временной узкополосной заменой АОЛС, так как «дуальны» по отношению к погодным условиям в сравнении с АОЛС. Так, сигналы в канале АОЛС сильно ослабляются плотным туманом, но практически нечувствительны к дождю, а сигналы в РЧ канале миллиметрового диапазона наоборот, нечувствительны к туману, однако значительно ослабляются дождем [10].

Выбор линии РЧ или АОЛС для передачи обусловлен состоянием атмосферного канала связи [12]–[13]. При этом требуется организация канала обратной связи, что усложняет систему в целом, хотя и обеспечивает более эффективную передачу.

Постановка задачи

На рис. 1 предложена схема коммутации гибридной радиооптической многоскачковой системы передачи.

В системе имеется R каналов АОЛС, являющихся основными, при условии, что мгновенные отношения сигнал / шум на соответствующих входах приемника АОЛС превышают заданное пороговое значение. Если же они окажутся ниже порогового уровня, задействуется линия РЧ. Информация о состоянии каналов РЧ и АОЛС отправляется обратно в передатчик по линии обратной связи. За счет такой организации передачи данных есть возможность получить $R+1$ оптический путь с независимыми статистиками.

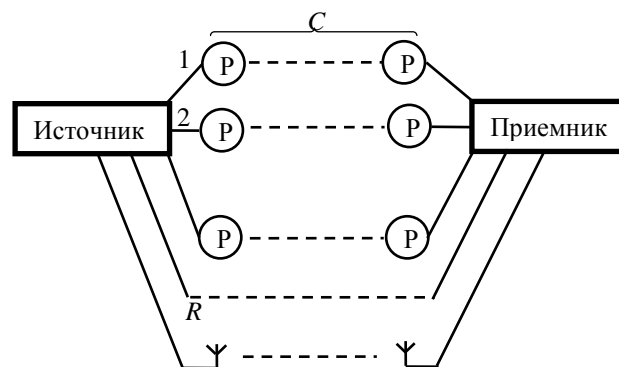


Рис. 1

Работа ретранслятора в системе на рис. 1 может осуществляться по одной из двух схем: усиление и передача (УП) [11] или декодирование и передача (ДП) [12]. Хотя схема УП реализуется более просто, в ретрансляторе происходит усиление шума вместе с сигналом, что снижает итоговое отношение сигнал/шум. Поэтому в дальнейшем будем рассматривать систему с ретранслятором типа ДП.

На пути оптического сигнала от источника данных к приемнику имеется C ретрансляторов. Каждый из них выполняет посимвольное детектирование. Для придания общности анализу в систему включен также один канал прямой видимости.

Модель системы

В каждом из каналов информационный сигнал представляет собой BPSK поднесущую, модулированную по интенсивности оптическим передатчиком. В случае радиоканала происходит непосредственная передача BPSK сиг-

нала. Тогда в оптический сигнал в m -м канале на выходе n -го ретранслятора можно представить в виде:

$$P_{m,n}^{FSO} = P_{m,n} [1 + ks(t)], \quad (1)$$

где $m \in [1 \dots R]$,
 $n \in [1 \dots C]$,

$P_{m,n}$ – средняя оптическая мощность передатчика в каждой линии,
 $s(t)$ – информационный сигнал,
 k – индекс модуляции, удовлетворяющий условию $-1 < ks(t) < +1$.

Принимаемая оптическая мощность преобразуется в электрический сигнал, представляющий собой фототок, который можно описать как

$$i_{m,n}(t) = R_{ФПР} P_{m,n}^{FSO} I_{m,n}(t) + n(t), \quad (2)$$

где $R_{ФПР}$ – чувствительность фотоприемника,
 $I_{m,n}(t)$ – мгновенное значение коэффициента передачи на n -ном участке m -го канала,
 $n(t)$ – аддитивный белый гауссовский шум (АБГШ) с нулевым средним и дисперсией σ_n^2 .

Отношение сигнал/шум на выходе демодулятора электрического сигнала можно описать как [13]:

$$\gamma_{m,n} = \frac{(P_{m,n} R_{ФПР} k)^2}{\sigma_n^2} I_{m,n}^2 = \bar{\gamma}_{m,n} I_{m,n}^2, \quad (3)$$

$$\bar{\gamma}_{m,n} = \frac{(P_{m,n} R_{ФПР} k)^2}{\sigma_n^2},$$

где $I_{m,n}$ – мгновенный отсчет $I_{m,n}(t)$ в момент вынесения решения детектором.

Статистика оптического канала описывается случайной величиной с экспоненциальным распределением Вейбулла, плотность вероятности $p_{I_{m,n}}(I)$ и интегральная функция вероятности которой $P_{I_{m,n}}(I)$ представляются следующим образом [10]:

$$p_{I_{m,n}}(I) = \frac{\alpha_{m,n} \beta_{m,n}}{\eta_{m,n}} \left[\frac{I}{\eta_{m,n}} \right]^{\beta_{m,n}-1} \cdot \exp \left[- \left(\frac{I}{\eta_{m,n}} \right)^{\beta_{m,n}} \right] \times \quad (4)$$

$$\times \left[1 - \exp \left[- \left(\frac{I}{\eta_{m,n}} \right)^{\beta_{m,n}} \right] \right]^{\alpha_{m,n}-1},$$

$$P_{I_{m,n}}(I) = \left[1 - \exp \left[- \left(\frac{I}{\eta_{m,n}} \right)^{\beta_{m,n}} \right] \right]^{\alpha_{m,n}}. \quad (5)$$

Структурные константы определяются как

$$\alpha_{m,n} = 3,931 \left(\frac{D_{m,n}}{\rho_{m,n}} \right)^{-0,519}, \quad (6)$$

где $D_{m,n}$ – диаметр апертуры приемника,
 $\rho_{m,n} = (1,46 C_n^2 K^2 L_{m,n})^{-3/5}$ – атмосферный радиус когерентности,
 C_n^2 – структурная константа турбулентности,
 K – волновое число,
 $L_{m,n}$ – протяженность n -го участка m -го канала связи.

Параметр $\beta_{m,n}$ задается как $\beta_{m,n} = (\alpha_{m,n} \sigma_I^2)^{-6/11}$,
где σ_I^2 – индекс сцинтилляции.

Коэффициент $\eta_{m,n}$ определяется согласно [10]

$$\eta_{m,n} = \frac{1}{\alpha_{m,n} \Gamma(1 + 1/\beta_{m,n}) g(\alpha_{m,n}, \beta_{m,n})}, \quad (7)$$

где

$$g(\alpha, \beta) = \sum_{i=0}^{\infty} \frac{(-1)^i (i+1)^{\frac{1-\beta}{\beta}} \Gamma(\alpha)}{i! \Gamma(\alpha - i)}. \quad (8)$$

Подставляя (3) в (4) для каждого участка ретрансляции получим плотность вероятности

$$p_{\gamma_{m,n}}(\gamma) = \frac{\alpha_{m,n} \beta_{m,n} \bar{\gamma}_{m,n}^{\beta_{m,n}/2}}{2 (\bar{\gamma}_{m,n} \eta_{m,n}^2)^{\beta_{m,n}/2}} \exp \left[- \left(\frac{\gamma}{\bar{\gamma}_{m,n} \eta_{m,n}^2} \right)^{\beta_{m,n}/2} \right] \times \quad (9)$$

$$\times \left[1 - \exp \left[- \left(\frac{\gamma}{\bar{\gamma}_{m,n} \eta_{m,n}^2} \right)^{\beta_{m,n}/2} \right] \right]^{\alpha_{m,n}-1},$$

а подставляя (3) в (5) – соответствующую интегральную функцию вероятности:

$$P_{\gamma_{m,n}}(\gamma) = \left[1 - \exp \left[- \left(\frac{\gamma}{\bar{\gamma}_{m,n} \eta_{m,n}^2} \right)^{\beta_{m,n}/2} \right] \right]^{\alpha_{m,n}}. \quad (10)$$

Как было сказано выше, статистика РЧ канала описывается m -распределением Накагами, для которого плотность вероятности имеет вид:

$$p^{RF}(\gamma) = \left[\frac{m}{\bar{\gamma}^{RF}} \right]^m \frac{(\gamma)^{m-1}}{\Gamma(m)} e^{-\frac{m\gamma}{\bar{\gamma}^{RF}}}, \quad (11)$$

где $\Gamma(\cdot)$ – гамма-функция.

Интегральная функция вероятности представляется как [7]:

$$P^{RF}(\gamma) = \int_0^{\gamma} p^{RF}(\gamma) d\gamma = \frac{1}{\Gamma(m)} \gamma \left(m, \frac{\gamma m}{\bar{\gamma}^{RF}} \right), \quad (12)$$

где $\chi(\cdot, \cdot)$ – нижняя неполная гамма-функция.

Если хотя бы один из C ретрансляторов на линии выполнит ошибочное детектирование (что, очевидно, возможно при низких отношениях сигнал/шум), то все остальные будут передавать искаженные данные. Поэтому в системе выбран минимаксный критерий выбора линии связи, основывающийся на выборе случайной величины $\gamma_{\max-\min}$, описывающейся как:

$$\gamma_{\max-\min} = \max \left(\min(\gamma_{m,n}) \Big|_{n=1..C} \right) \Big|_{m=1..R}. \quad (13)$$

Работа этого метода происходит в два этапа: сначала выбирается наименьшее значение отношения сигнал/шум среди n ретрансляторов в линии, а затем выбирается наибольшее из полученных минимумов для всех R оптических путей.

Пусть $\bar{\gamma}_{m,n} = \bar{\gamma}_{AB} = \bar{\gamma}$ – среднее отношение сигнал/шум в канале прямой видимости; аналогично введем обозначения $\alpha_{m,n} = \alpha_{AB} = \alpha$, $\beta_{m,n} = \beta_{AB} = \beta$, $\eta_{m,n} = \eta_{AB} = \eta$, применимые к описанию выбранного канала связи при условии задействования линии прямой видимости. Тогда, согласно [13], плотность вероятности и функция распределения вероятности случайной величины $\gamma_{\max-\min}$ можно представить выражениями (14) и (15), соответственно:

$$p_{\gamma_{\max-\min}}(\gamma) = RC \left\{ 1 - [1 - P_{\gamma_{m,n}}(\gamma)]^C \right\}^{R-1} \times, \quad (14)$$

$$\begin{aligned} & \times [1 - P_{\gamma_{m,n}}(\gamma)]^{C-1} \cdot p_{\gamma_{m,n}}(\gamma) \\ P_{\gamma_{\max-\min}}(\gamma) &= \left\{ 1 - [1 - P_{\gamma_{m,n}}(\gamma)]^C \right\}^R = \\ &= \left(1 - \left[1 - \left\{ 1 - \exp \left[- \left(\frac{\gamma}{\gamma\eta^2} \right)^{\beta/2} \right] \right\}^\alpha \right]^C \right)^R. \end{aligned} \quad (15)$$

Пусть γ_{AB} – мгновенное значение отношения сигнал/шум в канале прямой видимости, тогда из (6) получаем:

$$P_{\gamma_{AB}}(\gamma) = \left(1 - \exp \left[- \left(\frac{\gamma}{\bar{\gamma}_{AB}\eta_{AB}^2} \right)^{\beta_{AB}/2} \right] \right)^{\alpha_{AB}}. \quad (16)$$

Следовательно, при условии, что $\gamma_{\max-\min} > \gamma_{AB}$ выбирается какой-то из каналов с ретранслятором, если же $\gamma_{\max-\min} < \gamma_{AB}$, система будет использовать канал прямой видимости. Для описания этих случаев введем переменную $\gamma_{\max} = \max(\gamma_{\max-\min}, \gamma_{AB})$. Для нее получим выражения для плотности вероятности и функции распределения вероятности в виде выражений (17) и (18), соответственно:

$$p_{\gamma_{\max}}(\gamma) = \left\{ 1 - [1 - P_{\gamma_{m,n}}(\gamma)]^C \right\}^{R-1} \times \left\{ 1 - [1 - P_{\gamma_{m,n}}(\gamma)]^C + RCP_{\gamma_{m,n}}(\gamma)[1 - P_{\gamma_{m,n}}(\gamma)]^{C-1} \right\}. \quad (17)$$

$$\begin{aligned} P_{\gamma_{\max}}(\gamma) &= P_{\gamma_{\max-\min}}(\gamma)P_{\gamma_{AB}}(\gamma) = \\ &= \left(1 - \left[1 - \left\{ 1 - \exp \left[- \left(\frac{\gamma}{\gamma\eta^2} \right)^{\beta/2} \right] \right\}^\alpha \right]^C \right)^R \times \\ & \times \left\{ 1 - \exp \left[- \left(\frac{\gamma}{\gamma\eta^2} \right)^{\beta/2} \right] \right\}^\alpha. \end{aligned} \quad (18)$$

Согласно [14], вероятность ошибки для сигналов с BPSK модуляцией может быть описана как:

$$P_e(\gamma) = Q(\sqrt{2\gamma}). \quad (19)$$

Определим вероятность ошибки в канале АОЛС с отношением сигнал/шум γ_{\max} , статистика которого определена в (17) и (19) как:

$$\begin{aligned} P_e &= \int_0^\infty P_e(\gamma)p_{\gamma_{\max}}d\gamma = \\ &= \int_0^\infty Q(\sqrt{2\gamma})p_{\gamma_{m,n}}(\gamma) \left\{ 1 - [1 - P_{\gamma_{m,n}}(\gamma)]^C \right\}^{R-1} \times \\ & \times \left\{ 1 - [1 - P_{\gamma_{m,n}}(\gamma)]^C + RCP_{\gamma_{m,n}}(\gamma)[1 - P_{\gamma_{m,n}}(\gamma)]^{C-1} \right\} d\gamma. \end{aligned} \quad (20)$$

В силу сложности вычисления интеграла, аналогично [15], задействуем обобщенную квадратурную функцию Гаусса-Лагерра, приводя (20) к записи в виде конечного ряда:

$$\begin{aligned} P_e &= \frac{1}{2\sqrt{\pi}} \sum_{i=1}^n H_i \left(1 - \left[1 - \left\{ 1 - \exp \left[- \left(\frac{x_i}{\gamma\eta^2} \right)^{\beta/2} \right] \right\}^\alpha \right]^C \right)^R \times \\ & \times \left\{ 1 - \exp \left[- \left(\frac{x_i}{\gamma\eta^2} \right)^{\beta/2} \right] \right\}^\alpha, \end{aligned} \quad (21)$$

где x_i – i -й корень обобщенного многочлена Лагерра $L_n^{(-1/2)}(x)$ [15], а вес H_i можно вычислить как [13]:

$$H_i = \frac{\Gamma\left(n + \frac{1}{2}\right)x_i}{n!(n+1)^2 \left[L_{n+1}^{(-1/2)}(x_i) \right]^2}. \quad (22)$$

Если отношения сигнал/шум в каналах АОЛС падают ниже некоторого порога γ_{nop} происходит переключение на канал РЧ, вероятность ошибки в котором описывается как:

$$P_e^{RF} = \int_0^\infty P_e(\gamma^{RF}) p_{\gamma^{RF}} d\gamma = \int_0^\infty Q\left(\sqrt{2\gamma^{RF}}\right) p_{\gamma^{RF}}(\gamma) d\gamma^{RF}. \quad (23)$$

Ввиду сравнительно высокой вычислительной сложности вычисления этого интеграла воспользуемся разложением, предложенным в [16], и ограничимся первыми двумя членами, получим:

$$P_e^{RF} = \frac{\delta_1 \Gamma(m)}{2\beta_1^m} + \frac{\delta_2 \Gamma(m)}{2\beta_2^m}, \quad (24)$$

где

$$\delta_1 = \frac{m^m}{6\gamma^m \Gamma(m)}, \beta_1 = \frac{1}{2} + \frac{m}{\gamma}, \quad (25)$$

$$\delta_2 = \frac{m^m}{2\gamma^m \Gamma(m)}, \beta_2 = \frac{2}{3} + \frac{m}{\gamma}.$$

Состояние отказа в системе наступит, если мгновенные значения отношений сигнал/шум на всех линиях упадут ниже установленных порогов $\gamma_{нор}$ и $\gamma_{нор}^{RF}$ для линий АОЛС и РЧ соответственно. Выражение для вероятности отказа P_o определяется как

$$P_o = P_e(\gamma_{нор}) P_e^{RF}(\gamma_{нор}^{RF}), \quad (26)$$

Среднее значение битовой ошибки гибридной системы АОЛС/РЧ P_{BER} определяем исходя из средних битовых ошибок линий АОЛС и РЧ следующим образом:

$$P_{ош} = \frac{P_e(\gamma) + P_{\gamma_{max}}(\gamma) P_e^{RF}(\gamma^{RF})}{1 - P_o}. \quad (27)$$

Подставляя (18), (21) и (24) в (27), получим среднюю битовую ошибку гибридной системы АОЛС/РЧ с ретранслятором.

