

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ТЕХНОЛОГИИ

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ
СЕВАСТОПОЛЬСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА



Т.10 № 4
2024



ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГИИ И ПРОМЫШЛЕННОСТИ

ISSN 2413-5526

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ**

«СЕВАСТОПОЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ТЕХНОЛОГИИ

Научный журнал

Т. 10 № 4

**Севастополь
2024**

Э 651 Энергетические установки и технологии: науч. журнал. – Севастополь: ФГАОУ ВО СевГУ, 2024. – Т. 10. - № 4. – 108 с.: ил.

В научный журнал «Энергетические установки и технологии», включены статьи, посвященные актуальным вопросам современной энергетики. Журнал состоит из следующих тематических рубрик: Энергетические системы и комплексы, Электротехнические комплексы и системы, Теоретическая и прикладная теплотехника; Методы и приборы контроля и диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды; Ядерные энергетические установки, топливный цикл, радиационная безопасность; Техносферная безопасность (в энергетике); Процессы и аппараты химических технологий.

Предназначен для научных работников, инженеров и специалистов, работающих на предприятиях и в организациях энергетики, аспирантов и студентов технических вузов. Журнал выходит 4 раза в год.

Состав редколлегии:

Главный редактор – *Якимович Борис Анатольевич*, д.т.н., профессор, ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», г. Севастополь.

Заместитель главного редактора – *Губарев Федор Александрович*, д.т.н., доцент, ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», г. Севастополь.

Ответственный секретарь – *Черкашина Наталья Игоревна*, к.т.н., доцент, ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», г. Севастополь.

Технический редактор – *Нестерова Елена Александровна*, ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», г. Севастополь.

Члены международного редакционного совета:

Абу Исса Никола Наджиб, профессор Дамасского университета, Сирийская Арабская Республика.

Божек Павел, к.т.н., профессор, почетный доктор (Doctor Honoris Causa), Трнава Словацкий технологический университет, Словакия.

Ли Линь, к.т.н., ассоциированный профессор Ляонинского технологического университета, КНР.

Червинский Вячеслав Леонидович, к.т.н., доцент, БНТУ, Республика Беларусь.

Редакционный совет:

Аллаяров Садулла Реймович, д.х.н., главный научный сотрудник, Отдел строения вещества, Федеральный исследовательский центр проблем химической физики и медицинской химии РАН, г. Черноголовка.

Богомоллов Александр Романович, д.т.н., доцент, заведующий кафедрой теплоэнергетики Института энергетики, ФГБОУ ВО «Кузбасский государственный технический университет им. Т.Ф. Горбачева», г. Кемерово.

Вологдин Сергей Валентинович, д.т.н., доцент, ФГБОУ ВО «Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова», г. Ижевск.

Заворин Александр Сергеевич, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой руководитель НОЦ И. Н. Бутакова Инженерной школы энергетики ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», г. Томск.

Комишин Александр Сергеевич, д.т.н., доцент, ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)», г. Москва.

Лидер Андрей Маркович, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой - руководитель отделения на правах кафедры; профессор отделения экспериментальной физики Инженерной школы ядерных технологий ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», г. Томск.

Митрофанова Ольга Викторовна, д.т.н., профессор кафедры теплофизики ИЯФит, ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», г. Москва.

Пестряков Алексей Николаевич, д.х.н., профессор, профессора Исследовательской школы химических и биомедицинских технологий ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», г. Томск.

Семёнов Владимир Константинович, д.т.н., профессор, профессор кафедры атомных электрических станций, ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», г. Иваново.

Чудинова Юлия Валерьевна, д.б.н., доцент, заведующий кафедрой «Охраны труда и окружающей среды» ФГБОУ ВО «Томский государственный архитектурно-строительный университет», г. Томск.

Щеклеин Сергей Евгеньевич, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой атомных станций и возобновляемых источников энергии, Уральского Федерального университета, Уральского энергетического института.

Дмитриев Сергей Михайлович, д.т.н., профессор, ректор Нижегородского государственного технического университета имени Р.Е. Алексеева, заведующий кафедрой атомных и тепловых станций Образовательно-научного Института ядерной энергии и технической физики.

Члены редколлегии:

Высоцкий Виталий Евгеньевич, д.т.н., профессор кафедры «Судовое электрооборудование» Морского института, ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», г. Севастополь.

Глазырин Александр Савельевич, д.т.н., доцент, профессор отделения электроэнергетики и электротехники, ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», г. Томск.

Горбунов Владимир Александрович, д.т.н. доцент, профессор кафедры атомных электрических станций, ГОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», г. Иваново.

Завьялов Валерий Михайлович, д.т.н., доцент, ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», г. Севастополь.

Мостовицков Андрей Владимирович, д.т.н., доцент, ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», г. Томск. г. Томск.

Назаренко Ольга Брониславовна, д.т.н., доцент, профессор отделения контроля и диагностики, ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», г. Томск.

Пак Александр Яковлевич, д.т.н., заведующий лабораторией ЛПМЭО ИШЭ, ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», г. Томск.

Романенко Сергей Владимирович, д.х.н., профессор исследовательской школы химических и биомедицинских технологий, ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», г. Томск.

Семыкина Ирина Юрьевна, д.т.н., доцент, директор учебно-научного центра информационных технологий обучения ИЯЭиП ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», г. Севастополь.

Харламов Виктор Васильевич, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Электрические машины и общая электротехника» ФГБОУ ВО «Омский государственного университета путей сообщения», г. Омск.

Яковилин Леонид Александрович, д.х.н., доцент, профессор кафедры Химия и химические технологии, ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», г. Севастополь.

Браславский Юрий Валентинович, к.т.н., доцент, ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», г. Севастополь.

Губин Владимир Евгеньевич, к.т.н., доцент, зав. кафедрой, ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», г. Севастополь.

Козырь Дмитрий Александрович, к.т.н., доцент кафедры, ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», г. Севастополь.

Кучерик Галина Валентиновна, к.х.н., доцент, ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», г. Севастополь.

Магдыч Екатерина Александровна, к.т.н., доцент, ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», г. Севастополь.

Матузаев Кирилл Борисович, к.т.н., зав. кафедрой ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», г. Севастополь.

Ожиганова Марина Ивановна, к.т.н., доцент, ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», г. Севастополь.

Омельчук Юлия Аркадьевна, к.х.н., доцент, ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», г. Севастополь.

Скидан Александр Антонович, к.т.н., доцент, профессор ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», г. Севастополь.

Учредитель и издатель:

ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет».
ул. Университетская, 33. Севастополь, 299053, Российская Федерация

Рекомендован к печати Ученым советом ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций.
Свидетельство ПИ № ФС 77 – 64120 от 25.12.2015 г.

© Издание ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», 2024

КОЛОНКА ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА



Уважаемые читатели научного журнала «Энергетические установки и технологии»!

Предлагаем Вашему вниманию четвертый номер журнала, который традиционно посвящен рассмотрению актуальных вопросов современной энергетики и смежных с ней областей науки и техники. Просим обратить внимание на изменение рубрик журнала в соответствии с требованиями ВАК для включения в перечень.

Наибольшее количество работ поступило по направлениям 2.4.5. Энергетические системы и комплексы и 2.4.2 Электротехнические комплексы и системы. В работах севастопольских ученых рассмотрены системы электроснабжения на основе альтернативных источников энергии и установки для ее генерации. В совместной работе ученых из Томского политехнического университета и Севастопольского государственного университета выявлены перспективные для извлечения электроэнергии из термальных вод районы Томской области. Томскими учеными выполнена также инновационная работа в области электродугового синтеза карбида вольфрама.

В совместной работе симферопольских и севастопольских ученых предложены оригинальные решения в области суперконденсаторов. Стоит отметить комплексную работу по моделированию высоковольтного асинхронного электродвигателя с фазным ротором, выполненную коллективом Севастопольского государственного университета.

Заслуживают внимания статьи в области радиационной и техносферной безопасности, посвященные хранению отработавшего топлива и повышению качества очистки трюмных вод.

В методическом отношении интересны работы ученых из Севастопольского университета по созданию лабораторной установки для исследования высокоэнергетических процессов и виртуальной лабораторной работы для учебного процесса.

Бесспорно, радует активное участие студентов и аспирантов в выполнении научных работ и подготовке статей в научный журнал «Энергетические установки и технологии». Интерес к науке среди молодежи – это уверенность в процветании России в будущем!

Уважаемые коллеги, благодарю Вас за сотрудничество и поздравляю с Днем энергетика!

С уважением, заместитель главного редактора журнала «Энергетические установки и технологии», доктор технических наук

Ф.А. Губарев

СОДЕРЖАНИЕ

Энергетические системы и комплексы	10
<i>Аль-Руфайи Ф.М., Якимович Б.А., Кувишинов В.В., Абейдулин С.А., Котлов Д.В.</i> Разработка маломощных устройств на основе пьезоэлектрических преобразователей энергии	10
<i>Бордан Д.Ф., Галий В.А., Жильцов А.С., Касницкий А.Д., Никоненко А.В.</i> Мобильные фотоэлектрические станции для обеспечения автономного питания судовых энергосистем	16
<i>Канов Л.Н., Конева С.А., Пронина А.К.</i> Анализ режимов распределительных линий электроэнергетических систем на основе комплексных дифференциальных уравнений	20
<i>Крутенко Д.С., Лавриненко С.В., Янковский С.А., Губин В.Е., Слюсарский К.В.</i> Потенциал термальных вод мелового водоносного горизонта Томской области	27
<i>Якимович Б.А., Ивантеев И.С., Жильцов А.С., Владимиров А.С., Егоров Н.С.</i> Гибридная система энергоснабжения на основе альтернативных источников энергии	33
Методы и приборы контроля и диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды	37
<i>Губарев Ф.А., Давыдова Л.Ю., Торганов Д.В., Цирон М.С.</i> Лабораторная установка для исследования контактного инициирования высокоэнергетических материалов	37
<i>Кужель Д.Е., Эндржикиевич Ю.Ю.</i> Аутентификация с применением биометрических данных термографических изображений на основе нейронных сетей	49
Ядерные энергетические установки, топливный цикл, радиационная безопасность	56
<i>Павлова И.А., Губин А.В.</i> Обзор мирового опыта в области обращения с РАО	56
<i>Пичугова Л.Н., Фролова А.Н., Вишняков А.Н.</i> Контейнерное хранение отработавшего ядерного топлива на Запорожской атомной электростанции	64
Электротехнические комплексы и системы	69
<i>Бекиров Э.А., Циперко Л.Н., Асанов М.М., Кувишинов В.В.</i> Сравнение двух типов суперконденсаторов по результатам экспериментальных исследований	69
<i>Завьялов В.М., Майорова Ю.А., Смокталь Н.Н., Гайдук С.В.</i> Разработка и исследование алгоритмов синхронизации высоковольтного асинхронного электродвигателя с фазным ротором в режиме машины двойного питания	75
<i>Скидан А.А., Шадрин В.А.</i> Разработка виртуальной лабораторной работы «Исследование двухкаскадного усилителя переменного тока с обратной связью»	82
<i>Рипп А.Г., Матузаева О.В., Чернявская С.А.</i> Колебания связанных осцилляторов	87

