НАУЧНО-ИЗДАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР «АКАДЕМИЯ ЕСТЕСТВОЗНАНИЯ»

SCIENTIFIC PUBLISHING CENTER «ACADEMY OF NATURAL HISTORY»

НАУЧНОЕ ОБОЗРЕНИЕ • ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ № 1

SCIENTIFIC REVIEW • TECHNICAL SCIENCES 2023

Журнал «Научное обозрение. Технические науки» зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций. Свидетельство ПИ № ФС77-57440
ISSN 2500-0799

Двухлетний импакт-фактор РИНЦ – 0,887
Пятилетний импакт-фактор РИНЦ – 0,350

Учредитель, издательство и редакция: ООО НИЦ «Академия Естествознания», Почтовый адрес: 105037, г. Москва, а/я 47 Адрес редакции и издателя: 410056, Саратовская область, г. Саратов, ул. им. Чапаева В.И., д. 56

Founder, publisher and edition: LLC SPC Academy of Natural History, Post address: 105037, Moscow, p.o. box 47 Editorial and publisher address: 410056, Saratov region, Saratov, V.I. Chapaev Street, 56

Подписано в печать 28.02.2023
Дата выхода номера 31.03.2023
Формат 60×90 1/8

Типография ООО НИЦ «Академия Естествознания», 410035, Саратовская область, г. Саратов, ул. Мамонтовой, д. 5

Signed in print 28.02.2023
Release date 31.03.2023
Format 60×90 8.1

Typography LLC SPC «Academy Of Natural History» 410035, Russia, Saratov region, Saratov, 5 Mamontovoi str.

Технический редактор Доронкина Е.Н.
Корректор Галенкина Е.С., Дудкина Н.А.

Тираж 1000 экз.
Распространение по свободной цене
Заказ НО 2023/1
© ООО НИЦ «Академия Естествознания»

Журнал «НАУЧНОЕ ОБОЗРЕНИЕ» выходил с 1894 по 1903 год в издательстве П.П. Сойкина. Главным редактором журнала был Михаил Михайлович Филиппов. В журнале публиковались работы Ленина, Плеханова, Циолковского, Менделеева, Бехтерева, Лесгафта и др.

Journal «Scientific Review» published from 1894 to 1903. P.P. Soykin was the publisher. Mikhail Filippov was the Editor in Chief. The journal published works of Lenin, Plekhanov, Tsiolkovsky, Mendeleev, Bekhterev, Lesgaft etc.

М.М. Филиппов (M.M. Philippov)

С 2014 года издание журнала возобновлено Академией Естествознания

From 2014 edition of the journal resumed by Academy of Natural History

Главный редактор: М.Ю. Ледванов
Editor in Chief: M.Yu. Ledvanov

Редакционная коллегия (**Editorial Board**)
А.Н. Курзанов (**A.N. Kurzanov**)
Н.Ю. Стукова (**N.Yu. Stukova**)
М.Н. Бизенкова (**M.N. Bizenkova**)
Н.Е. Старчикова (**N.E. Starchikova**)
Т.В. Шнуровозова (**T.V. Shnurovozova**)

НАУЧНОЕ ОБОЗРЕНИЕ • ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

SCIENTIFIC REVIEW • TECHNICAL SCIENCES

www.science-education.ru

2023 г.

В журнале представлены научные обзоры, статьи проблемного и научно-практического характера

The issue contains scientific reviews, problem and practical scientific articles

СОДЕРЖАНИЕ

Технические науки (2.2. Электроника, фотоника, приборостроение и связь, 2.3. Информационные технологии и телекоммуникации, 2.4. Энергетика и электротехника)

СТАТЬИ

ОСНОВНЫЕ ТРЕНДЫ РАЗВИТИЯ ОТЕЧЕСТВЕННЫХ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ И ВОЗНИКАЮЩИЕ ПРОБЛЕМЫ В УСЛОВИЯХ ИМПОРТОЗАМЕЩЕНИЯ

Копнин А.А., Голубин А.В., Соколова Е.В., Прокошев Д.В. 5

ГЕНЕРАЦИЯ МУЗЫКИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДВУНАПРАВЛЕННОЙ РЕКУРРЕНТНОЙ НЕЙРОННОЙ СЕТИ

Мосин Е.Д., Белов Ю.С. 10

РАЗРАБОТКА МОДИФИЦИРОВАННОГО СЕГМЕНТИРОВАННОГО ЧИСЛЕННОГО МЕТОДА ПРОНИ С УЧЕТОМ ВЗАИМНОГО ВЛИЯНИЯ СИГНАЛОВ В МНОГОКАНАЛЬНОЙ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННОЙ СИСТЕМЕ

Власов С.В. 15

МАГНИТНОЕ ПОЛЕ СИСТЕМЫ КРУГОВЫХ ТОКОВ

Глущенко А.Г., Глущенко А.А., Глущенко В.А. 21

ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ОБРАЗЦА ПОДСИСТЕМЫ ЦИФРОВОЙ ГИДРОАКУСТИЧЕСКОЙ СВЯЗИ ОКЕАНОЛОГИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ

Лискин В.А., Римский-Корсаков Н.А., Гамазов Н.И. 26

МЕТОД СБОРА И ОБРАБОТКИ ДАННЫХ В СЕТЯХ ПРОМЫШЛЕННОГО ИНТЕРНЕТА ВЕЩЕЙ

Массеров Д.Д., Массеров Д.А. 32

НАУЧНЫЙ ОБЗОР

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ОЧИСТКИ ВОДЫ МЕМБРАННОЙ ФИЛЬТРАЦИЕЙ

Бурак Л.Ч., Писарик М.И. 37

CONTENTS

Technical sciences (2.2. Electronics, photonics, instrumentation and communication, 2.3. Information technologies and telecommunications, 2.4. Energy and electrical engineering)

ARTICLES

THE MAIN TRENDS IN THE DEVELOPMENT OF DOMESTIC INFORMATION SYSTEMS AND EMERGING PROBLEMS IN THE CONTEXT OF IMPORT SUBSTITUTION

Kopnin A.A., Golubin A.V., Sokolova E.V., Prokoshev D.V. 5

MUSIC GENERATION USING A BIDIRECTIONAL RECURRENT NEURAL NETWORK

Mosin E.D., Belov Yu.S. 10

DEVELOPMENT OF A MODIFIED SEGMENTED NUMERICAL PRONI METHOD WITH CONSIDERING THE MUTUAL INFLUENCE OF SIGNALS IN A MULTICHANNEL TELECOMMUNICATION SYSTEM

Vlasov S.V. 15

MAGNETIC FIELD OF A SYSTEM OF CIRCULAR CURRENTS

Gluschenko A.G., Gluschenko A.A., Gluschenko V.A. 21

RESEARCH AND DEVELOPMENT OF AN EXPERIMENTAL SAMPLE OF A DIGITAL HYDROACOUSTIC COMMUNICATION SUBSYSTEM OF OCEANOLOGICAL COMPLEXES

Liskin V.A., Rimskiy-Korsakov N.A., Gamazov N.I. 26

DATA COLLECTION AND PROCESSING METHOD IN INDUSTRIAL INTERNET OF THINGS NETWORKS

Masserov D.D., Masserov D.A. 32

REVIEW

EFFICIENCY OF WATER PURIFICATION BY MEMBRANE FILTRATION

Burak L.Ch., Pisarik M.I. 37

СТАТЬИ

УДК 004

ОСНОВНЫЕ ТРЕНДЫ РАЗВИТИЯ ОТЕЧЕСТВЕННЫХ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ И ВОЗНИКАЮЩИЕ ПРОБЛЕМЫ В УСЛОВИЯХ ИМПОРТОЗАМЕЩЕНИЯ

[1]Копнин А.А., [1]Голубин А.В., [1]Соколова Е.В., [2]Прокошев Д.В.

[1]ФГБОУ ВО «Уральский государственный экономический университет», Екатеринбург, e-mail: AntKop_tosha@mail.ru;

[2]ФГАОУ ВО «Российский университет транспорта», Москва, e-mail: prokoshev.danil@gmail.com

В условиях цифровой трансформации экономики большой упор идет на внедрение новейших информационных решений в различных направлениях экономики, а также в сложившейся политической обстановке и ориентации государства на политику импортозамещения как в органах государственной власти, так и в большинстве сфер национальной экономики возросла роль проектирования, разработки и внедрения отечественного программного обеспечения, поэтому в данном научном исследовании рассмотрены основные перспективные направления развития сферы информационных технологий в Российской Федерации, которые позволят развивать уровень отечественных технологий и быть конкурентоспособными в условиях импортозамещения. А также освещены основные проблемы, связанные с развитием сферы отечественных информационных технологий, их влияние на скорость развития и адаптации к новым условиям, как следствие, определены способы решения возникающих проблем и перспективы и направления развития области отечественных разработок. Сделан акцент на основных уязвимостях при разработке программного обеспечения, влияющих на степень безопасности программного обеспечения и непосредственно на уровень доверия к новым технологиям, а также на возможность и качество перехода с импортного программного решения на отечественное и повышение квалификации персонала при работе с отечественными разработками.

Ключевые слова: импортозамещение, российские информационные технологии, программное обеспечение, уязвимости ПО, проблемы развития информационных технологий, цифровые технологии, информационное обеспечение, цифровизация

THE MAIN TRENDS IN THE DEVELOPMENT OF DOMESTIC INFORMATION SYSTEMS AND EMERGING PROBLEMS IN THE CONTEXT OF IMPORT SUBSTITUTION

[1]Kopnin A.A., [1]Golubin A.V., [1]Sokolova E.V., [2]Prokoshev D.V.

[1]Ural State University of Economics, Yekaterinburg, e-mail: AntKop_tosha@mail.ru;

[2]Russian University of Transport, Moscow, e-mail: prokoshev.danil@gmail.com

In the context of the digital transformation of the economy, a lot of emphasis is placed on sustainable information solutions in various areas of the economy, as well as the current political situation and the focus on the observed import substitution as a public authority, and in most areas of the national economy, a sharp transformation in the role of construction, development and implementation of domestic software, therefore, in modern scientific research, the main promising directions for the development of information technologies in the Russian Federation are used, which provide a high level of domestic technologies and are useful in the context of import substitution. And also the main problems associated with the likelihood of the development of domestic information technologies, their impact on the speed of development and adaptation to new conditions, as the main solutions for solving problems and prospects and directions for the development of the field of domestic developments, are consecrated. Particular attention is paid to particularly vulnerabilities in software development that affect the degree of security, the level of trust in technologies is of particular importance, as well as the possibility and quality of the transition from imported software to domestic new and staff training when working with domestic developments.

Keywords: import substitution, Russian information technologies, software, software vulnerabilities, problems of information technology development, digital technologies, information support, digitalization

В настоящее время одним из основных способов экономического развития любой компании является технологический прогресс, основываясь на том, что информация стала одним из важнейших ресурсов современного общества, а процесс цифровизации стремительно модернизирует процессы во всех сферах деятельности человека. От уровня развития отраслей, производящих и предоставляющих информационные продукты и услуги, напрямую зависит уровень развития и конкурентоспособности не только определенной компании, но и страны в целом. В современных условиях при наличии санкционной политики западных стран обострилась пробле-

ма, связанная с развитием России в сфере информационных технологий, а именно наличия собственного программного обеспечения и необходимого оборудования. В связи с этим одной из ключевых задач развития страны становится ускоренное формирование объемов и качества производства отечественных продуктов и услуг в сфере информационных технологий и адаптация не только программных продуктов под произведенное оборудование, но и обучение и развитие использующих и создающих цифровые технологии [1].

В текущих реалиях в условиях осложнения взаимоотношений с иностранными поставщиками программного обеспечения (далее – ПО) возросла роль развития отечественного ПО в качестве импортозамещения, в связи с этим перед авторами статьи была поставлена цель – проанализировать текущие направления развития информационных систем и проблемы импортозамещения иностранного ПО в различных областях российской экономики.

Материалы и методы исследования

С использованием методов анализа и синтеза в исследовании проводится выявление основных направлений развития отечественных информационных технологий, методы поддержки и адаптации, а также выделяется ряд проблем, связанных с их внедрением и использованием. На основе современных публикаций, законов РФ в области информационных технологий и систем, методических документов, отражающих сущность и направленность развития отрасли информационных технологий.

При рассмотрении отрасли информационных технологий в России можно заметить ключевые динамично развивающиеся и поддерживаемые государством и бизнесом направления, представленные и описанные в таблице.

Стоит отметить, что развитие всех перечисленных отраслей в совокупности поможет выйти сфере информационных технологий России на новый уровень, но при создании, использовании и внедрении различных решений возникают проблемы, которые тормозят развитие данной сферы и не дают так быстро получить желаемые результаты, тем самым стать конкурентоспособными в современных условиях [2]. Для этого реализуются законодательные акты, направленные на поддержание отечественных компаний и замену импортного ПО в России, а именно поддержание единого реестра российских программ для электронных вычислительных машин, баз данных, обеспечение экономической и информационной безопасности страны в крайне уязвимых сферах, независимость от зарубежных поставщиков ПО, увеличение объемов внедрения систем на производство, что способствует стимулированию роста конкурентоспособности на отечественном рынке информационных технологий [3–5].

Результат анализа проблем развития цифровых технологий в ИТ-секторе Российской Федерации, связанный с уязвимостями и кадровым обеспечением

При переходе на российское ПО и развитие уровня отечественного сектора информационных технологий можно заметить и выделить ряд проблем, требующих комплексных решений для позиционирования компаний в качестве конкурентоспособных поставщиков продуктов и услуг для различных отраслей деятельности человека и направлений экономики, что играет немаловажную роль в условиях политики импорта замещения. А также динамичное развитие ИТ-технологий сопровождается усилением рисков для безопасности как для конечного пользователя технологиями, так и для компаний. В этой связи при переходе к отечественному ПО в рамках развития российского сектора ИТ наблюдаются следующие проблемы:

− недостаток квалифицированных ИТ-кадров;

− уязвимости ПО;

− ограничения, связанные с развитием отечественного технического и аппаратного обеспечения;

− проблемы при переходе на свежие программные и аппаратные решения.

Авторским коллективом рассмотрена одна из ключевых проблем уязвимости программного обеспечения, влияющая на создание, использование и продвижение отечественных решений в сфере информационных технологий, которые формируют спрос и доверие у потребителей [6]. Уязвимости программного обеспечения можно разделить на четыре категории:

− по типу ПО;

− по этапу жизненного цикла ПО;

− по причине возникновения уязвимости;

− по характеру последствий от атак.

В рамках каждой из категорий можно выделить следующие уязвимости, представленные на рисунке.

На основе схемы можно дополнить и выделить уязвимости системного ПО, основанные на архитектуре построения ЭВС:

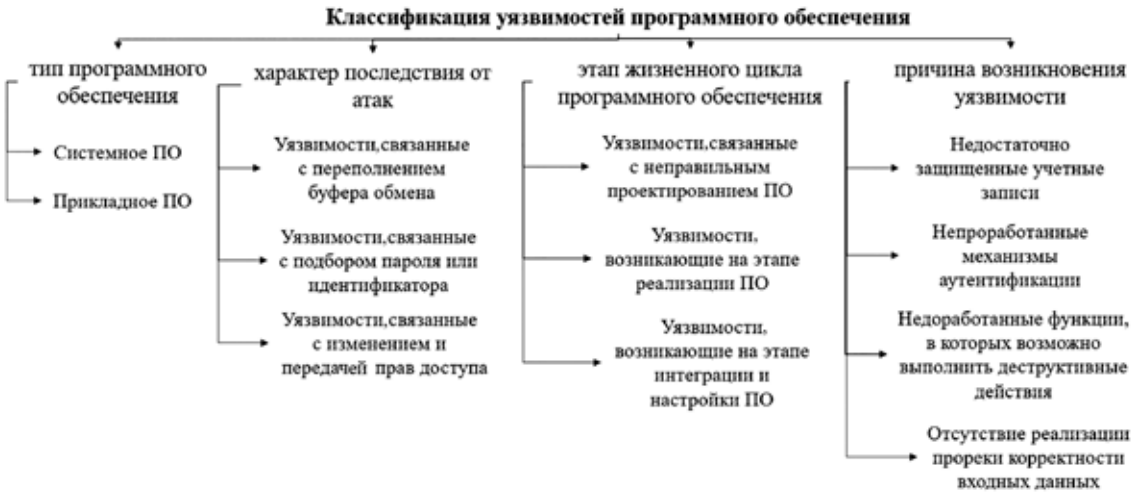
− в микропроцессах;

− в средствах ОС (драйверы, архиваторы, отладчики, библиотеки и др.);

− в сетевых средствах.

Анализ развития направлений в ИТ-отрасли России

Направление ИТ-отрасли	Основное описание и назначение ИТ-отрасли	Способы стимулирования к развитию конкретной отрасли	Компании, предоставляющие продукт или услугу
Аналитика данных	Технологии, связанные с аналитикой данных, необходимы во всех областях деятельности человека, поскольку помогают развитию любого бизнеса, компании и страны в целом.	Разработка ГОСТ Р ИСО/МЭК 20546-2021 «Информационные технологии – Большие данные – Обзор и словарь», направленного на стандартизацию развития в данной сфере	ИКС Холдинг, Группа Т1, Яндекс
Аппаратное обеспечение	Создание и обеспечение компаний необходимыми техническими мощностями и осуществления информационных процессов	Исключения в законодательстве, связанные с освобождением от налогового и валютного контроля, реализация грантовой поддержки, стимулирование закупок и освобождения от уплаты налогов на прибыль для компаний, представляющих ИТ-решения	Ростех, КРОК, Dell, Hp,
Программное обеспечение	Реализация и продвижение отечественных программных продуктов для обеспечения работы	Исключения в законодательстве, связанные с освобождением от налогового и валютного контроля, реализация грантовой поддержки, стимулирование закупок и освобождения от уплаты налогов на прибыль для компаний, представляющих ИТ-решения	Ростех, ГК Softline, ИКС Холдинг, Группа Т1, 1С, Лаборатория Касперского, КРОК, Айтеко
Искусственный интеллект	Технологии, направленные на разработку интеллектуальных компьютерных систем, которые позволяют обучаться на собственном опыте, адаптироваться к задаваемым параметрам и тем самым выполнять необходимые действия и задачи без помощи человека	Государственная поддержка для развития и применения искусственного интеллекта. А также сотрудничество будет в самых различных сферах деятельности. Конкретные детали сотрудничества будут обсуждаться, но главное – «взаимная заинтересованность» сторон	OCS Distribution, ИКС Холдинг, Группа Т1, 1С, Сбербанк, ЦРТ, Smart Engines, VisionLabs, Just AI, «Третье мнение», EORA, Яндекс
Аддитивные технологии и робототехника	Технологии, позволяющие развивать и использовать альтернативные способы замены бытовых действий или объектов для оптимизации бизнес-процессов, а также уменьшения трудовых и ресурсных затрат на производство	На государственном уровне существует поддержка развития этих технологий: в Министерстве промышленности и торговли РФ создан Департамент развития станкостроения, аддитивных технологий и робототехники	AT, ALFA Robotics, РусАТ, Доктор Веб
Кибербезопасность	Технологии, включающие в себя совокупность методов и практик защиты от атак злоумышленников для компьютеров, серверов, мобильных устройств, электронных систем, сетей и данных	В России реализуется федеральный проект «Информационная безопасность» национального проекта «Цифровая экономика». Расширяется сеть опорных центров Национального киберполигона на базе университетов. Сейчас существует 8 учебных площадок по отработке сценариев защиты от киберугроз	ГК Softline, Лаборатория Касперского, Яндекс



Классификация уязвимостей программного обеспечения

В ходе проектирования или ПО могут появиться уязвимости, которые можно разделить на категории:

− ошибки, возникшие на первичном этапе проектирования, связанные с недоработками в созданных алгоритмах, а также неточности при интеграции необходимых дополнительных модулей как в протоколах взаимодействия программных, так и в аппаратных частях;

− ошибки, связанные с реализацией и внедрением алгоритмов безопасности, отражающиеся в некорректной организации вычислительного процесса, синтаксические или логические ошибки;

− ошибки конфигурации аппаратной части, причиной которых является некачественная разработка и отсутствие проверки на логику функционала.

Уязвимости могут появляться при ненадлежащей поддержке и сопровождении программного обеспечения из-за стремительного развития информационных технологий, а также средств злоумышленников, что в дальнейшем оказывает влияние не только на функциональное использование реализованных решений, но на уровень продвижения и объемы использования среди компаний и частных лиц.

Стоит отметить, что быстроразвивающиеся технологии, которые внедряются в различные сферы экономики, создают необходимость проведения в корпорациях и на предприятиях постоянного обучения персонала с целью обеспечения возможности работы с новым программным и техническим решением. Повышение уровня квалификации своих специалистов является наиболее выгодным решением в сравнении с поиском и наймом новых работников с необходимыми знаниями. Например, при внедрении нового программного обеспечения стоит произвести некое обучение по использованию данного решения, чтобы оно не вызвало отторжения со стороны персонала, что поможет облегчить и улучшить дальнейшую работу, а также создать доверительное отношение к отечественной информационной системе. Стоит отметить, что при создании привлекающих условий и качественной отдачи от ИТ-решения можно создать некие доверительные отношения не только в организации, но и в целом на уровне страны, что поможет продвигать различные отечественные информационные системы и внедрять их в различных сферах деятельности человека [7]. Важно заметить, что современные образовательные программы помогают создавать и развивать квалифицированных сотрудников в современных условиях и необходимо реализовать возможность прямого взаимодействия между ними и возможными работодателями, чтобы при выпуске человек был нацелен на конкретное производство, что позволит активно развиваться как информационным технологиям, так и уровню их использования на производстве.