Численное моделирование

Моделирование поведения гибридной системы АОЛС проводилось при условии, что применен тип модуляции BPSK, параметр распределения Накагами $m = 3$, средние отношения сигнал/шум на участках между ретрансляторами полагались равными.

В качестве сигналов АОЛС выступало оптическое излучение на длине волны 1550 нм, диаметры передающих и приемных апертур принимались равными 20 см, расстояние между приемопередающими модулями было выбрано равным 800 м.

На рис. 2 показана зависимость вероятности ошибки, определяемой согласно (27), для различ-

ных видов турбулентности атмосферы. Выбрана минимальная конфигурация, включающая три основных оптических линии с тремя ретрансляторами в каждой. Турбулентность менялась от слабой, характеризуемой структурной постоянной показателя преломления $C_n^2 = 3 \cdot 10^{-17}$ и дисперсией Рытова $\sigma_R^2 = 0,2$, определяемой как

$$\sigma_R^2 = 1,23 C_n^2 k^{7/6} L^{11/6}, \quad (28)$$

до средней с $C_n^2 = 2,2 \cdot 10^{-15}$ и $\sigma_R^2 = 1,5$ и сильной с $C_n^2 = 2 \cdot 10^{-14}$ и $\sigma_R^2 = 16$ [3].

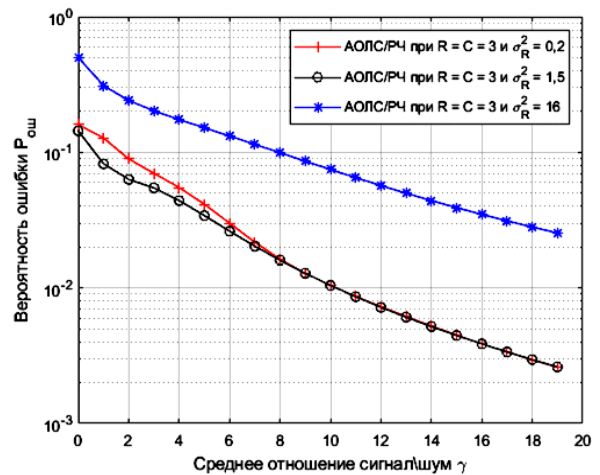


Рис. 2

При слабой и средней турбулентности вероятности ошибки практически совпадают, кроме случаев крайне малых отношений сигнал/шум, что можно объяснить выбранным типом работы ретранслятора – ДП, поскольку на каждом ретрансляционном промежутке по сути выполняется восстановление формы сигналов. Однако при передаче в условиях сильной турбулентности в канале ретрансляторы оказываются неспособны скорректировать возникающие искажения.

Ни рис. 3 представлена иллюстрация поведения системы передачи при изменении числа каналов АОЛС ($R = 2, 3, 5, 10$) с сохранением числа ретрансляторов в каждом из них ($C = 3$). Можно обнаружить, что значения $P_{ош}$ уменьшаются с увеличением числа оптических путей R . Это связано с тем, что рост количества оптических путей в системе увеличивает выигрыш от пространственного разнесения.

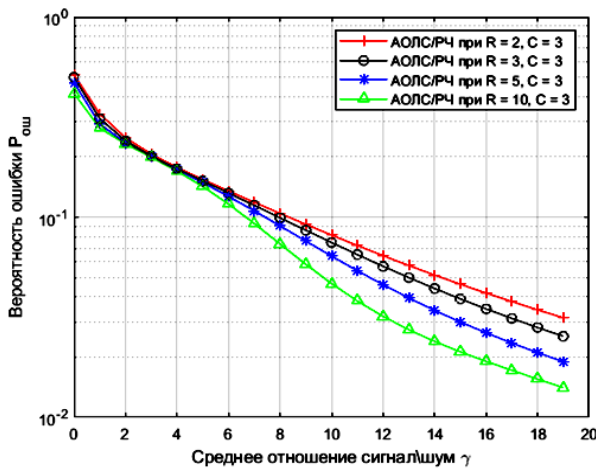


Рис. 3

На рис. 4 показана величина $P_{ош}$ для гибридной системы АОЛС/РЧ, содержащей различное число ретрансляторов на каждой линии АОЛС. Хорошо заметно, что битовая ошибка с увеличением числа ретрансляторов растет. Однако эффект можно в некоторой степени сдерживать, если увеличить диаметр апертур приемопередатчиков. В этом случае ухудшение качества связи можно смягчить за счет апертурного усреднения.

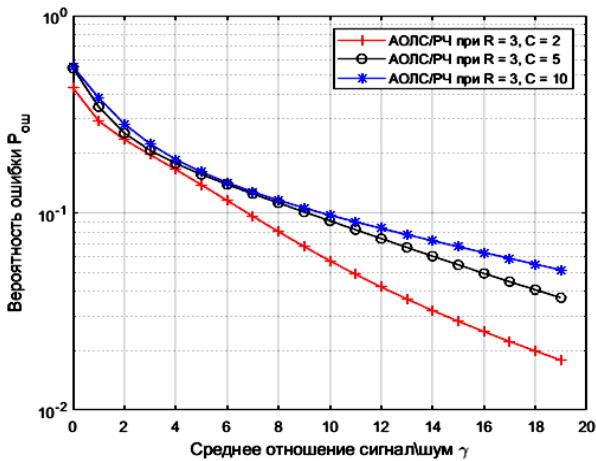


Рис. 4

Рис. 5 иллюстрирует качество связи в системе с различным числом ретрансляторов и каналов АОЛС. Как и ожидалось, наибольший вклад в увеличение $P_{ош}$ вносит рост числа ретрансляторов, снижение числа оптических каналов оказывает существенно меньшее влияние на битовую ошибку. Следовательно, можно сделать вывод о том, что при реализации схем кооперативного разнесения, аналогичных представленным, например, в [8] следует отдавать

предпочтение конфигурациям с большим числом оптических путей при малом числе ретрансляторов в каждом из них.

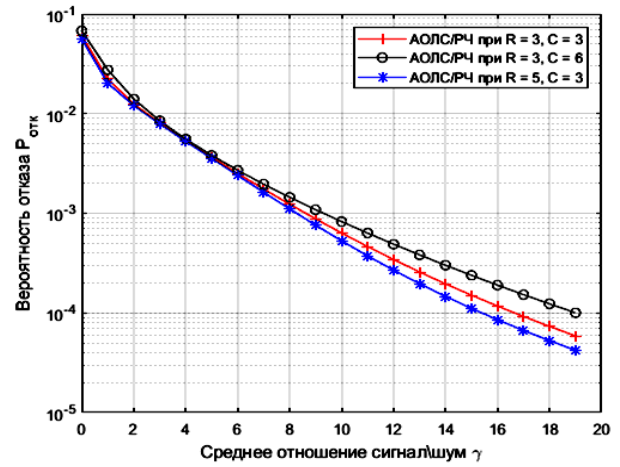


Рис. 5

На рис. 5 приведен график вероятности отказа гибридной системы АОЛС/РЧ, определяемой согласно (26). Для сравнения здесь же приведена величина вероятности отказа для системы, включающей только каналы АОЛС, рассчитываемая как:

$$P_o = \left(1 - \left[1 - \left\{ 1 - \exp \left[- \left(\frac{1}{\gamma_n \eta^2} \right)^{\beta/2} \right] \right\}^\alpha \right]^C \right)^R \times \left\{ 1 - \exp \left[- \left(\frac{1}{\gamma_n \eta^2} \right)^{\beta/2} \right] \right\}^\alpha, \quad (29)$$

где $\gamma_n = \gamma_{нор}/\gamma_{max}$ – нормализованное отношение сигнал/шум.

Предполагается также, что системы работают в условиях сильной атмосферной турбулентности.

Очевидно, что добавление радиоканала значительно повышает общую производительность такой системы передачи, например, при отношении сигнал/шум 15 дБ вероятность отказа гибридной системы снижается на три порядка (рис. 6).

Рис. 7 демонстрирует связь между вероятностью отказа гибридной системы и атмосферными условиями передачи, характеризуемыми различной степенью турбулентности, выбираемыми аналогично рис. 2. В целом поведение системы повторяет полученные выше результаты, поскольку, как и ранее, главный вклад в

производительность системы вносит поведение ретрансляторов.

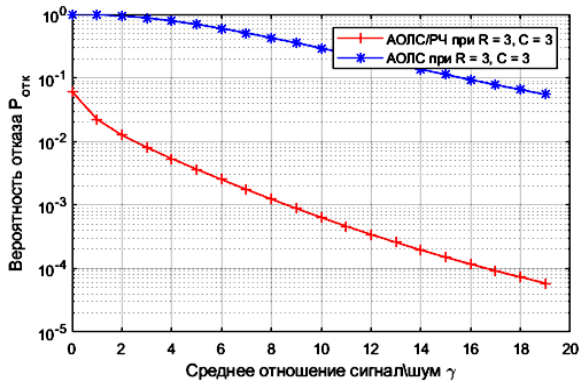


Рис. 6

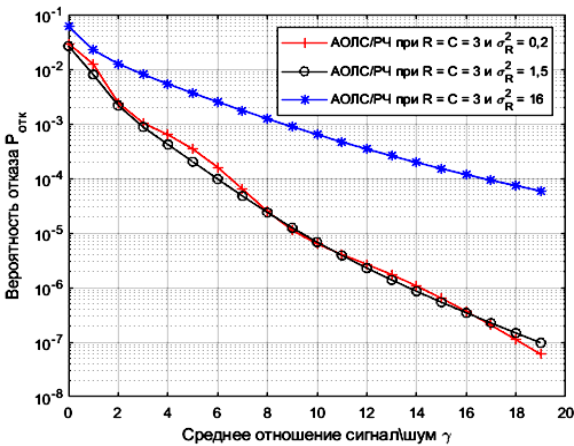


Рис. 7

Заключение

В статье исследованы характеристики гибридной радиооптической системы передачи данных с пространственным разнесением в каналах с ретрансляторами. Оптические каналы описывались экспоненциальной моделью Вейбулла, для радиоканалов применялась модель на основе m -распределения Накагами. Выбор канала приема выполнялся на основе минимаксного критерия. Приведены выражения для расчета интегральных функций вероятности и плотности вероятности, получены выражения для определения величины битовой ошибки и вероятности отказа гибридной системы и системы АОЛС без резервного радиоканала.

Анализ полученных результатов моделирования показывает, что качество связи может быть улучшено за счет увеличения размеров апертуры приёмопередатчиков и подбора структурных параметров R и C .

Литература

- 1 Free Space Optics for Access Networks <https://effectphotonics.com/insights/free-space-optics-for-access-networks/>
2. Willebrand H., Ghuman B. Free Space Optics: Enabling Optical Connectivity in Today's Networks. Indianapolis, IN: Sams Publishing, 2002. 259 p.
3. Andrews L., Phillips R., Hopen C. Laser Beam Scintillation With Applications. New York: SPIE Press, 2001. 416 p.
4. Uysal M., Li J., Yu M. Error rate performance analysis of coded free-space optical links over gamma-gamma atmospheric turbulence channels // IEEE Trans. Wireless Commun. 2006. Vol. 5. № 6. Pp. 1229–1233.
5. Navidpour S., Uysal M., Kavehrad M. BER performance of free-space optical transmission with spatial diversity // IEEE Trans. Wireless Commun. 2007. Vol. 6. № 8. Pp. 2813–2819.
6. El-Mashade M.B., Aly M.H., Toeima A.H. Performance Evaluation of FSO System with MIMO Technique in Different Operating Environments // Physical Science International Journal. 2015. Vol. 7(1). Pp. 33–48.
7. Sharma S., Madhukumar A.S., Sheng C. J. Performance analysis of hybrid FSO/RF transmission for DF relaying system // Proc. IEEE Globecom Workshops. 2017. Pp. 1–6.
8. User cooperation diversity—Part I: System description / A. Sendonaris, E. Erkip, B. Aazhang, Q. Inc, C. Campbell // IEEE Trans. Commun. 2003. Vol. 51. № 11. Pp. 1927–1938.
9. User cooperation diversity—Part II: Implementation aspects and performance analysis / A. Sendonaris, E. Erkip, B. Aazhang, Q. Inc, C. Campbell // IEEE Trans. Commun. Vol. 51. № 11. Nov. 2003. Pp. 1939–1948.
10. Yura H., Rose T. Exponentiated Weibull distribution family under aperture averaging Gaussian beam waves: comment // Opt. Express. Vol. 20. № 18. 2012. Pp. 20680–20683.
11. Aghajanzadeh S.M., Uysal M. Multi-hop coherent free-space optical communications over atmospheric channels // IEEE Trans. Commun. 2011. Vol. 59. № 6. Jun. Pp. 1657–1663.
12. Bhatnagar M.R. Average BER analysis of relay selection based decode-and-forward cooperative communication over Gamma-Gamma fading FSO links // IEEE ICC. Budapest, Hungary. Jun. 2013. Pp. 3142–3147.
13. Performance Analysis of Multihop Parallel Free-Space Optical Systems Over Exponentiated Weibull Fading Channels / P. Wang, T. Cao, L. Guo, R. Wang, Y. Yang // IEEE Photonics Journal. Vol. 7. № 1. Feb. 2015. Pp. 1–17.
14. Скляр Б. Цифровая связь: Теоретические основы и практическое применение. М.: Вильямс, 2003. 1104 с.
15. Tables for the evaluation of $x^\beta e^{-x} f(x) dx$ by Gauss-Laguerre quadrature / P. Concus, D. Cassatt, G. Jaehnig, E. Melby // Math. Comput. Vol. 17. № 83. Oct. 1963. Pp. 245–256.
16. E. Salahat I. Abualhaol. General BER Analysis over Nakagami-m Fading Channels // 6th Joint IFIP Wireless and Mobile Networking Conference (WMNC) - <https://ieeexplore.ieee.org/document/6549037/>

Поступила 30.03.2023; принята к публикации 13.06.2023

Информация об авторе

Краснов Роман Петрович – канд. техн. наук, доцент кафедры радиотехники, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: rpkrasnov@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4065-4557>