Теоретическая и прикладная теплотехника	91
<i>Кокорина А.И., Герасимов Р.Д.</i> Исследование влияния режима работы электродугового реактора на процесс и продукт электродугового синтеза в системе «вольфрам-углерод»	91
Техносферная безопасность (в энергетике)	97
<i>Тверская С.Е., Гаришин А.Ю.</i> Повышение качественных показателей системы очистки нефтесодержащих трюмных вод	97
Процессы и аппараты химических технологий	102
<i>Федорова С.А., Ткаченко Э.В., Сербин А.Д.</i> Сравнительная оценка использования наноструктурированного SiO ₂ для очистки модельных сред, содержащих Pb ²⁺ , Ni ²⁺ и Co ²⁺	102

CONTENTS

Energy systems and complexes	10
<i>Al-Rufai F.M., Yakimovich B.A., Kuvshinov V.V., Abeidulin S.A., Kotlov D.V.</i> Development of low-power devices based on piezoelectric energy converters	10
<i>Bordan D.F., Galiy V.A., Zhiltsov A.S., Kasnitsky A.D., Nikonenko A.V.</i> Mobile photovoltaic stations to provide autonomous power supply to ship power systems	16
<i>Kanov L.N., Koneva S.A., Pronina A.K.</i> Analysis of the modes distributive lines of the electro energy systems on the basis of complex differential equalizations	20
<i>Krutenko D.S., Lavrinenko S.V., Yankovsky S.A., Gubin V.E., Slyusarskiy K.V.</i> The potential of thermal waters of the Cretaceous aquifer of the Tomsk region	27
<i>Yakimovich B.A., Ivanteev I.S., Zhilcov A.S., Vladimirov A.V., Egorov N.S.</i> Hybrid power supply system based on alternative energy sources	33
Methods and devices for monitoring and diagnostics of materials, products, substances and the natural environment	37
<i>Gubarev F.A., Davydova L.Y., Torganov D.V., Tsiron M.S.</i> Laboratory installation for the study of contact initiation of high-energy materials	37
<i>Kuzhel D.E., Endrizhikevich Y.Y.</i> Authentication using biometric thermographic image data based on neural networks	49
Nuclear power plants, fuel cycle, radiation safety	56
<i>Pavlova I.A., Gubin A.V.</i> Review of world experience in the field of radioactive waste management	56
<i>Pichugova L.N., Frolova A.N., Vishnykov A.N.</i> Container storage of spent nuclear fuel at the Zaporizhzhya Nuclear Power Plant	64
Electrical engineering complexes and system	69
<i>Bekirov E.A., Tsiperko L.N., Asanov M.M., Kuvshinov V.V.</i> Comparison of two types of supercapacitors based on experimental results	69
<i>Zavyalov V.M., Mayorova Y.A., Smoktal N.N., Gayduk S.V.</i> Development and research of synchronization algorithms of high-voltage asynchronous electric motor with a wound rotor in the double-feed Machine mode	75
<i>Skidan A.A., Shadrina V.A.</i> Development of a virtual laboratory work «Research of a two-stage AC amplifier with feedback»	82
<i>Ripp A.G., Matuzaeva O.V., Chernyavskaya S.A.</i> Oscillations of coupled oscillators	87
Theoretical and applied heat engineering	91
<i>Kokorina A.I., Gerasimov R.D.</i> Investigation of the impact of the electric arc reactor's operation mode on the process and product of the synthesis in the «tungsten-carbon» system	91
Technosphere safety (in the energy sector)	97
<i>Tverskaya S.E., Garshin A.Yu.</i> Increasing the quality performance of the oil-containing bilge water treatment system	97

Processes and devices of chemical technologies **102**

Fedorova S.A., Tkachenko E.V., Serbin A.D. Comparative assessment of the use of nanostructured SiO₂ for the purification of model media containing Pb²⁺, Ni²⁺ and Co²⁺ 102

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И КОМПЛЕКСЫ

УДК 620.92, 621.31

Разработка маломощных устройств на основе пьезоэлектрических преобразователей энергии

Аль-Руфай Ф.М., Якимович Б.А., Кувшинов В.В., Абейдулин С.А.,
Котлов Д.В.

ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», ул. Университетская, 33,
г. Севастополь, 299053, Россия

Статья поступила 12.11.2024 г.; после доработки 13.11.2024 г.

Аннотация

Проведены исследования конструкций схем, используемых для пьезоэлектрических установок малой мощности. Для повышения эффективности работы предложенных устройств была предложена эффективная схема подключения под названием SECE-опт. Проведена оценка эффективности каждой схемы, её способность адаптироваться к переменным нагрузкам и общие характеристики преобразования энергии. Анализ показал, что схема SECEопт-с демонстрирует наивысшую эффективность благодаря усовершенствованной технологии переключения и стабильной выходной мощности. Установлено, что оптимизированная схема SECEопт является наиболее подходящим решением для маломощных систем.

Ключевые слова: пьезоэлектрические элементы, синхронное извлечение заряда, схемы преобразования энергии, автономные системы, эффективность преобразования энергии, механические вибрации.

Development of low-power devices based on piezoelectric energy converters

Al-Rufai F.M., Yakimovich B.A., Kuvshinov V.V., Abeidulin S.A., Kotlov D.V.
Sevastopol state university, Universitetskaya st., Sevastopol, 299053, Russia,

Received 12.11.2024 y.; received in final form 13.11.2024 y.

Abstract

Research has been carried out on the designs of circuits used for low-power piezoelectric installations. To improve the operating efficiency of the proposed devices, an effective connection scheme called SECE-opt was proposed. The flux of solar radiation reflected from the water surface is used. In this paper, various piezoelectric energy harvesting circuits including the standard full bridge rectifier (S-FBR), self-powered synchronous charge extraction (SECE) and optimized self-powered synchronous charge extraction (SECEopt) circuits are discussed. The performance of each scheme, their ability to adapt to variable loads and overall power conversion characteristics were evaluated.

Key words: piezoelectric elements, synchronous charge extraction, energy conversion circuits, autonomous systems, energy conversion efficiency, mechanical vibrations.

Введение

В данной статье представлены результаты экспериментального анализа схем преобразования энергии на основе пьезоэлектрических элементов под воздействием вибрации. Оценивались три типа схем: стандартная схема полного мостового выпрямителя (S-FBR), схема автономного синхронного извлечения электрического заряда (SECE) и оптимизированная схема автономного синхронного извлечения заряда (SECE-опт). Эксперименты проводились с целью оценки эффективности преобразования энергии в условиях реальной эксплуатации. Результаты показали, что схема SECE-опт обладает наивысшей эффективностью преобразования энергии и стабильной выходной мощностью, превосходя другие протестированные схемы. Выявлены оптимальные параметры работы схемы, обеспечивающие минимальные потери энергии и максимальную выходную мощность. SECE-опт обеспечивает максимальную выходную мощность и стабильность при изменяющихся условиях нагрузки. Таким образом, SECE-опт была признана наиболее эффективной схемой для сбора энергии из низкочастотных механических вибраций, таких как движение воды или волны.

Сбор энергии с помощью пьезоэлектрических элементов является перспективным решением для питания маломощных электронных устройств [1,2]. Современные маломощные устройства, такие как бие требуют энергоэффективных источников питания для обеспечения автономной работы. Одним из перспективных решений является использование механической энергии движений воды и волны для её преобразования в электричество с помощью пьезоэлектрических элементов [3-6]. Пьезоэлектрические элементы преобразуют механическую энергию, возникающую при движении, в электрическую энергию [7,9]. Однако эффективность таких систем зависит от применяемых схем преобразования энергии, которые должны минимизировать потери и обеспечивать стабильную выходную мощность [10-12]. В данной работе проведён экспериментальный анализ трёх типов схем для оценки их производительности и стабильности в условиях реальных сигналов.

Постановка задачи

Основные задачи работы состояли в проведение экспериментальных испытаний схем преобразования энергии, оценке стабильности работы схем при изменении условий нагрузки и

определение наиболее подходящей для практического применения в маломощных устройствах. Для методов исследования следует указать, что эксперименты проводились с использованием реальных сигналов вибрации. Для каждой схемы измерялась выходная мощность и стабильность работы. Данные собирались с использованием специализированных систем измерения и обрабатывались для выявления оптимальных параметров работы каждой схемы.

Целью работы являлась экспериментальная оценка эффективности различных схем преобразования энергии на основе пьезоэлектрических элементов. Цель анализируется для оценки влияния значений компонентов на выходную мощность. Цель состоит в том, чтобы определить оптимальные значения этих компонентов для максимизации выработки электроэнергии. В экспериментальном исследовании только три цепи, для выбора оптимальной цепью что имеет решающее значение для повышения выходной мощности.

В работе экспериментально оцениваются характеристики схем. На рисунке 1 показана экспериментальная установка, состоящая из пьезоэлемента PVDF, прикрепленного к вибростенду для имитации вибрационных воздействий. Система управления в реальном времени dSpace использовалась для захвата и регистрации сигналов дифференциального виброметра и акселерометра. Система также управляла усилителем мощности, который обеспечивал необходимый привод электромагнитного шейкера. Для поддержания постоянной амплитуды колебаний была реализована замкнутая система управления, обеспечивающая стабильность синусоидального возбуждения на протяжении всех экспериментов. Пьезоэлектрический элемент был подключен к схеме, а к выходу схемы был подключен программируемый резистор для регулирования значений сопротивления во время тестирования. Наконец, все данные измерений были записаны с помощью устройства DAQ (NI 9229).

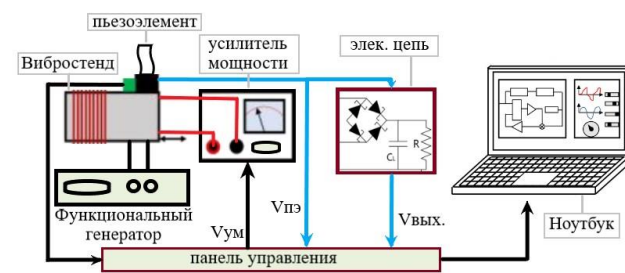


Рис. 1 Принципиальная схема экспериментальной установки

Транзисторы MOSFET, диоды и индуктор образуют электронный коммутатор, компоненты которых подробно описаны в таблице 1.

Таблица 1. Компоненты схемы

Элемент	Количество
ПЭ	5
диод	B140BQ-13-F
Транзистор 1 NPN	ZVN2110GTA
Транзистор 2 PNP	IRFL9110TRPBF
Индикатор1,2	TG05-2004NCRL

Результаты исследований

Цепь полного мостового выпрямителя

На рисунке (2-а) показаны два различных типа схем выпрямителей: (а) диодный выпрямитель S-FBR и (б) выпрямитель на основе CMOS.

Экспериментальное сравнение выходных напряжений для S-FBR (на основе диода) и CMOS (на основе CMOS) выпрямителей представлено на рисунках 3 и 4. Результаты наглядно показывают, что фильтрующий конденсатор C_L играет важную роль в стабилизации выходного напряжения в обеих схемах. Чем больше значение C_L , тем более стабильным становится выходное напряжение. Тем не менее, при одинаковой конфигурации схемы, S-FBR достигает стабильного выходного напряжения 12 В, в то время как CMOS стабилизирует только около 4,5 В.