При рассмотрении причин необходимости повышения уровня квалификации сотрудников можно указать следующие аспекты:

− ускоренное изменение методов и бизнес-процессов обеспечения технологий производства;

− изменение аппаратных и программных решений для создания и реализации товара или услуги;

− постоянное изменение требований к профессиональным компетенциям персонала, что ведет к нехватке квалифицированных специалистов [7].

Заключение

В Российской Федерации отрасли ИТ развиваются в различных областях экономики, можно отметить следующие области как наиболее перспективные и поддерживаемые: аналитика данных, искусственный интеллект, аппаратное и программное обеспечение, аддитивные технологии и робототехника, нейротехнологии, BIM-технологии, кибербезопасность.

Однако при быстром развитии и внедрении отечественного ПО необходимо учитывать возможные проблемы, такие как недостаток квалифицированных ИТ-кадров, уязвимости ПО; ограничения, связанные с развитием отечественного технического и аппаратного обеспечения, и другие.

Первостепенными сдерживающими причинами развития отечественных информационных технологий являются недостатки отечественных вычислительных машин, уязвимости аппаратных и программных обеспечений в социально-экономических сферах страны, данная ситуация связана с недостатком своевременного государственного финансирования и инвестиций в данные области и отсутствием сформированных программ создания отечественных решений. Успешность внедрения отечественного ПО во многом зависит от поиска решений поставленных проблем и перспектив развития, связанных:

− с улучшением условий для развития ИТ;

− обучением и продвижением кадров, обеспечивающих разработку и сопровождение ИТ;

− обеспечением безопасности в ИТ-продуктах для привлечения потребителей и развития доверия к ним;

− модернизацией образовательных программ в области ИТ;

− привлечением высококвалифицированных кадров к осуществлению деятельности в России;

− развитием центров взаимодействия работодателя и студента в качестве возможного будущего сотрудника;

− поддержкой развития малого бизнеса в сфере ИТ;

− развитием рынка сбыта для отечественных ИТ.

Список литературы

1. Щербина Т.А. Проблемы и перспективы импортозамещения в российской сфере информационных технологий // Инновационная экономика и менеджмент: Методы и технологии: сборник материалов II Международной научно-практической конференции, (Москва, 26 октября 2017 г.). / Под ред. О.А. Косорукова, В.В. Печковской, С.А. Красильникова. М.: ООО «Аспект Пресс», 2018. С. 157–161.

2. Емельяненко Е.О., Мендагазиев А.Е. Направления развития цифровой экономики и цифровых технологий в Российской Федерации // Научные записки молодых исследователей. 2021. Т. 9. № 6. С. 69–79.

3. Указ Президента Российской Федерации от 30.03.2022 № 166 «О мерах по обеспечению технологической независимости и безопасности критической информационной инфраструктуры Российской Федерации». [Электронный ресурс]. URL: http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202203300001 (дата обращения: 18.12.2022).

4. Указ президента РФ В.В. Путина от 02.03.2022 г. № 83 «О мерах по обеспечению ускоренного развития отрасли информационных технологий в Российской Федерации». [Электронный ресурс]. URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_410684/ (дата обращения: 18.12.2022).

5. Жиданова Е.А. Проблемы и перспективы перехода, связанные с реализацией государственной политики импортозамещения в сфере информационных технологий // Инновационные процессы в современной науке, тенденции развития: сборник статей по материалам международной научно-практической конференции (Уфа, 28 сентября 2019 г.). Уфа: ООО НИЦ «Вестник науки», 2019. С. 104–109.

6. Сахно В.В., Проказова Ж.В. Анализ уязвимости программного обеспечения // Modern Science. 2021. № 9–2. С. 223–226.

7. Ларин С.Н., Знаменская А.Н. Формирование условий повышения уровня квалификации персонала для минимизации негативного влияния санкционных ограничений // Экономика: вчера, сегодня, завтра. 2018. Т. 8. № 4А. С. 22–33.

УДК 004.89:004.032.26

ГЕНЕРАЦИЯ МУЗЫКИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДВУНАПРАВЛЕННОЙ РЕКУРРЕНТНОЙ НЕЙРОННОЙ СЕТИ

Мосин Е.Д., Белов Ю.С.

ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана», Калужский филиал, Калуга, e-mail: med18ki118@student.bmstu.ru

В эпоху больших данных спрос на короткие саундтреки вырос благодаря стремительному развитию потоковых платформ. От таких саундтреков не требуется высокий художественный уровень, однако немногие музыканты захотят тратить свое время на написание большого количества малосодержательной музыки. Для решения данной проблемы целесообразно использовать алгоритмы генерации музыки на основе нейронных сетей. В частности, для генерации красивой и гармоничной музыки хорошо подходит нейронная сеть, основанная на двунаправленной рекуррентной модели. В данной работе рассматривается двухбитный пианино-ролл, представляющий музыку, первые биты обозначают, что проигрывается текущая нота в текущее время, а вторые обозначают удерживаемую ноту (новая нота нажимается, если ее значение равно 1, иначе продолжается). Модель архитектуры базируется на двухосной LSTM, которая обеспечивает высокую производительность при музыкальном прогнозировании. Архитектура разделена на две части: генерация контекста заметок во временном направлении и генерация заметок в направлении заметок. Особое внимание в работе уделяется функции потерь. Сумма бинарных кросс-энтропийных потерь даст много одинаковых, бессмысленных результатов, для предотвращения чего разработана специальная функция потерь.

Ключевые слова: генерация музыки, нейронные сети, LSTM, функция потерь

MUSIC GENERATION USING A BIDIRECTIONAL RECURRENT NEURAL NETWORK

Mosin E.D., Belov Yu.S.

Bauman Moscow State Technical University, Kaluga branch, Kaluga, e-mail: med18ki118@student.bmstu.ru

In the era of big data, the demand for short soundtracks has grown thanks to the rapid development of streaming platforms. Such soundtracks do not require a high artistic level, but few musicians will want to spend their time writing a lot of low content music. To solve this problem, it is advisable to use music generation algorithms based on neural networks. In particular, a neural network based on a bidirectional recurrent model is well suited for generating beautiful and harmonious music. In this paper, we consider a two-beat piano roll representing music, the first bits indicate that the current note is being played at the current time, and the second indicate the note being held (a new note is pressed if its value is 1, otherwise it continues). The architecture model is based on a bi-axial LSTM, which provides high performance in music prediction. The architecture is divided into two parts: annotation context generation in the temporal direction and annotation context generation in the annotation direction. Particular attention is paid to the loss function. The sum of binary cross-entropy losses will give many identical, meaningless results, to prevent which a special loss function has been developed.

Keywords: music generation, neural networks, LSTM, loss function

Музыка как художественная форма содержит в себе эмоцию и идею композитора. Первая музыка, написанная с помощью компьютера, появилась в 1957 г., и с тех пор все больше и больше музыки создавалось с использованием компьютерной техники. Существует множество методов алгоритмического создания музыки: основанные на грамматике, марковские модели и нейронные сети. Преимуществом использования глубокого обучения (включая машинное обучение) для создания музыкального контента является его универсальность. По сравнению с другими методами система, основанная на машинном обучении, способна изучать модель из произвольного набора музыкальных произведений.

Цель исследования – рассмотреть модель глубокого обучения для создания полифонической музыки, основанную на близких нотах, которые окружают целевую ноту во временном измерении и измерении ноты. Как и большинство исследований, данная работа подразумевает представление музыкальных данных в MIDI формате. Для эффективности генерации модель генерирует только ноты и игнорирует музыкальное исполнение, такое как скорость.

Основные особенности рассматриваемого метода. Многие исследователи рассматривают задачу генерации музыки как вероятностную модель полифонической музыки, они представляют музыку как последовательность нот и пытаются моделировать музыку как распределение вероятностей, где следующая нота назначается на основе вероятностей предыдущей последовательности нот и некоторого контекста, такого как аккорд, гамма, ритм [1, 2]. Важно отметить, что, по сравнению с композицией

на основе правил, конкретную модель можно обучать на основе большого количества музыкальных произведений и позволять ей автоматически обнаруживать закономерности. На этапе генерации создается выборка из обученного распределения вероятностей для создания новых музыкальных произведений. Рекуррентные нейронные сети (RNN), особенно сети с долговременной кратковременной памятью (LSTM), эффективно предсказывают данные временных рядов. Многие исследователи использовали LSTM для создания музыки, что дало хорошие результаты.

Основной идеей этого метода является введение двунаправленной рекуррентной сети по оси заметок и оси времени. Интуитивное объяснение состоит в том, что, когда композиторы сочиняют песни, они будут рассматривать ноты с глобальной точки зрения, и на каждую ноту будут влиять окружающие ноты и гармоники. Поэтому моделируется условная вероятность по двунаправленной оси нот, которая представляет гармонические отношения, и условная вероятность по двунаправленной оси времени, которая представляет окружающие ноты. Эта модель способна генерировать музыку, лежащую в основе теории музыки и латентных паттернов в музыкальных произведениях. Основные нововведения:

− Вместо однонаправленной сети использовать двунаправленную рекуррентную нейронную сеть для генерации последовательности нот как по оси нот, так и по оси времени.

− Рассмотрение улучшенной функции потерь, чтобы избежать множества бессмысленных результатов.

− Упрощенное представление входных данных и новая стратегия выборки.

Входные данные. Музыка состоит из нескольких дорожек, а дорожка содержит несколько нот. Мелодия может рассматриваться как особая дорожка и обычно является самой важной частью музыки, в этой статье используется модель для создания одной дорожки мелодии, которая позволяет одновременно воспроизводить несколько нот. Целесообразно использовать пиано-ролл (piano roll) для представления музыки. Пианинороллл (piano roll) – это матрица N * T * C, N – количество шагов (N равно 128 в MIDI, шаг от 0 до 127), T – длина последовательности и количество шагов по времени, C равно 2 в этой статье. В каждой ячейке в матрице хранятся два значения, первое значение представляет, что нота играется (1 играется, а 0 не играется), второе значение представляет, что нота артикулирована (1 артикулируется, а 0 нет). На рис. 1 показано простое представление пиано-ролла.

$$piano_roll = \begin{bmatrix} [0,0] & [1,0] & [0,0] & [1,0] \\ [1,1] & [1,1] & [1,1] & [1,1] \\ [1,1] & [1,0] & [1,1] & [1,1] \\ [0,0] & [0,0] & [0,0] & [0,0] \end{bmatrix}$$

Рис. 1. Простой пример представления пиано-ролла

В MIDI нота представляет собой кортеж, например <скорость (velocity), высота ноты (pitch), начало ноты (start), конец ноты (end)>, в данной статье параметр скорости (velocity) не учитывается. Скорость (velocity) – это скалярное значение (диапазон от 0 до 127 в MIDI), которое обычно устанавливается на общую громкость воспроизводимой ноты, но это значение неверно во многих MIDI-файлах [3]. Поэтому в статье игнорируется скорость и принимается постоянным значением.

В теории музыки и в MIDI формате октава состоит из 12 полутонов, поэтому можно использовать вектор размером 12, представляющий октаву, которая описана следующим образом (рис. 2).

Трезвучие – это набор из трех нот, которые можно складывать вертикально в терции, и функция трезвучия определяется его качеством: мажор, минор, уменьшенное или увеличенное [4]. Для всех мажорных аккордов представление отличается только смещением, которое называется «трансляционной инвариантностью». Вдохновляясь принципом сверхточных нейронных сетей для получения инвариантности к сдвигу, можно использовать связанные веса для достижения свойства инвариантности к переводу.

C	*C#*	*D*	*D#*	*E*	*F*	*F#*	*G*	*G#*	*A*	*A#*	*B*	
0	0	1	0	0	1	0	0	0	1	0	0	*Dm*
0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	1	*Em*
1	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	*Cm*

Рис. 2. Представление аккордов Dm, Em, Cm

Берется двухбитный пианино-ролл, представляющий музыку, первые биты обозначают, что проигрывается текущая нота в текущее время, а вторые обозначают удерживаемую ноту (новая нота нажимается, если ее значение равно 1, иначе продолжается).

Ввод разработан на основе двух концепций.

− Контекст аккорда: мелодия и аккорд находятся в гармонии, между ними много общих тонов, поэтому целесообразно использовать вектор размером 12 для обозначения аккорда, который поддерживает пользовательский ввод во время создания музыки и позволяет пользователю взаимодействовать с музыкой. На этапе обучения рассматривается сочетание высот между басовым голосом как аккорд в одном такте.

− Ближайший контекст: каждый элемент в последовательности является 2-битным, поэтому используется many-hot с длиной 50 для обозначения контекста окрестности.

Наконец, ввод направления времени представляет собой комбинацию контекста аккорда и контекста окрестности. В направлении ноты используется вывод направления времени и вывод предыдущей ноты в качестве текущего ввода.

Архитектура. Модель архитектуры базируется на двухосной LSTM, которая обеспечивает высокую производительность при музыкальном прогнозировании [5]. Архитектура разделена на две части: генерация контекста заметок во временном направлении и генерация заметок в направлении заметок.

Во временном направлении назначается один сетевой экземпляр каждой заметке. Чтобы обеспечить «свойство инвариантности перевода», каждый экземпляр сети будет иметь связанные веса, и каждая заметка будет получать свои выходные данные в одной и той же процедуре расчета. Кроме того, использование связанных весов заметно уменьшит количество параметров в системе и снизит риск переобучения.

Схема привязанных весов следующая: на временном шаге t последовательность заметок принимается как V = {v1, v2, v3, v4, v5}, сеть LSTM будет обучаться на V.

На рис. 3 три сети LSTM будут иметь одинаковые веса, и при сложении двух слоев LSTM будет увеличиваться пропускная способность сети. Кроме того, двунаправленная LSTM хорошо подходит для создания гармонической мелодии, например, если модель обучается только с данными положительного направления, что означает, что текущая нота будет определяться только предыдущими появившимися нотами, некоторые ноты не будут гармоничны с точки зрения негативного направления [6]. Двусторонняя стрелка на рис. 3 показывает, что сеть является двунаправленной. Путем объединения прямой и обратной информации модель создает гармоничную музыку.

Наконец, как только контекст ноты обучен системой, можно легко получить окончательную вероятность воспроизведения ноты. На каждом временном шаге окончательные активации текущей заметки определяются тремя элементами: контекстом заметки, предыдущими активациями и следующими активациями, поэтому они объединяются с вектором ввода LSTM. То же самое с направлением времени, складываются 2 слоя LSTM. Полная архитектура показана ниже (рис. 4), она содержит направление времени и направление нот.

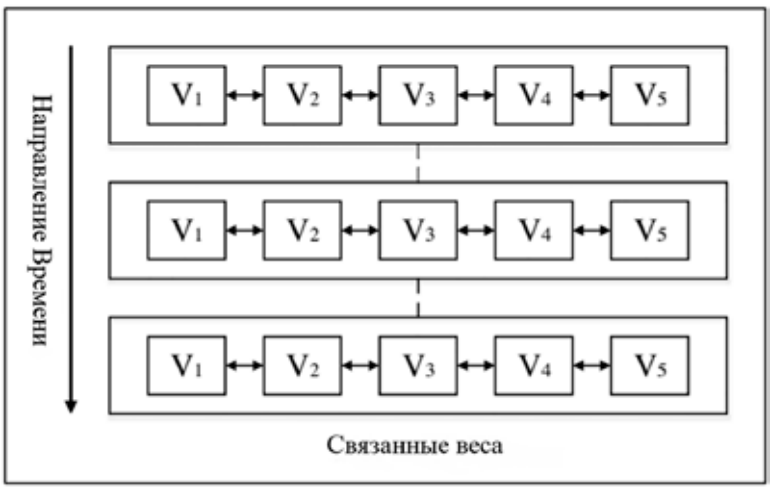


Рис. 3. Связанные веса во временном направлении

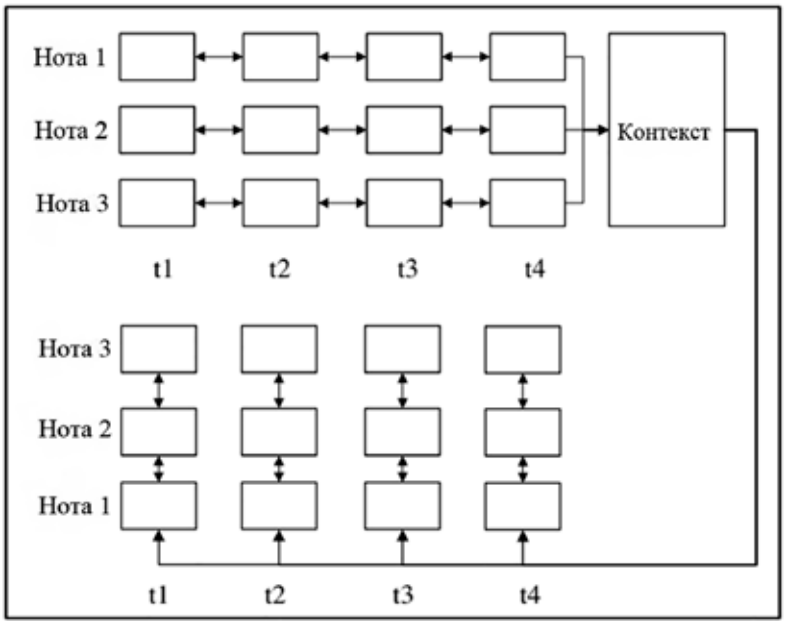


Рис. 4. Полная архитектура сети

$$L_{play} = \sum -y_{play} \log \hat{y}_{play} - \left(1 - y_{play}\right) \log(1 - \hat{y}_{play}). \quad (1)$$

$$L_c = \sum -y_{play}(y_c \log \hat{y}_c + (1 - y_c) \log(1 - \hat{y}_c)) - (1 - y_{play}) \log(1 - \hat{y}_c)\,. \quad (2)$$

По сравнению с двухосевой сетью LSTM, данная архитектура изменяет форму входных данных и позволяет пользователю настраивать ход и гиперпараметры сети. Прежде всего, двунаправленная LSTM решает проблемы гармонии нот и улучшает производительность двухосевой LSTM.

Функция потери. На каждом временном шаге модель выводит два результата: вероятность воспроизведения и вероятность продолжения для каждой ноты. Двухосевая модель LSTM добавляет слой активации softmax для каждого выхода, а функция потерь представляет собой двоичную кросс-энтропию [7]. Принимаются 2-битные числа, многие из которых представляют пианоролл, однако если воспроизводимый бит принимается равным 0, а продолжающийся бит равен 1, то эта нота не имеет смысловой нагрузки. Таким образом, сумма бинарных кросс-энтропийных потерь даст много одинаковых, бессмысленных результатов. Для решения этой задачи вводятся функции потерь для сыгранного бита (1).

Формула (1) представляет собой нормальную потерю перекрестной энтропии, она измеряет расстояние между истинным значением и прогнозируемым значением. Как только бит воспроизведения определен, потеря продолжающегося бита является явной. Далее переопределяется L_c, который обозначает потерю между прогнозируемой вероятностью и реальной продолжительностью бита (2).

Формула (2) состоит из двух частей: первая часть обозначает потерю перекрестной энтропии бита продолжения при воспроизведении текущей ноты, а вторая часть ограничивает бит продолжения равным 0, если текущая нота не воспроизводится. Этот подход позволяет избежать множества бессмысленных результатов.

Тренировка и генерация. Модель обучается оптимизатором Адама, размер партии составляет 64, все слои LSTM сложены по 2, а размер единиц LSTM составляет 512. Чтобы предотвратить переобучение, нужно досрочно прекращать обучение, если потери при проверке больше не уменьшаются.

После того как модель была обучена, можно сгенерировать последовательность заметок следующим образом:

− Во-первых, случайным образом генерируется начальный ввод (или пользо-

вательский ввод) и подается в сеть во времени, что выводит контекст на текущем временном шаге.

− Во-вторых, подается контекст на текущем временном шаге и предыдущих выбранных нотах (предыдущая из первой ноты является нулевым вектором) в сеть по направлению ноты и выводится условная вероятность воспроизведения и продолжения.

− Наконец, выбирается текущая заметка через выборочную стратегию по текущей условной вероятности.

− После завершения генерации заметки в течение одного временного шага модель обновит ввод первого шага и повторит процесс генерации.

Путем пошаговой итерации по направлению ноты и направлению времени модель может генерировать произвольное полиномическое музыкальное время шаг за шагом. Несмотря на то, что для генерации мелодии используется многократная итерация, занимающая много времени, общая производительность повышается [8].

Стратегия выборки. На этапе генерации на каждом временном шаге t последовательность нот принимается как $V^{(t)}$, для каждой ноты n вероятность воспроизведения ноты (или вероятность продолжения воспроизведения) принимается как $p^{(t,n)}$. Таким образом, окончательный вывод текущей позиции следует выбирать на основе $p^{(t,n)}$, для решения этой проблемы используется выборочная стратегия. Рассматривается вероятность сыгранной ноты как распределение Бернулли, случайным образом выбираемое значение посредством выборки, обусловленной $p^{(t,n)}$. Как следствие, музыкальный контент меняется каждый раз, даже если одни и те же входные данные подаются в сеть с помощью стратегии сэмплирования.