HYBRID MULTI-HOP RF-FSO SYSTEM WITH SPATIAL DIVERSITY

R.P. Krasnov

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract: the article studies a model of a multi-hop radio-optical atmospheric communication system using cooperative diversity with several relays in each channel. A radio channel is used as a backup, which is activated when the signal-to-noise ratio drops below a specified threshold in all optical channels. The choice of the working channel made based on the analysis of the channel state information according to the min-max criterion. With a further decrease in the signal-to-noise ratio to the limit threshold, a system outage condition occurs. The exponential Weibull model is used to describe the statistics of optical channels, and the Nakagami m-distribution is used for the radio channel. Expressions for calculating the bit error rate and the probability of failure of the hybrid system and FSO are given, the generalized Gauss-Laguerre quadrature function is used for the calculation. The expressions for the radio channel based on the calculation of the coefficients of the polynomial expansion are similarly presented. The dependences of the bit error rate on the average signal-to-noise ratio in the channels for various atmospheric transmission conditions, as well as for various combinations of the number of channels and relays in each of them are shown. The conclusion is made about the prevailing influence on the quality of communication of the number of repeaters in the channel compared to the total number of diversity channels. Dependences of the probability of failure of the hybrid system and FSO are given. The conclusion is made about the possibilities of improving the quality of communication in systems of this type

Key words: hybrid system, free space optics, radio channel, outage probability, bit error rate

References

1. “Free Space Optics for Access Networks”, available at: <https://effectphotonics.com/insights/free-space-optics-for-access-networks/>
2. Willebrand H., Ghuman B. “Free Space Optics: Enabling Optical Connectivity in Today’s Networks”, Indianapolis, IN: Sams Publishing, 2002, 259 p.
3. Andrews L., Phillips R., Hopen C. “Laser Beam Scintillation With Applications”, New York: SPIE Press, 2001, 416 p.
4. Uysal M., Li J., Yu M. “Error rate performance analysis of coded free-space optical links over gamma-gamma atmospheric turbulence channels”, *IEEE Trans. Wireless Commun.*, 2006, vol. 5, no. 6, pp. 1229–1233.
5. Navidpour S., Uysal M., Kavehrad M. “BER performance of free-space optical transmission with spatial diversity”, *IEEE Trans. Wireless Commun.*, 2007, vol. 6, no. 8, Aug., pp. 2813–2819.
6. El-Mashade M.B., Aly M.H., Toeima A.H. “Performance Evaluation of FSO System with MIMO Technique in Different Operating Environments”, *Physical Science International Journal*, 2015, vol. 7(1), May, pp. 33-48.
7. Sharma S., Madhukumar A. S., Sheng C. J. “Performance analysis of hybrid FSO/RF transmission for DF relaying system”, *proc. IEEE Globecom Workshops*, 2017, pp. 1–6.
8. Sendonaris A., Erkip E., Aazhang B., Inc Q., Campbell C. “User cooperation diversity - Part I: System description”, *IEEE Trans. Commun.*, 2003, vol. 51, no. 11, Nov., pp. 1927–1938.
9. Sendonaris A., Erkip E., Aazhang B., Inc Q., Campbell C. “User cooperation diversity - Part II: Implementation aspects and performance analysis”, *IEEE Trans. Commun.* 2003, vol. 51, no. 11, Nov., pp. 1939–1948.
10. Yura H., Rose T. “Exponentiated Weibull distribution family under aperture averaging Gaussian beam waves: comment”, *Opt. Express*, 2012, vol. 20, no. 18, pp. 20680–20683.
11. Aghajanzadeh S.M., Uysal M. “Multi-hop coherent free-space optical communications over atmospheric channels”, *IEEE Trans. Commun.*, 2011, vol. 59, no. 6, Jun, pp. 1657–1663.
12. Bhatnagar M.R. “Average BER analysis of relay selection based decode-and-forward cooperative communication over Gamma-Gamma fading FSO links”, *proc. IEEE ICC*, Budapest, Hungary, Jun. 2013, pp. 3142–3147.
13. Wang P., Cao T., Guo L., Wang R., Yang Y. “Performance Analysis of Multihop Parallel Free-Space Optical Systems Over Exponentiated Weibull Fading Channels”, *IEEE Photonics Journal*, 2015, vol. 7, no 1, Feb., pp. 1-17.
14. Sklyar B. “Digital communication: Theoretical foundations and practical application” (“Tsifrovaya svyaz’: Teoreticheskiye osnovy i prakticheskoye primeneniye”), Moscow, Vil’yame, 2003, 1104 p.
15. Concus P., Cassatt D., Jaehnig G., Melby E. “Tables for the evaluation of $x^\beta e^{-x} f(x) dx$ by Gauss-Laguerre quadrature”, *Math. Comput.*, 1963, vol. 17, no. 83, Oct., pp. 245–256.
16. Salahat E., Abualhaol I. “General BER Analysis over Nakagami-m Fading Channels”, *6th Joint IFIP Wireless and Mobile Networking Conference (WMNC)*, available at: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6549037/>

Submitted 30.03.2023; revised 13.06.2023

Information about the author

Roman P. Krasnov, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: rpkrasnov@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4065-4557>

ЭКВИВАЛЕНТНАЯ ГИБРИДНАЯ ДИПОЛЬНАЯ МОДЕЛЬ ОЦЕНКИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОМЕХ НА ОСНОВЕ ИСКУССТВЕННОЙ НЕЙРОННОЙ СЕТИ

М.А. Ромашенко, Д.В. Васильченко, Д.А. Пухов

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

Аннотация: предлагается новая эквивалентная гибридная дипольная модель с искусственной нейронной сетью (ИНС) для оценки электромагнитных помех (ЭМП), генерируемых в процессе работы устройства. Традиционная дипольная модель обычно не учитывает эффекты многократного отражения и дифракцию между источником электромагнитных помех и его близлежащими компонентами, вследствие чего в некоторых случаях это приводит к неточному результату расчетов. В предлагаемом методе функция диполя Грина берется в качестве входных данных, а излучаемое электромагнитное поле берется в качестве выходных данных ИНС. Применение мощных возможностей обработки ИНС необходимо для модификации матрично-векторного умножения между функцией Грина в свободном пространстве и дипольными моментами в традиционной дипольной модели, так что устанавливается новое отображение между эквивалентными диполями и их излучаемыми полями. Такой подход способствует повышению эффективности обработки данных экспериментов с применением программно-аппаратного комплекса (ПАК) сканирования электронных устройств в ближнем поле за счёт ускорения работы и повышения точности обработки данных. Последующее совершенствование алгоритмов позволит расширить область применения разрабатываемого программного обеспечения на базе описанной методики

Ключевые слова: электромагнитные помехи, диполь, нейронная сеть, сканирование ближнего поля, гибрид

Введение

Ввиду увеличения значений рабочих частот, множество электронных устройств становятся паразитными источниками электромагнитного излучения. Помехи, вызванные данным видом излучения, могут нарушить стабильную работу как отдельного блока, так и системы в целом [1]. Для минимизации возможного паразитного излучения необходимо проводить как математическое моделирование на этапе проектирования, так и экспериментальные исследования прототипов изделий на предмет определения уровней электромагнитных помех, а также частотного диапазона излучений, возникающих в процессе работы устройства. В связи с этим был разработан ПАК, который осуществляет поэтапное сканирование устройства в ближнем поле [2]. Данный функционал позволяет производить прогнозирование возникновения сложных ЭМП, которые могут быть пропущены на этапе математического моделирования из-за большого объема необходимых вычислений и невозможности их проведения, поскольку поле является трехмерной структурой с высокой прочностью данных. Также разработанный ПАК позволяет провести дополнительную верификацию данных, полученных в результате проведения ма-

тематического моделирования, что в свою очередь позволяет совершенствовать алгоритмы математического моделирования.

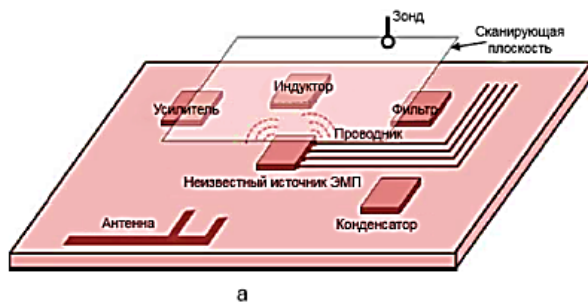
Метод сканирования ближнего поля, позволяет проводить измерения для восстановления простых и эквивалентных источников излучения, обеспечивая решение проблем с электромагнитной совместимостью (ЭМС). Обычно для представления источника излучения используются два вида эквивалентных источников. Одним из них является эквивалентный ток, широко используемый в антеннах ближнего поля. Другой эквивалентный источник – бесконечно малый диполь, основанный на мультипольном разложении, который предпочтителен при анализе электромагнитных помех из-за его четкого физического значения и простых аналитических формул [3].

Традиционная эквивалентная дипольная модель

На современных печатных платах располагается множество компонентов, таких как соединительные дорожки, микросхемы и антенны. В связи с этим чувствительные устройства подвержены влиянию электромагнитных помех на внутриаппаратном уровне, как показано на рис. 1.

В соответствии с принципом эквивалентности поля, для анализа проблемы электромагнитных помех предложен метод реконст-

рукции источника, основанный на сканировании ближнего поля, где дипольная матрица рассматривается как простой и эквивалентный источник в соответствии с теорией мультипольного расширения. Дипольный тип (магнитный или электрический диполь), поляризация, положение и число, исключая момент,



определяются на основе предварительной информации о зашумленных устройствах и сканируемом поле. Неизвестные - это моменты диполей. Поле в плоскости над неизвестным источником электромагнитных помех определяется зондом, как показано на рис. 1, а.

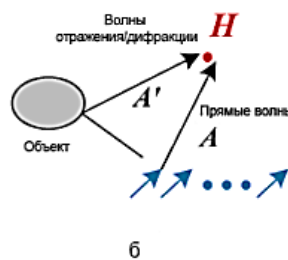


Рис. 1. Демонстрация влияния источника электромагнитных помех на сложной печатной плате (а). Сканирование в ближнем поле (б). Волна отражения/дифракции, вызванная близлежащим объектом

С практической точки зрения магнитное поле измеряется легче и точнее, чем электрическое поле. Поэтому магнитное поле используется в качестве известного ближнего поля. Кроме того, магнитные диполи больше подходят для того, чтобы быть эквивалентным источником, основанным на том факте, что токи контура обычно являются доминирующим источником электромагнитных помех для большинства реальных печатных плат. Более того, печатная плата обычно проектируется с большой плоскостью заземления. Впоследствии взаимосвязь между диполями и сканируемым полем может быть установлена при условии, что полное магнитное поле в каждой точке сканирования генерируется всеми диполями и их изображениями.

В сферической системе координат излучаемое магнитное поле от z-направленного магнитного диполя с единичным моментом, расположенным в начале координат, может быть вычислено по (1):

$$\begin{cases} H_r = \frac{\mu}{2\pi\eta r^2} \cos\theta \left(1 + \frac{1}{jkr}\right) e^{-jkr} \\ H_\theta = \frac{jk\mu}{4\pi\eta r} \left(1 + \frac{1}{jkr} + \frac{1}{(jkr)^2}\right) e^{-jkr} \\ H_\phi = 0 \end{cases}, \quad (1)$$

где r - расстояние между диполем и точкой сканирования, а k - волновое число. Неизвестные моменты эквивалентных диполей могут быть получены путем решения уравнения (2):

$$A \cdot X = H, \quad (2)$$

где $A = [a_{ij}] (i = 1, 2, \dots, N; j = 1, 2, \dots, M)$ - это N по M матрица преобразования между эквивалентными магнитными диполями и сканируемыми магнитными полями, которая определяется свободным пространством Функция диполя Грина в (1) вместе с теорией изображений. N обозначает номер выборки поля, а M представляет собой дипольное число. $X_{M \times 1} = [X_x, X_y]^t$ включает неизвестные дипольные моменты вдоль направлений x и y соответственно. Верхний индекс t представляет собой транспонирование матрицы. Два тангенциальных магнитных компонента на плоскости сканирования включены в $H_{M \times 1} = [H_x, H_y]^t$. Уравнение (2) обычно может быть решено методом наименьших квадратов с соответствующими методами регуляризации.

Однако (2) является крайне некорректным матричным уравнением по следующим причинам:

1) шумы окружающей среды неизбежны в реальном процессе сканирования, поскольку в настоящее время большая часть сканирования ближнего поля электромагнитными помехами выполняется в открытом пространстве.

2) сканирование с закрытой поверхностью вряд ли достигается в реальном процессе сканирования. В такой ситуации уникальность эквивалентного источника больше не поддерживается строго.

С другой стороны, матрично-векторное умножение (МВМ) между функцией Грина в свободном пространстве A и дипольными мо-

ментами X имеет недостаточную точность, как это ожидается в сложной системе. Например, при рассмотрении излучения диполей в присутствии находящегося поблизости объекта, как показано на рис. 1, б. Предполагая, что $N = M$, когда мы рассматриваем волны отражения/дифракции от объекта, (2) может быть переписано как (3):

$$A \cdot (U + A^{-1} \cdot A') \cdot X = H, \quad (3)$$

где U - единичная матрица, A представляет прямые волны, полученные из функции Грина в свободном пространстве, и A' представляет отражение/дифракцию, которая также приносит энергию от диполей в точку наблюдения.

Для некоторых гибридных численных методов, таких как метод моментов, гибридный с однородной теорией дифракции или

физическая оптика, МВМ между функцией Грина в свободном пространстве и источниками обычно изменено так, как указано в (3). К сожалению, такая модификация сложна и даже невозможна из-за сложной структуры современных печатных плат. А обычно включает функцию Грина, а функция Грина доступна только для особых случаев.

Разрабатываемый гибридный эквивалентный дипольный модели на основе нейронной сети

На рис. 2 показана разрабатываемая структура ИНС для задачи воссоздания эквивалентного источника. ИНС включает в себя входной слой, один или несколько скрытых слоев и один выходной слой.

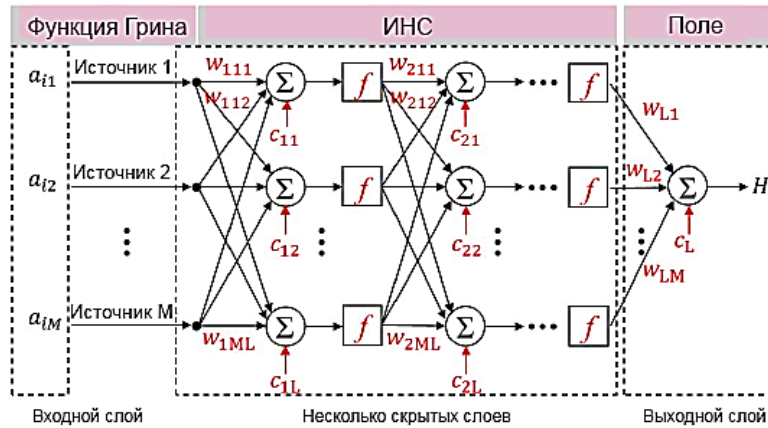


Рис. 2. Структура ИНС для задачи реконструкции эквивалентного источника: L - количество нейронов, которое может быть разным для разных скрытых слоев

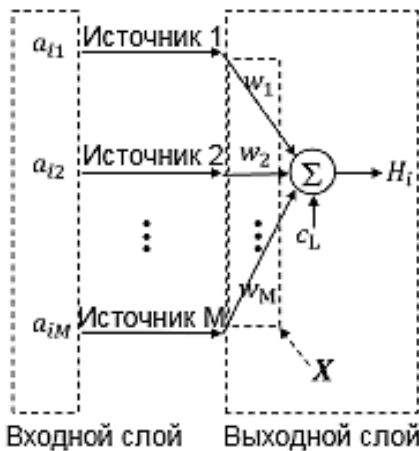


Рис. 3. Внутренняя структура ИНС без скрытых слоев

Нейроны, принадлежащие к соседним слоям, обычно полностью соединены. w , c и

f - это веса, смещения и функция активации соответственно.