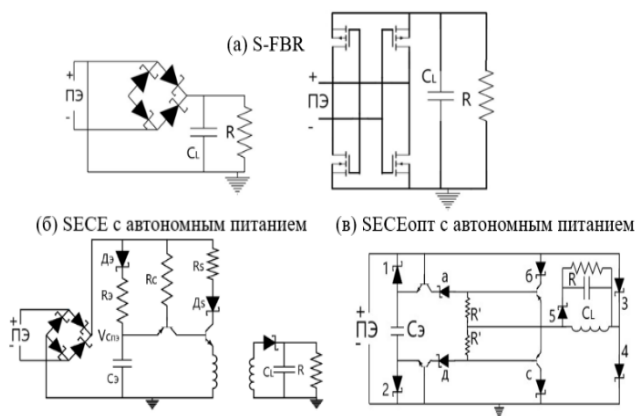


Рис. 2. Принципиальная схема электрических цепей, используемых в исследовании

Это несоответствие объясняется емкостями переходов транзисторов в CMOS, которые не успевают зарядиться из-за быстрых переходов волновых сигналов. По сравнению с этим схема S-FBR на основе диода более эффективна для достижения стабильного выпрямления.

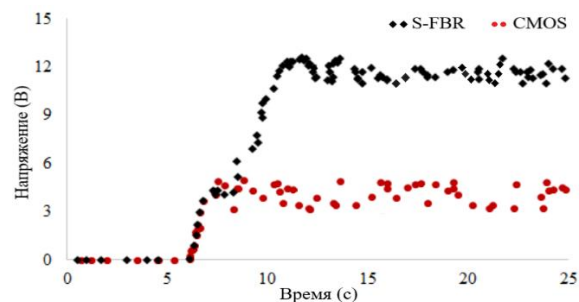


Рис. 3 Выход S-FBR и CMOS с нагрузкой C_L 150 нФ и $R = 1,1 \text{ М}\Omega$

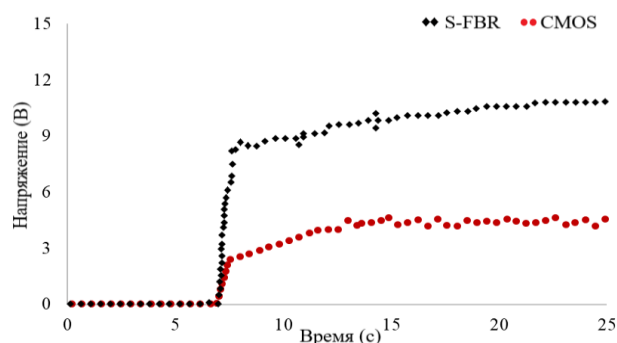


Рис. 4 Выход S-FBR и CMOS с нагрузкой C_L 350 нФ и $R = 1,1 \text{ М}\Omega$

Цепь SECE с автономным питанием

Принципиальная схема синхронного синхронного извлечения электрического заряда с автономным питанием (автономный SECE) показана на рисунке (2-б). Выходная мощность схемы SECE с автономным питанием зависит от значений огибающих компонентов. На рисунке 5 показано изменение средней выходной мощности в зависимости от значений огибающих конденсаторов и резисторов. Результаты показывают, что оптимальными значениями для огибающей конденсатора и огибающей резистора являются $R_3=0 \text{ Ом}$ и $C_3=300 \text{ нФ}$, что согласуется с результатами моделирования, проведенного ранее. Эти значения компонентов выбраны для дальнейших экспериментов с несколькими конфигурациями.

На рисунке 6 показана средняя выходная мощность в зависимости от сопротивления нагрузки для различных значений конденсатора нагрузки (C_L). Можно заметить, что средняя выходная мощность сильно зависит от компонентов нагрузки. При меньших значениях C_L средняя выходная мощность больше. Однако при больших значениях C_L выходная мощность становится менее стабильной. Экспериментальные результаты показывают, что максимальная выходная мощность составляет менее 10 мВт.

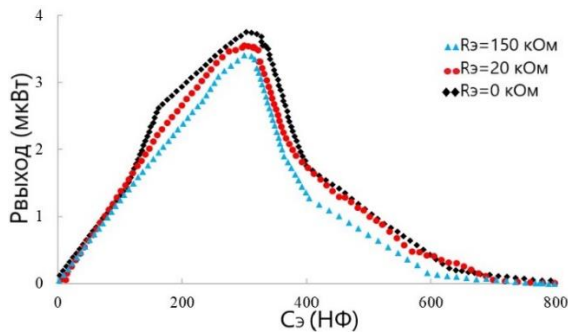


Рис. 5. Изменение выходной мощности в зависимости от значений C_z и R_z для цепи SECE с автономным питанием

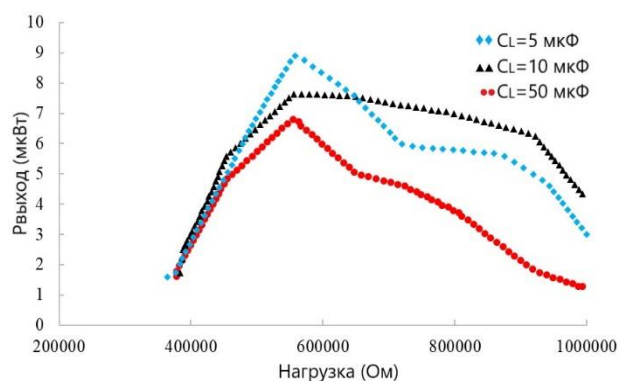


Рис. 6. Изменение выходной мощности в зависимости от значений C_L и R_μ для различных значений конденсатора нагрузки

Цепь SECEopt с автономным питанием

Принципиальная схема SECEopt с автономным питанием показана на рисунке (2-в). Аналогично моделированию, экспериментальные результаты были получены при использовании индуктивности нагрузки $L=20$ мГн, емкости нагрузки $C_L=25$ мкФ и сопротивления нагрузки $R=8$ МОм. Для оптимизации характеристик были протестированы различные комбинации подтягивающих резисторов R' и огибающих конденсаторов C_z . Результаты эксперимента, показанные на рисунке 7, свидетельствуют о том, что для каждого значения R' выходная мощность сначала увеличивается при увеличении C_z , а затем уменьшается. Оптимальное состояние достигается, когда $C_z=10$ нФ и R' открыт. При этом условия выходная мощность остается стабильной, а емкости переходов транзисторов получают достаточно времени для заряда и разряда. Эти результаты согласуются с прогнозами моделирования.

На рисунке 8 представлена выходная мощность в зависимости от сопротивления нагрузки для различных значений C_L .

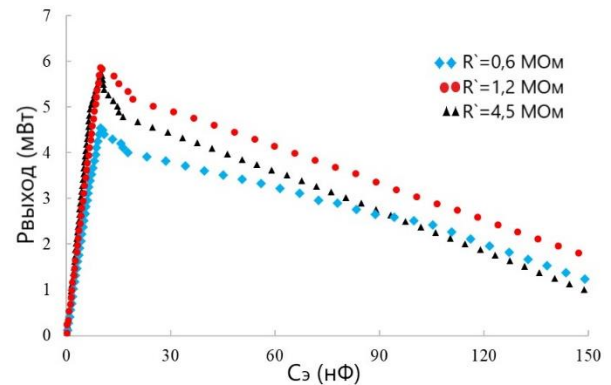


Рис. 7. Изменение выходной мощности в зависимости от значений C_z и R' для цепи SECEopt с автономным питанием

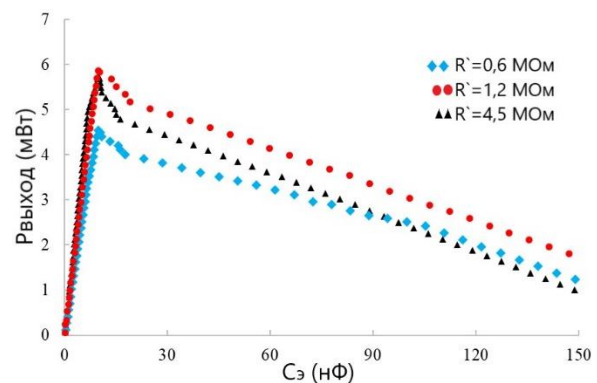


Рис. 8. Изменение выходной мощности в зависимости от значений C_L и R

Стабильная выходная мощность наблюдается при сопротивлении нагрузки R больше 0,1 МОм, а максимальная стабильная выходная мощность 98 мВт достигается при $C_L=5$ мкФ и $R=0,4$ МОм.

Обсуждение результатов

Результаты показали, что стандартная схема полного мостового выпрямителя (S-FBR) обеспечивала минимальную выходную мощность среди тестируемых схем, что объясняется значительными потерями на падении напряжения диодов и зависимостью от сопротивления нагрузки. Схема SECE с автономным питанием продемонстрировала улучшенную производительность за счет снижения потерь при выпрямлении и более стабильной работы при изменении нагрузки. Однако наилучшие результаты были достигнуты с использованием схемы SECEopt с автономным питанием, которая благодаря оптимизированной технологии синхронного извлечения заряда обеспечила максимальную выходную мощность и устойчивость к изменяющимся условиям эксплуатации. Схемы S-FBR и SECE с

автономным питанием, хотя и демонстрируют стабильную работу при низких нагрузках, теряют эффективность при увеличении сопротивления. Результаты экспериментов подтвердили, что схема SECE_{опт} с автономным питанием обладает наилучшей производительностью среди всех протестированных схем. Это связано с тем, что схема обеспечивает синхронное извлечение заряда с минимальными потерями энергии, что критически важно для систем сбора энергии от нерегулярных механических воздействий, таких как волны.

Таким образом, результаты экспериментов подтверждают, что оптимизированная схема SECE_{опт} с автономным питанием является наилучшим решением для систем сбора энергии и может использоваться в маломощных устройствах.

Выводы

В заключении можно утверждать, что в ходе экспериментального исследования были проведены испытания трех схем преобразования энергии: S-FBR, SECE с автономным питанием и SECE_{опт} с автономным питанием. Схемы S-FBR и SECE с автономным питанием, хотя и демонстрируют стабильную работу при низких нагрузках, теряют эффективность при увеличении сопротивления. Результаты показали, что схема SECE_{опт} с автономным питанием обладает наивысшей эффективностью и стабильностью работы. Эта схема минимизирует потери энергии и обеспечивает максимальную выходную мощность при различных параметрах движения пользователя. Полученные результаты подтверждают целесообразность использования схемы SECE_{опт} с автономным питанием в маломощных устройствах, где требуется эффективное преобразование механической энергии в электрическую.

Список литературы

1. Rahman, A., Farrok, O., Islam, M. R., & Xu, W. (2020). Recent progress in electrical generators for oceanic wave energy conversion. *IEEE Access: Practical Innovations, Open Solutions*, 2020, vol 8, pp138595–138615.
2. The Use of Solar Power Plants to Provide Energy Security of the Crimean Region, Kuvshinov, V.V., Al-Rufae, F.M., *Applied Solar Energy*, 2019, 55(4), pp. 252–255.
3. The Development of the Optimal Model of Energy Resources Management in Energy Systems of the Republic of Crimea and the Middle East, Guryev,

- V.V., Yakimovich, B.A., Al-Rufae, F.M., *Applied Solar Energy*, 2019, 55(3), pp. 189–194.
4. Разработка и анализ комбинированной энергетической системы на основе пьезоэлектрических элементов / Ф. М. Аль-Руфай, Б. А. Якимович, В. В. Кувшинов, В. В. Смирнов // *Промышленная энергетика*. – 2024. – № 3. – С. 31–40.
5. Shareef, A., Goh, W. L., Narasimalu, S., & Gao, Y. A rectifier-less AC–DC interface circuit for ambient energy harvesting from low-voltage piezoelectric transducer array. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2018, vol 34 (no 2), pp 1446–1457.
6. Wang, X., et al. Multi-input SECE based on buck structure for piezoelectric energy harvesting. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2021, vol 36, no 4, pp 3638–3642.
7. Использование пьезоэлектрических материалов для выработки электроэнергии от механических нагрузок на дорожное покрытие / Ф. М. М. Аль-Руфай, Б. А. Якимович, С. П. Муровский [и др.] // *Транспорт Азиатско-Тихоокеанского региона*. – 2024. – № 1(38). – С. 5–12.
8. J. Lee, B. Choi, Development of a piezoelectric energy harvesting system for implementing wireless sensors on the tires, *Energy Convers. Manage.* 78 (2014) 32–38.
9. Li, H., Tian, C., & Deng, Z. D. Energy harvesting from low frequency applications using piezoelectric materials. *Applied Physics Reviews*, (2014), 1 (4), 041301.
10. L.M. Miller, A.D.T. Elliott, P.D. Mitcheson, E. Halvorsen, I. Paprotny, P.K. Wright, Maximum performance of piezoelectric energy harvesters when coupled to interface circuits, *IEEE Sens. J.* 16 (12) (2016) 4803–4815.
11. J. Dicken, P. D. Mitcheson, I. Stoianov and E. M. Yeatman, "Power-Extraction Circuits for Piezoelectric Energy Harvesters in Miniature and Low-Power Applications," in *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2012, vol. 27, no. 11, pp. 4514–4529.
12. Shafer, B. W., & Yoon, S. (2017). Comparison of energy harvesting circuits for piezoelectric devices. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 32(4), 2793–2800.