Заключение

Генеративная музыка становится все более востребованной, она хороша не только для персонального пользования, но, к примеру, для использования на фоне в видеоролике или видеоигре. Современные модели способны создавать самые разные композиции в различных жанрах на любой вкус, рассмотренная в этой статье двунаправленная рекуррентная сеть позволяет эффективно генерировать гармоничную музыку, которую можно использовать в бизнесе, не тратя большие деньги на авторские композиции и не нарушая авторские права.

Список литературы

1. Kun Zh., Siqi Li, Juanjuan C. An Emotional Symbolic Music Generation System based on LSTM Networks. IEEE 3rd Information Technology, Networking, Electronic and Automation Control Conference (ITNEC). 2019. P. 2039–2043. [Электронный ресурс]. URL: https://ieeexplore.ieee.org/document/8729266 (дата обращения: 13.12.2022).

2. Ahmet E. Piano Music Generation with a Text Based Musical Note Representation using LSTM Models. 29th Signal Processing and Communications Applications Conference. 2021. P. 1–4. [Электронный ресурс]. URL: https://ieeexplore.ieee.org/document/9477952 (дата обращения: 13.12.2022).

3. Ke Ch., Weilin Zh., Shlomo D. The Effect of Explicit Structure Encoding of Deep Neural Networks for Symbolic Music Generation. International Workshop on Multiplayer Music Representation and Processing (MMRP). 2019. P. 77–84. [Электронный ресурс]. URL: https://ieeexplore.ieee.org/document/8665362 (дата обращения: 13.12.2022).

4. Rui L., Kailun W., Zhiyao D. Deep Ranking: Triplet Matchnet for Music Metric Learning. IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP). 2017. P. 121–125. [Электронный ресурс]. URL: https://ieeexplore.ieee.org/document/7952130 (дата обращения: 13.12.2022).

5. Shopynskyi M., Golian N., Afanasieva I. Long Short-Term Memory Model Appliance for Generating Music Compositions. IEEE International Conference on Problems of Infocommunications. Science and Technology (PIC S&T). 2020. P. 239–242. [Электронный ресурс]. URL: https://ieeexplore.ieee.org/document/9468088 (дата обращения: 13.12.2022).

6. Huanru H.M., Taylor Sh., Garrison W.C. DeepJ: Style-Specific Music Generation. 12th IEEE International Conference on Semantic Computing. 2018. P. 377–382. [Электронный ресурс]. URL: https://ieeexplore.ieee.org/document/8334500 (дата обращения: 13.12.2022).

7. Brandon R., Kien H., Brenton Zh. Deep Composer: Deep Neural Hashing and Retrieval Approach to Automatic Music Generation. IEEE International Conference on Multimedia and Expo (ICME). 2020. P. 1–6. [Электронный ресурс]. URL: https://ieeexplore.ieee.org/document/9102815 (дата обращения: 13.12.2022).

8. Haowen T., Yikun G., Xinyu Ya. Music Generation with AI technology: Is It Possible? IEEE 5th International Conference on Electronics Technology (ICET). 2022. P. 1265–1272. [Электронный ресурс]. URL: https://ieeexplore.ieee.org/document/9824149 (дата обращения: 13.12.2022).

УДК 621.391:681.5

РАЗРАБОТКА МОДИФИЦИРОВАННОГО СЕГМЕНТИРОВАННОГО ЧИСЛЕННОГО МЕТОДА ПРОНИ С УЧЕТОМ ВЗАИМНОГО ВЛИЯНИЯ СИГНАЛОВ В МНОГОКАНАЛЬНОЙ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННОЙ СИСТЕМЕ

Власов С.В.

ФГБОУ ВО «Пензенский государственный технологический университет», Пенза, e-mail: vlasov_s.v@mail.ru

Для проведения исследования взаимного влияния сигналов в телекоммуникационных системах, предлагается использовать модифицированный сегментированный метод Прони. В данной статье разработан модифицированный сегментированный численный метод Прони для оценки взаимного влияния сигналов с квадратурной многоуровневой многофазовой модуляцией в многоканальной телекоммуникационной системе с использованием многомерных метрических пространств. Результат исследования заключается в том, что при использовании модифицированного численного метода Прони повышается точность оценки взаимного влияния сигналов с использованием коэффициента взаимного влияния. Научный вывод проведенных исследований: длительность окна обработки принимается равной отрезку времени, в котором сосредоточен модулированный сигнал одного цифрового пакета, при условии, что начало окна обработки совпадает с началом первого сегмента сигнального созвездия с определенным уровнем квадратурной амплитудной модуляции. Как следствие, взаимное влияние определяется как отношение спектра сигнала по методу Прони к расстоянию между сфер виртуального многомерного метрического пространства. Эрмитова матрица, учитывающая взаимное влияние сигналов с использованием многомерных метрических пространств, может быть представлена с учетом коэффициентов взаимного влияния. Таким образом, можно выполнять спектральный анализ очень коротких временных рядов с нестационарными процессами с помощью метода сегментации.

Ключевые слова: сигналы, спектры, телекоммуникационная система, модель, метод, метрическое пространство

DEVELOPMENT OF A MODIFIED SEGMENTED NUMERICAL PRONI METHOD WITH CONSIDERING THE MUTUAL INFLUENCE OF SIGNALS IN A MULTICHANNEL TELECOMMUNICATION SYSTEM

Vlasov S.V.

Penza State Technological University, Penza, e-mail: vlasov_s.v@mail.ru

To conduct a study of the mutual influence of signals in telecommunication systems, it is proposed to use a modified segmented Prony method. In this article, a modified segmented numerical Prony method is developed for estimating the mutual influence of signals with quadrature multilevel multiphase modulation in a multichannel telecommunication system using multidimensional metric spaces. The result of the study is that when using the modified numerical method of Prony, the accuracy of estimating the mutual influence of signals using the coefficient of mutual influence increases. The scientific conclusion of the research is: the duration of the processing window is taken equal to the length of time in which the modulated signal of one digital packet is concentrated, provided that the beginning of the processing window coincides with the beginning of the first segment of the signal constellation with a certain level of quadrature amplitude modulation. As a consequence, the mutual influence is defined as the ratio of the signal spectrum according to the Prony method to the distance between the spheres of a virtual multidimensional metric space. The Hermitian matrix, which takes into account the mutual influence of signals using multidimensional metric spaces, can be represented taking into account the coefficients of mutual influence. Thus, it is possible to perform spectral analysis of very short time series with non-stationary processes using the segmentation method.

Keywords: signals, spectra, telecommunication system, model, method, metric space

Классические методы оценки энергетических спектров дискретных сигналов обычно основаны на применении процедур, использующих численные методы быстрых преобразований Фурье (БПФ). Они эффективны в вычислительном отношении и обеспечивают получение асимптотически достоверных оценок для весьма обширного класса сигналов, удовлетворяющих гипотезе стационарности, эргодичности и ограничению выборки большого объема [1]. При проведении анализа взаимного влияния сигналов необходима разработка математической модели анализируемого случайного процесса.

На первый взгляд при анализе спектра сигнала с квадратурной амплитудной модуляцией (КАМ) создается впечатление, что спектр сигнала состоит из одной спектральной составляющей, так как итоговый модулированный сигнал состоит из «кусочков» одной гармонической составляющей, отличающихся амплитудой и фазой, однако при анализе спектров численным методом Прони выявляется достаточно широкий спектр, оказывающий влияние на соседние

каналы. Применительно к численным методам математического моделирования различают следующие типы моделей: AR-модель («авторегрессия»), MA-модель («скользящее среднее»), ARMA-модель. Наибольшее распространение получили методы, основанные на AR-модели формирования сигнала [2].

Статистические характеристики спектральных АР-оценок мало исследованы, и большая часть имеющихся сведений основана на результатах экспериментов, полученных путем моделирования. Для оценки AR-параметров используются метод Юла – Уокера, ковариационный метод, модифицированный ковариационный метод, метод Берга [3].

Затруднение в теории спектрального анализа вызывает определение совокупного спектра сигнала, включающего помеху «белый шум» и помеху, вызванную соседними каналами многоканальной телекоммуникационной системы (ТКС). Методический аппарат, позволяющий проводить такую оценку на основе БПФ или численных методов, требует сложных вычислений и технически сложно реализуем [1]. Использование коэффициента взаимного влияния сигналов в многомерных метрических пространствах [4] позволит решить эту научную проблему.

Попытки научного обоснования и расчета спектров в основном базируются на различных эмпирических опытах, а не на фундаментальной теоретической основе. Публикации новых методов спектрального оценивания нередко сопровождаются субъективными описаниями достигаемых на их основе характеристик, ожидающихся в результате ограниченного числа испытаний. Превосходство того или иного метода спектрального анализа определяется преимуществом или компромиссом, применительно к видам сигналов, длительности наблюдения, точности оценки, временным и аппаратурным затратам на получение результатов [5].

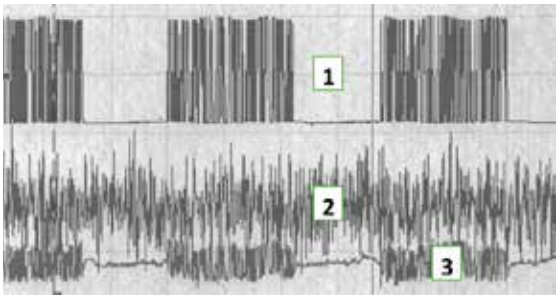
Цель исследования – разработать модифицированный сегментированный численный метод Прони с учетом взаимного влияния сигналов в многоканальной телекоммуникационной системе.

Материалы и методы исследования

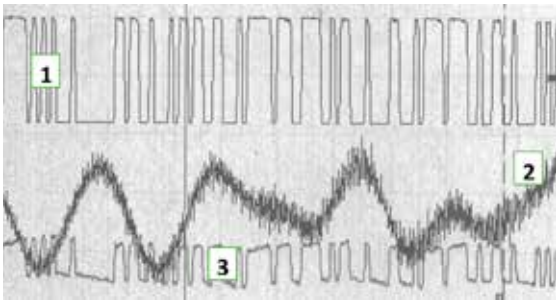
Относительное превосходство того или иного метода спектрального анализа определяется необходимостью выделения того или иного преимущества, применительно к видам сигналов: длительности наблюдения, точности оценки, временных и аппаратурных затрат на получение результатов.

Метод Прони – это метод моделирования выборочных данных в виде линейной комбинации экспоненциальных функций [6, 7].

На рис. 1, а, представлены осциллограмма модуляции и демодуляции сигналов с КАМ-64, соответственно цифровой код (слово) содержит 6 символов. Осуществляется пакетный способ передачи. Причем цифрой 1 обозначен цифровой сигнал Манчестерского кода, поступающий на вход модема. Цифрой 2 обозначен сигнал с КАМ, поступающий из линии связи (радио или проводной) в демодулятор. Цифрой 3 обозначен выходной сигнал демодулятора, поступающий в оконечную аппаратуру. На рисунке 1, б, представлены осциллограммы модуляции и демодуляции сигналов КАМ с «белым» шумом и с помехой по соседнему каналу развернутого пакета.



а)



б)

Рис. 1. Осциллограммы модуляции и демодуляции сигналов с КАМ-64

Анализ осциллограмм показывает, что демодулированный сигнал претерпевает искажения формы.

Одним из допущений при разработке алгоритма обработки сигналов по методу Прони является предположение о точно известном времени начала сигнала. Если начало сигнала известно точно, тогда требуется оценить только амплитуду A сигнала, постоянную затухания α, частоту ω и фазу φ. В случае нескольких синусоид, помимо параметров каждой, дополнительно требу-

ется оценить и их число [8]. Чтобы использовать метод Прони для представленного на рисунке 1, б, сигнала с «белым» шумом и помехой по соседним каналам, необходимо учитывать: какой длительности необходимо выбирать окно обработки; как устанавливать окно обработки (как определить начало исследуемого сигнала); как работает алгоритм, при взаимном влиянии сигналов.

Результаты исследования и их обсуждение

Исходя из общих принципов обработки сигнала, можно предложить следующую модификацию метода Прони. Длительность окна обработки принимается равной отрезку времени, в котором сосредоточен модулированный сигнал одного пакета (рис. 1), при условии, что начало окна обработки совпадает с началом первого сегмента сигнального созвездия с определенным уровнем КАМ. Первый сегмент определяется фронтом первого бита первого цифрового кода информационного пакета. Окончание окна совпадает со спадом последнего бита цифрового кода информационного пакета.

Следующий этап обработки начинается с поступлением фронта первого цифрового бита последующего цифрового кода информационного пакета, то есть окно обработки сдвигается на один цифровой информационный пакет. Процедура получения спектра сигнала методом Прони заключается в накоплении данных о спектральных составляющих модулированных цифровых слов информационного пакета (окна обработки). Далее полученные данные о спектральных составляющих обрабатываются с целью выявления составляющих, влияющих на соседний канал.

Никаких «априорных» ограничений на выбор сегментов не накладывается, и они содержат достаточное количество точек данных (> 20).

Таким образом, можно выполнять спектральный анализ очень коротких временных рядов с нестационарными процессами с помощью метода сегментации. Тогда для оценки спектров мощности различных сегментов необходима минимизация с ограничениями по методу наименьших квадратов. В научных исследованиях этот подход обозначен как «сегментированный метод Прони» (СМП) [7].

Предположим, что наблюдаемый процесс (окно обработки t_0, t_{N-1}), т. е. конечное время серии y_n с $n = 0, 1, 2, ..., N - 1$, может быть разбито на s отрезков (t_n, t_{n+1}), где $n_{i+1} > n_i$ и $i = 1, 2, ..., s$, таких что в каждом из них процесс можно считать асимптотически стационарным и каждый отрезок данных относительно времени $t_n = n\Delta t$ – это элемент сигнала с КАМ, определяемый соответствующим цифровым кодом, определяющим слово в информационной цифровой последовательности, может быть представлено суммой q экспоненциально затухающих синусоид:

$$y_n = \sum_{k=1}^{q} C_k exp\left\{\alpha_k n\Delta t\right\}\cos\left(\omega_k n\Delta t + \varphi_k\right) + w_n = \\ = x_n + w_n, \quad (1)$$

где x_n – неизвестный детерминированный сигнал, определяемый одним из отрезков n, а w_n – белый шум со средним нулем и дисперсией σ^2. C_k, ω_k, φ_k и α_k – амплитуды, частоты, фазы и коэффициенты затухания различных компонентов отрезка x_n соответственно.

Можно показать, что x_n удовлетворяет разностному уравнению

$$x_n = -\sum_{h=1}^{p} a_h x_{n-h} \quad (2)$$

при $p = 2q$, ассоциированное характеристическое уравнение которого имеет вид

$$\sum_{h=0}^{p} a_h z^{-h} = \sum_{h=0}^{p} a_h z^{p-h} = 0 \quad (3)$$

(при $a_0 = 1$). Оценки Прони частот и коэффициентов затухания являются функциями корней характеристического уравнения (2), и автоковариационная функция (где преобразование Фурье является спектром авторегрессии) является решением этого уравнения.

Как следствие из уравнения (3), для наблюдаемого ряда имеем

$$y_n = -\sum_{h=1}^{p} a_h y_{n-h} + \sum_{h=1}^{p} a_h w_{n-h} + w_n. \quad (4)$$

Это стохастическая модель с авторегрессионным скользящим средним (ARMA) для y с равными коэффициентами AR и MA a_h, которые связаны с параметрами, появляющимся в уравнении (4).

В статистическом анализе временных рядов модели с ARMA обеспечивают описание стационарного случайного процесса в терминах двух полиномов, один для авторегрессии (AR), а второй для скользящего среднего (MA).

Значения этих параметров вычисляются из комплексных корней z_k характеристического уравнения (4). Появление действительных корней будет означать, что некоторые компоненты не имеют колебательного вида, и поэтому они не будут включены

в модель. Частоты и константы электронного сворачивания получены путем

$$\omega_k = \frac{1}{\Delta t} arctg \frac{Im\{z_k\}}{Re\{z_k\}}, \quad (5)$$

$$\alpha_k = \frac{1}{\Delta t} \ln|z_k|, \quad (6)$$

при $k = 1, 2, ..., q_c$, где $q_c \le q$ – число пар комплексных сопряженных корней. Затем фазы и амплитуды оцениваются путем подстановки значений w_k и α_k в уравнение (1), и решение задачи наименьших квадратов для всех N данных точек будет иметь вид (7).

Необходимо получить оценку коэффициентов a_h в зависимости от варианта модели p. Следовательно, значения C_k, φ_k, ω_k и α_k не всегда имеют желаемую точность. Затем необходимо вычислить новый временной ряд x_n» для детерминированной части уравнения (1) с оценочными значениями параметров. Когда при вычислении x_n можно использовать ряд компонент $q_s \le q_c$, введение некоторых критериев выбора (например, значения w_k должны находиться внутри заданного интервала или значения C_k должны быть больше фиксированного порога). Эта возможность будет очень полезна для игнорирования компонентов, в основном связанных с шумом или с физически несущественными частотами.

Также можно вычислить энергетический спектр сигнала, комбинируя вклады различных компонентов в каждую частоту. Для этого расчета необходимо знать аналитическое выражение для энергетического спектра каждой компоненты, которое легко вычислить с помощью преобразования Фурье затухающей синусоиды. Однако результат зависит от предполагаемого сигнала до и после наблюдаемого временного интервала, для которого нет никакой информации.

Модулированный информационный цифровой пакет содержит X сегментов, каждый из которых содержит достаточное количество точек данных (> 20) для получения достоверной оценки коэффициентов AR.

Предполагается, что наблюдаемый процесс является локально асимптотически стационарным, то есть интервал наблюдения во временной области может быть разделен на отрезки, достаточно короткие, чтобы процесс можно было характеризовать определенной спектральной плотностью мощности.

Фактически для получения значимых результатов стандартные методы Фурье предполагают медленное изменение частотных характеристик процесса во времени. В нашем подходе спектральная плотность не меняется на каждом отрезке, а может резко меняться при переходе от одного отрезка к другому. Ограничимся рассмотрением последовательных и непересекающихся отрезков (модулированных слов сигнального созвездия). Предположим, что найдена правильная сегментация, к каждому сегменту применяются первые две части метода Прони для оценки коэффициентов затухания частот ω_d. Затем ко всем данным подгоняется глобальная модель для вычисления амплитуд и фаз. На этом шаге могут быть заданы заданные пользователем условия непрерывности сигнала и его производных до порядка r в точках сегментации t_m. Тогда мы должны построить линейную систему наименьших квадратов с ограничениями:

$$\min_{C_k, \varphi_k} \sum_{n=0}^{N-1} \left[y_n - \sum_{1\,k}^{q_c} C_k \exp\{\alpha_k n \Delta t\} \cos(\omega_k n \Delta t + \varphi_k) \right]^2. \quad (7)$$

$$\min_{\{C_k^{(i)}, \varphi_k^{(i)}\}} \sum_{k=1}^{N-1} \left[y_n - \sum_{1\,k}^{q} C_k^{(i)} \exp\left\{\alpha_k^{(i)} (n - m_i) \Delta t\right\} \cos\left(\omega_k^{(i)} (n - m_i) \Delta t + \varphi_k^{(i)}\right) \right]^2, \quad (8)$$

$$\Delta^r x_{m_{i+1}}^{(i)} = \Delta^r x_{m_{i+1+r}}^{(i)} \qquad m_i \le n \le m_{i+1}, i = 1, \ldots, s, r = 0, 1, \ldots, D,$$

где Δ – разностный оператор $\Delta x_n = x_n - x_{n-1}$ с условием, что Δ^0 – тождественный оператор, а $x_{m_{i+1}}^{(i)}$ – оператор экстраполированного значения следующих шагов.

Оценку спектральной плотности энергии можно производить, начиная непосредственно с аналитического выражения (1), пренебрегая шумом w_n. Однако затухающую синусоидальную модель нельзя считать хорошей при произвольных значениях $n\Delta t$, поскольку амплитуда компоненты будет неограниченно возрастать либо в прошлом ($a_k < 0$), либо в будущем ($a_k > 0$).

Нужно наложить ограничения на модель для вычисления преобразования Фурье.

При условии, что $a_k < 0$ для каждого k, можно считать, что амплитуды всех компонент тождественно равны нулю для всех моментов времени до начального. В этом случае энергетический спектр:

$$S(\omega)=\left|\sum_{k=1}^{q}\left\{-\frac{C_k}{2}\frac{\exp\{i\varphi_k\}\left(\alpha_k-i\left(\omega_k-\omega\right)\right)}{\alpha_k^2+\left(\omega_k-\omega\right)^2}-\frac{C_k}{2}\frac{\exp\{-i\varphi_k\}\left(\alpha_k+i\left(\omega_k+\omega\right)\right)}{\alpha_k^2+\left(\omega_k-\omega\right)^2}\right\}\right|^2. \quad (9)$$

Другая гипотеза предложена Марпл-мл. (1981), которая предполагает, что все компоненты симметрично затухают относительно начала координат. Соответствующий энергетический спектр

$$S(\omega)=\left|\sum_{k=1}^{q}\left\{-\frac{C_k\exp\{i\varphi_k\}\alpha_k}{\alpha_k^2+\left(\omega_k-\omega\right)^2}-\frac{C_k\exp\{-i\varphi_k\}\alpha_k}{\alpha_k^2+\left(\omega_k+\omega\right)^2}\right\}\right|^2. \quad (10)$$

В выражении 3.29 в проблеме взаимного влияния сигналов вызывает интерес помеха w_n. В проводимых исследованиях помеха рассматривалась как «белый шум». Для оценки взаимного влияния сигналов помеху необходимо рассматривать как часть энергетического спектра одного канала, находящегося в полосе частот другого канала (рис. 2).