Для ИНС каждая строка матрицы преобразования A в (2) берется в качестве одной выборки обучающих данных, а в качестве выходных данных берется соответствующее излучаемое поле. Таким образом, существует N выборок для нашего обучения ИНС. Выборка обучающих данных для ИНС равна (4):

$$a_i = [a_{i1}, a_{i2}, \dots, a_{ij}, \dots, a_{iM}], i = 1, 2, \dots, N \quad (4)$$

a_{ij} определяется функцией Грина (1) диполя в свободном пространстве и его изображением, содержащим переменную $r = |r_i - r_j|$, где r_i и r_j представляют местоположение точки сканирования и диполя соответственно. Функция затрат определяется как среднеквадратич-

ная ошибка между выводом ИНС H_i и i -м элементом в сканируемом поле $H_{N \times 1} = [H_x, H_y]^t$.

В традиционном методе эквивалентные диполи явно решаются методом наименьших квадратов. После решения нам известен каждый дипольный момент. Однако эквивалентные диполи неявно решаются предложенным методом ИНС. Дипольные моменты неявно представлены весами, смещениями и функциями активации ИНС. Если на рис. 2 нет скрытого слоя, предложенный ИНС будет сведен к рис. 3. Теперь это точно представляет исходное матричное уравнение $A \times X = H$, где веса $w_1 - w_M$ являются неизвестными дипольными моментами X .

Новизна предлагаемого метода заключается в том, что мы используем более гибкую методику отображения ИНС для замены операции МВМ между свободным пространством Функцию Грина и дипольным моментом в традиционном методе. Сравнивая рис. 2 и 3, после добавления скрытых слоев к ИНС, нейронную сеть можно использовать для обработки непрямых волн.

Для обучения ИНС все обучающие данные случайным образом разбиваются на три набора. 70% данных выбираются в качестве обучающего набора, который используется для оптимизации параметров ИНС; 15% данных выбираются в качестве проверочного набора, который используется для предотвращения переобучения; последние 15% данных используются в качестве тестового набора, которые используются для предварительной проверки модели обучения.

Пример вычисления

Для примера вычислений используются поля на плоскостях сканирования №1 ($z = 20$ мм) и №2 ($z = 25$ мм) для прогнозирования поля на третьей плоскости ($z =$

35 мм) над плоскостями сканирования [4]. На рис. 4 показана дипольная сетка и сканирующие сетки № 1 и № 2. Чтобы получить базу данных, для обучения ИНС необходимы поля на двух плоскостях сканирования. Положения диполя и область сканирования на рис. 4 используются для построения матрицы A в (2).

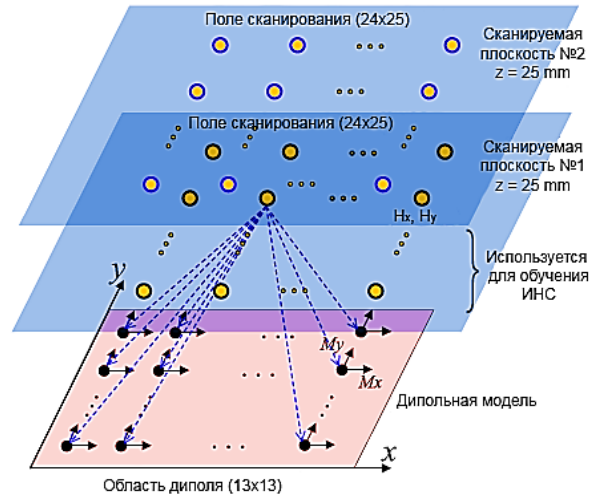


Рис. 4. Дипольная и сканирующая сетка для вычислительного примера

Для традиционного дипольного метода используется метод наименьших квадратов вместе с методом регуляризации Тихонова для решения матричного уравнения (2). Для метода ИНС обучающий набор, набор проверки и тестовый набор случайным образом содержат поля из плоскостей сканирования №1 и №2, что улучшает обобщение модели ИНС для прогнозирования полей на третьей плоскости сканирования. Для удобства обученная ИНС в этом примере обозначается как Net №1.

Обучение ИНС реализовано на нейронных сетевых инструментах в MATLAB. На рис. 5 показана структура ИНС для примера моделирования.



Рис. 5. Структура ИНС

Нейронная сеть представляет собой пяти-слойную сеть прямой связи с симметричной

сигмоидной активацией, как показано в (5), в каждом скрытом слое и линейной активацией в

выходном слое. Каждый скрытый слой содержит десять нейронов, определенных на основе (5)

$$S(x) = \frac{2}{1 + e^{-2x}} - 1. \quad (5)$$

В примере моделирования используется быстрый и экономящий память алгоритм обучения, называемый обратным распространением масштабированного сопряженного градиента. После обучения можно получить разумную и эквивалентную дипольную модель. Обучающие кривые показаны на рис. 6.

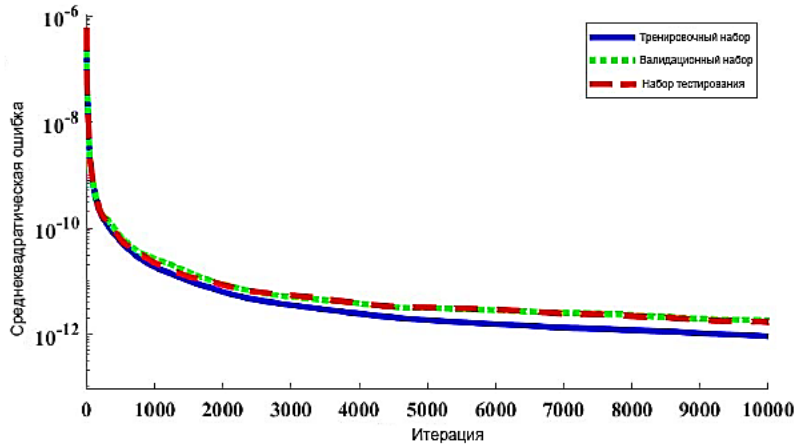


Рис. 6. Кривые обучения нейронной сети

Прогнозируемые поля показаны на рис. 7.

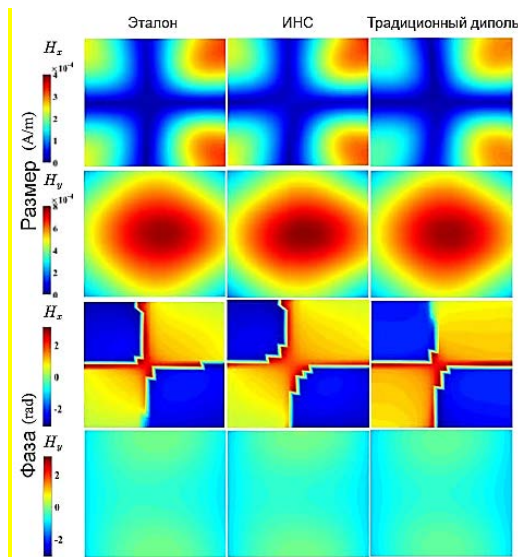


Рис. 7. Магнитные поля на частоте 2,2 ГГц в плоскости прогнозирования ($z = 35$ мм) над поверхностью сканирования

Поле на плоскости предсказания, полученное с помощью ИНС, имеет более согласованную структуру поля, чем поле, предсказанное традиционным дипольным методом. Для дальнейшего количественного сравнения относительная ошибка определяется в (6)

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (|H^{calc}(r_i)| - |H^{ref}(r_i)|)^2}{\sum_{i=1}^N |H^{ref}(r_i)|^2}}, \quad (6)$$

$r_i \in \text{valid.plane}$

где H^{calc} относится к предсказанному полю традиционным дипольным методом или предлагаемому методу ИНС, представляет моделируемое поле с помощью полноволнового программного обеспечения. Относительные ошибки ближнего поля на плоскости прогнозирования традиционным дипольным методом составляют $\sigma_{|H_x|}^{tra} = 11\%$ и $\sigma_{|H_y|}^{tra} = 3,9\%$. Что касается предлагаемого метода ИНС, то относительные погрешности составляют $\sigma_{|H_x|}^{ANN} = 5,0\%$ и $\sigma_{|H_y|}^{ANN} = 2,8\%$.

Заключение

Таким образом, можно сделать вывод, что применение данной методики совместно с программно-аппаратным комплексом позволит с высокой точностью выделять на исследуемых образцах печатных модулей зоны где, наблюдаются проблемы с ЭМС. Таким образом, разработчик может заранее узнать о местах потенциальных проблем в части электромагнитной совместимости и принять необходимые меры по их устранению. Разработка подобных высокоточных отечественных стендов тестирования электронных устройств на ЭМС, позволит повысить качество выпускаемой продукции и минимизировать затраты при разработке новых устройств.

Литература

1. Ромащенко М.А. Конструкторско-технологические аспекты обеспечения ЭМС при разработке РЭС // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2010. Т. 6. № 11. С. 149-151.
2. Васильченко Д.В., Неклюдов А.Л., Ромащенко М.А. Программно-аппаратный комплекс тестирования электронных средств на воздействие электромагнитных помех // Радиолокация, навигация, связь: сб. тр. XXVI Междунар. науч.-техн. конф., 2020. С. 386-391.

3. Ромащенко М.А., Васильченко Д.В., Пухов Д.А. Методика автоматизированной оценки устойчивости электронных средств к электромагнитным помехам // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2022. Т. 18. № 3. С. 95-99.

4. Ромащенко М.А., Васильченко Д.В., Пухов Д.А. Разработка модулей калибровки комплекса оценки влияния электромагнитных помех на электронные средства // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2021. Т. 17. № 6. С. 95-99.

Поступила 24.04.2023; принята к публикации 16.06.2023

Информация об авторах

Ромащенко Михаил Александрович – д-р техн. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, д. 84), e-mail: kivr@vorstu.ru

Васильченко Дмитрий Владимирович – аспирант, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, д. 84), e-mail: Shadow951@bk.ru

Пухов Дмитрий Анатольевич – студент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, д. 84), e-mail: puhov.dm22@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6818-2715>

EQUIVALENT HYBRID DIPOLE MODEL OF ELECTROMAGNETIC INTERFERENCE ESTIMATION BASED ON ARTIFICIAL NEURAL NETWORK

M.A. Romashchenko, D.V. Vasilchenko, D.A. Puhov

Voronezh state technical University, Voronezh, Russia

Abstract: the article proposes propose a new equivalent hybrid dipole model with artificial neural network (ANN) to estimate electromagnetic interference (EMI) generated during device operation. The traditional dipole model usually does not take into account the effects of multiple reflection and diffraction between the electromagnetic interference source and its nearby components, which in some cases leads to inaccurate calculation results. In the proposed method, the Green's dipole function is taken as input data and the emitted electromagnetic field is taken as output data of the ANN. The application of powerful ANN processing capabilities is necessary to modify the matrix-vector multiplication between the Green's function in free space and the dipole moments in the traditional dipole model, so that a new mapping between the equivalent dipoles and their emitted fields is established. This approach improves the efficiency of near-field electron scanning hardware-software complex (NHC) experiments by accelerating the work and improving the accuracy of data processing. Subsequent improvement of the algorithms will make it possible to expand the area of application of the software developed based on the described technique

Key words: electromagnetic interference; dipole; neural network; near field scanning; hybrid

References

1. Romashchenko M.A. "Design and technological aspects of providing EMC in the development of RES", *The Bulletin Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2010, vol. 6, no. 11, pp. 149-151. eLIBRARY ID: 15279494 - EDN: MWJKAL
2. Vasylichenko D.V., Neklyudov A.L., Romashchenko M.A. "Software-hardware complex for testing electronic devices on the impact of electromagnetic interference", *Radar, navigation, communication (Radiolokatsiya, navigatsiya, svyaz')*, proc. of the XXVI International Scientific and Technical conference, 2020, pp. 314-319.
3. Romashchenko M.A., Vasilchenko D.V., Pukhov D.A. "Methods for automated assessment of the stability of electronic means to electromagnetic interference", *The Bulletin Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2022, vol. 18, no. 3, pp. 95-99. DOI 10.36622/VSTU.2022.18.3.013. – EDN VAIKAU
4. Romashchenko M.A., Vasilchenko D.V., Pukhov D.A. "Development of calibration modules for assessing the effect of electromagnetic interference on electronic devices", *The Bulletin Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2021, vol. 17, no 6, pp. 95-99.

Submitted 24.04.2023; revised 16.06.2023

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: kivr@vorstu.ru

Dmitriy V. Vasilchenko - Postgraduate student, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: Shadow951@bk.ru

Dmitry A. Pukhov - Student, Voronezh State Technical University, (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: puhov.dm22@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6818-2715>

МАЛОЭЛЕМЕНТНАЯ АНТЕННАЯ РЕШЕТКА С УВЕЛИЧЕННЫМ ПОКРЫТИЕМ ЗОНЫ ОБСЛУЖИВАНИЯ

А.В. Лукьянчиков

Севастопольский государственный университет, г. Севастополь, Россия

Аннотация: интенсивное развитие современного общества требует наличия современных систем связи, в частности, пятого поколения. Использование нелицензируемого диапазона *Wi-Fi* в качестве «последней мили» сетей 5G может ускорить их внедрение. Однако пропускная способность системы может стать узким местом, так как она зависит от соотношения сигнал/шум в радиоканале. Для увеличения бюджета радиоканала можно использовать антенны с управляемой диаграммой направленности, которые, как правило, реализуются с помощью фазированных антенных решеток. Малоэлементная решетка может быть использована для обеспечения максимальной скорости связи в системе *Wi-Fi*, при этом требуется минимальное количество элементов для управления диаграммой характеристикой. Обоснованно выбран излучатель такой решетки и определены его геометрические параметры. Также выбрано оптимальное расстояние между элементами и дискрет фазы между входами, что позволило увеличить зону обслуживания на 76 %. Была предложена достаточно простая схема возбуждения и структурная схема устройства возбуждения на основе двух дискретных фазовращателей и двух делителей мощности

Ключевые слова: управление диаграммой направленности, печатный излучатель, диаграммо-образующая схема, дискретный фазовращатель, коэффициент стоячей волны (КСВ)

Введение

Бурное развитие систем связи вызвано необходимостью обеспечения быстрого и надежного доступа к информации, коммуникации и услугам в любой точке планеты, повышения эффективности бизнеса и улучшения качества жизни людей. Одним из элементов систем связи который влияет на основные тактико-технические характеристики, является ее антенна. Например, в системе связи *Wi-Fi* на точках доступа в основном используются антенны с постоянной диаграммой направленности. Однако интенсивное развитие мобильных систем связи пятого поколения заставляет посмотреть на это обстоятельство с другой стороны. В частности использование нелицензируемого диапазона *Wi-Fi* в сетях 5G является актуальным решением для увеличения пропускной способности и улучшения качества обслуживания [1]. Это особенно важно в условиях растущего количества устройств, которые используют беспроводные сети, и увеличения объема передаваемых данных. Таким образом, актуальность антенн для *Wi-Fi* с управлением ДН (диаграммой направленности) в вертикальной плоскости связана с необходимостью обеспечения равномерного покрытия сигналом во всех направлениях при большом количестве абонентов [2, 3]. В условиях, когда пользователи находятся на разных этажах здания или в разных частях помещения, вертикальное распростране-

ние сигнала является ключевым фактором для обеспечения стабильной и высокоскоростной связи. Традиционные антенны для *Wi-Fi* имеют диаграмму направленности, ориентированную главным образом в горизонтальной плоскости, что может приводить к неравномерному покрытию сигналом в вертикальной плоскости. Антенны с управлением ДН в вертикальной плоскости позволяют решить эту задачу, обеспечивая равномерное покрытие сигналом во всех направлениях.