References

1. Rahman, A., Farrok, O., Islam, M. R., & Xu, W. (2020). Recent progress in electrical generators for oceanic wave energy conversion. *IEEE Access: Practical Innovations, Open Solutions*, 2020, vol 8, pp138595–138615.
2. The Use of Solar Power Plants to Provide Energy Security of the Crimean Region, Kuvshinov, V.V., Al-Rufae, F.M., *Applied Solar Energy*, 2019, 55(4), pp. 252–255.
3. The Development of the Optimal Model of Energy Resources Management in Energy Systems of the

- Republic of Crimea and the Middle East, Guryev, V.V., Yakimovich, B.A., Al-Rufae, F.M., *Applied Solar Energy*, 2019, 55(3), pp. 189–194.
4. Development and analysis of a combined energy system based on piezoelectric elements / F. M. Al-Rufai, B. A. Yakimovich, V. V. Kuvshinov, V. V. Smirnov // *Industrial energy*. – 2024. – No. 3. – P. 31-40.
 5. Shareef, A., Goh, W. L., Narasimalu, S., & Gao, Y. A rectifier-less AC–DC interface circuit for ambient energy harvesting from low-voltage piezoelectric transducer array. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2018, vol 34 (no 2), pp 1446–1457.
 6. Wang, X., et al. Multi-input SECE based on buck structure for piezoelectric energy harvesting. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2021, vol 36, no 4, pp 3638–3642.
 7. The use of piezoelectric materials to generate electricity from mechanical loads on the road surface / F. M. M. Al-Rufai, B. A. Yakimovich, S. P. Murovsky [et al.] // *Transport of the Asia-Pacific Region*. – 2024. – No. 1(38). – P. 5-12.
 8. J. Lee, B. Choi, Development of a piezoelectric energy harvesting system for implementing wireless sensors on the tires, *Energy Convers. Manage.* 78 (2014) 32–38.
 9. Li, H., Tian, C., & Deng, Z. D. Energy harvesting from low frequency applications using piezoelectric materials. *Applied Physics Reviews*, (2014), 1 (4), 041301.
 10. L.M. Miller, A.D.T. Elliott, P.D. Mitcheson, E. Halvorsen, I. Paprotny, P.K. Wright, Maximum performance of piezoelectric energy harvesters when coupled to interface circuits, *IEEE Sens. J.* 16 (12) (2016) 4803–4815.
 11. J. Dicken, P. D. Mitcheson, I. Stoianov and E. M. Yeatman, "Power-Extraction Circuits for Piezoelectric Energy Harvesters in Miniature and Low-Power Applications," in *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2012, vol. 27, no. 11, pp. 4514-4529.
 12. Shafer, B. W., & Yoon, S. (2017). Comparison of energy harvesting circuits for piezoelectric devices. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 32(4), 2793-2800.

УДК 620.92, 621.311.243

Мобильные фотоэлектрические станции для обеспечения автономного питания судовых энергосистем

Д.Ф. Бордан¹, В.А. Галий¹, А.С. Жильцов¹, А.Д. Касницкий¹, А.В. Никоненко¹
ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», ул. Университетская, 33,
г. Севастополь, 299053, Россия

Статья поступила 12.11.2024 г.; после доработки 13.11.2024 г.

Аннотация

При использовании отражённого потока солнечной радиации можно значительно увеличить мощностные характеристики фотоэлектрических преобразователей и поднять выработку электроэнергии. В представленной работе были проведены исследования конструкции фотоэлектрической станции для расположения на палубах судна. С целью повышения мощностных характеристик кремниевых панелей используется отраженный от поверхности воды поток солнечной радиации. В результате было получено значительное увеличение энергетической эффективности солнечной установки.

Ключевые слова: фотоэлектрические панели, отраженное излучение, альтернативная энергетика, коэффициент преобразования, солнечная электростанция.

Mobile photovoltaic stations to provide autonomous power supply to ship power systems

D.F. Bordan, V.A. Galiy, A.S. Zhiltsov, A.D. Kasnitsky, A.V. Nikonenko
Sevastopol state university, Universitetskaya st., Sevastopol, 299053, Russia,

Received 12.11.2024 y.; received in final form 13.11.2024 y.

Abstract

By using the reflected flux of solar radiation, it is possible to significantly increase the power characteristics of photoelectric converters and increase electricity production. Research has been carried out on the design of a photovoltaic station for placement on the decks of a ship. In order to increase the power characteristics of silicon panels, the flux of solar radiation reflected from the surface of the water is used. The result was a significant increase in the energy efficiency of the solar installation.

Key words: photovoltaic panels, reflected radiation, alternative energy, conversion factor, solar power plant.

Введение

В работе показано влияние работы фотоэлектрических панелей при определенных условиях эксплуатации для расположения на прибрежной территории или непосредственно на палубах морских, речных судов или другого водного транспорта [1].

Использование солнечных электрогенерирующих батарей для вспомогательного электроснабжения позволяет решать такие проблемы,

как экономия топлива, улучшение экологии, простота использования, малый вес и др. Особенно это актуально для морских судов малого водоизмещения, которые вследствие ограниченной грузоподъемности не могут взять на борт достаточного количества топлива, что особенно важно для длительных морских переходов без заходов в порты [1, 2]. Кремниевые преобразователи, а также фотоэлектрические электрогенерирующие установки, созданные на их основе, поз-

воляют вырабатывать электроэнергию без использования органического топлива и вредных выбросов в окружающую среду и морскую воду, что особенно важно с точки зрения морской экологии [2]. Однако они имеют существенный недостаток – это малый коэффициент преобразования солнечной энергии [3]. Отсюда чтобы получить хоть какой-то маломальский достаточный мощностной электроэнергетический выход необходимо покрывать фотоэлектрическими панелями большую площадь на поверхности палубы, что не всегда реализуемо [1, 4].

Постановка задачи

Авторами данной работы предложена специальная конструкция расположения фотоэлектрических модулей с целью использования отраженного от воды потока солнечной радиации для повышения энергосыработки солнечной электрогенерирующей системой [5]. В исследование вошли шесть панелей, для повышения потока солнечной радиации использовались отражающие конструкции, установленные непосредственно на горизонтальной поверхности земли. Такое расположение позволяет имитировать отраженный от водной поверхности поток солнечной радиации и соответственно повысить мощностные характеристики фотоэлектрической станции, установленной на палубе судна или на прибрежной территории [1,5,6].

Результаты исследований

В Севастопольском государственном университете на кафедре Энергетические системы и комплексы традиционных и возобновляемых источников (ЭСКТВИ) были проведены исследования, которыми занимались сотрудники и аспиранты. Используя солнечную фотоэлектрическую установку мощностью 1,5 кВт с линейным низкопотенциальным концентратором (рис.1), были получены данные по увеличению её мощностных характеристик [6,7].

Имитация отраженного потока солнечной радиации осуществлялась при помощи расположенных на поверхности земли отражающих конструкций с покрытиями из светоотражающей пленки марки ORACAL [7]. Сама установка состояла из 6 фотоэлектрических модулей (марка PL-250), мощностью по 250 Вт каждый. Концентратор можно было располагать на горизонтальной поверхности под определенным углом к панелям [5], что позволяет менять направление потока солнечной радиации и увеличивать мощностные характеристики электроустановки.

Такой тип концентратора можно использовать как на палубе судна, так и в полевых условиях на прибрежной территории. В частности, такая конструкция может быть установлена и на сетевой солнечной электростанции при покрытии определённой части земли отражающим покрытием. На кафедре ЭСКТВИ были проведены исследования, направленные на определение энергетических характеристик отраженного потока солнечной радиации от низкопотенциального концентратора предложенной конструкции, показавшие значительное увеличение энергоотдачи (рис. 2).



Рис.1. Фотоэлектрическая установка с линейным отражателем номинальной мощностью 1,5 кВт, без учёта работы концентратора.

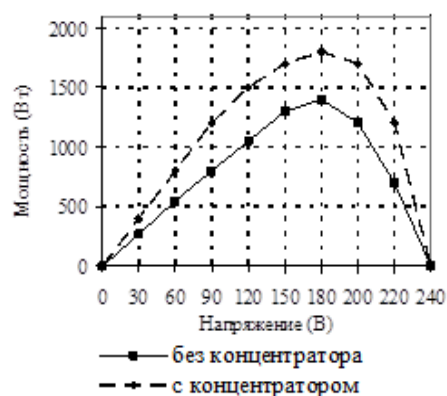


Рис. 2. Мощностные характеристики фотоэлектрической станции, номинальной мощностью 1,5 кВт, при использовании отражающих конструкций (плотность потока солнечной радиации составляла 900 Вт/м²).

Как видно из представленных данных на рис. 2 энергетические характеристики, в частности мощность фотоэлектрической станции, при использовании низкопотенциального концентратора увеличивалась на 25 %. Т. к. размеры модулей PL-250 составляют 1,5 x 1 м, и расположены они вертикально (рис.1), соответственно длина всей станции относительно поверхности

земли составляет 6 м, а площадь модулей 9 м². При этом ширина отражающих конструкций при данном эксперименте (рис.1) составляла всего 1 м, т. е. площадь концентратора составляет 6 м². При увеличении ширины отражателей соответственно будет и увеличиваться и поток солнечной радиации, а соответственно и мощностные характеристики фотоэлектрических панелей.

Для изменения потока солнечной радиации необязательно изменять угол установки отражателей, гораздо эффективнее изменять установку самих панелей, при этом концентратор располагается неподвижно на горизонтальной поверхности земли и при необходимости его площадь можно увеличивать в значительных размерах, что позволяет значительно увеличивать мощностные характеристики электростанции. При проведении исследований было определено, что при установке отражающих конструкций под углами от 45 до 60° к поверхности земли увеличение плотности потока будет наивысшей. Эти исследования позволяют имитировать работу такой конструкции на палубе морского транспорта, т. к. поверхность моря, используемого в качестве концентратора неограниченна.

На кафедре ЭСКТВИ были проведены эксперименты, сходные с экспериментами, представленными выше (рис. 1 и рис. 2), но с изменением ширины отражающих поверхностей (на горизонтальную поверхность добавлялись плоские отражатели) и с изменением угла наклона фотоэлектрических модулей. По результатам экспериментов была составлена таблица 1, в которой показаны результаты относительного увеличения энергетических характеристик всей установки.