Эрмитова матрица, учитывающая взаимное влияние сигналов, может быть представлена как

$$\begin{vmatrix} P_{xx}(f) & P_{xy}(f) \\ P_{yx}(f) & P_{yy}(f) \end{vmatrix} \quad (11)$$

и по определению является матрицей многоканальной спектральной плотности мощности (СПМ) многоканального случайного процесса. Диагональными элементами ее являются автоспектральные плотности отдельных каналов, а недиагональными – взаимные спектральные плотности пар каналов. Заметим, что матрица $P_{xx}(f)$ эрмитова, т. е. $P_{xx}(f) = P^{н}_{xx}(f)$, и является положительно полуопределенной.

Двухканальная взаимная спектральная плотность мощности представляет собой дискретно-временное преобразование Фурье (ДВПФ) взаимной корреляционной функции

$$P_{xy}(f)=T\sum_{k=-\infty}^{\infty}r_{xy}[k]\exp(-j2\pi fkT) \quad (12)$$

Значения взаимного спектра на каждой частоте не превышают среднего геометрического значения спектров процессов x и y на этой частоте, т. е.

$$\left|P_{xy}(f)\right|^2 \le P_{xx}(f)P_{yy}(f) \quad (13)$$

$$P_{xx}(f)=T\sum_{k=-\infty}^{\infty}R_{xx}[k]\exp(-j2\pi fkT). \quad (14)$$

Взаимное влияние по соседнему каналу будет определяться как

$$P_{xy}(f)=\frac{1}{d}P_{xx}, \quad (15)$$

где d – коэффициент взаимного влияния сигналов, в соответствии с математическими моделями [4, 9].

Тогда Эрмитова матрица, учитывающая взаимное влияние сигналов с использованием многомерных метрических пространств, может быть представлена как

$$\begin{vmatrix} P_{xx}(f) & \dfrac{P_{xx}(f)}{d} \\ \dfrac{P_{yy}(f)}{d} & P_{yy}(f) \end{vmatrix}. \quad (16)$$

Это матрица когерентности должна иметь неотрицательный детерминант для всех частот. Тогда квадрат модуля когерентности (КМК) может быть представлен в виде

$$\text{КМК}(f) = \left|\Phi_{xy}(f)\right|^2 =$$

$$=\frac{\left|\dfrac{P_{xx}(f)}{d}\right|^2}{P_{xx}(f)P_{yy}(f)}=\frac{\left|\dfrac{P_{yy}(f)}{d}\right|^2}{P_{xx}(f)P_{yy}(f)} \quad (17)$$

и фазовый спектр когерентности или «фазовый» спектр взаимного влияния сигналов:

$$\Theta(f)=arctg\left[\frac{Im\{\Phi_{xy}(f)\}}{Re\{\Phi_{xy}(f)\}}\right]. \quad (18)$$

Параметры взаимного влияния спектров сигналов

Сетка частот	25 кГц	12,5 кГц	10 кГц
Мощность сигнала	45дБ = 31,6 Вт	45дБ = 31,6 Вт	45дБ = 31,6 Вт
Мощность помехи по соседнему каналу	5,6дБ = 0,00363 Вт	17 дБ = 0,05 Вт	22,5 дБ
Ширина спектра «перекрытия»	17,5 кГц	22,5 кГц	75 кГц
Отношение сигнал/помеха	39,4дБ = 8705,23 раз	28 дБ = 25,1 раз	22,5 дБ

Величина КМК должна быть заключена между 0 (для частот, на которых отсутствует когерентность между каналами) и 1 (для частот, на которых каналы полностью когерентны в границах некоторых фиксированных фазовых соотношений). Таким образом, КМК можно использовать как для измерения сходства (как функции частоты) двух сигналов, так и для обнаружения общего сигнала в двух различных каналах. Фаза когерентности характеризует отставание или опережение по фазе в канале *x* по отношению к каналу *y* как функцию частоты.

На рис. 2 приведен пример взаимного влияния сигналов по соседнему каналу с КАМ-64 с сеткой частот 25 кГц.

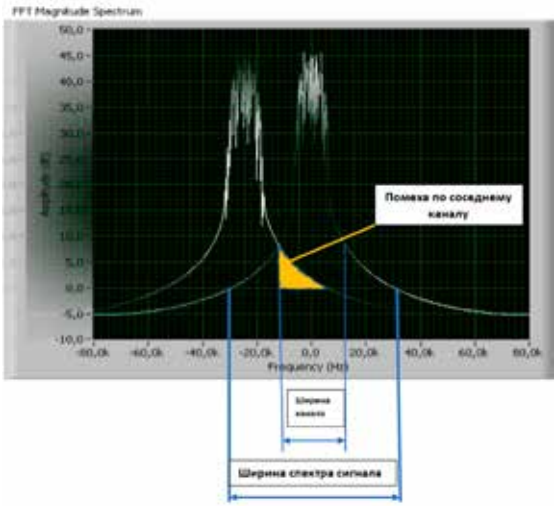


Рис. 2. Пример взаимного влияния сигналов по соседнему каналу с КАМ-64

В таблице приведены данные исследований «наложение спектров сигналов», вызывающее эффект взаимного влияния сигналов.

Заключение

Полученный модифицированный сегментированный метод Прони позволяет определить ширину спектра «перекрытия» соседнего канала связи и вычислить мощность помехи по соседнему каналу. Очень короткий временной ряд обнаружения взаимного влияния сигналов в частотно-фазовом пространстве определяется кодовым словом сигнального созвездия КАМ, что неприемлемо при использовании преобразований Фурье, использующих обобщенный анализ спектральных составляющих на интервале «окна» наблюдения. Разработанный метод позволяет оценить взаимное влияние сигналов как в частотном, так и «фазовом» спектре с использованием коэффициента взаимного влияния сигналов.

Список литературы

1. Нуссбаумер Г. Быстрое преобразование Фурье и алгоритмы вычисления сверток. М.: Наука, 2021. 248 с.

2. Вознесенский А.С. Средства передачи и обработки информации: учебник. М.: Издательский дом НИТУ «МИСиС», 2019. 210 с.

3. Овчарук В.Н. Спектральный анализ сигналов акустической эмиссии // Ученые заметки ТОГУ. 2013. Т. 4. № 4. С. 974–986.

4. Власов С.В., Власов В.И. Модель контроля безопасности информационных систем // Современные наукоемкие технологии. 2020. № 6. С. 31–37.

5. Марпл-мл. С.Л. Цифровой спектральный анализ и его приложения / Пер. с англ. М.: Мир, 1990. 584 с.

6. Иосифов В.П., Гулынина Е.В., Иосифова Л.Г. Модифицированный метод оценки спектральных характеристик с применением дискретных преобразований Уолша и метода параметрического спектрального анализа Прони // Инженерный вестник Дона. 2019. № 5. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n5y2019/5963 (дата обращения: 22.02.2023).

7. Barone P., Massaro E., Polichetti A. The segmented Prony method for the analysis of non-stationary time series. Astronomy and Astrophysics. December 1988. URL: https://www.researchgate.net/publication/234550726 (дата обращения: 22.02.2023).

8. Митрофанов Г.М., Смолин С.Н., Орлов Ю.А., Беспечный В.Н. Разложение и фильтрация Прони. Сериальное издание: Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири. 2020. Вып. 2 (41). С. 55–67.

9. Власов С.В., Иосифов В.П., Власов В.И. Автоматизированное устройство контроля взаимного влияния сигналов // Патент на изобретение RU 2785898 C1. Патентообладатель Власов С.В. 14.12.2022, Бюл. № 35.

УДК 621.315.55:537.632.3

МАГНИТНОЕ ПОЛЕ СИСТЕМЫ КРУГОВЫХ ТОКОВ

Глущенко А.Г., Глущенко А.А., Глущенко В.А.
ФГБОУ ВО «Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики», Самара, e-mail: gag646@yandex.ru

Рассмотрено магнитное поле, формируемое системами соосных кольцевых токов, описываемое уравнениями закона Био – Савара – Лапласа. Показано, что распределение магнитного поля существенно зависит от конфигурации системы и числа кольцевых токов. Установлено, что увеличение числа регулярно расположенных кольцевых токов витков проводника, характерное в конструкциях соленоидов, не является оптимальным для создания участков с однородным магнитным полем. Это позволяет повысить однородность поля специальным расположением кольцевых токов наряду с резким снижением веса конструкции. Получено аналитическое выражение для расчета магнитного поля, создаваемого системой соосных кольцевых токов (модель нерегулярного по диаметру и намотке соленоида), позволяющая оптимизировать конструкцию магнитной системы для создания локально однородного магнитного поля. Проведен расчет распределения магнитного поля по оси многоконтурной системы для различных сочетаний контуров с постоянным током (от одного до пяти). Показано, что существует оптимальная конфигурация структуры всего из трех кольцевых токов, позволяющая создать однородное магнитное поле на участке длиной, равной диаметру кольцевых токов. Полученные результаты позволяют существенно упростить конструкцию существующих устройств для создания однородного магнитного поля и одновременно улучшить однородность создаваемого ими поля.

Ключевые слова: магнитное поле, аналитический расчет, кольцевые токи

MAGNETIC FIELD OF A SYSTEM OF CIRCULAR CURRENTS

Gluschenko A.G., Gluschenko A.A., Gluschenko V.A.
Volga State University of Telecommunications and Informatics, Samara, e-mail: gag646@yandex.ru

The magnetic field formed by systems of coaxial ring currents, described by the equations of the Biot-Savart-Laplace law, is considered. It is shown that the distribution of the magnetic field essentially depends on the configuration of the system and the number of ring currents. It has been established that an increase in the number of regularly spaced ring currents of the conductor turns, which is typical in the designs of solenoids, is not optimal for creating sections with a uniform magnetic field. This makes it possible to increase the uniformity of the field by a special arrangement of ring currents, along with a sharp reduction in the weight of the structure. An analytical expression is obtained for calculating the magnetic field generated by a system of coaxial ring currents (a model of a solenoid irregular in diameter and winding), which makes it possible to optimize the design of the magnetic system to create a locally uniform magnetic field. The calculation of the distribution of the magnetic field along the axis of a multi-circuit system for various combinations of circuits with direct current (from one to five) is carried out. It is shown that there is an optimal configuration of the structure of only three ring currents, which makes it possible to create a uniform magnetic field in a section with a length equal to the diameter of the ring currents. The results obtained make it possible to significantly simplify the design of existing devices for creating a uniform magnetic field and at the same time improve the uniformity of the field they create.

Keywords: magnetic field, analytical calculation, ring currents

Расчет магнитного поля, создаваемого подвижными зарядами и токами различной конфигурации элементов, является одной из важных прикладных задач физики [1] из-за многочисленного применения в научных исследованиях, физике, технике различного направления [2, 3]. Основным требованием к конструкциям катушек, генерирующих постоянное магнитное поле, является обеспечение максимальной пространственной области однородности поля [4–6]. Для решения этой задачи предложено множество конструкций [7–9]. Виток Ампера (рис. 1–1) является простейшей конструкцией, порождающей однородное магнитное поле. Наиболее часто для генерации однородного магнитного поля используют катушки Гельмгольца, которые состоят из двух соосных витков тока одного радиуса (рис. 1–2). Установлено, что максимальный объем однородности магнитного поля достигается, когда расстояние между катушками приблизительно равно радиусу катушки.

Катушки Гельмгольца являются основным конструктивным элементом для множества систем, предназначенным для генерации однородного магнитного поля: катушек Бакера (3), катушек МакКихана (4), катушек Браунбека (5) и бипланарных катушек Моргана (6). Аналитическое исследование ограничивается расчетом ограниченного количества моделей [10–12] и проводится обычно численными методами [13–15], что затрудняет исследование физических свойств конкретных структур.

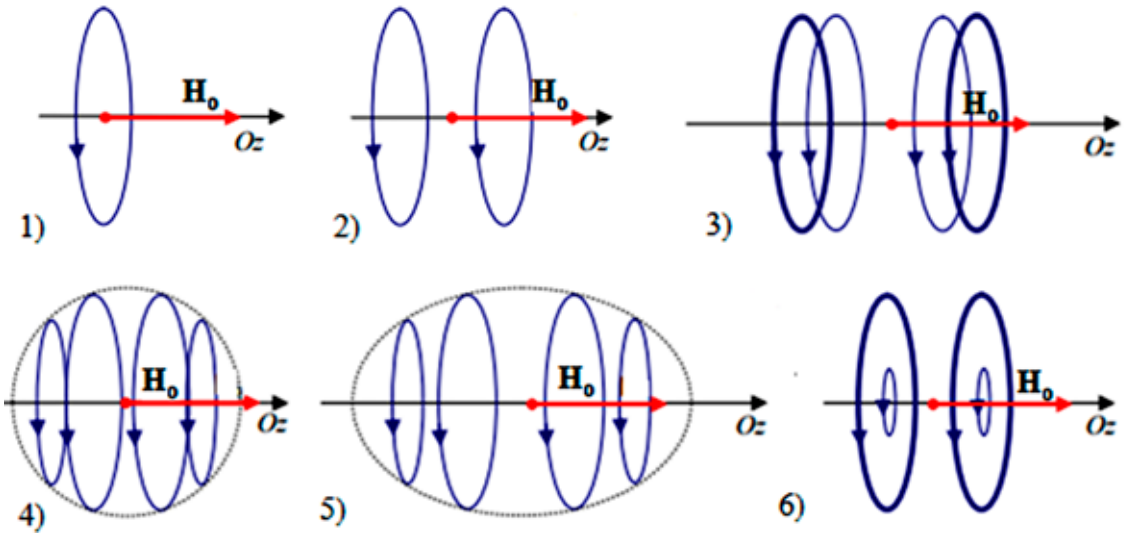


Рис. 1. Катушки для создания магнитного поля
(1 – виток Ампера, 2 – катушка Гельмгольца, 3 – катушки Бэкера,
4 – катушки МакКихана, 5 – Катушки Браунбека, 6 – бипланарные катушки Моргана)

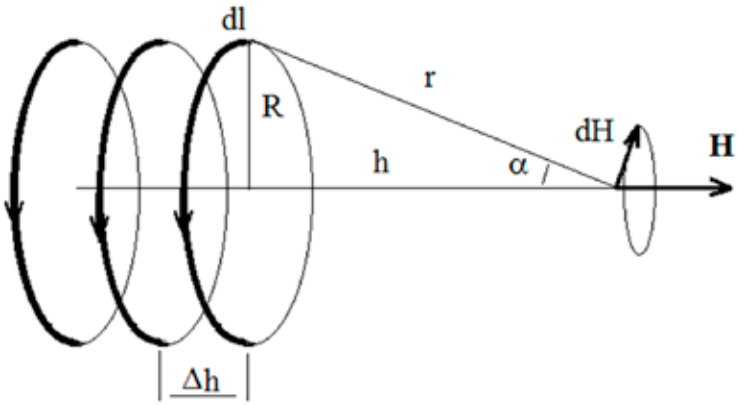


Рис. 2. Исследуемая структура

Целью исследования явилось получение аналитических соотношений для расчета напряженности магнитного поля, создаваемого системой конечного числа кольцевых токов; анализ однородности магнитного поля по оси структуры в зависимости от конфигурации системы для создания магнитных систем (формирующих локальные области с высокой однородностью магнитного поля, необходимые в различных областях измерительной [2–4] и функциональной техники [7, 8]).

Материалы и методы исследования

Исследуется однородность магнитного поля на оси нескольких систем кольцевых токов (рис. 2). Используется закон Био – Савара – Лапласа [1, 2] для нахождения магнитного поля $d\boldsymbol{H}$, создаваемого элементом тока $d\boldsymbol{l}$ (рис. 2) на оси кругового тока на расстоянии r от центра контура:

$$d\boldsymbol{H} = \frac{I\left[d\boldsymbol{l}, \boldsymbol{r}\right]}{r^3},$$

где I – ток, $\boldsymbol{r}$ – расстояние до точки наблюдения. Векторы $d\boldsymbol{H}$ перпендикулярны плоскостям, проходящим через элемент тока $d\boldsymbol{l}$ и точку наблюдения, в которой ищется поле. Вместе они образуют конус, результирующий вектор направлен вдоль оси контура. Каждый из векторов $d\boldsymbol{H}$ вносит в результирующий вектор вклад $d\boldsymbol{H}_{\parallel}$ по модулю равный

$$dH \sin\alpha = dH \cdot \frac{R}{r} = \frac{Idl}{4\pi} \cdot \frac{R}{r^3}.$$

Тогда на оси кольцевого тока магнитное поле направлено перпендикулярно плоскости кольца и определяется после интегрирования по контуру проводника [2] соотношением

$$H = \frac{IR}{4\pi r^3}\oint dl = \frac{IR^2}{2\left(R^2+h^2\right)^{3/2}}, \qquad (1)$$

R – радиус кольца тока, h – расстояние от точки наблюдения на оси кольца до центра кольца.

Распределение поля по оси, перпендикулярной кольцевому току и проходящей через центр кольца, показано на рис. 3. Для одного кольцевого тока (кривая 1) распределение поля характеризуется его существенной неоднородностью. Использование нескольких соосных круговых токов позволяет регулировать распределение поля вдоль оси в широких пределах. Если соосно расположено N (дискретное количество) кольцевых токов в общем случае с разными параметрами (токами I_i, радиусами R_i, расположенными на расстояниях h_i от точки наблюдения) магнитное поле определяется суперпозицией полей отдельных колец с, в общем случае, различными токами:

$$H = \sum_{i=1}^{N} H_i = \sum_{i=1}^{N} \frac{I_i R_i^2}{2\left(R_i^2+h_i^2\right)^{3/2}}. \qquad (2)$$

Результаты исследования и их обсуждение

Известно, что для создания локальных в пространстве участков однородного магнитного поля обычно используется магнитная система в виде соленоида – катушки в виде цилиндра постоянного радиуса с достаточно большим числом равномерно намотанных витков проводника, через которые пропускается ток. Это достаточно громоздкая, тяжелая и дорогостоящая конструкция (во многом из-за того, что для достижения нужных параметров часто используется медный провод, достаточно тяжелый и дорогой). Численный анализ соотношения (2) показывает, что высокая равномерность магнитного поля на оси системы колец с токами может быть обеспечена существенно меньшим по сравнению с соленоидом числом кольцевых токов, что позволяет в конечном итоге существенно снизить вес и стоимость магнитной системы.