Такие антенны могут быть использованы в различных сценариях, таких как офисные здания, аэропорты, торговые центры и другие общественные места, где необходимо обеспечить высокоскоростную и стабильную связь для большого количества пользователей.

В целом, использование антенн для *Wi-Fi* с управлением ДН в вертикальной плоскости является актуальным решением для обеспечения равномерного покрытия сигналом и высококачественной связи в условиях, когда пользователи находятся на разных этажах здания или в разных частях помещения. Поэтому разработка и исследование таких антенн является актуальной задачей.

Выбор и обоснования геометрических параметров одиночного печатного излучателя

В качестве элемента антенной решетки можно использовать разные излучатели [4, 5,

б). Наиболее компактным и технологичным элементом является печатный излучатель [7]. Существует несколько физических моделей, на основе которых можно построить теорию печатных излучателей. Одна из таких моделей представляет печатный излучатель в виде разомкнутого отрезка несимметричной полосковой линии, возбуждаемого штырем через отверстие в экране [8]. При приближенном подходе, основанном на теории длинных линий, учитывается возбуждение только квази-Т-волн в отрезке. В качестве продольной оси отрезка выбирается одна из осей симметрии прямоугольной пластинки. Излучение происходит через торцевые щели, образованные кромками отрезка полоскового проводника и экраном. Боковые щели не оказывают существенного влияния на излучение. Коэффициент отражения близок к единице, так как мощность, излучаемая торцевыми щелями, невелика по сравнению с мощностью квази-Т-волны, набегавшей на щель. Распределение тока и поля вдоль оси полосковой линии между торцевыми щелями и возбуждающим штырем мало отличается от соответствующих распределений в несимметричной полосковой линии со стоячей квази-Т-волной. На торцевых щелях наблюдается максимум напряженности электрического поля и нуль электрического тока. При определенной длине отрезка полосковой линии происходит синфазное сложение волн, отраженных от его концов, и волн, возбуждаемых штырем, что соответствует резонансному режиму работы. В этом случае интенсивность колебаний поля и тока резко возрастает. Если направление оси отрезка полосковой линии совпадает с осью y (рис. 1), то резонанс квази-Т-волны, распространяющейся в этом направлении, определяется размером b пластинки, а размер a определяет входное сопротивление при резонансе. Торцевые щели излучают волны с основной поляризацией, а боковые щели – с кроссполяризацией поля.

Для оптимальной работы печатной антенны необходимо подобрать ее параметры, такие как ширина и длина излучателя, чтобы резонансный размер был кратен полуволнам квази-Т-волны. Также необходимо подобрать значения ширины и расстояния между торцевыми щелями для достижения минимального отражения сигнала. Для определения параметров согласования необходимо рассчитать комплексные сопротивления торцевых щелей и эквивалентной двухпроводной линии, которые могут быть определены по соответствующим формулам.

Для определения резонансного размера излучателя используется выражение

$$b = \lambda_t / 2, \quad (1)$$

где λ_t — длина квази-Т-волны. В резонансном режиме распределение напряженности электрического поля вдоль торцевых и боковых щелей соответствует низшей резонансной частоте. Энергия, запасенная в поле квази-Т-волны при резонансе, достаточно велика, что приводит к высокой добротности излучателей.

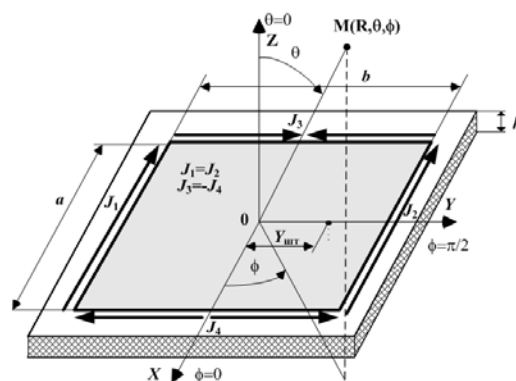


Рис. 1. Прямоугольный печатный излучатель с эквивалентными электрическими и магнитными токами

Для вычисления параметров согласования используется эквивалентная схема печатного излучателя, которая представлена на рис. 2. Излучатель в виде эквивалентной двухпроводной линии, которая нагружена на проводимости торцевых щелей, которые являются комплексными величинами с емкостной реактивной частью. Излучающие кромки представлены в виде щелей размером $a \cdot h$, соединенных между собой несимметричной длинной линией. Формула для расчета волнового сопротивления выглядит следующим образом:

$$W = 120 \cdot \pi \cdot h / (b \cdot \sqrt{\epsilon_r}), \quad (2)$$

где $\epsilon_r = 0,5 \cdot (\epsilon + 1) + 0,5 \cdot (\epsilon - 1) / \sqrt{1 + 12 \cdot h/b}$ — эффективная относительная проницаемость;

h — толщина подложки;

b — резонансный размер пластины;

ϵ — относительная проницаемость подложки.

В качестве материала подложки предлагается использовать воздух по нескольким причинам:

— воздух имеет низкий коэффициент диэлектрической проницаемости, что позволяет

уменьшить ослабление электрического поля, это важно для печатных антенн, где эффективность передачи сигнала зависит от того, насколько хорошо электрическое поле передается через диэлектрик;

— при больших значениях диэлектрической проницаемости размер излучающих кромок уменьшается, а следовательно, уменьшается апертура антенны, что влечет падение коэффициента усиления антенны [9];

— воздух доступен и дешев, что делает его привлекательным диэлектриком для печатных антенн;

— изготовление печатных антенн с воздушным диэлектриком проще, чем с использованием других материалов, таких как стекло или керамика.

Учитывая, что в качестве диэлектрика будет использоваться воздух, выражение (2) примет вид:

$$W = 120 \cdot \pi \cdot h / b. \quad (3)$$

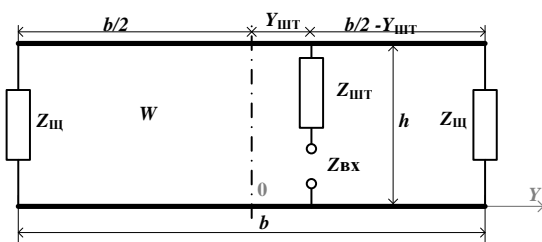


Рис. 2. Эквивалентная схема печатного излучателя с возбуждающим штырём расположенным на оси симметрии пластинки

Для расчета параметров согласования используется эквивалентная схема печатного излучателя, изображенная на рис. 2. Преобразуем ее к виду, представленному на рис. 3. Здесь Z_1 и Z_2 — сопротивления щелей, пересчитанные к месту установки штыря $Y_{шт}$ с учетом их трансформации в длинной линии с сопротивлением W .

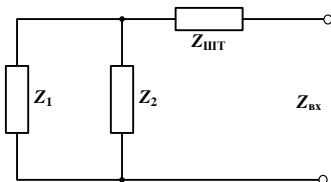


Рис. 3. Обобщенная эквивалентная электрическая схема печатного излучателя с возбуждающим штырём расположенным на оси симметрии пластинки

Согласно приведенной схеме основной вклад в сопротивление излучателя вносят сопротивления излучающих кромок пересчитанных к

точке возбуждения $Y_{шт}$ и сопротивления самого штыря. Формула для расчета входного сопротивления $Z_{вх}$:

$$Z_{вх} = R_{вх} + jX_{вх} = (Z_1 \parallel Z_2) + Z_{шт} = Z_{шт} + Z_1 \cdot Z_2 / (Z_1 + Z_2) \quad (4)$$

где

$$Z_1 = W \frac{Z_{щ} + jWtg[k_0(b/2 - Y_{шт})]}{W + jZ_{щ}tg[k_0(b/2 - Y_{шт})]}, \quad (5)$$

есть входное сопротивление отрезка эквивалентной двухпроводной линии длиной $b/2 - Y_{шт}$, нагруженной на сопротивление торцевой щели;

$$Z_2 = W \frac{Z_{щ} + jWtg[k_0(b/2 + Y_{шт})]}{W + jZ_{щ}tg[k_0(b/2 + Y_{шт})]} \quad (6)$$

есть входное сопротивление отрезка эквивалентной двухпроводной линии длиной $b/2 + Y_{шт}$, нагруженной на сопротивление торцевой щели;

$Z_{шт}$ — индуктивное сопротивление штыря;

W — волновое сопротивление полосковой линии;

k_0 — коэффициент фазы квази Т-волны;

$Y_{шт}$ — смещение штыря вдоль оси Y относительно оси симметрии.

Входное сопротивление излучателя в рабочей полосе частот ведет себя как сопротивление параллельного контура, но на частоте, соответствующей максимуму активной составляющей, реактивная составляющая не обращается в нуль и равна индуктивному сопротивлению штыря $Z_{шт}$. Из-за наличия емкостной реактивной составляющей сопротивления щелей, резонансный размер излучателя немного меньше значения, определяемого формулой (1).

Входное сопротивление печатных излучателей в резонансном режиме существенно зависит от расположения штыря под пластинкой. Это позволяет получить нужное его значение на резонансной частоте и обеспечить согласование линии передачи с излучателем.

С использованием математической модели 3,4,5,6 проведено моделирование для определения геометрических параметров печатного излучателя как элемента решетки. На рис. 4 изображены результаты моделирования. Чтобы отвязаться от абсолютного значения резонансной частоты, независимые переменные математической модели использованы в отно-

сительном виде. По горизонтальной оси отложено отношение размера излучающей кромки к размеру боковой щели, которая определяет резонансную полу длину квази- T -волны. По вертикальной оси отложено положение точки возбуждения к размеру боковой щели. По графику можно установить, что наименьшее значение коэффициента стоячей волны (КСВ) наблюдается для соотношения сторон печатного излучателя $a/b=0.875$. Диапазон частот системы $Wi-Fi$ от 2400 МГц до 2500 МГц. Средняя частота диапазона $f_0=2450$ МГц.

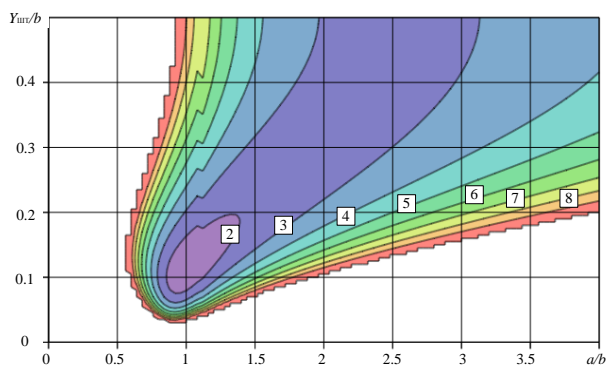


Рис. 4. Зависимость КСВ печатного излучателя от его размеров и положения точки питания на резонансной частоте

Частота f_0 принимается резонансной для печатного излучателя. Используя выражение (1) и учитывая, что $\lambda_r = c/f_0$, получим, что резонансный размер $b=56$ мм., а размер излучающей кромки — $a=b*0.875=49$ мм. Начальная точка возбуждения (исходя из графика на рис. 4) $Y_{шт}=0.1*b=5,6$ мм. Полученные данные были использованы в качестве начальных для дальнейшего моделирования, в программе *FEKO lite*.

В результате моделирования входных характеристик печатного излучателя установлено, что резонанс находится на частоте 2450 МГц. Зависимость КСВ от частоты изображена на рис. 5.

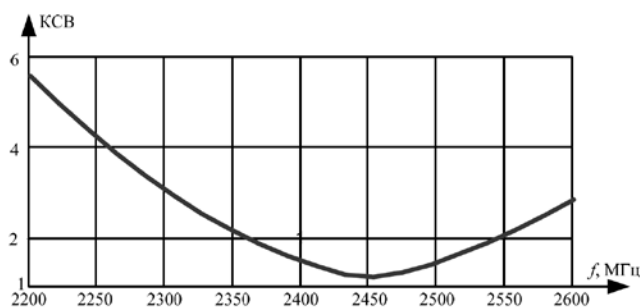


Рис. 5. Зависимость коэффициента стоячей волны одиночного печатного излучателя от частоты

В частотном диапазоне $Wi-Fi$ сети КСВ печатного излучателя не превышает 1,5. На частоте резонанса f_0 КСВ равен 1,16. Установлено, что на глубину резонанса при согласовании влияют координата точки возбуждения и соотношение геометрических размеров печатного излучателя. На широкополосные свойства влияет расстояние от пластины печатного излучателя до экрана h . В нашем случае для перекрытия частотного диапазона $Wi-Fi$ высота излучателя $h=9$ мм. Кроме того, точка возбуждения сместилась из середины на торец печатного излучателя. Возбуждение печатного излучателя на кромке позволяет уменьшить ее размеры и сделать конструкцию более технологичной. Такой способ возбуждения обеспечивает более равномерное распределение электромагнитного поля по всей поверхности антенны, что повышает ее эффективность, т.к. установлено, что печатная антенны, строго говоря, излучает всей поверхностью [7], просто вклад отдельных областей не очень велик. Также проанализированы характеристики излучения печатного излучателя, зависимость осевого коэффициента усиления от частоты приведена на рис. 6.

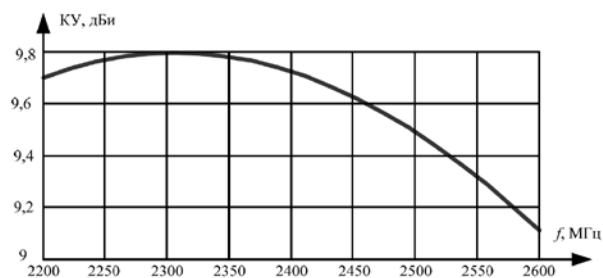


Рис. 6. Зависимость коэффициента усиления одиночного печатного излучателя от частоты

Коэффициент усиления меняется от 9.7 дБ до 9.5 дБ, относительно изотропного излучателя, таким образом, неравномерность коэффициента усиления печатного излучателя составляет 0,2 дБ. После проведения анализа диаграмм направленности было обнаружено, что предложенный печатный излучатель имеет максимум диаграммы в осевом направлении на всех частотах. В плоскости XOZ ширина диаграммы направленности составляет 76° , а в плоскости YOZ — 49° . Боковые лепестки не превышают уровня — 20 дБ. Далее, используя этот излучатель, разработана и исследована коллинеарная антенна с управляемой диаграммой направленности.

Разработка трехэлементной антенной решетки с переключаемой диаграммой направленности

На рис. 7 изображена исследуемая антенная решетка, состоящая из трех однотипных печатных излучателей с геометрическими параметрами, которые были получены ранее. Излучатели расположены соосно вдоль оси y с одинаковым расстоянием между ними, что делает решетку эквидистантной. Значение расстояния d будет выбрано в результате моделирования, а для возбуждения решетки требуется трехканальная система с двумя дискретными фазовращателями [1]. В данном подразделе необходимо определить значение начальных фаз (а также дискрет фазы фазовращателя) и расстояния между излучателями, учитывая критерий максимального сужения диаграммной характеристики в вертикальной плоскости при минимальном уровне боковых лепестков.