Таблица 1. Относительные характеристики установки при использовании низкопотенциального плоского концентратора

Угол наклона панелей (градусы)	Относительное увеличение энергетических характеристик			
	Ширина и площадь (м ²) концентратора			
	1 м (6 м ²)	2 м (12 м ²)	3 м (18 м ²)	4 м (24 м ²)
45,0	1,3	2,5	3,3	4
67,5	1,27	2,2	3	3,5
75,0	1,22	2	2,5	3
80	1,15	1,8	2	2,5

Как видно из результатов экспериментов выходные характеристики фотоэнергетической установки при изменении углов наклона концентратора и увеличении его площади изменялись

нелинейно. Т. е. при увеличении потока солнечной радиации оптимальный коэффициент преобразования являлся при угле установки в 45 градусов, при увеличении углов относительные показатели уменьшались. Соответственно при увеличении ширины и площади концентратора относительные показатели также уменьшались. Например, при увеличении коэффициента концентрации в 2 раза (при оптимальных углах) мощность панелей увеличивалась в 1,5 и менее раз. Это может быть объяснено так и качеством отражающих поверхностей, так и заводскими характеристиками самих модулей. В работах [3-7] описано что при наклонном падении солнечных лучей конструкция кремниевых панелей не может преобразовывать качественно весь поток падающей радиации и соответственно коэффициент фотоэлектрического преобразования падает.

Выводы

В заключении можно утверждать, что предложенные фотоэлектрические системы питания для судового оборудования не заменяют основные генерирующие мощности и не усложняют их работу, при этом они эффективно помогают работе основных систем питания. Также эти системы позволяют долгое время обходиться без поставок топлива и без непосредственного участия в их работе технического персонала, что особенно важно для обеспечения судовых энергетических систем.

Для обеспечения морского транспорта и припортовой инфраструктуры можно использовать фотоэлектрические генерирующие системы, но для повышения их характеристик целесообразно использование отражённого потока солнечной радиации от водной поверхности.

Использование предложенных систем позволяет значительно сократить потребление органических топлив и уменьшить негативное влияние на экологию, что важно для морского транспорта и прибрежных территорий, которые как правило являются и курортно-рекреационными зонами.

Список литературы

1. Системы резервного питания для судовых энергетических установок // Жильцов А.С., Коломийченко В.П., Ивантеев И.С., Владимиров А.С., Артеменко И.Д. / Естественные и технические науки. 2024. № 1 (188). С. 230-233.
2. Солнечная энергетика для устойчивого развития Крыма / [Н. В. Багров, А. И. Боков, Э. А. Бекиров, и др.]. – Симферополь: Крымский научный

- центр, 2009. – 293 с.
3. Возможности повышения эффективности электрогенерации фотоэлектрических модулей / Кувшинов В.В., Гусева Е.В., Березняк В.А., Тиман Д.И., Ивантеев И.С. / *Естественные и технические науки*. 2022. № 5 (168). С. 266-268.
 4. Фотоэлектрические приборы из кристаллического кремния. Методика коррекции результатов измерения вольтамперной характеристики (МЭК 891-87) : ГОСТ 28976-91. – [Введ. 19.04.91]. – Москва: ИПК Издательство стандартов, 2004. – 42 с. – (Национальный стандарт России).
 5. Солнечный концентратор для фотоэлектрических модулей / Башта А.И., Кувшинов В.В., Сафонов В.А. // Патент на полезную модель RU 150120 U1, 27.01.2015. Заявка № 2014149411/93 от 17.10.2014.
 6. Раушенбах Г. Справочник по проектированию солнечных батарей. М.: Энергоатомиздат, 1983. 397 с.
 7. Кувшинов, В.В., Морозова, Н.В. / Возможности повышения мощностных характеристик солнечных установок для использования в энергетике Крыма // М.: Спутник+, 2017. 175 с.
 8. Анализ методов управления производительно-стью преобразователей постоянного тока солнечных элементов и выбор оптимального метода / Л. М. А. Абдали, М. Н. К. Аль-Малики, А. Г. Аль Баирмани [и др.] // *Интеллектуальные системы в производстве*. – 2023. – Т. 21, № 1. – С. 125-137.
 9. Belkaid A., Colak I., Kayisli K. Implementation of a modified P&O-TMMT algorithm adapted for varying solar radiation conditions // *Electrical Engineering*, 2017, vol. 99, pp. 839–846.
 10. Абдали Л.М., Аль-Малики М.Н., Кувшинов В.В. Кузнецов П.Н., Морозова Н.В. Математическое моделирование с использованием алгоритма контроля точки максимальной мощности для фотоэлектрической системы// *Труды МАИ*. 2023. № 130.
 - GOST 28976-91. – [Input. 04/19/91]. – Moscow: IPK Publishing House of Standards, 2004. – 42 p. – (National Standard of Russia).
 5. Solar concentrator for photovoltaic modules / Bashta A.I., Kuvshinov V.V., Safonov V.A. // Patent for utility model RU 150120 U1, 01/27/2015. Application No. 2014149411/93 dated 10/17/2014.
 6. Rauschenbach G. Handbook for the design of solar panels. M.: Energoatomizdat, 1983. 397 p.
 7. Kuvshinov, V.V., Morozova, N.V. / Possibilities for increasing the power characteristics of solar installations for use in the energy sector of Crimea // M.: Sputnik+, 2017. 175 p.
 8. Abdali L.M., Al'-Maliki M.N., Al' Bairmani A.G., Yakimovich B.A., Syaktereva V.V., Kuvshinov V.V. [Analysis and selection of the optimal performance control method for solar cell dc converters]. *Intellectual'nye sistemy v proizvodstve*. 2023, vol. 21, no. 1, pp. 125-137 (in Russ.).
 9. Belkaid A., Colak I., Kayisli K. Implementation of a modified P&O-TMMT algorithm adapted for varying solar radiation conditions, *Electrical Engineering*, 2017, vol. 99, pp. 839–846.
 10. Abdali L.M., Al-Maliki M.N., Kuvshinov V.V. Kuznetsov P.N., Morozova N.V. Mathematical modeling using a maximum power point control algorithm for a photovoltaic system // *Proceedings of MAI*. 2023. No. 130.

References

1. Backup power systems for ship power plants // Zhiltsov A.S., Kolomiychenko V.P., Ivanteev I.S., Vladimirov A.S., Artemenko I.D. / *Natural and technical sciences*. 2024. No. 1 (188). pp. 230-233.
2. Solar energy for sustainable development of Crimea / [N. V. Bagrov, A. I. Bokov, E. A. Bekirov, etc.]. – Simferopol: Crimean Scientific Center, 2009. – 293 p.
3. Possibilities for increasing the efficiency of power generation of photovoltaic modules / Kuvshinov V.V., Guseva E.V., Bereznyak V.A., Timan D.I., Ivanteev I.S. / *Natural and technical sciences*. 2022. No. 5 (168). pp. 266-268.
4. Photovoltaic devices made of crystalline silicon. Methodology for correcting the results of measuring the current-voltage characteristic (IEC 891-87):

УДК 620.92

Анализ режимов распределительных линий электроэнергетических систем на основе комплексных дифференциальных уравнений

Канов Л.Н., Конева С.А., Пронина А.К.

ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», ул. Университетская, 33,
г. Севастополь, 299053, Россия, Inkanov48@mail.ru

Статья поступила 30.10.2024 г.; после доработки 31.10.2024 г.

Аннотация

Представлена возможность численного моделирования режима распределительной линии электроэнергетических систем на основе аналитической аппроксимации зависимости удельных параметров линии от расстояния по длине. Построена математическая модель линии на основе теории электрических цепей с распределенными параметрами. Показано, что анализ режима линии сводится к решению системы линейных дифференциальных уравнений с переменными параметрами. Описан алгоритм решения краевых задач для уравнений модели, приведены примеры расчета типичных режимов.

Ключевые слова: электроэнергетическая система, участки распределительной линии, распределенные параметры, комплексные напряжение, ток, нагрузка, краевые задачи

Analysis of the modes distributive lines of the electro energy systems on the basis of complex differential equalizations

Kanov L.N., Koneva S.A., Pronina A.K.

Sevastopol State University, 33, Universitetskaya st., Sevastopol, 299053, Russia, Inkanov48@mail.ru

Received 30.10.2024 y.; received in final form 31.10.2024 y.

Abstract

Possibility of numeral design of the mode of distributive line of the electro energy systems is presented on the basis of analytical approximation of dependence of specific parameters of line from distance on length. The mathematical model of line is built on the basis of theory of electric chains with the up-diffused parameters. It is showed that the analysis of the mode of line is taken to the decision of the system of linear differential equalizations with in-out parameters. The algorithm of decision of regional tasks is described for equalizations of model, the examples of calculation of the typical modes are resulted.

Keywords: electro energy system, areas of distributive line, up-diffused parameters, complex tension, current, loading, regional tasks

Введение

Распределительные линии электропередач представляют основу, каркас электроэнергетических систем. В настоящее время для этой цели все чаще используются длинные кабельные линии с целью освобождения территорий под трассами воздушных линий, а также в связи с экологическими соображениями [1–3]. Кроме того, кабельные линии являются практически единственным способом передачи электроэнергии через большие водные пространства, например, в оффшорных электростанциях [4].

Кабельные линии в большинстве случаев являются закрытыми сооружениями, они защищены от ветра и гололедных нагрузок, однако

они подвержены другим отрицательным внешним воздействиям. При прокладке кабелей ими являются наличие влаги, химическая агрессивность среды, блуждающие токи, возможность механических повреждений, дополнительный нагрев или охлаждение отдельных участков. Все это ведет к изменению их удельных параметров на единицу длины и понижает точность и достоверность их расчетов.

Целью статьи является повышение точности и достоверности расчетов режимов длинных кабельных линий на основе их оперативного контроля и оценки их удельных параметров.

Для достижения этой цели в статье поставлены и решаются следующие задачи:

- представлена методика оценки зависимости первичных параметров кабельных линий по их длине;
- предложена процедура точного расчета стационарных режимов линий на основе комплексных дифференциальных уравнений.

Основные уравнения линии

Соотношения между токами i и напряжениями u на границах элементарного участка линии длиной dl определяются двумя уравнениями в частных производных [5–7]:

$$\left. \begin{aligned} -\frac{\partial u}{\partial x} &= r_0 i + L_0 \frac{\partial i}{\partial t}; \\ -\frac{\partial i}{\partial x} &= g_0 u + C_0 \frac{\partial u}{\partial t}, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где r_0, g_0, L_0, C_0 – соответственно активные сопротивление и проводимость, индуктивность и емкость на единицу длины линии. Эти уравнения характеризуют как переходные, так и установившиеся режимы линии. Если линия подсоединена к источнику синусоидального напряжения $\dot{U} = Ue^{j\omega t}$, то для установившегося по времени режима следуют уравнения (1) в комплексной форме

$$-\frac{d\dot{U}}{dx} = \underline{Z}_0 \dot{I}; \quad -\frac{d\dot{I}}{dx} = \underline{Y}_0 \dot{U}, \quad (2)$$

где $\underline{Z}_0 = r_0 + j\omega L_0$; $\underline{Y}_0 = g_0 + j\omega C_0$ – комплексные сопротивление и проводимость единицы длины линии соответственно. После дифференцирования по x уравнений (2) и взаимной подстановки получаем два однотипных линейных дифференциальных уравнения 2-го

порядка, характеризующие изменение вдоль линии напряжения и тока

$$-\frac{d^2 \dot{U}}{dx^2} = -\underline{Z}_0 \underline{Y}_0 \dot{U}; \quad -\frac{d^2 \dot{I}}{dx^2} = -\underline{Z}_0 \underline{Y}_0 \dot{I}. \quad (3)$$

Решения уравнений (3) напряжения и тока имеют вид

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}(x) &= \underline{A}_1 e^{-\gamma x} + \underline{A}_2 e^{\gamma x}; \\ \dot{I}(x) &= \frac{\underline{A}_1 e^{-\gamma x} - \underline{A}_2 e^{\gamma x}}{\underline{Z}_B}, \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

где $\gamma = \sqrt{\underline{Z}_0 \underline{Y}_0}$ – коэффициент распространения; $\underline{Z}_B = \sqrt{\frac{\underline{Z}_0}{\underline{Y}_0}}$ – волновое сопротивление

линии; $\underline{A}_1, \underline{A}_2$ – комплексные постоянные, определяемые из условий на концах линии при $x = 0$ и $x = l$.