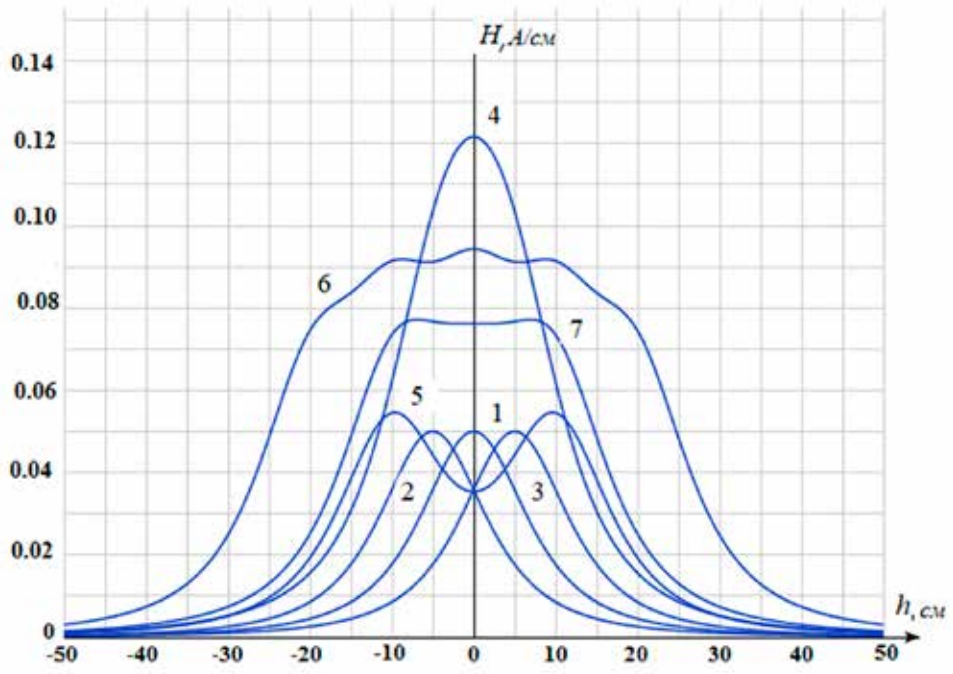


Рис. 3. Распределение поля по оси соосно расположенных тонких колец с одинаковым током и одинаковыми радиусами колец (R =10 см, Δh = 5, 10 см, 1 – распределение поля одиночного кольца с током, просматривается существенная неоднородность поля вдоль оси, 2 – распределение поля каждого из трех соосных колец, расположенных на расстоянии 5 см друг от друга, и их суммарное поле (кривая 4) также достаточно неоднородное вдоль оси структуры, 5 – поле двух колец с током, расположенных на Δh = 20 см друг от друга, 6 – поле пяти колец, расположенных по оси структуры с шагом 10 см, 7 – поле трех колец, расположенных с шагом 10 см и параметрами $R_3 = R_1 = 10$ см, $R_2 = 12$ см, Δh = 10 см)

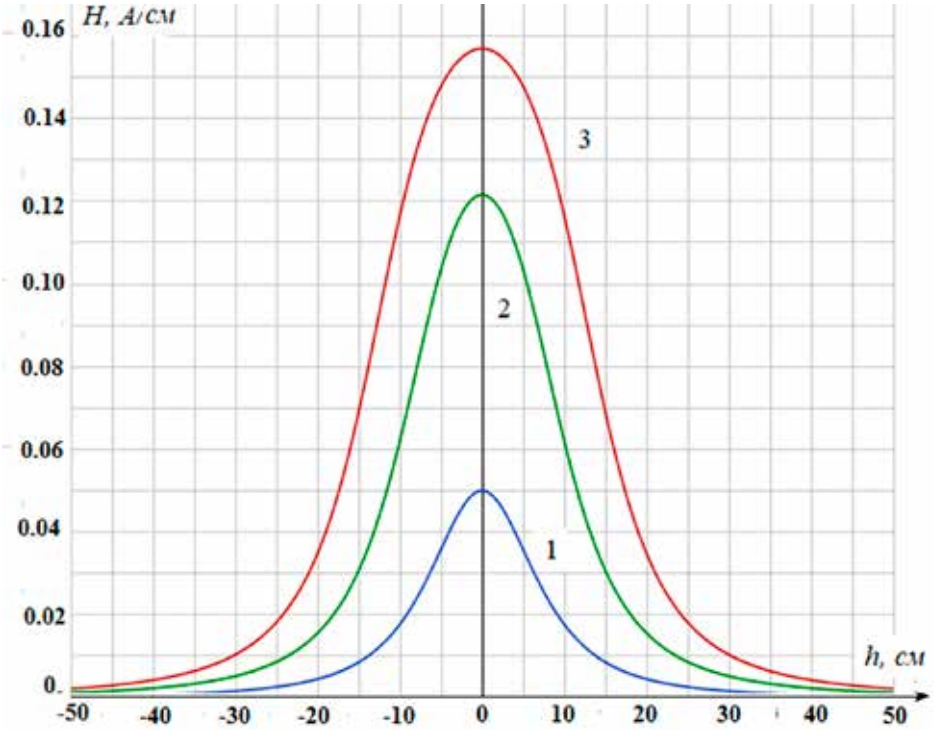


Рис. 4. Изменение поля по оси системы в зависимости от числа кольцевых витков с током (1 – один виток, 2 – три витка, 3 – пять витков)

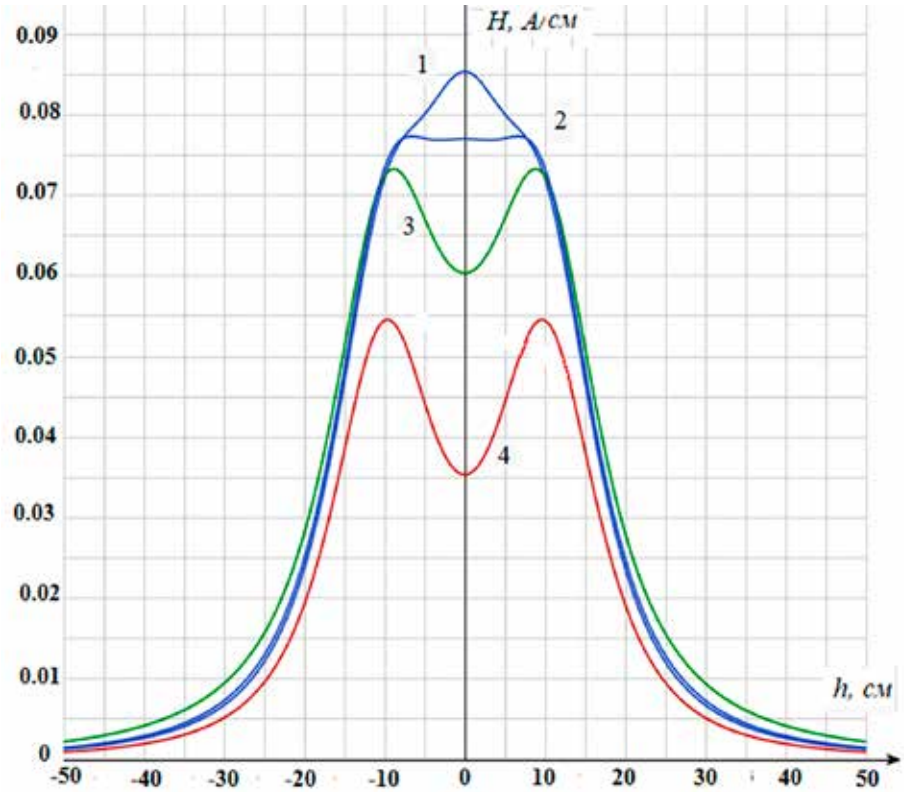


Рис. 5. Изменение структуры при изменении конфигурации системы, расстояние между соседними кольцами одинаково h =10 см (1 – три кольца одинакового радиуса 10 см, 2 – два крайних кольца того же радиуса, среднее кольцо имеет радиус 12 см, 3 – среднее кольцо имеет радиус 20 см, 4 – два кольца, расположенные на расстоянии 20 см друг от друга, среднее кольцо отсутствует)

На рис. 3 показано распределение поля для нескольких комбинаций кольцевых токов (величина тока выбиралась во всех случаях одинаковой).

Очевидно, что однородное поле может быть получено уже при использовании трех витков тока (катушка Максвелла) при изменении диаметра центрального кольца стоком (рис. 4 (кривая 7) $R_3 = R_1 = 10$ см, $R_2 = 12$ см, $\Delta h = 10$ см). Конструкция катушек Гельмгольца (кривая 5) также дает более высокую неоднородность магнитного поля вдоль оси системы, которая может быть уменьшена сближением колец с током и тем самым существенным уменьшением области однородного магнитного поля.

Зависимость распределения поля по оси системы соосных колец с током от числа колец показана на рис. 4 и показывает, что с ростом числа колец неоднородность поля сохраняет свой характер, хотя на расстоянии ~10 см уменьшается от 20% (один виток с током) до 3% (пять витков с током, расположенных с шагом 5 см). Влияние изменения радиуса центральных витков при неизменных концевых витках на структуру поля показано на рис. 5.

Кривая 1 соответствует конфигурации, когда система состоит из трех колец тока одинакового радиуса. В этом случае неоднородность поля в центре системы на расстоянии 20 см составляет ~10%. Увеличение диаметра среднего кольца до 12 см позволяет снизить неоднородность поля величины менее 1% (рис. 5, кривая 2). Дальнейшее увеличение радиуса среднего кольца увеличивает неоднородность поля (рис. 5, кривая 3 при радиусе 20 см).

Кривая 4 соответствует случаю отсутствия центрального кольца. Таким образом, введение центрального кольцевого тока позволяет существенно увеличить размеры области однородного поля. Проведенный анализ показывает, что дополнительные возможности регулировки и увеличения области однородного магнитного поля дает регулировка величины токов в токопроводящих кольцах, которую можно осуществлять с помощью специальных схем управления. Дополнительные возможности дает использование вместо дискретной системы кольцевых токов токопроводящих цилиндров с радиусом, меняющимся с высотой, анализ которых аналогичен описанному выше случаю с заменой операции суммирования (2) интегрированием по высоте цилиндрических источников поля.

Заключение

Рассмотрена задача расчета магнитного поля, возбуждаемого кольцевыми токами проводника круговой формы. Получены аналитические решения для системы N кольцевых соосно расположенных кольцевых токов различного диаметра. Показано, что высокая равномерность магнитного поля на оси системы колец с токами может быть обеспечена существенно меньшим по сравнению с соленоидом числом кольцевых токов, что позволяет в конечном итоге существенно снизить вес и стоимость магнитной системы. Эффект достигается не увеличением длины намотки витков соленоида, а регулировкой диаметра кольцевых токов.

Список литературы

1. Савельев И.В. Курс общей физики. Т. 2. СПб.: Лань, 2021. 500 с.

2. Фризен В.Э., Черных И.В., Бычков С.А., Тарасов Ф.Е. Методы расчета электрических и магнитных полей. Екатеринбург: УрФУ, 2014. 176 с.

3. Зегря Г.Г., Векслер М.И., Смирнова И.Г., Устинова И.А. Расчет стационарных электрических и магнитных полей. СПб.: Университет ИТМО, 2019. 98 с.

4. Jefimenko O. New method for calculating electric and magnetic fields and forces. Americ Journal of Physics. 1983. No. 51. P. 545. DOI: 10.1119/1.13200.

5. Schill R.A. General relation for the vector magnetic field of a circular current loop: a closer look. Magnetics. IEEE Transactions on Issue. 2003. Vol. 39. No. 2. P. 961. DOI: 10.1109/TMAG.2003.80859.

6. Barker J.R. The Magnetic Field Inside a Solenoid. British Journal of Applied Physics, 1950. Vol. 1. No. 3. P. 65–67. DOI: 10.1088/0508-3443/1/3/303.

7. Prigozhin L., Sokolovsky V. 3D Magnetization Problems in Superconductivity: Solution by the FFT-based Method. WSEAS Transactions on Circuits and Systems archive. 2019. No. 18. P. 212–219.

8. Frey N.C., Horton M.K., Munro J.M., Griffin S.M., Persson K.A., Shenoy V.B. High through put search for magnetic and topological order in transition metal oxides. Sci. Adv. 2020. № 6. P. eabd1076. DOI: 10.1126/sciadv.abd1076.

9. Behtouei M., Spataro B., Faillace L., Carillon M., Comelli M., Palumbo L., Variola A., Migliorati M. A novel method to calculate the magnetic field of a solenoid generated by a surface current element. Waves in Random and Complex Media. 2022. DOI: 10.1080/17455030.

10. Глущенко А.Г., Глущенко Е.П., Ванькова А.Е. Магнитное поле тонких полосок тока // Научное обозрение. Технические науки. 2021. № 6. С. 5–9.

11. Глущенко А.А., Глущенко А.Г., Глущенко Е.П. Аналитический расчет магнитной индукции в центре планарных спиралей // Научное обозрение. Технические науки. 2020. № 1. С. 10–14.

12. Gluschenko A.A., Gluschenko A.G., Gluschenko E.P. Analytical solution of the problem of calculating a magnetic field in the center of a correct polygon // Актуальные научные исследования в современном мире. 2019. № 12 (56). Ч. 1. С. 6–12.

13. Granum P., Madsen M., McKenna J., Hodgkinson D. Efficient calculations of magnetic fields of solenoids for simulations. 2022. DOI: 10.1016/j.nima.(2022).166706.

14. Andreeva E.G., Tatevosyan A.A. Mathematical Description of Solution of the Three-Dimensional Boundary Value Problem for the Stationary Magnetic Field in the Cylindrical Coordinate System. Journal of Physics: Conference Series. 2020. № 1441 (1).

15. David Romero-Abad, José-Pedro Reyes-Portales, José-Luis La Rosa-Navarro, Roberto Suárez-Córdova. Elliptic Helmholtz coil. Rev. Bras. Ensino Fís. 2022. № 44. DOI: 10.1590/1806-9126-RBEF-2022-0115.

УДК 551.46.09

ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ОБРАЗЦА ПОДСИСТЕМЫ ЦИФРОВОЙ ГИДРОАКУСТИЧЕСКОЙ СВЯЗИ ОКЕАНОЛОГИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ

[1]Лискин В.А., [1,2]Римский-Корсаков Н.А., [2]Гамазов Н.И.

[1]ФГБУН Институт океанологии им. П.П. Ширшова Российской академии наук, Москва, e-mail: nrk@ocean.ru;

[2]ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана», Москва, e-mail: nrk@ocean.ru, nick_gamazov@mail.ru

Системы передачи информации по гидроакустическому каналу можно классифицировать по различным признакам: дальности действия, скорости передачи данных, вероятности появления ошибок, потребляемой мощности и т.д. Методы передачи информации в водной среде непосредственно связаны с характеристиками самого гидроакустического канала связи. Практически во всех случаях основными особенностями гидроакустического канала связи является наличие нескольких путей (лучей) распространения звука от передающего модуля к приемному модулю связи, а также наличие допплеровского сдвига частоты принимаемого сигнала. Кратко перечислим наиболее распространенные методы компенсации искажений сигнала в зависимости от типа замираний. К таковым относятся: разделение лучей во временной области путем расширения спектра сигнала, прием с пространственным разнесением, выравнивание спектра, расширение спектра, использование помехоустойчивой системы демодуляции, введение избыточности в передаваемое сообщение. Использование направленных антенн в ряде случаев позволяет превратить многолучевой канал, в один или несколько однолучевых каналов. В качестве направленной антенны может быть использована антенна как с фиксированной, так и с перестраиваемой диаграммой направленности. В результате проведенного анализа различных методов передачи данных по гидроакустическому каналу связи, реализована сверхмалопотребляющая и весьма помехоустойчивая система гидроакустической связи, предназначенная для передачи команд и получения сжатой телеметрической информации даже в условиях быстрых замираний. Отметим, что испытания образца подсистемы гидроакустической связи продемонстрировали, что она пригодна для обеспечения надежного обмена цифровой информацией с автономными подводными аппаратами на значительных расстояниях в условиях многолучевого распространения звука при чрезвычайно низком энергопотреблении приемной части системы.

Ключевые слова: гидроакустический, канал, спектр, помехоустойчивость, направленные, антенны

RESEARCH AND DEVELOPMENT OF AN EXPERIMENTAL SAMPLE OF A DIGITAL HYDROACOUSTIC COMMUNICATION SUBSYSTEM OF OCEANOLOGICAL COMPLEXES

[1]Liskin V.A., [1,2]Rimskiy-Korsakov N.A., [2]Gamazov N.I.

[1]Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Science, Moscow, e-mail: nrk@ocean.ru;

[2]Bauman Moscow State Technical University, Moscow, e-mail: nrk@ocean.ru, nick_gamazov@mail.ru

Systems for transmitting information through a hydro acoustic channels, can be classified according to various criteria: range, data transfer rate, error probability, power consumption, etc. Methods for transmitting information in the aquatic environment, are directly related, to the characteristics of the hydroacoustic communication channel itself. In almost all cases, the main features of a hydroacoustic communication channel are the presence of several paths (beams) of sound propagation from the transmitting module to the receiving communication module, as well as the presence of a Doppler frequency shift of the received signal. Let us briefly list the most common methods for compensating signal distortions depending on the type of fading. This is the separation of beams in the time domain by spreading the signal spectrum, receiving with spatial diversity, spectrum equalization, spreading the spectrum, using a noise-immune demodulation system, introducing redundancy into the transmitted message. The use of directional antennas in some cases makes it possible to turn a multibeam channel into one or more single-beam channels. As a directional antenna, an antenna with both a fixed and a tunable radiation pattern, can be used. As a result, of the analysis of various methods of data transmission over a hydroacoustic communication channel, an ultra-low-power and very noise-resistant hydroacoustic communication system has been implemented, designed to transmit commands and receive compressed telemetry information even in conditions of fast fading. It should be noted that tests of a sample of the hydroacoustic communication subsystem demonstrated that it is suitable for ensuring reliable exchange of digital information with autonomous underwater vehicles at considerable distances in conditions of multipath sound propagation with extremely low power consumption of the receiving part of the system.

Keywords: hydroacoustic, channel, spectrum, noise immunity, directional, antennas

Системы передачи информации по гидроакустическому каналу можно классифицировать по различным признакам: дальности действия, скорости передачи данных, вероятности появления ошибок, потребляемой мощности и т.д. При классификации по скорости передачи данных и вероятности появления ошибок все системы передачи информации условно могут быть разделены на следующие две группы: системы,

используемые для телеуправления и получения информации о состоянии подводных аппаратов и станций, и системы, предназначенные для передачи значительных объемов информации с подводного аппарата (станции) или передачи на подводный аппарат (станцию). Далее рассмотрим методы передачи сигналов по гидроакустическому каналу в системах гидроакустической связи со сверхмалым потреблением, предназначенных для телеуправления и получения информации о состоянии подводных аппаратов на расстоянии до нескольких километров при наличии сильных искажений в гидроакустическом канале.

Целью исследований является разработка и создание современных методов цифровой гидроакустической связи. Методы передачи информации по гидроакустическому каналу в водной среде непосредственно связаны с характеристиками самого гидроакустического канала связи. Практически во всех случаях основными особенностями гидроакустического канала связи является наличие нескольких путей (лучей) распространения звука от передающего модуля к приемному модулю связи, а также наличие допплеровского сдвига частоты принимаемого сигнала. При относительно небольших расстояниях наличие дополнительных лучей вызвано, как правило, однократным или многократным отражением звука от дна и поверхности воды. Сигналы, отраженные от дна и поверхности воды, интерферируют с прямым лучом и друг с другом. Поскольку копии сигнала, распространяющиеся по нескольким путям (лучам), имеют различные задержки, интерференция в точке приема приводит к искажению формы сигнала, что в свою очередь уменьшает отношение сигнал/шум. Поэтому пропускная способность системы связи и вероятность ошибки ограничиваются интенсивностью, задержками и скоростью изменения задержек дополнительных лучей в точке приема. В зависимости от соотношения задержек дополнительных лучей с частотно-временными характеристиками передаваемого сигнала, можно выделить следующие виды искажений сигнала в точке приема. Гладкие замирания, а именно изменение амплитуды сигнала в точке приема, вызванное внутрисимвольной интерференцией. В этом случае многолучевая задержка меньше длительности одного элемента сигнала. С другой стороны, частотно-селективные замирания – вид замираний, вызванный межсимвольной интерференцией. В этом случае многолучевая задержка больше длительности одного элемента сигнала. Наличие быстрых замираний – это вид искажений принимаемого сигнала и возникает в том случае, когда интервал корреляции замираний меньше длительности элемента сигнала, т.е. быстрые замирания приводят к частичному или полному разрушению когерентной структуры сигнала. Кроме того, этот вид замираний приводит к наибольшим искажениям в принимаемом сигнале. Следует отметить, что в зависимости от профиля дна, состояния поверхности воды, взаимного расположения и скорости перемещения корреспондирующих точек, а также частотно-временных характеристик передаваемого сигнала, в связном гидроакустическом канале могут возникать любые из перечисленных искажений. Кратко перечислим наиболее распространенные методы компенсации искажений гидроакустического сигнала в зависимости от типа замираний. Это разделение лучей во временной области путем расширения спектра сигнала, прием с пространственным разнесением, выравнивание спектра, расширение спектра, использование помехоустойчивой системы демодуляции, введение избыточности в передаваемое сообщение, комбинация избыточности и некогерентного приема [1, 2].

Материалы и методы исследования

Использование направленных антенн в ряде случаев позволяет превратить многолучевой канал в один или несколько однолучевых каналов. В качестве направленной антенны может быть использована антенна как с фиксированной, так и с перестраиваемой диаграммой направленности. Использование антенны с фиксированной диаграммой направленности позволяет создать простую по конструкции, но весьма неудобную в эксплуатации систему гидроакустической связи. Использование антенны с перестраиваемой (адаптивной) диаграммой направленности в ряде случаев может оказаться весьма эффективным средством борьбы с многолучевостью, однако при малой разнице в углах прихода различных лучей приемная гидроакустическая антенна должна иметь значительные габариты, а адаптивный синтез диаграммы направленности требует значительного объема вычислений. Как можно понять из сделанного краткого обзора, а также многочисленной литературы, посвященной методам передачи данных по многолучевым каналам, цифровая гидроакустическая связь подводного аппарата, как правило, состоит из двух подсистем: телеуправления и передачи данных. Подсистема телеуправления характеризуется малым энергопотреблением, имеет сравнительно небольшую производительность и сохраняет работоспособность в ши-

роком диапазоне изменений характеристик гидроакустического канала. Подсистема передачи данных функционирует со значительно большей производительностью, однако обладает повышенной чувствительностью к характеристикам гидроакустического канала.

Рассмотрим функциональную схему цифровой связи. Основные связи гидроакустических систем телеуправления и передачи данных между собой и с другими устройствами подводного аппарата схематически представлены на рис. 1. Система телеуправления используется для включения или выключения, а также для изменения режима работы системы передачи данных, датчиков и других систем подводного аппарата. Кроме того, низкоскоростной канал телеуправления может быть использован для получения информации о состоянии различных подсистем подводного аппарата. В канале телеуправления для компенсации многолучевости в условиях сильного изменения характеристик гидроакустического канала, используется комбинация избыточности и некогерентного приема сигнала. Поскольку такой метод приема не позволяет передавать данные со значительной скоростью, в гидроакустической системе передачи данных должен быть использован другой метод компенсации многолучевости, например эквалайзер.