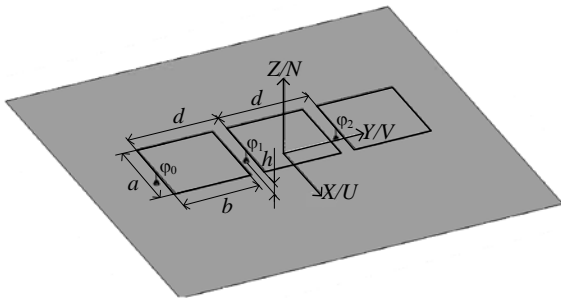


Рис. 7. Проект антенной трехэлементной решетки в программе моделирования СВЧ

Выбор трехэлементной решетки обусловлен необходимостью уменьшения ширины диаграммной характеристики для обеспечения максимальной дальности или скорости связи в системе *Wi-Fi*, с одной стороны [10], а с другой — требованием минимально достаточного количества элементов для управления диаграммной характеристикой. В результате нахождения компромисса для этих противоречивых требований было выбрано три элемента в решетке. Поскольку два элемента дают неоднозначность в управлении диаграммой, а четыре слишком усложняют систему возбуждения.

Возбуждение каждого элемента осуществляется сигналом с одинаковой амплитудой на каждом входе, а начальная фаза определяется выражением (7).

$$\varphi_i = i\Delta\varphi_0, \tag{7}$$

где $i=0...2$ — номер канала;

$\Delta\varphi_0$ — разность фаз между соседними каналами, при которой главный лепесток диаграммы направленности отклоняется на q градусов;

φ_i — начальная фаза i -го канала.

Целью математического моделирования является определение оптимальных значений параметров $\Delta\varphi_0$ и d , при которых происходит заданное отклонение главного лепестка, слабо меняются другие параметры диаграммы направленности. Оптимизация проводилась методом перебора, изменялись следующие параметры:

— $\Delta\varphi_0$ в пределах от 22.5° до 135° с шагом 22.5° ;

— d в пределах от $0.4\lambda_0$ до $0.7\lambda_0$ с шагом $0.05\lambda_0$.

На первом этапе исследовалось влияние изменения параметров на ширину диаграммы в горизонтальной плоскости, которая должна оставаться постоянной для всех значений $\Delta\varphi_0$. График зависимости ширины диаграммы направленности в горизонтальной плоскости от выбранных параметров приведен на рис. 8. Это связано с тем, что настройка решетки может изменять ширину диаграммы направленности, другими словами, изменение фазы и амплитуды сигнала на каждом элементе может изменить ширину диаграммы направленности.

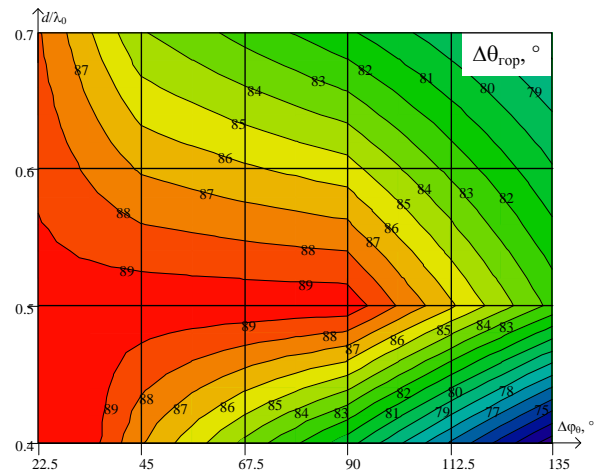


Рис. 8. Зависимости ширины диаграммы направленности в горизонтальной плоскости от расстояния и разности фаз между соседними элементами

При расстоянии между элементами $d=0.5\lambda_0$ для разностей фазы между соседними элементами $\Delta\varphi_0 = 22.5^\circ...90^\circ$ ширина главного лепестка в горизонтальной плоскости остается

постоянной. Таким образом выберем эти параметры для дальнейшего моделирования.

Далее исследовалось влияние расстояния между элементами и разность фаз между соседними элементами на ширину диаграммы направленности в вертикальной плоскости, эта зависимость изображена на рис. 9.

Ширина диаграммы направленности решетки во всем диапазоне изменения параметров изменяется от 24° до 39° . В выбранном диапазоне изменения входных параметров (заштрихованная область) ширина диаграммы меняется примерно в диапазоне от 34° до 37° , что составляет 8,4 %.

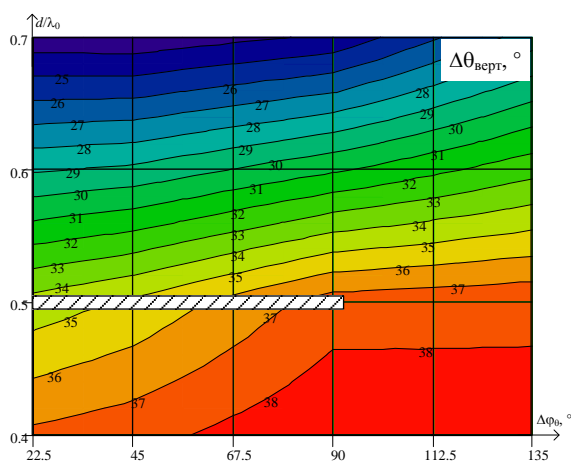


Рис. 9. Зависимости ширины диаграммы направленности в вертикальной плоскости от расстояния и разности фаз между соседними элементами

Затем исследовалось влияние расстояния и разности фаз между элементами решетки на угол отклонения диаграммы направленности от нормали антенной решетки. Эта зависимость изображена на рис. 10.

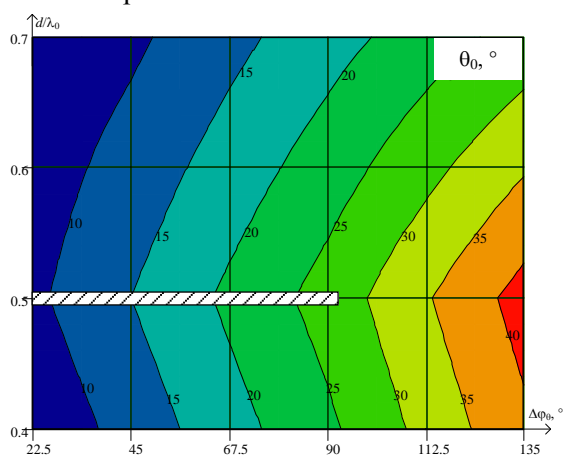


Рис. 10. Зависимости направления главного лепестка диаграммы направленности от расстояния и разности фаз между соседними элементами

Отклонение максимума диаграммы направленности решетки от нормали во всем диапазоне изменения параметров изменяется от 5° до 40° . В выбранном диапазоне изменения входных параметров (заштрихованная область) отклонение главного лепестка диаграммы меняется примерно в диапазоне от 9° до 27° .

Ширина диапазона перекрытия составила 62.5° с учетом средней ширины диаграммы направленности 35.5° . Это позволило увеличить покрытие зоны обслуживания на 76 %.

Проведен анализ влияния расстояния и разности фаз между элементами решетки на уровень боковых лепестков диаграммы направленности антенной решетки. Исходная зависимость изображена на рис. 11.

Уровень бокового излучения диаграммы направленности решетки во всем диапазоне изменения параметров изменяется от -28 дБ до -8 дБ. В выбранном диапазоне изменения входных параметров (заштрихованная область) уровень бокового лепестка диаграммы меняется в диапазоне от -22 дБ до -12 дБ. Большой уровень бокового излучения соответствует большему углу отклонения главного лепестка диаграммы направленности решетки. Для того чтобы обеспечить выбранный диапазон перекрытия и максимально упростить систему возбуждения, предложена схема возбуждения в табл. 1.

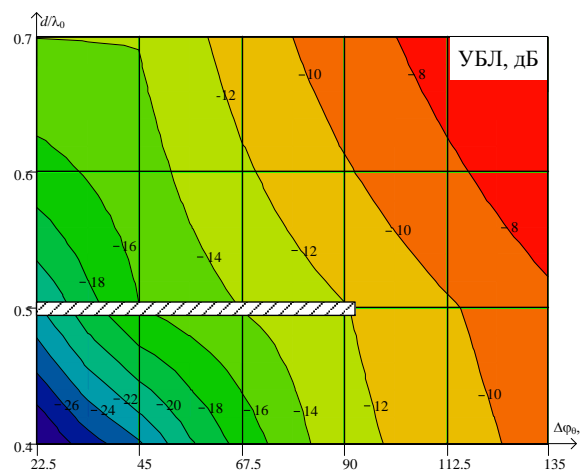


Рис. 11. Зависимости уровня бокового лепестка диаграммы направленности от расстояния и разности фаз между соседними элементами

За счет выбора четырех дискретов фазы — 0° , 22.5° , 45° , 90° — для реализации схемы возбуждения согласно табл. 1 можно использовать два дискретных, четырехпозиционных фазовращателя. Возможная схема возбуждения изображена на рис. 12.

Таблица 1

Соотношения фаз для каждого входа для заданного направления главного максимума

Направление главного лепестка $\theta_0, ^\circ$	Дискрет $\Delta\varphi_0, ^\circ$	Фаза на входе 1, $^\circ$	Фаза на входе 2, $^\circ$	Фаза на входе 3, $^\circ$
0	0	0	0	0
9	22.5	0	22.5	45
15	45	0	45	90
27	90	0	90	180

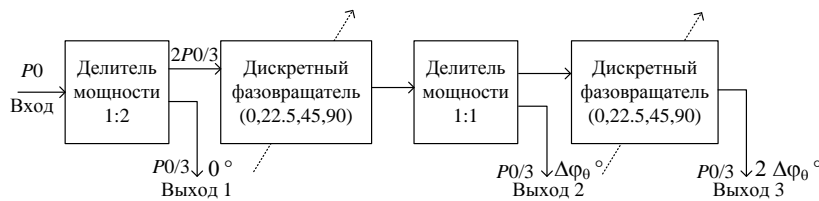


Рис. 12. Структурная схема устройства возбуждения трехэлементной антенной решетки

Таким образом обеспечивается схема возбуждения, приведенная в табл. 1.

Заключение

В результате проведенного исследования установлено, что использование нелицензируемого диапазона *Wi-Fi* в сетях *5G* является актуальным решением для увеличения пропускной способности и улучшения качества обслуживания. Узким местом такого решения является пропускная способность системы, которая определяется в основном соотношением сигнал/шум в радиоканале. Для увлечения соотношения сигнал/шум можно использовать антенны с управляемой диаграммой направленности. Управлять направлением главного лепестка можно с помощью фазированных антенных решеток. Использование трехэлементной решетки обусловлено необходимостью уменьшения ширины диаграммной характеристики для обеспечения максимальной дальности или скорости связи в системе *Wi-Fi*, с одной стороны, а с другой — требованием минимально достаточного количества элементов для управления диаграммной характеристикой. В результате исследования обоснованно выбрано расстояние между элементами и дискрет фазы между входами, при которых обеспечивается увеличение покрытия зоны обслуживания на 76 %. Предложена структурная схема устройства возбуждения.

Литература

1. Лукьянчиков А.В., Коцур Е.О., Мединский А.А.

Мощность со входа устройства возбуждения делится в отношении один к двум. Меньшая часть мощности попадает на выход 1 с нулевой начальной фазой. Далее сигнал попадает на дискретный четырехпозиционный фазовращатель и на делитель мощности в отношении один к одному. С одного выхода делителя сигнал попадает на выход 2 с начальной фазой $\Delta\varphi_0, ^\circ$. Со второго выхода делителя сигнал попадает на второй дискретный фазовращатель и на выход 3 устройства с начальной фазой $2\Delta\varphi_0, ^\circ$.

Адаптивная антенна для систем 5G // Современные проблемы радиоэлектроники и телекоммуникаций. 2021. № 4. С. 106.

2. Ильяш Д.В., Рыжанков А.П., Лукьянчиков А.В. Антенна диапазона 2,4 ГГц с переключаемой диаграммой направленности // Теория и практика проектного образования. 2022. № 1(21). С. 59-61.

3. Lobkova L.M., Lukyanchikov A.V., Evstigneev I. A. Method of control of radiation characteristic of conical spiral antenna // КрбиМуКо 2010 CriMiCo - 2010 20th International Crimean Conference Microwave and Telecommunication Technology, Conference Proceedings. Sevastopol, Crimea, 2010. Pp. 595-596.

4. Lukjanchikov A.V., Kadatsky E.V. Research of radiation characteristics of Z antenna // 2007 6th International Conference on Antenna Theory and Techniques, ICATT'07. Sevastopol, 2007. Pp. 396-397.

5. The analysis of radiation modes of thelog-periodic antenna / L.M. Lobkova, A.V. Lukyanchikov, A.M. Shepetkov, M.Y. Gavrik // 2007 17th International Crimean Conference - Microwave and Telecommunication Technology, CRIMICO, Sevastopol, 2007. Pp. 396-397.

6. Лукьянчиков А.В., Колпенский А.А., Могилевский А.В. Оптимизация характеристик излучения двухзаходной конической спиральной антенны // Вестник СевНТУ. 2014. № 149. С. 39-43.

7. Golovin V.V., Lukyanchikov A.V. The broadband compact antenna with the radiation field of circular polarization // 2008 4th International Conference on Ultrawideband and Ultrashot Impulse Signals, UWBUSIS 2008. Sevastopol, 2008. Pp. 95-96.

8. The characteristics analysis of patch antenna array Ku-band / V.V. Golovin, Y.N. Tyschuk, A.V. Luk'yanchikov, E.U. Toloknova // 2010 5th International Conference on Ultrawideband and Ultrashot Impulse Signals, UWBUSIS'2010, Sevastopol. 2010. Pp. 243-245.

9. Антенна с управляемой поляризацией для RFID систем / Ю.Б. Гимпилевич, В.М. Исквй, А.В. Лукьянчиков [и др.] // 26-я Международная Крымская конференция "СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии" (КрыМиКо'2016): материалы конференции: в 13 т. Сева-

стополь: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Севастопольский государственный университет", 2016. Т. 5. С. 880-884.

10. Лукьянчиков А.В. Антенна для систем МИМО // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии. 2020. № 1-1. С. 171-172.