Если все удельные параметры равномерно распределены вдоль линии по длине, то линия является однородной. Формулы (4) имеют место только для однородных линий. Если параметры являются функциями расстояния вдоль линии: $r_0(x), g_0(x), L_0(x), C_0(x)$, то линия неоднородная. Её уравнения записываются следующим образом

$$\left. \begin{aligned} -\frac{d^2 \dot{U}(x)}{dx^2} &= -\underline{Z}_0(x) \underline{Y}_0(x) \dot{U}(x); \\ -\frac{d^2 \dot{I}(x)}{dx^2} &= -\underline{Z}_0(x) \underline{Y}_0(x) \dot{I}(x). \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Для произвольных зависимостей $\underline{Z}_0(x), \underline{Y}_0(x)$ общего решения уравнений (5) не найдено [8]. Обычно в этом случае для анализа линию длиной l разбивают на n отрезков с длинами $x_i, i = 1, 2, \dots, n$. Затем параметры $\underline{Z}_{0i}(x), \underline{Y}_{0i}(x)$ на каждом участке усредняются. В результате получается линия, состоящая из последовательно соединенных участков с постоянными параметрами в пределах каждого участка, но различных на разных участках, рис.1.. В этом случае линия описывается n выражениями (4) с удельными параметрами $\gamma_i, \underline{Z}_i$ и постоянными $\underline{A}_{1i}, \underline{A}_{2i}$, которые определяются из граничных условий на концах участков. Возникающие при этом погрешности в результате расчетов не учитывают. Для повышения точности расчетов нами предлагается применить аналитическую аппрок-

симиацию удельных параметров линии по расстоянию x .

Аппроксимация удельных параметров неоднородной линии

Наиболее часто при аппроксимации применяются комбинации известных базовых функций [9]. В качестве конкретного примера выполним аппроксимацию продольного удельного сопротивления жилы кабеля $r_0(x)$ Ом/км длиной 15 км, характерный график которого в оффшорных линиях по участкам кабеля длиной по 1 км представлен на рис.1. Береговой распределительной подстанции соответствует координата $x = 0$. Выходной трансформатор оффшорной электростанции расположен в точке $x = l$. Остальные удельные параметры будем полагать неизменными.

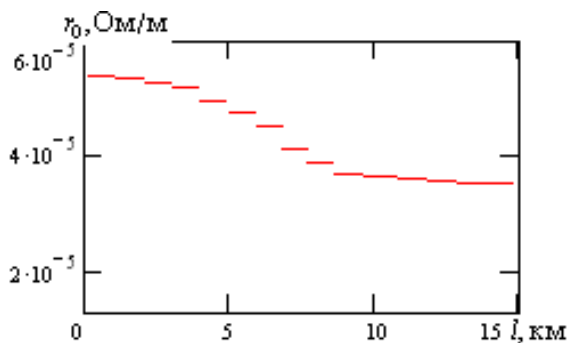


Рис.1. Кусочно линейная аппроксимация удельного сопротивления жилы кабеля

За основу выберем базовую функцию вида

$$R_0(x) = [a \cdot \operatorname{arctg}(-b \cdot x + c) + d] \cdot 10^{-5}$$

Ом/м. (6) Задача состоит в таком выборе коэффициентов a, b, c, d , при которых график (6) возможно более точно аппроксимировал бы график на рис.1

$$\Delta(x, a, b, c, d) = \int_0^l (R_0(x) - r_0(x))^2 \rightarrow \min$$

при $r_0(x) = r_{0i}$, $x \in [x_i, x_{i+1}]$ – границы i – го участка; $i = 1, 2, \dots, 15$.

Для нахождения минимума $\Delta(x, a, b, c, d)$ был выбран метод Нелдера–Мида [10], относящийся к группе методов прямого поиска, не требующий вычисления градиента. За исходные опорные значения коэффициентов в соответствии с рис.1 применены: $a = 1$; $b = 0,001$; $c = d = 5$. В результате поиска получены оптимальные значения коэффициентов:

$$a_* = 0,6895; b_* = 0,0006; c_* = 3,53; d_* = 4,5.$$

На рис.2 приведен график сопротивления (6) с найденными коэффициентами и для сравнения повторен график $r_0(x)$. Рис.2 показывает приемлемое соответствие аппроксимации и исходного графика.

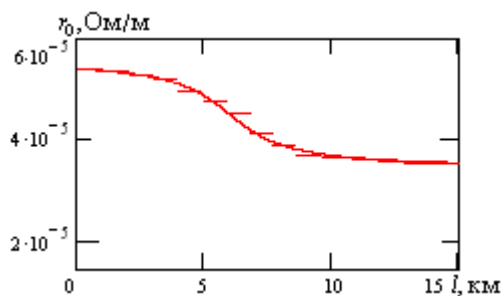


Рис.2. Аналитическая аппроксимация удельного сопротивления жилы кабеля

Представленная аппроксимация также не позволяет получить аналитическое выражение вида (4), однако представляет удобную возможность численного решения уравнений (2).

Далее на конкретном примере покажем применение предлагаемого подхода к анализу режимов распределительных линий с неоднородно распределенными параметрами.

Электрораспределительная система с одним центром питания и нагрузкой

Рассмотрим простую цепь с распределенными параметрами, изображенную на рис.3, которая содержит источник ЭДС E и нагрузку $Z_H = R_H + jX_H$.

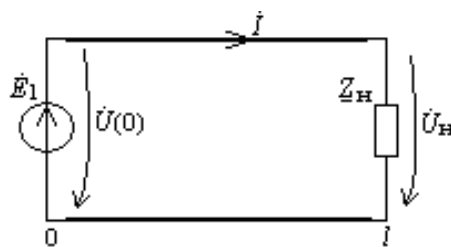


Рис.3. Простая электрическая цепь с распределенными параметрами

В комплексных дифференциальных уравнениях (2) отделим вещественные и мнимые части и получим систему линейных дифференциаль-

ных уравнений для вещественных и мнимых составляющих напряжений и токов:

$$\left. \begin{aligned} \frac{d \operatorname{Re} \dot{U}(x)}{dx} &= -R_0(x) \cdot \operatorname{Re} \dot{I}(x) + \omega L_0 \cdot \operatorname{Im} \dot{I}(x); \\ \frac{d \operatorname{Im} \dot{U}(x)}{dx} &= -R_0(x) \cdot \operatorname{Im} \dot{I}(x) - \omega L_0 \cdot \operatorname{Re} \dot{I}(x); \\ \frac{d \operatorname{Re} \dot{I}(x)}{dx} &= -g_0 \cdot \operatorname{Re} \dot{U}(x) + \omega C_0 \cdot \operatorname{Im} \dot{U}(x); \\ \frac{d \operatorname{Im} \dot{I}(x)}{dx} &= -g_0 \cdot \operatorname{Im} \dot{U}(x) - \omega C_0 \cdot \operatorname{Re} \dot{U}(x). \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

Для краткости введем вектор y реальных и мнимых частей напряжения и тока вдоль линии, а также матрицу A уравнений системы (7)

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -r_0(x) & \omega L_0 \\ 0 & 0 & -\omega L_0 & -r_0(x) \\ -g_0 & \omega C_0 & 0 & 0 \\ -\omega C_0 & -g_0 & 0 & 0 \end{bmatrix};$$

$$y = \begin{bmatrix} \operatorname{Re} \dot{U}(x) \\ \operatorname{Im} \dot{U}(x) \\ \operatorname{Re} \dot{I}(x) \\ \operatorname{Im} \dot{I}(x) \end{bmatrix}.$$

Уравнения (7) теперь примут вид

$$\frac{dy(x)}{dx} = A \cdot y(x). \quad (8)$$

Уравнения (8) допускают решение численными методами [11] – [12]. Особенностью задачи является наличие краевых условий для этих уравнений, т.е. необходимо, чтобы напряжение и ток в начале и конце линии удовлетворяли конкретной конфигурации системы. Поставим вопрос определения необходимого напряжения источника питания $\dot{E} = \dot{U}(0)$ для обеспечения заданного напряжения на нагрузке $\dot{U}(l) = \dot{U}_H = \dot{I}(l) \cdot \underline{Z}_H$. В развернутой форме эти условия запишем в виде системы уравнений

$$\left. \begin{aligned} \operatorname{Re} \dot{U}(l) &= R_H \cdot \operatorname{Re} \dot{I}(l) - X_H \cdot \operatorname{Im} \dot{I}(l); \\ \operatorname{Im} \dot{U}(l) &= X_H \cdot \operatorname{Re} \dot{I}(l) + R_H \cdot \operatorname{Im} \dot{I}(l). \end{aligned} \right\}$$

Полагая $\dot{U}(l) = \dot{U}_H = 0 - jU_H$ и известными параметры нагрузки $\underline{Z}_H = R_H + jX_H$, из последних двух уравнений получаем составляющие тока в нагрузке $\operatorname{Re} \dot{I}(l)$ и $\operatorname{Im} \dot{I}(l)$.