Выполнено моделирование системы цифровой гидроакустической связи. Передача цифровой информации используется в радиосвязи уже много лет и в последнее время широко вошла в наш быт (например, в сотовых телефонах). Однако в гидроакустике она стала применяться лишь в последние годы. Это связано с особенностями распространения звука в океане, скорость которого на несколько порядков ниже скорости электромагнитных волн. Два фактора особенно важны в этой связи: во-первых, это многолучевое распространение звука в толще воды по различным путям и вследствие многократных донно-поверхностных отражений. В результате основной помехой в этом случае является не аддитивный шум, а реверберация звука, связанная с самим сигналом. Поэтому увеличение мощности сигнала приводит к пропорциональному увеличению помехи и не улучшает отношение сигнал/шум. Для радио и телефонной связи этот фактор также имеет место, в частности, как результат многократных отражений, однако затягивание сигнала за счет реверберации здесь невелико. Это затягивание измеряется в величинах количества интервалов временной корреляции огибающей сигнала и составляет единицы, в то время как для гидроакустики затягивание сигнала составляет десятки и сотни интервалов. Разработанный уже давно в радиосвязи метод так называемой «адаптивной эквализации», в котором адаптивно строится обратный фильтр, позволяющий восстановить исходный сигнал, искаженный многолучевым распространением и многократными отражениями, оказывается для гидроакустики в ряде случаев неэффективным вследствие плохой сходимости адаптивного фильтра при длительных растяжениях сигнала. В особенности это относится к распространению в мелком море. Второй важнейший фактор – это значительный эффект Допплера за счет движения излучателя и/или приемника, а также временных изменений среды, в частности движения поверхности океана, который из-за низкой скорости звуковых волн также на много порядков выше, чем для радиоволн. Метод адаптивной эквализации для эффективной работы требует малости величины произведения временного затягивания сигнала ΔT и допплеровского расширения ΔF ($\Delta T * \Delta F << 1$ (~ 10^{-3}).

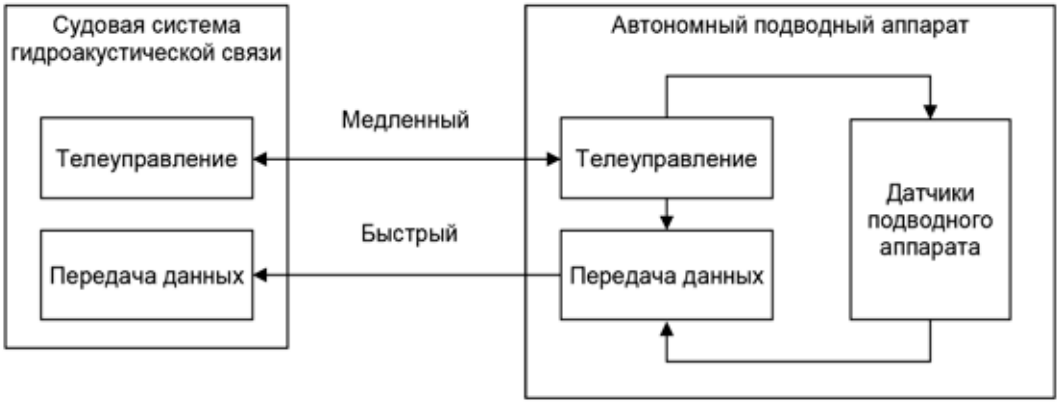


Рис. 1. Основные связи гидроакустических систем телеуправления и передачи данных между собой и с другими устройствами подводного аппарата

В ряде условий для гидроакустики (мелкое море, сильное волнение, большие скорости носителей) это условие может не выполняться. Большинство разработанных модемов для гидроакустической связи работают именно при этом условии, в частности при предположении, что допплеровские смещения хотя и имеются, но они одинаковы для всех путей распространения сигнала [3, 4].

Результаты исследования и их обсуждение

В результате проведенного анализа различных методов передачи данных по гидроакустическому каналу связи появилась возможность создания сверхмалопотребляющей и в то же время весьма помехоустойчивой системы гидроакустической связи, предназначенной для передачи команд и получения сжатой телеметрической информации даже в условиях быстрых замираний. Для компенсации быстрых замираний принимаемого сигнала используется комбинация введения избыточности в передаваемый сигнал и его некогерентного приема. Несмотря на то, что подобная система не использует энергии всех лучей в точке приема и обладает относительно невысокой пропускной способностью, она способна обеспечивать связь практически в любых условиях многолучевого распространения при использовании относительно несложного алгоритма приема. Простота алгоритма приема информации в сочетании с современными сверхмалопотребляющими цифровыми и аналоговыми компонентами приводит к существенному снижению энергопотребления гидроакустического приемника и позволяет создавать автономные устройства, не требующие смены источников питания в течение года, а в случае необходимости и нескольких лет. Конструктивно разработанный макетный образец системы гидроакустической связи (рис. 2) состоит из следующих узлов:

− Гидрофон.

− Гидрофонный усилитель.

− Микропроцессорный модуль со схемой управления усилителем мощности и встроенным аналого-цифровым преобразователем.

− Усилитель мощности гидроакустического излучателя.

− Гидроакустический излучатель.

− Источник питания.

В качестве гидрофона может быть использован практически любой гидрофон с чувствительностью не менее нескольких десятков мкв/Па и рассчитанный для работы на тех глубинах, на которых предполагается эксплуатация системы гидроакустической связи. В данном случае был использован гидрофонный модуль, имеющий чувствительность 120 мкв/Па и рассчитанный на работу на глубине до 6000 м. Для снижения уровня интермодуляционных искажений при большом уровне сигнала, в качестве гидрофонного усилителя использован полосовой усилитель со ступенчато изменяемым коэффициентом усиления 60 или 80 дБ. Известны два основных способа реализации полосовых усилителей: с использованием активных полосовых фильтров или с использованием пассивных полосовых фильтров. Основным преимуществом активных полосовых фильтров является отсутствие катушек индуктивности, а недостатком является значительно большее энергетическое потребление по сравнению с пассивными фильтрами. Поскольку в описываемой системе одной из основных характеристик является потребляемая мощность в режиме приема, гидрофонный усилитель реализован с использованием пассивных полосовых фильтров. В качестве усилительных элементов использованы супер-бета-транзисторы, способные давать усиление в несколько десятков децибел при работе в килогерцовом диапазоне частот, потребляя при этом ток не более 10–20 мка. На рис. 3 приведена блок-схема усилителя.

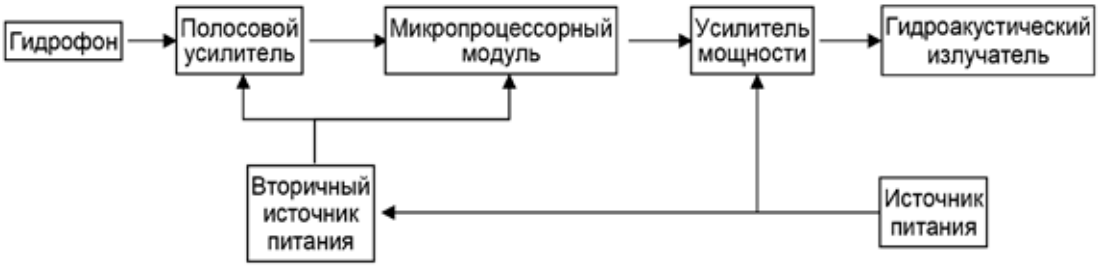


Рис. 2. Блок-схема системы гидроакустической связи

Рис. 3. Блок-схема усилителя

Полосовые усилительные каскады № 1 и 2 имеют коэффициент усиления 30 дБ и полосу пропускания 300 Гц. Для уменьшения неравномерности частотной характеристики усилителя в рабочем диапазоне частот, центральные частоты полосовых каскадов сдвинуты друг относительно друга. Коэффициент усиления апериодического усилительного каскада устанавливается равным 0 или 20 дБ с помощью перемычки. Выходной буферный каскад предназначен для согласования выходного сопротивления полосового усилительного каскада № 2 с входным сопротивлением аналого-цифрового преобразователя. Усиление этого каскада равно 0 дБ. Средняя частота полосы пропускания гидрофонного усилителя равна 7000 Гц, ширина полосы пропускания 800 Гц. Рабочее напряжение питания составляет 1.8–3.6 В. Потребляемый ток составляет не более 70 мка.

Весь процесс обработки принимаемых сигналов, включая аналого-цифровое преобразование, а также генерация передаваемых сигналов производится с помощью микропроцессорного модуля. Математическое обеспечение микропроцессорного модуля, реализующее алгоритм гидроакустической связи, включает в себя ряд программных модулей (модули: «main.c», «adc12.c», «lkhi.c»). В программном модуле «main.c» вызывается ряд функций, обеспечивающих начальную инициализацию встроенной периферии микропроцессора (генераторы тактовых частот, аналого-цифровой преобразователь, порты ввода-вывода, последовательный интерфейс и т.д.). Кроме того, устанавливаются начальные значения некоторых переменных. Модуль «adc12.c» содержит функцию начальной инициализации аналого-цифрового преобразователя микропроцессора. Модуль «lkhi.c» содержит функции начальной инициализации встроенных таймеров, а также функцию обработки прерываний от аналого-цифрового преобразователя со средней частотой 28 кГц (учетверенная несущая частота). Частота прерываний задается с помощью программно-аппаратного частотного синтезатора. В этом же программном модуле производится предварительная фильтрация (интегрирование) отсчетов, поступающих с аналого-цифрового преобразователя. В качестве усилителя мощности может быть использован практически любой ключевой или линейный усилитель с выходной мощностью в несколько десятков ватт, способный работать на гидроакустический излучатель. В качестве гидроакустического излучателя пригоден любой излучатель с рабочей полосой частот 6500–7500 Гц, хорошим КПД и рассчитанный на мощность не менее чем несколько десятков ватт. Напряжение питания как цифровой, так и аналоговой части (за исключением усилителя мощности) может находиться в пределах 1.8–3.6 В. Потребляемый от этого источника питания ток не более 2 ма. Характеристики источника питания усилителя мощности определяются напряжением питания и током потребления усилителя мощности [5].

Заключение

Одним из возможных применений создаваемой системы гидроакустической связи является ее использование для дистанционного управления режимами работы и получения информации о состоянии, например, автономной донной станции. Разработанная гидроакустическая связь смонтирована в комплексе с усовершенствованным блоком управления в унифицированном сменном модуле донной станции. Была также разработана усовершенствованная судовая часть системы гидроакустической связи. Разработан и создан новый вариант приемно-излучающей гидроакустической антенны: обновлены схемы излучателя, работающие в требуемом диапазоне частот, обновлены также гидрофоны, гидрофонные предусилители, изменена компоновка антенны. Выполнена унификация программного обеспечения и электронного оборудования. В качестве судового блока гидроакустиче-

ской связи оказалось возможным использовать блок, идентичный блоку гидроакустической связи автономной донной станции. Комплекс гидроакустической связи, устанавливаемый на судне, отличается от блока донной станции только конструкцией гидроакустической антенны, а также тем, что к судовому блоку подключен компьютер для визуализации информации, поступающей с донной станции, а также для ввода оператором команд, которые необходимо передать на автономную донную станцию. Испытания подсистемы гидроакустической связи показали, что предлагаемый вариант подсистемы надежно обеспечивает обмен цифровой информацией с автономными подводными аппаратами на значительных расстояниях в условиях многолучевого распространения звука при чрезвычайно низком (2–8 мВт в зависимости от напряжения источника питания) энергопотреблении приемной части системы.

Список литературы

1. Шрейдер Ал.А., Шрейдер А.А., Клюев М.С., Евсенко Е.И. Высокоразрешающая геоакустическая система для геолого-археологического изучения дна // Процессы в Геосредах. 2016. № 2. С. 156–161.

2. Греков А.Н., Греков Н.А., Сычев Е.Н. Профилографы скорости звука и алгоритм определения плотности воды для океанографического диапазона // Системы контроля окружающей среды. Севастополь: ИПТС, 2017. Вып. 8 (28). С. 11–15.

3. Пронин А.А. Методика сбора и представления материалов видеосъемки дна с помощью необитаемого подводного аппарата «Видеомодуль» // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2017. № 12–1. С. 142–147.

4. Борисов А.Н., Борисова М.А. Моделирование управляемого движения подводного аппарата с параллельной бортовой вычислительной средой // Сборник трудов конференции «Транспорт России. Проблемы и перспективы». 2017. С. 457–460.

5. Шурыгин В.А. Технология применения подводных шагающих роботизированных платформ при освоении подводных (подледных) месторождений углеводородов // Технические проблемы освоения Мирового океана: материалы VII Всероссийской научно-технической конференции. Владивосток. 2017. Т. 7. С. 43–47.

УДК 004.896

МЕТОД СБОРА И ОБРАБОТКИ ДАННЫХ В СЕТЯХ ПРОМЫШЛЕННОГО ИНТЕРНЕТА ВЕЩЕЙ

Массеров Д.Д., Массеров Д.А.

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Мордовский государственный университет имени Н.П. Огарёва», Саранск, e-mail: resurs2003@bk.ru

Основной целью данной работы является повышение эффективности сбора и обработки информации в промышленном интернете вещей за счет использования модифицированного метода сбора и обработки данных, называемого Protobuf. В статье рассматривается сравнение различных методов сбора и обработки информации для установления усовершенствования по сравнению с ними. Внедрение IIoT (промышленного интернета вещей) позволяет пользователям использовать данные для предиктивного анализа, сокращения времени простоя оборудования, централизованного хранения и удаленного мониторинга активности. С внедрением умного производства информация, полученная от устройств, должна быть обработана, что требует значительного времени и памяти для хранения накопленной информации. В связи с этим возникает задача минимизации времени обработки и размера файла для передачи по сети. В работе предложен метод сериализации и десериализации данных на основе метода Protobuf, который позволяет повысить эффективность обработки информации по временным показателям и уменьшить объем передаваемой информации. В результате работы показано увеличение скорости обработки информации, получаемой от IIoT оборудования за счет использования механизма сериализации и уменьшения размера файла информации, передаваемой по сети.

Ключевые слова: IIoT, интернет вещей, десериализация, сериализация, обработка информации, умный концентратор

DATA COLLECTION AND PROCESSING METHOD IN INDUSTRIAL INTERNET OF THINGS NETWORKS

Masserov D.D., Masserov D.A.

Ogarev Mordovia State University, Saransk, e-mail: resurs2003@bk.ru

The main purpose of this paper is to improve the efficiency of information collection and processing in the Industrial Internet of Things through the use of a modified method of data collection and processing, called Protobuf. The paper discusses the comparison of different methods of collecting and processing information to establish improvements over them. The implementation of the IIoT (Industrial Internet of Things) allows users to use data for predictive analysis, reduced equipment downtime, centralized storage and remote activity monitoring. With the introduction of smart manufacturing, information received from devices must be processed, which requires significant time and memory to store the accumulated information. This raises the challenge of minimizing the processing time and file size for transmission over the network. In this paper, we propose a method for serialization and deserialization of data based on the Protobuf method, which can improve the efficiency of information processing in terms of time and reduce the volume of transmitted information. As a result of the work it is shown to increase the speed of processing the information received from IIoT equipment by using the mechanism of serialization and reducing the file size of the information transmitted over the network.

Keywords: IIoT, Internet of things, deserialization, serialization, information processing, smart hub

Существует три основных метода [1] сбора и обработки данных, которые были проанализированы: метод сбора и обработки информации с помощью шлюза, метод сбора и обработки информации с помощью умного концентратора, метод сбора и обработки информации на базе промышленных шин. Метод сбора и обработки информации с использованием умного концентратора имеет преимущество перед другими методами, так как помогает модернизировать и достичь высокого уровня производства в обрабатывающей промышленности.

Устройства и датчики генерируют и собирают огромное количество данных, общий объем собранных данных может быть настолько велик, что передать их по сети для дальнейшего анализа может быть невозможно. Датчики могут передавать эту информацию каждые 30 с, и таких устройств может быть несколько сотен. Это может быть лишь один из десятков типов датчиков, имеющих различные типы данных, которые вместе представляют собой огромный неоднородный набор информации из многих источников. Это приводит к высоким затратам на сбор данных и интеграцию оборудования с системой обработки данных. Также большой проблемой является недостаток вычислительной мощности и ресурсов хранения для выполнения сложных задач анализа и машинного обучения [2].

Кроме того, большие объемы данных трудно обрабатывать, поскольку требуется больше времени для ответа. Таким образом, передача важных данных через интернет для проведения важного анализа часто становится проблемой [3].

Метод сбора и обработки информации с помощью умного концентратора имеет

преимущество перед другими методами, так как помогает в модернизации и достижении высокого уровня производства в обрабатывающей промышленности. Это достигается благодаря тому, что основным элементом данного метода является умный концентратор, который предоставляет удобные решения для масштабирования системы с помощью новых устройств, осуществляет сбор и форматирование данных с использованием процессов сериализации, что уменьшает объем информации, которую необходимо передавать на облачную платформу для дальнейшего анализа.

Материалы и методы исследования

I. Метод сбора и обработки информации с помощью шлюза

Этот метод содержит три модуля: модуль умного объекта, модуль шлюза и модуль центра управления (сервера). Каждый модуль является многоуровневым (включая сенсорный, сетевой и прикладной уровни) и выполняет определенные функции для поддержки мониторинга взаимозависимой среды [4].

Модуль шлюза является мостом между умными объектами и центром управления. С другой стороны, в случае когда умные объекты не имеют доступного прямого соединения для прямой связи с центром управления посредством телекоммуникационных технологий, шлюзы будут соединять эти умные объекты с центром управления. Также модуль шлюза будет выполнять обязанности прикладного уровня при отсутствии прикладного уровня в модуле умного объекта.

II. Метод сбора и обработки информации с помощью умного концентратора

Метод сбора и обработки информации, позволяющий использовать информационную и операционную инфраструктуру для улучшения управления, мониторинга и контроля существующих и новых устройств. Он состоит из трех основных компонентов: слой устройств, умный концентратор, облачная платформа микросервисов. Представленный метод также может быть реализован на существующих умных предприятиях для оптимизации управления умным оборудованием и повышения эффективности производства [5].

Умный концентратор может выступать в качестве шлюза для существующих устройств IIoT. Функционально концентратор предлагает простой и удобный способ предварительной обработки данных, обмена данными и связи между существующими устройствами IIoT и серверной платформой, что означает, что использование умного концентратора может обновить или улучшить каналы обмена данными и связи.

III. Метод сбора и обработки информации на основе промышленных шин

Этот метод осуществляется на четырех уровнях: уровень устройств, датчиков и механизмов, уровень поставщика данных, уровень кроссплатформенного программного обеспечения и уровень приложений [6].

Уровень поставщика данных предназначен для приема данных от промышленных шин и передачи их на уровень кроссплатформенного программного обеспечения, которое содержит программный коммуникационный модуль для каждой промышленной шины.

Назначение этого модуля – реализация цикла сбора информации. Интерфейс для приема и передачи данных используется поставщиком данных, отдельным программным модулем, для получения данных из промышленных сетей и хранения их в буферном кэше. Эта память используется для более быстрого реагирования на запросы с уровня промежуточного ПО.

Результаты исследования и их обсуждение

Исходя из выбранного прототипа, модифицированный метод сбора и обработки информации выглядит следующим образом (рис. 1). Основой сбора данных являются датчики, механизмы, которые разбросаны в определенной географической зоне. Они обмениваются данными по сети для автономного сбора данных и передачи их на специальный узел, который считается промежуточной точкой для сбора информации.

Для хранения и передачи информации, полученной от устройств, используется механизм сериализации, который позволяет уменьшить размер передаваемых файлов, что в свою очередь снижает нагрузку на сеть и сокращает время, необходимое для передачи информации для дальнейшего анализа.

Информация, полученная от датчиков, механизмов, устройств, передается в умный концентратор, используя протокол интернета вещей CoAP или MQTT.

Проанализированная на микросервисной платформе IIoT, информация может быть передана в другие информационные или операционные системы или сохранена в базе данных.

1. Сбор данных

В зависимости от требований к сбору информации передача собранных данных может осуществляться периодически или по событию. Умный концентратор – это узел с двумя и более сетевыми интерфейсами, он собирает и выполняет промежуточную обработку данных, полученных от устройств сбора информации.