Поступила 10.05.2023; принята к публикации 20.06.2023

Информация об авторах

Лукьянчиков Андрей Владимирович — канд. техн. наук, доцент кафедры инновационных телекоммуникационных технологий Института радиоэлектроники и интеллектуальных технических систем, Севастопольский государственный университет (299053, Россия, г. Севастополь, ул. Университетская, 33), e-mail: brain75@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5581-711X>

LOW-ELEMENT ANTENNA ARRAY WITH INCREASED COVERAGE AREA

A.V. Lukyanchikov

Sevastopol State University, Sevastopol, Russia

Abstract: the intensive development of modern society requires the presence of modern communication systems, in particular fifth-generation networks. The use of unlicensed Wi-Fi spectrum as the "last mile" of 5G networks can accelerate their implementation. However, the system's throughput may become a bottleneck as it depends on the signal-to-noise ratio in the radio channel. To increase the radio channel budget, antennas with controllable directional patterns can be used, which are usually implemented using phased antenna arrays. A low-element array can be used to provide maximum communication speed in a Wi-Fi system, while requiring a minimum number of elements to control the directional pattern. In this work, the radiator of such an array is chosen and its geometric parameters are determined. Also, as a result of the study, the optimal distance between elements and discrete phase differences between inputs are selected, which allowed increasing the coverage area by 76%. A relatively simple excitation scheme and a structural diagram of the excitation device based on two discrete phase shifters and two power dividers are also proposed

Key words: directional pattern control, printed radiator, diagram-forming scheme, discrete phase shifter, voltage standing wave ratio (VSWR)

References

1. Lukyanchikov A.V., Kotsur E.O., Medinsky, A.A. "Adaptive antenna for 5G systems", *Modern problems of radio electronics and telecommunications (Sovremennyye problemy radioelektroniki i telekommunikatsiy)*, 2021, no. 4, pp. 106.
2. Ilyash D.V., Ryzhankov A.P., Lukyanchikov A.V. "Antenna of 2.4 GHz range with switchable directivity pattern", *Theory and practice of project education (Teoriya i praktika proyektnogo obrazovaniya)*, 2022, no. 1(21), pp. 59-61.
3. Lobkova L.M., Lukyanchikov A.V., Evstigneev I.A. "Method of control of radiation characteristic of conical spiral antenna", *KpbiMuKo-2010 CriMiCo-2010*, proc. of the 20th International Crimean Conference on Microwave and Telecommunication Technology, Sevastopol, Crimea, 2010, pp. 595-596.
4. Lukyanchikov A.V., Kadatsky E.V. "Research of radiation characteristics of Z antenna", *ICATT'07*, proc. of the 6th International Conference on Antenna Theory and Techniques, Sevastopol, 2007, pp. 396-397.
5. Lobkova L.M., Lukyanchikov A.V., Shepetkov A.M., Gavrik M.Y. "The analysis of radiation modes of the log-periodic antenna", *Microwave and Telecommunication Technology*, proc. of the 17th International Crimean Conference on, Sevastopol, 2007, pp. 396-397.
6. Lukyanchikov A.V. Kolpensky A.A., Mogilevsky A.V. "Optimization of radiation characteristics of two-turn conical spiral antenna", *The Bulletin of SevNTU (Vestnik SevNTU)*, 2014, no. 149, pp. 39-43.
7. Golovin V.V., Lukyanchikov A.V. "The broadband compact antenna with the radiation field of circular polarization", *UWBUSIS 2008*, proc. of the 4th International Conference on Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals, Sevastopol, 2008, pp. 95-96.
8. Golovin V.V., Tyschuk Y.N., Lukyanchikov A.V., Toloknova E.U. "The characteristics analysis of patch antenna array Ku-band", *UWBUSIS'2010*, proc. of the 5th International Conference on Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals, Sevastopol, 06–10 September 2010, pp. 243-245.
9. Gimpilevich Y.B., Iskiv V.M., Lukyanchikov A.V. "Antenna with controllable polarization for RFID systems", *KryMiCo'2016*, proc. of the 26th International Crimean Conference on Microwave and Telecommunication Technology, Sevastopol, Crimea, 2016, pp. 880-884.
10. Lukyanchikov A.V. "Antenna for MIMO systems", *Microwave technology and telecommunications (Mikrovolnovaya tekhnika i telekommunikatsii)*, 2020, no. 1-1, pp. 171-172.

Submitted 10.05.2023; revised 20.06.2023

Information about the authors

Andrey V. Lukyanchikov – Cand. Sc. (Technical), Associate Professor of the Department of Innovative Telecommunication Technologies, Institute of Radio Electronics and Intelligent Technical Systems, Sevastopol State University (33 Universitetskaya str., Sevastopol 299053, Russia), e-mail: brain75@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5581-711X>

Машиностроение и машиноведение

DOI 10.36622/VSTU.2023.19.3.017

УДК 621.9.047;048

ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА ДЕТАЛЕЙ ИЗ ЛЕГКОПЛАВКИХ МАТЕРИАЛОВ ПУТЕМ НАНЕСЕНИЯ ПОКРЫТИЙ ИЗ ЧУГУНА

А.В. Норман¹, В.П. Смоленцев¹, А.В. Норман², М.В. Кондратьев¹

¹**Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия**

²**Воронежский государственный авиационный техникум им. В.П. Чкалова, г. Воронеж, Россия**

Аннотация: рассмотрены возможности покрытия высоконагруженных деталей из алюминиевых сплавов тугоплавким чугуном. Решена проблема сохранения геометрии деталей без термического разрушения за счет их покрытия, создающего теплозащитные свойства на поверхности изделия, эрозионно-химическим импульсным упрочнением чугунами электродами. Раскрыт механизм формирования жаростойких сочленений деталей под сборку узлов с высокой износостойкостью, низким коэффициентом трения подвижных элементов конструкции, облегченных на 20-25 % по сравнению с деталями из серого чугуна. Приведены рекомендации по составу флюсов для комбинированных процессов нанесения покрытий. Показано влияние использования флюсов на адгезию покрытия, описан механизм получения качественного покрытия с минимальной пористостью поверхностного слоя. Применение комбинированного эрозионно-химического метода упрочнения, изготовления и восстановления эксплуатационных свойств деталей, ранее выполняемых из чугуна, позволило до двух раз сократить трудозатраты и себестоимость деталей при обработке изделий в полевых условиях с использованием минимального количества средств технологического оснащения. Доказана возможность нанесения электроэрозионно-химическим методом качественных покрытий из чугуна на алюминиевые сплавы, где стойкость слоя поддерживается за счет образования переходного диффузионного нанослоя после химического удаления флюсом окисной пленки с поверхности сплава основы детали

Ключевые слова: качество, покрытие, легкоплавкие материалы, чугун, механизм, флюсы, эрозионно-химическая обработка

Введение

При отработке технологичности конструкции авиакосмической техники приходится совмещать трудновыполнимые требования: максимально облегчить детали за счет применения легких сплавов и сохранить работоспособность изделия при повышенных температурах в условиях контактного трения. Первая часть проблемы может решаться путем использования алюминиевых, титановых и магниевых сплавов, а для второй требуются материалы с хорошей адгезией к контактной поверхности типа серых чугунов, которые при используемых наплавках разрушают покрытие и практически не используются. Попытки применить чугунные покрытия так же не дали положительных результатов из-за большой разницы температур плавления основы и покрытия.

В работе решена проблема [1; 2; 3] получения единого конструкционного материала, сочетающего положительные характеристики (снижение массы, улучшения обрабатываемо-

сти резанием и др.) основной части детали и повышение износостойкости и ресурса деталей за счет эрозионно-химического покрытия поверхности детали [1].

Механизм получения комбинированным эрозионно-химическим методом высокотемпературных покрытий на алюминиевых сплавах

Анализ, приведенный в [1; 4], показывает, что покрытие деталей из алюминиевых сплавов чугуном представляется одним из наиболее эффективных способов, обладая при этом высоким сопротивлением окислению, небольшим сопротивлением перемещению деталей в узлах, незначительными потерями напряжения в токоподводах. При этом следует отметить недостаточную адгезию при нанесении покрытия используя комбинированный способ его нанесения, основанный на электроэрозионно-термическом и химическом легировании основного материала, что предопределяет сниженные эксплуатационные характеристики деталей. Причиной этого стал установленный факт появления холодохрупко-

сти и ухудшения адгезионных свойств наносимых слоев, хотя при кристаллизации материала происходит желаемое увеличение прочности и герметичности в соединении деталей. В [1; 4] показано, что данное явление связано с изменением структуры, измельчением и повышением равномерности распределения плотности и пластичности материала в связи с однородным распределением легкоплавкой хрупкой фазы и примесей. Данный подход оказался неприемлемым для чугунного покрытия деталей, работающих в условиях знакопеременных длительных импульсных нагрузок, так как он не обеспечивал за счет тепловых и химических процессов образования стабильного диффузионного переходного слоя требуемой толщины за короткое время действия импульса. Ускорение протекания переходных процессов [4; 5] было достигнуто за счет применения в этих источниках рекомендаций по применению колебаний звуковой и ультразвуковой частоты на все компоненты соединений в многослойном материале. Однако не всегда дает значимые результаты, поскольку при импульсных разрядах может происходить разрушение не только пленки окислов, но и самого алюминиевого сплава, что снижает прочностные показатели многослойного материала. Тем не менее, для деталей с малой массой в технологических рекомендациях [1; 4] предлагается использовать колебания звуковой и низкой частоты, способствующих получению качественных покрытий с хорошей адгезией между слоями.

В результате исследования особенностей процесса нанесения чугунных покрытий на поверхности алюминиевых деталей с удалением с обрабатываемой поверхности окисной пленки, препятствующей перегреву покрытия и сопутствующее этому снижение точности и качества поверхностного слоя, разработаны новые методы [2; 3] получения износостойких теплозащитных, токопроводящих покрытий из чугунных сплавов на поверхности облегченных деталей и оснастки из алюминиевых сплавов.

В описанных способах [2; 3; 6] получения металлических токопроводящих износостойких покрытий перед нанесением наружных слоев в зону разряда дозированно подаются химически активные флюсы, позволяющие изменять тепловую защиту окислами алюминиевых сплавов на границе покрытия чугуном, что снижает термическое разрушение поверхностного слоя детали [4] при комбинированном нанесении покрытия.

Выбор флюсов для удаления окисных нанослоев на переходных участках под чугунное покрытие

По аналогии со сваркой и пайкой [4; 5; 6] для получения неразъемных соединений с участием сплавов на базе алюминия были изучены стандартные флюсы и комбинированные методы нанесения покрытий импульсными методами. В табл. 1 приведены составы флюсов, которые оказались пригодными для нанесения чугуна на основу из алюминиевых сплавов.

Таблица 1

Состав флюсов для нанесения на алюминиевые сплавы чугунных покрытий

Массовая доля элемента %	Марка флюса			
	АНФ-1	АНФ-7	АНФ-6	АНФ-28
CaF ₂	≥ 90	65-75	Ост.	41-49
Al ₂ O ₃	≤ 3	-	25-31	≤ 5
CaO	≤ 5	18-30	≤ 8	26-32
MgO	-	-	-	≤ 6
SiO ₂	≤ 2,5	≤ 2	≤ 2,5	20-24
C	0,1	-	0,1	0,1
Fe ₂ O ₃	0,5	-	0,5	0,5
S	0,05	0,05	0,05	0,06
P	0,02	0,02	0,02	0,03
Другие эл-ты	≤ 0,05 TiO ₂	-	≤ 0,05 TiO ₂	-

Применение таких флюсов, помимо основных технологических свойств, обеспечивает: устранение окислов без разрушения основы материала; сокращение длительности импульса, снижающее вероятность перегрева основы и зоны контакта с покрытием; устойчивое протекание процесса нанесения покрытий комбинированными импульсными методами; легкое удаление шлаковой корки, вызывающей перегрев детали и нарушение режимов комбинированного нанесения слоев; формирование качественного покрытия, обладающего высокой адгезией и антифрикционными и защитными свойствами; предупреждение образования в покрытии пор и трещин, служащих концентраторами напряжений; повысить коррозионную стойкость, и другие свойства. Для разрушения оксидной пленки и снижения пористости разработаны рекомендации [4] по составу флюсов TiO₂, SiO₂, Cr₂O₃; карбонаты BaCO₃, K₂CO₃, а также сульфаты, хлориды цветных металлов, древесный уголь и др.

В большинстве используемых для нанесения покрытия флюсов (АНФ-1, АНФ-7, АНФ-6, АНФ-28, ФС-71, ЖА-64 (табл. 2)), применялись добавки кремнезема, уменьшающего электропроводность флюса, что способствует устойчивости протекания процесса. Доказано, что при

использовании импульсов кремнезем существует в расплавленном флюсе в виде сложных и малоподвижных кремнекислородных анионов, которые не позволяют осуществлять перенос тока катионами натрия и калия. В результате взаимодействия криолита с кремнеземом формируется глинозем и летучий фторид кремния, который связывает в газовой фазе водород и устраняет опасность образования пор и сетки микротрещин, способствующих разрушению покрытия, особенно при знакопеременных импульсных нагрузках многослойных деталей.

Использование рекомендованных флюсов позволяет достичь формирования качественных покрытий с хорошей адгезией через диффузионный нано слой. Для этого температура плавления флюса назначается [4] примерно на 473К ниже температуры плавления металла покрытия. Температурный интервал затвердевания и пластичность флюса в твердом состоянии повышается по мере снижения температуры плавления металла покрытия. Тогда легкоплавкие флюсы обеспечивают получение более тонкой шлаковой корки (ее толщина может составлять доли микрона или несколько десятков нанометров). Возрастание вязкости расплавленного флюса приводит к возрастанию его адгезии к металлу основы при нанесении чугунного покрытия (табл. 2).

Таблица 2
Состав флюсов для нанесения на алюминиевые сплавы чугунных покрытий через переходные нанослои

Мар-ка флюса	Массовая доля элемента %							
	Na F	Ti O ₂	Ti порошок ПТМ	Cr ₂ O ₃	Si O ₂	K Cl	Na Cl	Na ₃ Al F ₆
ФС-71	6,4	13,6	13,6	9,1	57,3	-	-	-
АН-А1	-	-	-	-	-	50	20	30
ЖФ-64	-	-	-	-	3	38	15	44

В результате исследований [4] установлено, что для разрушения оксидных пленок требуется незначительное количество рассмотренных флюсов. В большинстве случаев основой рекомендованных флюсов, обеспечивающих возможность применения требуемых режимов комбинированной обработки, в том числе температуры плавления, являются хлористые соли (или их смеси).

Ограничением для использования в машиностроении таких флюсов является возможность

последующей коррозии нанесенного слоя покрытия, хотя это скорее исключение, т.к. чугун имеет достаточно высокие защитные свойства при работе в большинстве агрессивных сред, а при нанесении покрытий требуется малое количество флюсов. Такая опасность может быть существенно снижена при использовании флюсов, включающих в качестве основы фториды, в меньшей степени вызывающих коррозию.

Применительно к чугунным покрытиям, наносимым на алюминиевые сплавы, флюсы применяют в виде шликера на основе этилового спирта из порошка ФС-71 (табл. 2), получаемого смешиванием порошка ФС-71 (50 % по массе) и этилового спирта (C₂H₅OH) (50 %). Рекомендованный для рассматриваемого случая состав применяемого флюса прост для подготовки, приготовления и для использования в эксплуатации при заданном качестве.

В [4] указывается, что здесь эффективно также применение фтористого натрия в качестве растворителя и восстановителя оксидов. Однако там же высказывается опасение, что скопление большого количества свободного натрия в пустотах на границах зерен может привести к образованию в покрытии трещин при его деформировании, например, в условиях эксплуатации деталей с покрытием. По [4] применение предложенного флюса позволяет сформировать переходный диффузионный слой и получить бездефектное, адгезионно прочное многослойное покрытие.

Рекомендуемые условия и режимы обработки с применением флюсов для комбинированного нанесения покрытий должны быть скорректированы до получения рабочих параметров, пригодных для дальнейшего использования в опытном и серийном производстве при изготовлении алюминиевых деталей с чугунными покрытиями.

Технология нанесения качественных покрытий на алюминиевые сплавы

Известны [4; 6] способы использования флюсов для наплавки покрытий, большинство из которых применяются для проектирования технологии нанесения качественных чугунных покрытий на алюминиевые сплавы.

Этапы проектирования технологического процесса содержат следующие элементы: на поверхности детали из алюминиевого сплава, предназначенной для нанесения покрытия из чугуна, выполняют разметку участков с оди-

наковой толщиной наружного слоя, затем базируют деталь в положении, при котором слой флюса в процессе нанесения будет стабильно защищать поверхность детали.

Далее определяют марку флюса и сплошным слоем равномерно наносят его на размеченные участки основы. После чего на установке для нанесения покрытия электродом наносят сплошной слой чугуна на режимах комбинированной обработки, обеспечивающих получение прочного соединения слоев чугуна с основой из алюминиевого сплава.

Процесс следует выполнять на обособленных технологических режимах, не допускающих образования трещин на покрытии.