Теперь уравнения (8) можно решить обрат-

ным ходом от $x = l$ до $x = 0$ с найденными конечными условиями

$$\operatorname{Re} \dot{U}(l) = 0; \operatorname{Im} \dot{U}(l) = -U_H; \operatorname{Re} \dot{I}(l) \text{ и } \operatorname{Im} \dot{I}(l).$$

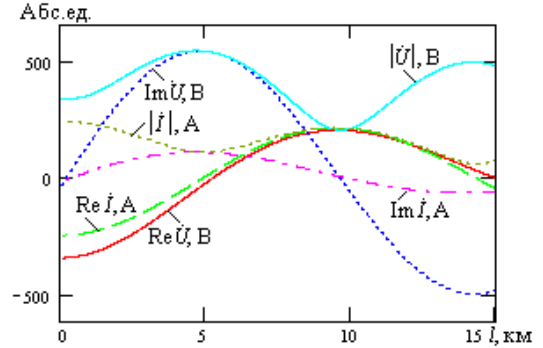


Рис.4. Составляющие напряжения и тока вдоль линии

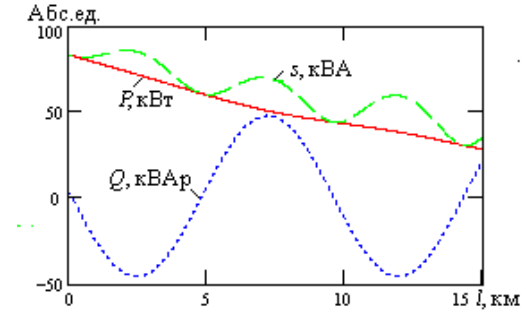


Рис.5. Распределение мощностей вдоль линии

Решение уравнений (8) в точке $x = 0$ и даст составляющие входного напряжения $\operatorname{Re} \dot{U}(0)$, $\operatorname{Im} \dot{U}(0)$ и тока $\operatorname{Re} \dot{I}(0)$, $\operatorname{Im} \dot{I}(0)$. Это решение позволяет получить и распределение мощностей по линии $\dot{U}(x)\dot{I}(x)$:

$$P(x) = \operatorname{Re} \dot{U}(x) \operatorname{Re} \dot{I}(x) + \operatorname{Im} \dot{U}(x) \operatorname{Im} \dot{I}(x);$$

$$Q(x) = -\operatorname{Re} \dot{U}(x) \operatorname{Im} \dot{I}(x) + \operatorname{Im} \dot{U}(x) \operatorname{Re} \dot{I}(x).$$

На рис.4, 5 представлены графики составляющих напряжения, тока и мощностей, рассчитанных при следующих типичных данных распределительной системы небольшой мощности: $U_H = 480$ В; $R_H = 5$ Ом; $X_H = 4$ Ом. Из графиков следует, что $\operatorname{Re} \dot{U}(0) = -340,53$ В; $\operatorname{Im} \dot{U}(0) = -39,05$ В; $\operatorname{Re} \dot{I}(0) = -242,81$ А; $\operatorname{Im} \dot{I}(0) = -16,36$ А. Мощности на концах линии: $P(0) = 83,32$ кВт; $P(l) = 28,1$ кВт; $Q(0) = 3,9$ кВАр; $Q(l) = 22,48$ кВАр. Напряжение, ток и мощность существенно изменяются по

длине линии.

Электрораспределительная система с двумя центрами питания

Упрощенная схема электрораспределительной системы с прежней кабельной линией и двумя центрами питания показана на рис.6.

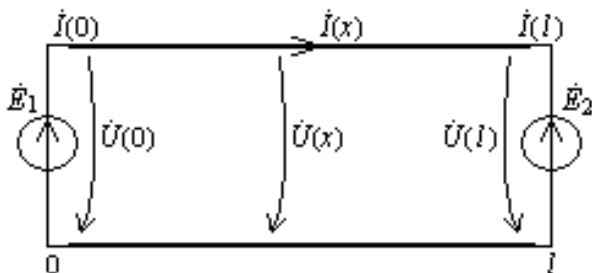


Рис.6. Электрораспределительная система с двумя центрами питания

При этом в начале линии при $x=0$ $\dot{U}(0) = \dot{E}_1$; в конце линии при $x=l$ имеем $\dot{U}(l) = \dot{E}_2$. Для составляющих напряжения $\text{Re } \dot{U}(x)$ и $\text{Im } \dot{U}(x)$ известны граничные условия в начале и конце линии: $\text{Re } \dot{U}(0) = 0$; $\text{Im } \dot{U}(0) = -E_1$; $\text{Re } \dot{U}(l) = 0$; $\text{Im } \dot{U}(l) = -E_2$. Составляющие токов в начале и конце линии $\text{Re } \dot{I}(0)$, $\text{Im } \dot{I}(0)$, $\text{Re } \dot{I}(l)$, $\text{Im } \dot{I}(l)$ не определены.

Для их нахождения запишем граничные условия в точках $x=0$ и $x=l$ в виде

$$\mathbf{B} \cdot \mathbf{y}(0) = \mathbf{b}; \quad \mathbf{D} \cdot \mathbf{y}(l) = \mathbf{d}, \quad (9)$$

где матрицы $\mathbf{B} = \mathbf{D} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$; век-

торы $\mathbf{b} = \begin{bmatrix} 0 \\ -E_1 \end{bmatrix}$; $\mathbf{d} = \begin{bmatrix} 0 \\ -E_2 \end{bmatrix}$.

Граничные условия найдем методом пристрелки [11 - 12].

Выполним пробный расчет уравнений (8) при $\text{Re } \dot{U}(0) = 0$; $\text{Im } \dot{U}(0) = -E_1$ с произвольными значениями $\text{Re } \dot{I}_0(0)$, $\text{Im } \dot{I}_0(0)$. В результате получим $\text{Re } \dot{U}_0(l)$, $\text{Im } \dot{U}_0(l)$, которые не будут соответствовать вектору $\mathbf{d}$ в (9), а также некоторые значения $\text{Re } \dot{I}_0(l)$, $\text{Im } \dot{I}_0(l)$. Для коррекции результатов $\text{Re } \dot{U}_0(l)$ и $\text{Im } \dot{U}_0(l)$ выполним два дополнительных просчета уравнений (8)

у нулевыми условиями $\text{Re } \dot{U}(0) = 0$; $\text{Im } \dot{U}(0) = 0$ и с другими произвольными, не равными между собой значениями: $\text{Re } \dot{I}_1(0)$, $\text{Im } \dot{I}_1(0)$ и $\text{Re } \dot{I}_2(0)$, $\text{Im } \dot{I}_2(0)$.

В результате при $x=l$ получаем $\text{Re } \dot{U}_1(l)$, $\text{Im } \dot{U}_1(l)$ и $\text{Re } \dot{U}_2(l)$, $\text{Im } \dot{U}_2(l)$, которые также не соответствуют вектору $\mathbf{d}$ в (9). Теперь составим уравнения для нахождения обновленных начальных значений с $\text{Re } \dot{I}_0(0)$, $\text{Im } \dot{I}_0(0)$:

$$\text{Re } \dot{U}_0(l) + c_1 \text{Re } \dot{U}_1(l) + c_2 \text{Re } \dot{U}_2(l) = 0;$$

$$\text{Im } \dot{U}_0(l) + c_1 \text{Im } \dot{U}_1(l) + c_2 \text{Im } \dot{U}_2(l) = -E_2,$$

откуда находим c_1 , c_2 и обновленные начальные значения составляющих тока

$$\text{Re } \dot{I}(0) = \text{Re } \dot{I}_0(0) + c_1 \text{Re } \dot{I}_1(0) + c_2 \text{Re } \dot{I}_2(0);$$

$$\text{Im } \dot{I}(0) = \text{Im } \dot{I}_0(0) + c_1 \text{Im } \dot{I}_1(0) + c_2 \text{Im } \dot{I}_2(0).$$

После трех циклов просчета получаем:

$$\text{Re } \dot{I}(0) = -142 \text{ А}; \quad \text{Im } \dot{I}(0) = -57,4 \text{ А при}$$

$$\text{Re } \dot{U}(l) = -3,03 \text{ В}; \quad \text{Im } \dot{U}(l) = -480,0 \text{ В};$$

$\text{Re } \dot{I}(l) = 153,48 \text{ А}; \quad \text{Im } \dot{I}(l) = 54,88 \text{ А}$ с достаточной степенью точности. Расчеты выполнены при $E_1 = 500 \text{ В}$; $E_2 = 480 \text{ В}$ и с удельными параметрами линии, принятыми выше.

На рис. 7, 8 показаны графики изменения напряжения, тока и мощностей. Рисунки показывают наличие стоячих волн тока и напряжения, сопровождаемыми изменениями активных и реактивных мощностей: $P(0) = 28,68 \text{ кВт}$; $Q(0) = 71,0 \text{ кВАр}$; $P(l) = -26,8 \text{ кВт}$; $Q(l) = -73,5 \text{ кВАр}$. Из рисунков также следует наличие стоячих волн напряжения и тока, характеризующихся наличием узла тока в точке $x = 7,51 \text{ км}$.

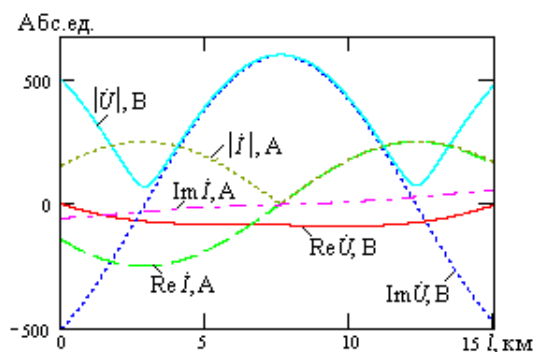


Рис.7. Распределение составляющих напряжения и тока вдоль линии с двумя центрами питания

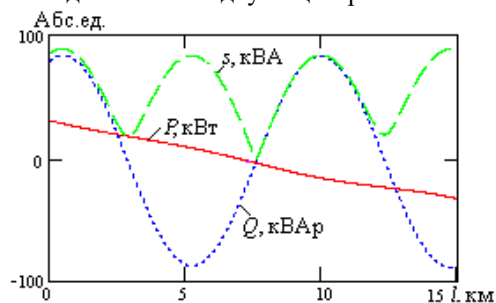


Рис.8. Распределение мощностей вдоль линии с двумя центрами питания

Заключение

Предложенный способ расчета режима электроэнергетической системы переменного тока позволяет повысить точность анализа распределительной линии с неоднородными распределенными параметрами за счет аналитической аппроксимации зависимостей первичных удельных параметров такой линии по длине. Методика сводится к численному решению дифференциальных уравнений в краевой задаче для напряжений и токов с граничными условиями на концах распределительной линии.

Перспективным направлением дальнейших исследований является распространение методики на разветвленные электроэнергетические системы с несколькими распределительными линиями линии и центрами питания.

Список литературы

1. Электрические системы. Электрические сети / В.А.Веников, А.А.Глазунов, Л.А.Жуков и др. Под ред. В.А.Веникова, В.А.Строева. – М.: Высш. шк., 1998. – 511 с.
2. Сазыкин В.Г., Багметов А.А. Графоаналитический метод определения оптимального места расположения пунктов сетевого секционирования // Изв.ВУЗов. Электромеханика. 2022. Т.65. № 4. С. 86-96. <https://doi.org/10.17213/0136-3360-2022-4-86-96/>
3. Логунов А.В., Шлык Ю.К. Разработка модели кабельной линии с повреждением на основе теории четырехполюсников с переменной топологией // Известия ВУЗов. Электромеханика. 2023. Т.66. № 3. С. 48 – 54. DOI: 10.17213/01136-3360-2023-3-48-54.
4. Олейников А.М. Особенности математического моделирования передачи электроэнергии от ветроэлектростанций в оффшорных зонах / А.М.Олейников, Л.Н.Канов // Тезисы докладов Международной научно-практической конференции «Системы контроля окружающей

среды–2022». –Севастополь, изд-во ИПТС, 2022. – С.43.

5. Теоретические основы электротехники: В 3-х т. Т.2 / К.С.Демирчан, Л.Р.Нейман, Н.В.Коровкин, В.А.Чечурин. СПб: Питер, 2003. 576 с.
6. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи. 1 часть. – М.: Изд-во «Юрайт», 2012. – 701 с.
7. Каганов З.Г. Электрические цепи с распределенными параметрами; цепные схемы. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 248 с.
8. Васильев В.В., Грёзов Г.И., Симак Л.А. и др. Моделирование динамических систем. Аспекты мониторинга и обработки сигналов. – К.: НАН Украины, 2002. – ISBN 966-02-0966-5. 344 с.
9. Струченков В.И. Методы оптимизации в прикладных задачах. – М.: СОЛОН – ПРЕСС. – 2009. – 320 с.
10. Вержбицкий В.М., Численные методы (Математический анализ и дифференциальные уравнения). – М.: Высш. шк., 2001. – 382 с.
11. Хайрер Э., Нёрсетт С., Ваннер Г. Решение обыкновенных дифференциальных уравнений. – М.: Мир, 1990. – 512 с.
12. Бахвалов Н.С. Численные методы. Т. 1. – Москва, изд-во «Наука», 1975. – 631 с.