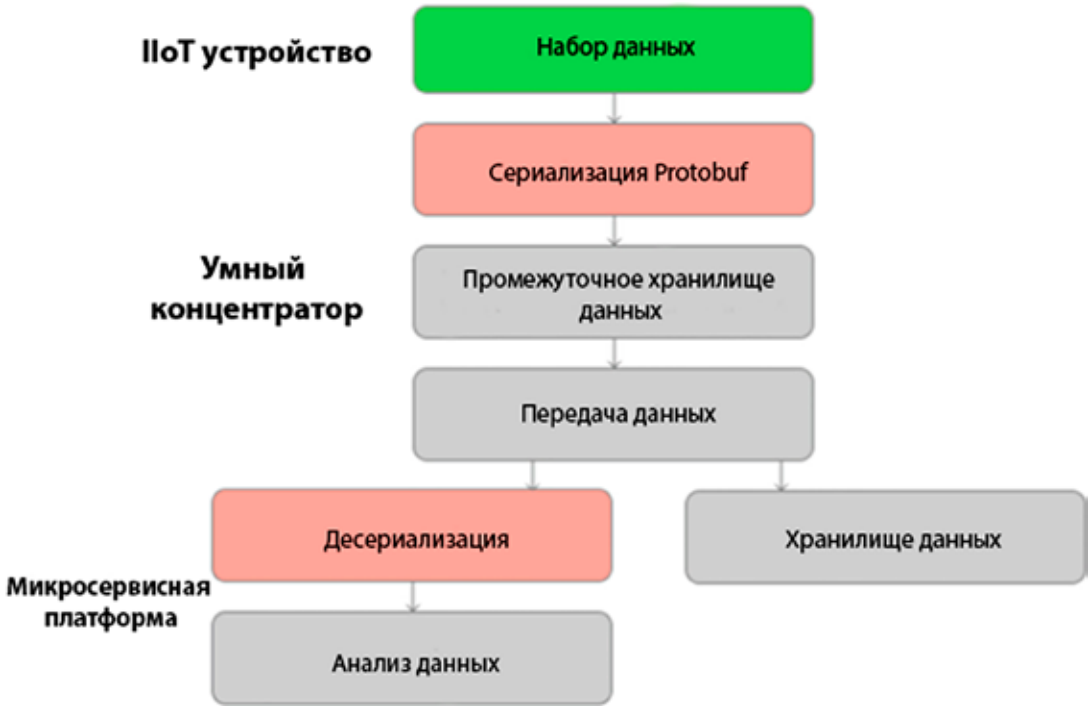


Рис. 1. Модифицированный метод

Рис. 2. Общий процесс сбора информации

Датчики и механизмы – это небольшие электронные устройства, способные измерять физические величины (например, температуру, свет, давление) и передавать ее на блок обработки информации. Учитывая достижения в области микроэлектроники, технологии и программное обеспечение для беспроводной передачи данных позволяют производить микросенсоры объемом в несколько кубических миллиметров [6].

Общий процесс сбора информации и передачи ее на умный концентратор показан на рис. 2. Устройства могут иметь свои собственные методы связи, такие как Wi-Fi, BLE, ZigBee и Z-Wave.

2. Данные о передаче технологий в HUB

Сенсорные сети – это пространственно распределенные датчики, которые отслеживают физические или экологические условия, такие как температура, звук, давление и т.д., и совместно передают свои данные по сети. Такие сети могут использоваться в большом количестве различных приложений: промышленная автоматизация, системы контроля микроклимата, системы безопасности и сигнализации, учет и оптимизация энергопотребления и т.д. [7]. Зона покрытия таких сетей может составлять от нескольких метров до нескольких километров. Одними из основных стандартов для реализации таких сетей являются Wi-Fi, BLE, ZigBee, Z-Wave.

3. Протоколы для информационных данных

В модифицированном способе протокол CoAP предназначен для передачи между устройствами в одной ограниченной сети, например, с низким энергопотреблением, в сетях с потерями, а также между устройствами в разных сетях, подключенных к интернету.

CoAP может быть интегрирован с такими форматами данных, как XML, JSON, Protobuf, для эффективного взаимодействия с другими платформами.

В модифицированном методе протокол MQTT обеспечивает минимальные требования к ресурсам и используется для передачи информации. Протокол не накладывает ограничений на формат данных.

4. Сериализация

На рис. 3 показан общий процесс сериализации-десериализации.

В предлагаемом методе создания распределенного сервиса, части которого должны обмениваться информацией со сложной структурой, в данном случае для передаваемых данных создается код, выполняющий процессы сериализации и десериализации.

Для объекта, заполненного необходимыми данными, вызывается созданный код сериализации, в результате на выходе получаем, например, XML file.

Полученная последовательность битов записывается в базу данных, память или file, который затем отправляется принимающей стороне. Для десериализации служба-получатель создает объект того же типа и вызывает необходимый код, в результате чего получается объект с теми же данными, что и объект службы-отправителя.

В таблице представлено описание основных характеристик методов сериализации с использованием XML, JSON, Protobuf.

Для модифицированного метода сбора и обработки информации предлагается использовать метод сериализации Protobuf.

Рис. 3. Общий процесс сериализации-десериализации

Описание основных параметров различных методов сериализации

Способ	JSON	XML	ProtoBuf
Стандартизация	+	+	+
Спецификация	STD 90/RFC 8259	Рекомендуется W3C: 1.0 and 1.1	Спецификация языка буферов протокола версии 3
Двоичный	-	Частично	+
Доступен для понимания человеком	+	+	–
Поддержка ссылок	+	+	–
Стандартные API	JSONQuery, JSON-Path, JSON-LD	DOM, SAX, XQuery, XPath	Java, C++, C#, Python

По сравнению с Protobuf, JSON и XML передают детали метаданных, что добавляет полезную нагрузку к полезной нагрузке. Использование Protobuf для сериализации и десериализации будет потреблять меньше процессорного времени и памяти, поэтому время обработки будет быстрее по сравнению с JSON и XML. Protobuf сжимает данные и генерирует плотные данные. Если сравнивать с XML, то он составляет почти 1/3 размера, а если сравнивать с JSON, то 1/2 [8].

JSON и XML читаемы человеком и небезопасны для передачи данных по сети. Если необходимо, чтобы ответ не был прочитан пользователем, то необходимо использовать Protobuf. Пользователю также необходим proto file для десериализации потока объектов.

5. Микросервисная платформа

В модифицированном методе микросервисная платформа структурирует приложение как набор сервисов. Микросервисы обычно основаны на бизнес-функциях [9].

Развертывание с использованием контейнеров обеспечивает переносимость. Контейнеризация сокращает время развертывания, поскольку требует только включения нужного контейнера, не затрагивая другие контейнеры, запущенные на том же хосте [10].

Платформа микросервиса может передавать полезную статистику или информацию другим информационным или операционным системам, таким как система управления производством, система автоматического хранения и поиска, система управления активами предприятия с помощью Protobuf по протоколу CoAP или MQTT.

Заключение

В данной работе проведен анализ существующих методов сбора и обработки информации в сети IIoT, на основе которого был выбран прототип метода сбора и обработки информации.

Методика сбора и обработки информации была модифицирована, отличием ее является использование сериализации на основе метода Protobuf, что позволяет повысить эффективность обработки информации во времени и уменьшить объем передаваемой информации.

Список литературы

1. Ven. R. Three Industrial IoT Implementation Challenges. 2018. URL: https://dzone.com/articles/3-iiot-industrial-internet-of-things-implementatio (дата обращения: 08.02.2023).

2. Массеров Д.А., Массеров Д.Д. Анализ, проблемы и возможности использования больших данных в городском хозяйстве // Научное обозрение. Технические науки. 2022. № 6. С. 27–31.

3. Касперская Н.И. Анализ больших данных в ИБ предприятий. Перспективы развития // Защита информации. Инсайд. 2019. № 3 (87). С. 34–43.

4. Khan W.Z., Aalsalem M.Y., Khan M.K., Hossain M.S., Atiquzzaman M. A reliable Internet of Things based architecture for oil and gas industry. In: 2017 19th International Conference on Advanced Communication Technology (ICACT). 2017. P. 705–710. DOI: 10.23919/ICACT.2017.7890184.

5. Lee K.M., Zhang S.Z., Ng K.H. Development of an industrial Internet of things suite for smart factory towards reindustrialization. Adv. Manuf. 2017. No. 5 (4). P. 335–343. DOI: 10.1007/S40436-017-0197-2.

6. Ungurean I., Gaitan N., Gaitan V. A middleware based architecture for the industrial internet of things. KSII Trans. Internet Inf. Syst. 2016. No. 10 (7). P. 2874–2891. DOI: 10.3837/TIIS.2016.07.001.

7. Al Hadidi M., Al-Azzeh J.S., Tkalich O.P., Odarchenko R.S., Gnatyuk S.O., Khokhlachova Y.Y. Zigbee, bluetooth and Wi-Fi complex wireless networks performance increasing. Int. J. Commun. Antenna Propag. 2017. No. 1 (48). P. 1–48. DOI: 10.15866/IRECAP.V7I1.10911

8. Shinde Y. Protobuf Performance Comparison. 2016. [Электронный ресурс]. URL: https://dzone.com/articles/protobuf-performance-comparison-and-points-to-make (дата обращения: 08.02.2023).

9. Жукова Н.А., Тристанов А.Б., Тин Т., Аунг М. О проблеме сбора данных в сетях интернета вещей с динамической структурой // Известия КГТУ. 2021. № 61. С. 105–118.

10. Babaria U. IoT Development Needs Microservices and Containerization. 2018. [Электронный ресурс]. URL: https://www.einfochips.com/blog/why-iot-development-needs-microservices-and-containerization (дата обращения: 08.02.2023).

НАУЧНЫЙ ОБЗОР

УДК 628.16

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ОЧИСТКИ ВОДЫ МЕМБРАННОЙ ФИЛЬТРАЦИЕЙ

Бурак Л.Ч., Писарик М.И.

ООО «Белросаква», Минск, e-mail: leonidburak@gmail.com, m@belrosakva.by

Рост мирового спроса на питьевую воду способствует поиску эффективных способов и методов очистки. Воздействие антропогенных факторов является причиной того, что источники питьевой воды все чаще подвергаются различным видам загрязнения. В общественных системах питьевой воды используются различные методы очистки для обеспечения населения безопасной и качественной питьевой водой. Однако они не всегда эффективны по удалению всех загрязняющих веществ, которые считаются опасными для окружающей среды и, следовательно, для человека. В качестве наиболее эффективного способа очистки предложено несколько альтернативных процессов очистки, таких как мембранная фильтрация. Цель представленной работы – научный обзор соединений – загрязнителей питьевой воды, процессов фильтрации и мембран, наиболее изученных и применяемых в процессе очистки воды Методы исследования – аналитический, обзорный, индукция, анализ научных публикаций. Тип полимера определяет физико-химические характеристики и рабочие характеристики мембран. Поэтому выбор полимера должен основываться на целевом применении. Тонкопленочные композитные (TFC) мембраны имеют лучшую удаляющую способность, чем обычные мембраны, хотя и работают при более высоких рабочих давлениях, что ограничивает их использование.

Ключевые слова: вода, загрязняющие вещества, водоподготовка, мембраны, мембранное разделение, полимерная добавка, наноматериалы

EFFICIENCY OF WATER PURIFICATION BY MEMBRANE FILTRATION

Burak L.Ch., Pisarik M.I.

LLC Belrosakva, Minsk, e-mail: leonidburak@gmail.com, m@belrosakva.by

The growing global demand for drinking water contributes to the search for effective ways and methods of purification. The impact of anthropogenic factors is the reason that sources of drinking water are increasingly exposed to various types of pollution. Public drinking water systems use a variety of treatment methods to provide the public with safe and quality drinking water. However, they are not always effective in removing all contaminants that are considered hazardous to the environment and therefore to humans. Several alternative purification processes, such as membrane filtration, have been proposed as the most efficient purification method. The purpose of the presented work is a scientific review of drinking water pollutant compounds, filtration processes and membranes, the most studied and used in the process of water purification. Research methods – analytical, review, induction, analysis of scientific publications. The type of polymer determines the physicochemical characteristics and performance of the membranes. Therefore, the choice of polymer should be based on the intended application. Thin Film Composite (TFC) membranes have better removal capacity than conventional membranes, although they operate at higher operating pressures, which limits their use.

Keywords: water, pollutants, water treatment, membranes, membrane separation, nanomaterials, polymer additive

Общеизвестно, что питьевая вода – это вода, предназначенная для ежедневного неограниченного и безопасного потребления живыми существами. Необходимость воды в биологических процессах делает ее таким важным источником для жизни человека, которому постоянно угрожают изменения климата и ежедневные источники загрязнения. Ожидается, что глобальное потепление, которому мы способствуем, повлияет на выброс загрязняющих веществ из-за изменений растворимости, кинетики растворения, образования загрязняющей газовой фазы, сорбционного равновесия, биологического разложения и мобилизации жидкости неводной фазы. Антропогенная деятельность в значительной степени способствовала ухудшению качества воды, затронув реки, озера и океаны по всему миру, ухудшив не только окружающую среду, но и здоровье человека и сообщества живых существ, которые от него зависят. Присутствие органических и неорганических загрязнителей в водных ресурсах, которые являются причиной заболеваний, способствует поиску более эффективных процессов очистки для обеспечения населению мира доступа к безопасной питьевой воде [1].

Обычные методы очистки, используемые на станциях очистки воды, включают осветление, окисление, аэрацию, фильтрацию и дезинфекцию. Такие факторы, как низкая летучесть, гидрофобные характеристики, размер, форма, заряд и незначительные концентрации, могут быть причиной неэффективного удаления загрязняющих веществ [2, 3]. Хотя физико-химические методы удаления загрязняющих веществ на станциях водоочистки хорошо изучены, они имеют недостатки, а именно: (а) высокие затраты на энергию, (б) большие капиталовложения в эксплуатацию и техническое обслужива-

ние, (в) образование токсичных отходов, (г) добавление токсичных химических веществ и низкая эффективность разложения органических загрязнителей. Поэтому такие способы, как ионный обмен, электрохимическое, химическое осаждение, усовершенствованные процессы окисления (УПО) и мембранное разделение, являются наиболее эффективными альтернативами по удалению токсичных соединений из воды. Особый интерес представляют процессы мембранного разделения. Высокая скорость удаления низкомолекулярных загрязнителей, возможность интеграции с другими системами позволяет считать мембранное разделение наиболее предпочтительным методом использования [3].

Мембраны, обычно используемые в процессах фильтрации, можно разделить на обычные мембраны и промышленные композитные тонкопленочные (ПТП) мембраны, в которых тонкий активный слой полиамида (ПА) (< 200 нм), полученный межфазной полимеризацией, наносится на пористый слой полиэфирсульфона (ПЭС) или полисульфона (ПСУ) (около 50 мкм) [4]. Для процесса мембранной фильтрации требуется наличие одного из таких параметров, как давление, концентрация или электрический потенциал, с целью разделения необходимых компонентов, которые определяются размером пор мембраны. Процессы фильтрации, проводимые с использованием давления, классифицируются на микрофильтрацию (MF), ультрафильтрацию (UF), нанофильтрацию (NF), обратный осмос (RO) и прямой осмос (FO) [5]. Процессы MF основаны на использовании мембран с симметричной пористой структурой, позволяющих разделять частицы со средним размером более 0,1 мкм и варьировать рабочее давление от 1 до 3 атм. UФ-мембраны имеют диаметр пор от 0,01 до 0,1 мкм при несколько более высоких рабочих давлениях (от 2 до 7 атм); оба часто используются в качестве этапа предварительной обработки для удаления коллоидов и природных органических веществ. НФ имеет гораздо более низкое пороговое значение молекулярной массы при среднем диаметре пор от 1 до 10 нм. НФ используется для удаления двухвалентных солей и других небольших молекул, таких как PhAC, и новых микрозагрязнителей. Обратный осмос (ОО) представлен как наиболее эффективный процесс удаления растворенных неорганических и небольших органических молекул. Однако поры наименьшего размера (от 0,1 до практически 0). Это является основным недостатком, так как процесс фильтрации связан с гораздо большими энергозатратами.

В процессе разработки различных видов мембран были исследованы новые наноматериалы, эффективность которых установлена во многих процессах, включая очистку воды. Свойства мембран (большая удельная площадь поверхности и высокая реакционная способность), наряду с другим возможным применением, способствовали использованию их в качестве адсорбентов, катализаторов и сенсоров [6]. Таким образом, последние разработки в области наноматериалов и нанотехнологий позволили создать новые поколения искусственных мембран для очистки воды с новыми функциями и улучшенными свойствами молекулярного разделения. Эти мембраны на основе наноматериалов, которые включают в себя наночастицы, нановолокна, двумерные слоистые материалы и другие наноструктурированные соединения, обладают эффективными свойствами проникновения, а также дополнительными свойствами (противообрастающими, антибактериальными, фоторазлагаемыми и т.д.) [7]. Поэтому об интересе мирового научного сообщества к разработке такого типа мембран свидетельствует количество научных публикаций за последние 10 лет – более 53000 публикаций в период с 2010 по 2021 г.) [8].

Основываясь на структуре мембраны и способе диспергирования наноматериала, различные типы мембран с отличительными характеристиками проницаемости называют: обычные наноструктурированные, тонкопленочные наноструктурированные (TFN) и с локализованным поверхностным нанокомпозитом [9]. В обычных наноструктурных мембранах наноматериалы включаются в полимерную матрицу в процессе инверсии фаз, но эти мембраны имеют низкую устойчивость к высоким температурам, агрессивным средам и органическим растворителям [10]. В последние десятилетия сшитый полиамид, полученный межфазной полимеризацией, и мембраны TFC, полученные из него, заменили обычные мембраны, добившись улучшения характеристик разделения и проницаемости. Мембраны TFN представляют собой развивающийся класс мембран TFC и производят их путем включения наночастиц в тонкий полиамидный слой для изменения свойств поверхности, что приводит к получению наноструктурированных материалов со значительным улучшением характеристик [11]. Насколько нам известно, нет систематизированного обзора преимуществ и недостатков применения этих мембран для удаления обычных

и ввозможных к попаданию в воду. Таким образом, цель данной статьи – анализ эффективности использования мембран в процессах фильтрации, применяемых в настоящее время для очистки воды, загрязненной микроорганизмами, ионами токсичных металлов, красителями, а также органическими и неорганическими соединениями.

Процессы мембранного разделения

Мембранная технология охватывает научные и инженерные подходы, связанные с переносом или отторжением компонентов, видов или веществ через мембраны или с их помощью. Данная технология широко применяется при очистке воды для бытового и промышленного водоснабжения, в химической, биотехнологической, фармацевтической, пищевой, металлургической промышленности, а также в других процессах разделения. Промышленные применения обширны, поскольку мембранное разделение является технологией с пониженным потреблением энергии и заменяет традиционные процессы, такие как фильтрация, дистилляция, ионный обмен и системы химической обработки. Кроме того, данный процесс обеспечивает непрерывное разделение, а свойства мембраны можно регулировать в соответствии с необходимым результатом. Однако у этой технологии есть некоторые недостатки, такие как концентрационная поляризация и засорение мембраны, низкий срок службы мембраны, низкая селективность и поток. Но этого можно избежать или минимизировать, подбирая различные типы мембран [12, 13].

Мембраны обычно классифицируются как изотропные или анизотропные. Изотропные мембраны однородны по составу и физической природе по всему сечению мембраны. Анизотропные мембраны неоднородны по сечению мембраны и обычно состоят из слоев, различающихся по структуре и/или химическому составу. Природа сырья (органическое или неорганическое) и желаемая морфология (плотная или пористая) влияют на выбор метода подготовки мембран. Универсальным методом, позволяющим получать все виды полимерных мембран, является инверсия фаз [14]. Метод инверсии фаз представляет собой процесс, при котором стабильный полимерный раствор переходит из жидкого состояния в твердое за несколько миллисекунд с учетом важных термодинамических и кинетических аспектов. Наиболее широко используемым методом изготовления мембран с инверсией фазы является иммерсионное осаждение, также известное как фазовое разделение, не индуцированное растворителем (NIPS) [15]. Мембраны, сформированные с помощью этого процесса, часто имеют конфигурацию плоского листа или полого волокна. Полимер, растворенный в растворителе (полимерный раствор), отливается на соответствующий поддерживающий слой (например, кремниевая пластина) для конфигурации плоского листа или нагнетается фильерой с одним отверстием для полых волокон. Скорость обмена между растворителем, содержащимся в отлитой пленке, и нерастворителем, присутствующим в коагуляционной ванне, определяет морфологию мембраны. Для повышения селективности и эффективности удаления загрязняющих веществ в процессе фильтрации были выбраны различные специфические наноматериалы, обеспечивающие, среди прочего, более высокую способность к удалению, антимикробную и фотокаталитическую активность, улучшенную гидрофильность и механическую стойкость [16, 17].

1. Удаление фармацевтического соединения

Широкое использование фармацевтических активных соединений (PhAC) людьми и животными приводит к загрязнению водной среды с серьезными последствиями для здоровья человека. В нескольких исследованиях сообщалось о разработке новых целевых стратегий удаления этих соединений из воды с помощью мембранной фильтрации [18–20]. Однако этот процесс очистки достаточно сложен, так как его эффективность определяется физико-химическими свойствами PhAC, pH растворов, составом мембраны, взаимодействием растворенного вещества и мембраны, а также одновременным присутствием нескольких химических родственных соединений.

Мембранные процессы для регенерации или повторного использования сточных вод и очистки питьевой воды были оценены для удаления PhAC микрофильтрацией (MF), нанофильтрацией (NF), ультрафильтрацией (UF) и обратным осмосом (RO) и комбинациями мембран последовательно. MF и UF имеют ограниченное применение для удаления PhAC, в водных средах из-за более высокого предела молекулярной массы (MWCO) мембраны по сравнению с молекулярной массой (MW) большинства PhAC (150–500 г/моль) [21]. NF и RO имеют гораздо более низкую MWCO, что позволяет сильно отбраковывать PhAC. Разделение NF и RO было описано как наиболее эффективные процессы удаления PhAC [5]. Согласно литературным данным, микрофильтрация и ультрафильтрация, как правило, не совсем эффективны для удаления PhAC [3]. Например, использование на-

нофильтрационной мембраны из полиэфирсульфона (ПЭС), полученной методом инверсии фаз, показало неполную эффективность при удалении карбамазепина, диклофенака и ибупрофена из питьевой воды. Установлено, что общее удаление составило примерно 31–39 и 55–61% для нейтральных (карбамазепин) и ионных (диклофенак и ибупрофен) PhAC соответственно. Учитывая, что диклофенак и ибупрофен заряжены отрицательно, в условиях эксперимента электростатическое отталкивание способствовало лучшему отторжению, полученному для этих PhAC, по сравнению с карбамазепином.