Как правило, при использовании флюсов рекомендуется [4] использовать рабочее напряжение в пределах U_p (40÷60) В; ток короткого замыкания, $I_{кз} = (2÷7)$ А; длительность импульса, $t_{и} = (100 ÷ 150)$ мкс; частота колебаний электрода-инструмента, $f_{э-и} = 100$ Гц; расчетное время нанесения покрытия (1÷5) мин/см².

Количество наносимых слоев (n) до 3 ÷ 4. Скорость перемещения электрода-инструмента

определяется для обеспечения перекрытия соседних капель примерно на 1/4 их диаметров.

Оценка качества покрытий с наличием переходного слоя

В работе [4] приведены результаты исследования поверхностных слоев образцов с покрытиями, нанесенными электроэрозионно-химическим методом под слоем флюса марки ФС-71, с созданием диффузионных нанослоев на границе основа-покрытие.

В табл. 3 образцы, подлежащие обработке, были изготовлены из листов алюминиевого сплава марки Д16 толщиной 3 мм с размеченными на них участками 15X10 мм под нанесение чугунного покрытия. Шероховатость исходной поверхности $R_a = 1,25$ мкм.

Нанесение покрытия производилось электродом, выполненным в виде стержня из материала марки СЧ-20.

Таблица 3

Характеристики слоя покрытия, сформированного на поверхности алюминиевого сплава Д16 электродом-инструментом из чугуна марки СЧ-20

Хар-ка слоя	Энергия импульса, Дж	Толщина нанесенного слоя покрытия, мкм				
		20	50	100	150	200
Сплошность %	< 0,5	40-50	75-85	85-95	80-90	-
	0,5-3,0	50-70	85-90	80-85	75-80	70-75
	< 0,5	-	-	-	Случайное появление	-
Микротрещины	0,5-3,0	-	-	Незначительное	Встречаются	Сетка трещин
	< 0,5	-	-	-	Редкое появление	-
Пористость	0,5-3,0	-	-	Редкое появление	Частично сквозная	Значительная
Высота микронеровности, мкм	< 0,5	2-8	8-20	20-35	45-70	-
	0,5-3,0	6-10	15-25	30-50	60-90	100-140
	< 0,5	-	-	-	Встречаются	-
Прижоги	0,5-3,0	-	-	Редко	Встречаются	Часто

Металлографический контроль нанесенных слоев покрытий показал (табл. 3), что в случае использования более жестких режимов с $A_{и} = (0,5 ÷ 1)$ Дж толщина слоя превышает 40 мкм, а с повышением жесткости режима $A_{и} ≥ 1$ Дж толщина возрастает до 150-200 мкм. При этом во всех случаях формируется переходный слой, в котором имеется диффузионный участок толщиной от десятков наномет-

ров до долей миллиметра, что может повышать качество покрытий. С возрастанием энергии импульсов увеличивается толщина покрытия (табл. 3), но при этом могут возникать дефекты типа сеток трещин, прижогов, неоднородностей, а также возможно образование газовых микрокаволин и пустот [5; 6], которые становятся концентраторами напряжений. В отличие от покрытий, полученных на

мягких режимах ($R_a=(2\div 20)$ мкм) местные неровности на поверхности покрытий повышенной толщины составляют до $R_a=100\div 150$ мкм, что требует использования чистовой заключительной обработки поверхности.

Мягкие режимы ($A_n=(0,1\div 0,5)$ Дж) обеспечивают формирование более однородного, бездефектного слоя, что снимает необходимость последующей чистовой обработки нанесенного покрытия. При этом толщина слоя покрытия может заметно снижаться и обычно составляет $20\div 35$ мкм, что может использоваться для малонагруженных деталей с ограниченными небольшими участками под покрытие. Контроль поверхности образцов на соответствие эксплуатационным характеристикам показал отсутствие у таких покрытий сетки микротрещин пор и прижогов, а величина шероховатости поверхностного слоя без дополнительной обработки имеет диапазон $R_a=10\div 50$ мкм при необходимой сплошности покрытий ($75\div 95\%$).

Проведенные эксперименты показали зависимости характеристик сформированных слоев от режимных параметров процесса их нанесения (рис. 1), что подтвердило правомерность расчетных результатов с экспериментами (расхождение в пределах $7\div 10\%$.)

На рис. 1 и 2 показан рост толщины качественного слоя, получаемого при однослойном нанесении покрытия. Как видно из рисунков толщина слоя может достигать более 60 мкм, что вполне обеспечивает получение требуемых эксплуатационных характеристик большинства алюминиевых деталей с чугуном покрытием. При этом припуск на чистовую обработку может даже возрастать, что повышает работоспособность многослойных деталей и расширяет область их обоснованного применения. Но качество окончательного слоя покрытия, полученного после удаления припуска, заметно снижается, что требует предусматривать в технологическом процессе назначения весьма трудоемких финишных операций. Тем не менее общая толщина покрытия, после $3\div 4$ проходов и выполнения финишных операций может достигать 100 мкм и более.

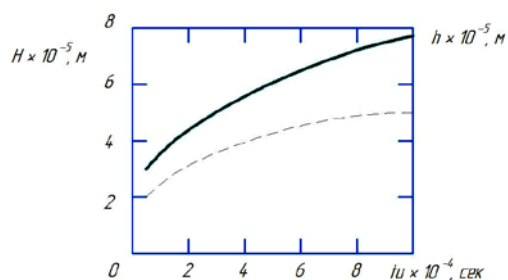


Рис. 1. Зависимость изменения толщины нанесенного слоя покрытия H (м) и бездефектного слоя h (м) от длительности импульса (t_n) при $U_{cp}=50$ В, $I_{k3}=4$ А

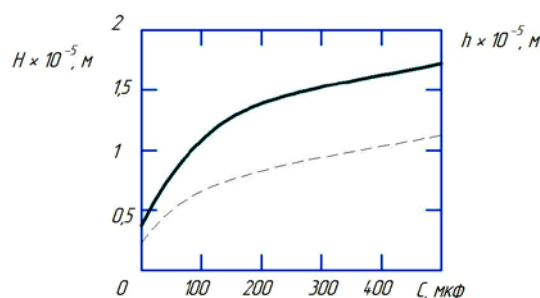


Рис. 2. Зависимость изменения толщины нанесенного слоя покрытия (H) и бездефектного слоя (h) от емкости (C) при $U_{cp} = 50$ В, $I_{k3} = 4$ А, $R = 20$ ом

На рис. 3 представлены зависимости толщины покрытия и диффузионного слоя от энергии импульса, характеризующей режимы комбинированной обработки. Кривые на рис.3 получены расчетным путем (линии 1, 3) и при тех же режимах комбинированной обработки в процессе выполнения экспериментов (зависимости 2, 4). Как видно из рисунка, экспериментально полученные данные хорошо согласуются с расчетными значениями. При энергии импульса $A_n=0,2$ Дж толщина качественного покрытия составила около 25 мкм, а толщина диффузионного слоя $H=5\div 18$ мкм.

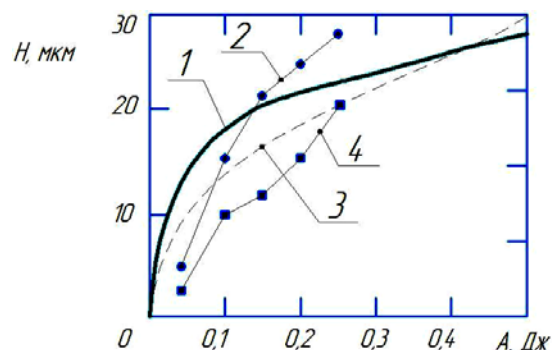


Рис. 3. Изменение толщины (H , мкм) от энергии импульса (A_n , Дж). Нанесенный слой металла: 1 - расчетная кривая; 2 - экспериментальные значения; 3 - расчетная кривая; 4 - экспериментальные значения

За счет оптимизации режимов комбинированного нанесения слоев получена качественная микроструктура покрытия из чугуна, нанесенного на алюминиевую основу при использовании в конце мягкого режима обработки. Такое покрытие является сплошным, не имеет видимых дефектов, его толщина составляла $20 \div 25$ мкм, а диффузионный слой является равномерным с толщиной в несколько микрон и не требует выполнения заключительной чистовой обработки. При этом переходный слой может иметь толщину на порядок меньше, чем диффузионная зона. Слой состоит из взаиморастворенных материалов основы в покрытии и практически во всех случаях способствует получению высокой адгезионной прочности слоев. В верхней части покрытия приповерхностный слой обогащен углеродом и состоит в основном из аустенита. Такая структура обеспечивает получение высоких эксплуатационных показателей, оцениваемых в ходе отработки технологичности. Как показано в [4;6], рекомендованный состав флюсов и сочетаний материалов позволяет до двух раз снизить трудоемкость и затраты на операцию, расширить область использования эрозионно-химического упрочнения с покрытием серым чугуном.

Заключение

Доказана возможность нанесения электроэрозионно-химическим методом качественных покрытий из чугуна на алюминиевые сплавы, где стойкость слоя поддерживается за счет образования переходного диффузионного нанослоя после химического удаления флюсом

окисной пленки с поверхности сплава основы детали. Это позволило решить проблему эффективной замены труднообрабатываемых массивных (дефицитных) конструкционных материалов при изготовлении, особенно в авиакосмической отрасли облегченных, высокопрочных долговечных деталей основного производства и технологической оснастки для электрических, механических и других видов обработки с приданием многослойным изделиям с минимальной массой эксплуатационных свойств, формируемых покрытиями из высокотемпературных чугунных материалов.

Литература

1. Перова А.В., Смоленцев В.П. Механизм нанесения покрытий на алюминиевые сплавы электроэрозионным методом // Орел: Известия Орел ТУ, 2008. №4-4/272(550). С.8-12.
2. Патент 2318637 (РФ) Способ электроэрозионного восстановления чугунных деталей / В.П. Смоленцев, О.Н. Кириллов, С.В. Дульцев, М.В. Щипанов // Бюл. изобр. 2008, № 7.
3. Патент 2405662 (РФ). Способ нанесения чугунного покрытия на алюминиевые сплавы / В.П. Смоленцев, А.В. Гребенщиков, А.В. Перова, Б.И. Омигов // Бюл. изобр. 2010. № 34.
4. Перова А.В., Смоленцев В.П., Грибанов А.С. Формирование покрытий на алюминиевых сплавах методом электроэрозионного легирования // Авиакосмические технологии «АКТ - 2008»: труды IX Всерос. науч.-техн. конф. и школы молодых ученых, аспирантов и студентов, Воронеж: ВГТУ, 2008. С. 48-53.
5. Справочник технолога-машиностроителя. В 2т. Т.2 / Под ред. А.С. Васильева, А.А. Кутина. М.: Инновационное машиностроение. 2018. 818 с.
6. Справочник технолога / Под ред. А.Г. Суслова // М.: Инновационное машиностроение, 2019. 800 с.

Поступила 26.05.2023; принята к публикации 16.06.2023

Информация об авторах

Норман Анна Валерьевна – канд. техн. наук, доцент кафедры технологии машиностроения, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: vgtukaftm@ya.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-2927-7099>

Смоленцев Владислав Павлович – д-р техн. наук, профессор кафедры технологии машиностроения, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: vgtukaftm@ya.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-0327-0354>

Норман Александр Владимирович – канд. техн. наук, директор, Воронежский государственный авиационный техникум им. В.П. Чкалова (394004, Россия, г. Воронеж, ул. Ленинградская, 33), e-mail vgtukaftm@ya.ru

Кондратьев Михаил Вячеславович – канд. техн. наук, доцент кафедры технологии машиностроения, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: vgtukaftm@ya.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8444-0668>

IMPROVING THE QUALITY OF PARTS MADE OF LOW-MELTING MATERIALS BY COATING CAST IRON

A.V. Norman¹, V.P. Smolentsev¹, A.V. Norman², M.V. Kondratiev¹

¹ Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

² Voronezh State Aviation Technical School named after V.P. Chkalov, Voronezh, Russia

Annotation: the possibilities of coating highly loaded aluminum alloy parts with refractory cast iron are considered. The problem of preserving the geometry of parts without thermal destruction is solved due to their coating, which creates heat-protective properties on the surface of the product by erosion-chemical pulse hardening with cast iron electrodes. The mechanism of formation of heat-resistant joints of parts for assembly of assemblies with high wear resistance, low coefficient of friction of movable structural elements, lightened by 20-25% compared to parts made of gray cast iron, is disclosed. Recommendations on the composition of fluxes for combined coating processes are given. The influence of the use of fluxes on the adhesion of the coating is shown. The mechanism of obtaining a high-quality coating with minimal porosity of the surface layer is described. The use of a combined erosion-chemical method of hardening, fabrication and restoration of the operational properties of parts previously made of cast iron made it possible to reduce labor costs and the cost of parts up to two times when processing products in the field using the minimum amount of technological equipment. The possibility of applying high-quality cast iron coatings by the electroerosion-chemical method to aluminum alloys, where the layer resistance is maintained by forming a transitional diffusion nano layer after chemical flux removal of the oxide film from the surface of the joint of the part base, is proved

Key words: quality, coating, low-melting materials, cast iron, mechanism, fluxes, erosion-chemical treatment

References

1. Perova A.V., Smolentsev V.P. "The mechanism of coating aluminum alloys by the electroerosion method", *The Proceedings of OrelSTU (Izvestiya OrelGTU)*, 2008, №4-4/272(550), pp.8-12.
2. Smolentsev V.P., Kirillov O.N., Dultsev S.V., Shchipanov M.V. "Method of electroerosive restoration of cast iron parts" ("Sposob elektroerozionnogo vosstanovleniya chugunnykh detaley") Patent of RF no. 2318637, 2008.
3. Smolentsev V.P., Grebenshchikov A.V., Perova A.V., Omigov B.I. "Method of applying cast iron coating on aluminum alloys" ("Sposob naneseniya chugunnogo pokrytiya na alyuminiyevyye splavy"), Patent of RF no. 2405662, 2010.
4. Perova A.V., Smolentsev V.P., Griбанov A.S. "Formation of coatings on aluminum alloys by the method of electroerosion alloying. "Aerospace technologies "AST - 2008" ("Aviakosmicheskiye tekhnologii "AKT - 2008"), proc. of the IX All-Russian Scientific and Technical conf., Voronezh, VSTU, 2008, pp. 48-53.
5. "Handbook of a machine-building technologist" ("Spravochnik tekhnologa-mashinostroitel'ya"), vol. 2, ed. by Vasiliev A.S., Kutin A.A., Moscow, Innovatsionnoye mashinostroyeniye, 2018, 818 p.
6. "Technologist's Handbook" ("Spravochnik tekhnologa"), ed. by Suslov A.G., Moscow, Innovatsionnoye mashinostroyeniye, 2019, 800 p.

Submitted 26.05.2023; revised 16.06.2023

Information about the authors

Anna V. Norman - Cand Sc. (Technical), Associate Professor, Department of Mechanical Engineering Technology, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: vgtukaftm@ya.ru, ORCID: 0009-0006-2927-7099

Vladislav P. Smolentsev – Dr. Sc., Professor, Department of Mechanical Engineering Technology, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: vgtukaftm@ya.ru, ORCID: 0009-0000-0327-0354

Alexandr V. Norman - Cand Sc. (Technical), Director of the Voronezh State Aviation Technical School named after V.P. Chkalov (33 Leningradskaya str., Voronezh 394004, Russia), e-mail: vgtukaftm@ya.ru

Mikhail V. Kondratiev - Cand Sc. (Technical), Associate Professor, Department of Mechanical Engineering Technology, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: vgtukaftm@ya.ru, ORCID: 0000-0001-8444-0668