Эффективность удаления PhAC мембранами TFC также изучалась путем включения наночастиц в или под мембрану из полиамидного слоя [22, 23]. Эта мембрана имела аналогичную эффективность отторжения отрицательно заряженных PhAC (> 90%) по сравнению с мембранами TFC.

Структура поверхностного слоя мембран, модифицированных добавками и наноразмерными частицами, была улучшена в отношении как проницаемости, так и профиля отторжения, механической прочности, жесткости, противообрастающих характеристик основного полимера и особенно селективности по отношению к определенным соединениям [24–26]. Повышение водопроницаемости и отталкивания для большинства испытанных PhAC было достигнуто за счет более высокой эффективности порообразования, улучшенной смачиваемости и значительного увеличения активной поверхности. Хотя признано, что нанонаука и нанотехнологии открывают прекрасные возможности для разработки инновационных методов очистки воды, информация о модификации мембран наноматериалами и их эффективности в удалении PhAC из водной среды все еще недостаточна.

Ученые синтезировали обычные наноструктурированные UF-мембраны, используя PSU в качестве мембранной матрицы, метилцеллюлозу (MC) в качестве порообразователя и коммерческий порошкообразный активированный уголь (PAC) в качестве адсорбирующего наноматериала. Добавление активированного угля в матрицу мембраны улучшило удаление PhAC на 34 и 6% для ацетаминофена и диклофенака соответственно по сравнению с обычными мембранами без наноматериалов. По мнению авторов, углерод-полимерные мембраны могут удалять следовые количества фармацевтических препаратов из воды за счет гибридного процесса, сочетающего фильтрацию и адсорбцию. Однако для аналогичной молекулярной массы диклофенака (50,4%) были получены разные скорости удаления [25]. Эти результаты показывают, как наноматериалы можно использовать для изменения характеристик мембраны.

Совсем недавно Zhou et al. [27] использовали TiO_2 с целью модификации ультрафильтрационной мембраны PVDF для удаления сульфадиазина из воды. Результаты показали высокую способность удаления около 91,4%. Авторы связывают эту высокую скорость удаления с фотодеградацией сульфадиазина, которая является результатом фотокаталитической активности TiO_2.

Недавно сообщалось, что MOFs использовался в процессах ультрафильтрации, называемых гибридными системами MOF-UF, для достижения лучших результатов. Эта комбинация обеспечивает более высокую скорость удержания по сравнению с обычной UF. Эти исследования подтверждают высокую эффективность MOF в качестве адсорбирующего материала, что делает их подходящей альтернативой для повышения эффективности процессов мембранной фильтрации при удалении PhAC [28, 29].

2. Удаление пестицидов

Пестициды являются потенциальными загрязнителями источников питьевой воды, поскольку они наносятся на сельскохозяйственные угодья, сады и газоны и могут попадать в подземные или поверхностные водные системы. Процессы мембранной фильтрации также рассматривались для удаления этих типов загрязняющих веществ, хотя и в меньшей степени, чем PhAC. В данном случае использование наноматериалов было ограничено только изготовлением ультрафильтрационных мембран, включающих в качестве добавки новый сшитый полимер β-циклодекстрина (β-CDP) с иерархической микро-мезопористой структурой и большой площадью поверхности [30]. По мнению авторов, высокая эффективность удаления 2,4-дихлорфенола связана с синергетическим эффектом микропор и мезопор включенного β-CDP. Нанофильтрационные мембраны также применяют для удаления пестицидов из воды [31]. Как и в случае с PhAC, исследования показывают, что процент удаления зависит от молекулярной массы, молекулярной ширины и гидрофобности пестицида. В целом самая высокая средняя эффективность удаления была у стойких хлорорганических инсектицидов (93%), включая эндосульфан (100%), ДДТ (95%) и ГХЦГ (92%). Эти результаты показывают корреляцию между отклонением (%) пестицидов с их log P и молекулярной массой, согласно Mukherjee et al. [31].

Сильно гидрофобные пестициды (log P > 4,5), такие как ДДТ, бифентрин, альдрин, перметрин, α-циперметрин, этион, дифеноконазол, α-эндосульфан, хлорпирифос и бутахлор, показали высокие показатели удаления (80–100 %), тогда как менее гидрофобные, такие как диметоат (log P = 0,7) и тиаметоксам (log P = -0,13), показали более низкие удаления (< 80 %); примечательно, что для монокротофоса наблюдалось низкое отклонение (38 %) (log P = -0,22).

3. Удаление микроорганизмов

Удаление или инактивация бактерий из питьевой воды очень важна для здоровья и благополучия населения. Многие станции очистки воды используют химические вещества для уничтожения или инактивации бактерий, но их также можно физически удалить с помощью мембранной фильтрации. Однако процессы MF и UF не способны обеспечить полное удаление всех микроорганизмов. Для более эффективного удаления некоторые авторы предлагают встраивать в мембраны антимикробные наночастицы [32], в частности частицы оксида серебра, из-за сильной бактерицидной активности этого материала. При покрытии поверхности микрофильтрационной мембраны PA оксидом серебра (AgO) ученые Kacprzyńska-Gołacka et al. [32] наблюдали полную элиминацию грамотрицательных (*Escherichia coli*) и грамположительных бактерий (*Bacillus subtilis*) из воды. По мнению авторов, сильные антибактериальные свойства мембран, модифицированных AgO, могут быть связаны с высвобождением ионов серебра и их способностью закрепляться и проникать во внешние структуры бактерий, вызывая нарушение проницаемости клеточных мембран, что приводит к гибели микроорганизмов. Образование свободных радикалов также является одним из аргументов, объясняющих гибель клеток в результате выщелачивания наночастиц оксида серебра. Присутствие наноматериала повышает эффективность мембраны, предотвращая адгезию бактерий к поверхности мембраны и уменьшая образование биопленки. По их мнению, взаимодействие катиона серебра с тиоловыми группами и образование S-Ag-связей или дисульфидных связей может разрушать бактериальные и вирусные белки, прерывая электрон-транспортную цепь и взаимодействуя с ДНК. Было предложено модифицировать мембраны с помощью TiO_2 + AgO для улучшения фотокаталитического эффекта в видимой области [32]. Степень удаления 100 % была достигнута, так как обе наночастицы использовались и были связаны с технологией магнетронного распыления, что помогло создать новые структурные свойства в полимерных мембранах.

4. Удаление тяжелых металлов

Основная опасность тяжелых металлов для здоровья человека связана с воздействием свинца, кадмия, ртути и мышьяка. Эти неорганические загрязнители попадают в воду, почву и в атмосферу из-за развивающегося сельского хозяйства и металлургической промышленности, неправильной утилизации отходов, удобрений и пестицидов. Использование мембран для фильтрации также применяли в качестве процесса очистки от этих типов загрязняющих веществ, в основном UF и NF. Подобно микроорганизмам, механизм удаления, по-видимому, недостаточен для эффективного удаления тяжелых металлов из воды и даже показывает низкую скорость удаления (от 10 до 35 %). Установлено, что промышленные мембраны TFC и обычные мембраны, содержащие некоторые наноматериалы, могут повысить эффективность удаления. Полиамидные мембраны для нанофильтрации TFC обеспечивают высокое удаление металлов из воды на уровне > 95 % [33]. Авторы показали, что процент удерживания металлов в основном зависит от pH, поскольку свойство заряда материала поверхности мембраны изменяется с pH. Эти результаты подтверждают возможность применения таких мембран для удаления металлов от сточных вод.

Установлено, что наноматериалы на основе углерода могут избирательно удалять ионы тяжелых металлов из источников воды. Углеродные нанотрубки увеличивают удаление тяжелых металлов, так как улучшают адсорбционную способность мембран и уменьшают размер пор в диапазоне от 20 до 30 нм.

Наночастицы оксидов металлов представляют собой еще одну группу эффективных наноматериалов с большой площадью поверхности, высокой адсорбционной способностью и селективностью. Различные наночастицы оксидов металлов сравнивались в отношении удаления меди с использованием мембран PES [34]. Присутствие наночастиц AL_2O_3 в исходных мембранах улучшает скорость удаления с 25 до 60 %, в отличие от использования Fe_3O_4, которая увеличивает только 5 %. Чтобы улучшить полученные результаты, Ghaemi et al. [34] покрыли и функционализировали наночастицы Fe_3O_4 более гидрофильными материалами, такими как диоксид кремния, диоксид кремния, модифицированный метформином, и диоксид кремния, моди-

фицированный амином, которые обеспечивают лучшую дисперсию наночастиц в мембране. Эта стратегия способствует лучшему удалению Cu (II) с приемлемым уровнем проницаемости, так как Fe_3O_4 наночастицы, покрытые диоксидом кремния, модифицированным метформином, лучшая комбинация для удаления около 92% меди (II). Эти результаты объясняются большим количеством атомов азота вокруг каждой частицы, которые предлагают больше доступных мест для адсорбции на поверхности мембраны. Кроме того, гидрофильность модифицированных наночастиц может увеличить доступные центры адсорбции и таким образом миграцию тяжелых металлов на поверхность мембраны.

5. Удаление полициклических ароматических углеводородов (ПАУ) и фталатов (ПАЭ)

Существует несколько источников этого типа загрязняющих веществ, которые возникают в результате естественной деятельности (например, лесных пожаров и вулканической активности), бытовых, промышленных, сельскохозяйственных и других источников (выхлопы самолетов, нефтяные резервуары/корабли) и т.д. Они сохраняются в окружающей среде и накапливаются в биоте и пищевых цепях и могут оказывать неблагоприятное воздействие на водную флору и фауну и человека, включая канцерогенные свойства. Поэтому загрязнение водных ресурсов алкилфталатами и некоторыми опасными фенильными соединениями также находится под пристальным вниманием исследователей. В литературе мало работ, посвященных использованию фильтрующих мембран для удаления этих видов соединений [35]. Применяли промышленные нанофильтрационные мембраны на основе сульфированного полиэфирсульфона или поливинилового спирта/полиамида для алкилфталатов и других растворенных веществ, таких как монозамещенные бензолы, уровень удаления был выше 99% алкилфталатов. Однако п-диметилфталат, п-диэтилфталат и все монозамещенные бензолы показали значительно более низкий процент снижения. Это может быть связано с тем, что эти соединения имели меньший размер молекулы по сравнению с указанными выше соединениями (< 0,32 нм).

Заключение

Удаление различных загрязнений в воде может проводиться физическим методом с помощью фильтрующих мембран. Разработано несколько видов полимерных мембран для удаления PhAC, пестицидов, микроорганизмов, красителей, тяжелых металлов в воде. Обзор научных публикаций подтверждает использование различных типов полимеров, модифицированных добавками и/или наноматериалами. Подводя итог обзора научных источников, можно сделать следующие выводы.

Вид полимера определяет физико-химические характеристики и рабочие параметры мембран, поэтому при выборе полимера необходимо учитывать, какой цели необходимо достичь.

Заряженные мембраны вызывают электростатический эффект с заряженными молекулами, что необходимо для контроля pH исходных растворов, хотя установить какую-либо корреляцию нельзя, поскольку нет экспериментальных доказательств.

Обычные полимерные мембраны имеют низкую эффективность удаления загрязняющих веществ из воды, а тонкопленочные композитные (TFC) мембраны имеют более высокую способность удалять вещества из воды, чем обычные мембраны, хотя и работают при более высоких рабочих давлениях, что ограничивает их использование.

Введение полимерных добавок в мембраны не обеспечивает большую селективность мембран; однако они могут улучшить дисперсию наноматериалов в наноструктурированных мембранах, обеспечивая тем самым более эффективное включение.

Пропитка полимерных мембран наноматериалами является перспективной альтернативой для снижения ограничений, т.е. загрязнения, площади поверхности, гидрофильных свойств.

В зависимости от вида загрязнения, которое необходимо удалить из воды, применяют различные наноматериалы. Для удаления микроорганизмов наиболее подходящими являются наночастицы серебра из-за их высокой антимикробной активности; комбинация наночастиц GO/TiO_2 более эффективна, чем их индивидуальное использование, для удаления красителей; для удаления тяжелых металлов наиболее эффективны и широко используются углеродные нанотрубки и наночастицы некоторых металлов. Адсорбирующие материалы нового поколения, такие как MOF, эффективно удаляют некоторые PhAC. Однако необходимы дополнительные исследования, чтобы доказать их способность справляться с большим количеством загрязняющих веществ.

Тонкопленочные наноструктурированные (TFN) мембраны показываютт более высокие потоки по сравнению с сильно сшитыми непористыми полиимидными слоями, типичными для мембран TFC. Следовательно, они могут более эффективно отделять загрязняющие вещества при меньших затратах энергии.

Список литературы

1. WHO/UNICEF. Drinking Water. [Электронный ресурс]. URL: https://data.unicef.org/topic/water-and-sanitation/drinking-water/ (дата обращения: 10.12.2021).

2. Kim S. et al. Removal of contaminants of emerging concern by membranes in water and wastewater: a review. Chemical Engineering Journal. 2018. Vol. 335. P. 896–914. DOI: 10.1016/J.CEJ.2017.11.044.

3. Taheran M. et al. Membrane processes for removal of pharmaceutically active compounds (PhACs) from water and wastewaters. Science of the Total Environment. 2016. Vol. 547. P. 60–77. DOI: 10.1016/J.SCITOTENV.2015.12.139.

4. Hosseini S.S. et al. Recent progress in development of high performance polymeric membranes and materials for metal plating wastewater treatment: a review. Journal of Water Process Engineering. 2016. Vol. 9. P. 78–110. DOI: 10.1016/J.JWPE.2015.11.005.

5. Rezakazemi M., Khajeh A., Mesbah M. Membrane filtration of wastewater from gas and oil production. Environmental Chemistry Letters. 2018. Vol. 16. No. 2. P. 367–388. DOI: 10.1007/s10311-017-0693-4.

6. Cai Z. et al. Application of nanotechnologies for removing pharmaceutically active compounds from water: development and future trends. Environmental Science: Nano. 2018. Vol. 5. No. 1. P. 27–47.

7. Ying Y. et al. Recent advances of nanomaterial-based membrane for water purification. Applied Materials Today. 2017. Vol. 7. P. 144–158. DOI: 10.1016/j.apmt.2017.02.010.

8. Khraisheh M. et al. Recent progress on nanomaterial-based membranes for water treatment. Membranes. 2021. Vol. 11. No. 12. P. 995. DOI: 10.3390/membranes11120995.

9. Shahmirzadi M.A.A., Kargari A. Nanocomposite membranes. Emerging technologies for sustainable desalination handbook. Butterworth-Heinemann. 2018. P. 285–330.

10. Yin J., Deng B. Polymer-matrix nanocomposite membranes for water treatment. Journal of membrane science. 2015. Vol. 479. P. 256–275. DOI: 10.1016/j.memsci.2014.11.019.

11. Werber J.R., Osuji C.O., Elimelech M. Materials for next-generation desalination and water purification membranes. Nature Reviews Materials. 2016. Vol. 1. No. 5. P. 1–15. DOI: 10.1038/natrevmats.2016.18.

12. Ji C. et al. Recent advances in high-performance TFC membranes: A review of the functional interlayers. Desalination. 2021. Vol. 500. P. 114869. DOI: 10.1016/j.desal.2020.114869.

13. Mamba F.B., Mbuli B.S., Ramontja J. Recent Advances in Biopolymeric Membranes towards the Removal of Emerging Organic Pollutants from Water. Membranes. 2021. Vol. 11. No. 11. P. 798.

14. Siddique T., Dutta N.K., Choudhury N.R. Mixed-matrix membrane fabrication for water treatment. Membranes. 2021. Vol. 11. No. 8. P. 557. DOI: 10.3390/membranes11080557.

15. Tasselli F. Membrane Preparation Techniques. In Encyclopedia of Membranes; Drioli E., Giorno L. Eds. Springer: Berlin/Heidelberg, Germany. 2015. P. 1–3.

16. Hołda A.K., Vankelecom I.F.J. Understanding and guiding the phase inversion process for synthesis of solvent resistant nanofiltration membranes. Journal of Applied Polymer Science. 2015. Vol. 132. No. 27. DOI: 10.1002/app.42130.

17. Esfahani M.R. et al. Nanocomposite membranes for water separation and purification: Fabrication, modification, and applications. Separation and Purification Technology. 2019. Vol. 213. P. 465–499. DOI: 10.1016/j.seppur.2018.12.050.

18. Patel M. et al. Pharmaceuticals of emerging concern in aquatic systems: chemistry, occurrence, effects, and removal methods. Chemical reviews. 2019. Vol. 119. No. 6. P. 3510–3673. DOI: 10.1021/acs.chemrev.8b00299.

19. Maryam B. et al. A study on behavior, interaction and rejection of Paracetamol, Diclofenac and Ibuprofen (PhACs) from wastewater by nanofiltration membranes. Environmental Technology & Innovation. 2020. Vol. 18. P. 100641. DOI: 10.1016/j.eti.2020.100641.

20. Couto C.F. et al. Assessing potential of nanofiltration, reverse osmosis and membrane distillation drinking water treatment for pharmaceutically active compounds (PhACs) removal. Journal of Water Process Engineering. 2020. Vol. 33. P. 101029. DOI: 10.1016/j.jwpe.2019.101029.

21. Couto C.F., Lange L.C., Amaral M.C.S. A critical review on membrane separation processes applied to remove pharmaceutically active compounds from water and wastewater. Journal of Water Process Engineering. 2018. Vol. 26. P. 156–175. DOI: 10.1016/j.jwpe.2018.10.010.

22. Kong F. et al. Assessment of the hindered transport model in predicting the rejection of trace organic compounds by nanofiltration. Journal of Membrane Science. 2016. Vol. 498. P. 57–66.

23. Dong L. et al. A thin-film nanocomposite nanofiltration membrane prepared on a support with in situ embedded zeolite nanoparticles. Separation and Purification Technology. 2016. Vol. 166. P. 230–239 DOI: 10.1016/j.seppur.2016.04.043.

24. Basu S., Balakrishnan M. Polyamide thin film composite membranes containing ZIF-8 for the separation of pharmaceutical compounds from aqueous streams. Separation and Purification Technology. 2017. Vol. 179. P. 118–125. DOI: 10.1016/j.seppur.2017.01.061.

25. Nadour M., Boukraa F., Benaboura A. Removal of Diclofenac, Paracetamol and Metronidazole using a carbon-polymeric membrane. Journal of Environmental Chemical Engineering. 2019. Vol. 7. No. 3. P. 103080. DOI: 10.1016/j.jece.2019.103080.

26. Ali J.K., Abi Jaoude M. Polyimide ultrafiltration membrane embedded with reline-functionalized nanosilica for the remediation of pharmaceuticals in water. Separation and PurificationTechnology. 2021. Vol. 266. P. 118585. DOI: 10.1016/j.seppur.2021.118585.

27. Zhou A. et al. Abatement of sulfadiazine in water under a modified ultrafiltration membrane (PVDF-PVP-TiO2-dopamine) filtration-photocatalysis system. Separation and Purification Technology. 2020. T. 234. P. 116099. DOI: 10.1016/j.seppur.2019.116099.

28. Jun B.M. et al. Comprehensive evaluation of the removal mechanism of carbamazepine and ibuprofen by metal organic framework. Chemosphere. 2019. Vol. 235. P. 527–537.

29. Sewoon K. Hernández-Maldonado A.J., Yoon Y. A metal organic framework-ultrafiltration hybrid system for removing selected pharmaceuticals and natural organic matter. Chem. Eng. J. 2020. Vol. 382. P. 122920. DOI: 10.1016/j.cej.2019.122920.

30. Wang Z. et al. Macroporous membranes doped with micro-mesoporous β-cyclodextrin polymers for ultrafast removal of organic micropollutants from water. Carbohydrate polymers. 2019. Vol. 222. P. 114970. DOI: 10.1016/j.carbpol.2019.114970.

31. Mukherjee A. et al. Removal of multiple pesticide residues from water by low-pressure thin-film composite membrane. Applied Water Science. 2020. Vol. 10. No. 12. P. 1–8.

32. Kacprzyńska-Gołacka J. et al. Microfiltration membranes modified with composition of titanium oxide and silver oxide by magnetron sputtering. Polymers. 2020. Vol. 13. No. 1. P. 141. DOI: 10.3390/polym13010141.

33. Wei X. et al. Removal of heavy metals from electroplating wastewater by thin-film composite nanofiltration hollow-fiber membranes. Industrial & Engineering Chemistry Research. 2013. Vol. 52. No. 49. P. 17583–17590.

34. Ghaemi N. et al. Polyethersulfone membrane enhanced with iron oxide nanoparticles for copper removal from water: Application of new functionalized Fe_3O_4 nanoparticles. Chemical Engineering Journal. 2015. Vol. 263. P. 101–112.

35. Wu Q. et al. Sandwich structured membrane adsorber with metal organic frameworks for aflatoxin B1 removal. Separation and Purification Technology. 2020. Vol. 246. P. 116907.