References

1. Venikov V.A., Glazunov A.A., Zgukov L.A. *Elektricheskie sistemy. Elektricheskie seti. Pod red. Venikova V.A., Stroeva V.A.* [Electric systems. Electric networks]. Moscow: Higher school, 1988. 511 p.
2. Sazykin V.G., Bagmetov A.A. *Grafoanaliticheskiy metod opredeleniya optimalnogo mesta raspodleniya punktov setevogo sektionirovaniya* [Grafoanaliticheskiy method of Determining the Optimum location of Location of points of the Network sectionalizing]. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Electromekhanika = Russian Electromechanics/. 2022. V. 65. No. 4. – PP. 86-96. <http://doi.org/10.17213/01136-3360-2022-4-86-96/>
3. Logunov A.V., Shlyk Yu.K. *Razrabotka modeli kabel'noi linii s povrezhdeniem na osnove teorii chetyrekhpolusnikov s peremennoi topologiei* [Developing a Cable line model with a Fault based on the Theory of four-poles with variable Topology]. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Electromekhanika = Russian Electromechanics/. – 2023. V. 66. No. 3. – PP. 48-54. DOI: 10.17213/01136-3360-2023-3-48-54.
4. Oleinikov A.M., Kanov L.N. [Osobennosti matematicheskogo modelirovaniya peredachi elektroenergii ot vetroelektrostantsii v offshornykh zonakh] [Peculiarity of mathematical design of passing to electric power from windelectrostations in offshorn areas]. Theses of lectures of the International science-practice conference of Checking of environment–2022 «System». – Sevastopol, INTS, 2022.

- PP.43.
5. Demirchyan K.S., Neyman L.R., Korovkin N.V., Chechurin V.L. *Teoreticheskie osnovy elektrotekhniki: V 3 tomakh. Tom 2* [Theoretical Foundation of Electrical Engineering: In 3 v. Textbook for Universities. Volume 2]. Saint-Petersburg: Piter Publ. 2003. 576 p.
 6. Bessonov L.A. *Teoreticheskie osnovy elektrotekhniki. Electriccheskie scepi. 1 chastt* [Theoretical bases of the electrical engineering. Electric chains. 1 part] – Moscow: Izd-vo of «Yurayt». 2012. 701 p.
 7. Kaganov Z.G. *Electriccheskie tscepi s raspredelennymi parametrami; tscepnye skhemy* [Electric chains with the up-diffused parameters; chain charts]. Moscow: Energoatomizdat, 1990. 248 p/
 8. Vasil'ev V.V., Greozov G.I., Simak L.A. *Modelirovanie dinamicheskikh sistem. Aspekty monitoringa i obrabotki signalov* [Design of the dynamic systems. Aspects of monitoring and treatment of signals]. Kyiv, NAN Ukraine, 2002. – ISBN 966-02-0966-5. 344 p.
 9. Struchenkov V.I. *Metody optimizatchii v prikladnykh zadachakh* [Methods of optimization are in the applied tasks]. Moscow.: SOLON – PRESS. 2009. 320 p.
 10. Verzhbitchkii V.M. *Tchislennye metody (Matematicheskii analiz i differentsial'nye uravneniya)* [Numeral methods (Mathematical analysis and differential equalizations)]. Moscow.: Izd-vo 'Higher school'. 2001. 382 p.
 11. Khairer E., Nersett S., Vanner G. *Reshenie obyknovennykh differentsial'nykh uravnenii* [Decision of usual differential equalizations]. Moscow: Izd-vo 'Mir'. 1990. 512 p.
 12. Bakhvalov N.S. *Chislennye metody* [Numeral methods. Part. 1]. Moscow, Izd-vo «Science». 1975. 631 p.

УДК 556.33

Потенциал термальных вод мелового водоносного горизонта Томской области

Д.С. Крутенко¹, С.В. Лавриненко¹, С.А. Янковский¹, В.Е. Губин^{1,2},
К.В. Слюсарский¹

¹Национальный исследовательский Томский политехнический университет, пр. Ленина 30, г. Томск, 634050, Россия, dsk37@tpu.ru, lavrinenko@tpu.ru, jankovsky@tpu.ru, jankovsky@tpu.ru, vegubin@sevsu.ru, konstantinsv@tpu.ru

²Севастопольский государственный университет, ул. Университетская, 33, г. Севастополь, 299053, Россия

Статья поступила 10.10.2024 г.; после доработки 11.10.2024 г.

Аннотация

Цель исследования заключается в определении участков распространения термальных вод мелового водоносного горизонта, пригодных для выработки электроэнергии на территории Томской области. Для водоносного комплекса построен комплект структурных и температурных карт. Расчет пластовых температур водоносных комплексов выполнялся путем решения прямой задачи геотермии с известным тепловым потоком. В результате комплексного анализа были выявлены перспективные для извлечения электроэнергии из термальных вод районы населенных пунктов.

Ключевые слова: водоносный комплекс, водоносный горизонт, температурные карты, пластовые температуры, термальные воды, Томская область.

The potential of thermal waters of the Cretaceous aquifer of the Tomsk region

D.S. Krutenko¹, S.V. Lavrinenko¹, S.A. Yankovsky¹, V.E. Gubin^{1,2}, K.V. Slyusarskiy

¹National Research Tomsk Polytechnic University, 30 Lenin Ave., Tomsk, 634050, Russia, dsk37@tpu.ru, lavrinenko@tpu.ru, jankovsky@tpu.ru, jankovsky@tpu.ru, vegubin@sevsu.ru, konstantinsv@tpu.ru

²Sevastopol State University, 33 Universitetskaya str., Sevastopol, 299053, Russia

Received 10.10.2024 y.; received in final form 11.10.2024 y.

Abstract

The purpose of the study is to determine the areas of distribution of thermal waters of the Cretaceous aquifer suitable for generating electricity in the Tomsk region. A set of structural and temperature maps has been built for the aquifer complex. The calculation of reservoir temperatures of aquifers was carried out by solving the direct problem of geothermy with a known heat flux. As a result of a comprehensive analysis, areas of settlements that are promising for extracting electricity from thermal waters have been identified.

Key words: aquifer complex, aquifer, temperature maps, reservoir temperatures, thermal waters, Tomsk region.

Введение

В настоящее время одной из важнейших проблем современного общества является глобальное потепление. Возобновляемые источники энергии (ВИЭ) играют ключевую роль в снижении выбросов углекислого газа и других вредных веществ (например, SO_x, NO_x). Согласно прогнозам, для снижения последствий

глобального потепления потребуется увеличить долю ВИЭ до 65 % в 2050 г.

Также отмечается, что ВИЭ будут самыми быстрорастущими источниками энергии и уже к 2040 г. их общая доля увеличится в пять раз, что обеспечит около 14 % мирового потребления энергии [1].

Если посмотреть на энергетический баланс в мире, то значительная доля вырабатываемой

энергии используется для потребления электрической и тепловой энергией жилых зданий. В развитых странах около 20 % от общего потребления энергии приходится на жилые здания, а в развивающихся – более 35 %.

Западно-Сибирский нефтегазоводонаосный мегабассейн обладает крупнейшими запасами термальных вод, которые достигают величины примерно 70 % от общих запасов России. На территории Томской области сосредоточено от 40 до 50 % геотермальных ресурсов этого мегабассейна. При этом в Томской области термальные воды находятся на доступной глубине (1...4 км) и обладают энергетическим потенциалом для использования в энергетике [2].

А.Д. Назаров подразделяет термальные воды по типу использования: выработка электроэнергии 80...100 °С, теплоснабжение 65 °С, горячее водоснабжение 50 °С [3]. Отсюда следует, что перспективными с точки зрения получения геотермальной энергии считаются водонаосные пласты, температура в которых равна и превышает 80 °С.

По своим энергетическим характеристикам геотермальные воды Томской области относятся к низкопотенциальным и среднепотенциальным и могут применяться не только для теплофикации объектов, но и для производства электроэнергии.

Постановка задачи и целей исследования

Цель работы заключается в определении участков распространения термальных вод, пригодных для выработки электроэнергии на территории Томской области.

Для оценки возможности использования термальных вод Томской области в первую очередь необходимо выделить на территории исследования пласты-коллекторы, насыщенные водой – водонаосные комплексы. Далее необходимо определить, на каких глубинах залегают эти водонаосные комплексы – построить структурные карты по кровле/подошве этих водонаосных горизонтов. Располагая информацией о глубинах водонаосных комплексов и распределении плотности теплового потока, можно выполнить для них расчеты современных температур и выделить зоны, где температуры равны и превышают 80 °С. Сопоставив эти зоны с расположением поселков территории исследования, можем сделать выводы о перспективности использования геотермальной энергии. Целевые поселки: Новый Тевриз, Лукашкин Яр, Назино, Новоникольское,

Киевский, Неготка, Усть-Тым, Тымск, Восток, Сосновка, Нарым, Усть-Чижалка, Наунак, Копыловка, Куржино, Дальнее, Иванкино, Молодежный, Напас, Суйга, Лисица, Макзыр, Центральный, Дружный, Степановка, Катайга, Первопашинск.

В связи с этим, необходимо провести анализ температурных карт водонаосных комплексов с целью определения их перспективности для добычи термальной воды. Кроме того, необходимо оценить температуры в водонаосном горизонте для получения геотермальной энергии.

По данным диссертации М.В. Мищенко [4], наиболее доступными и перспективными в отношении эксплуатации водонаосными комплексами меловых отложений являются апт-альб-сеноманский, готерив-барремский и валанжинский водонаосные комплексы в связи с их выдержанностью по площади, высокой водообильностью, хорошими фильтрационно-ёмкостными свойствами и высокой температурой термальных подземных вод.

Апт-альб-сеноманский водонаосный комплекс стратиграфически связан с покурской свитой, получившей распространение на западе области, и симоновской свитой, распространенной на востоке области [4]. Апт-альб-сеноманский водонаосный комплекс залегает на глубинах 900–1000 м, имеет мощность 600–900 м. Представлен неравномерным чередованием изменяющихся по мощности и фильтрационно-ёмкостным свойствам разнородных слабосцементированных песчаников, алевролитов и глин.

Коэффициенты песчаности отложений комплекса изменяются в пределах 0,28–0,56 (в среднем 0,41), открытая пористость песчано-алевритовых пород составляет 15–20 %. Коэффициент фильтрации изменяется в пределах 0,61–1,44 м/сут, коэффициент водопроводимости – 125–300 м²/сут. Для подземных вод характерны высокие напоры – до 70 м над устьем скважины. Дебиты скважин при фонтанировании составляют 500–1000 м³/сут, достигая в отдельных случаях 2–4 тыс. м³/сут.

Готерив-барремский водонаосный комплекс стратиграфически связан с киялинской свитой, получившей развитие на западе области, и илекской свитой, распространенной на востоке области. Водонаосный комплекс залегает на глубинах 1600–2000 м, имеет мощность 400–800 м, представлен песчано-глинистоалевритовыми неравномерно слоистыми лагунно-континентальными отложениями. Коэффициент песчаности отложений равен 0,4–0,6, увеличиваясь в восточ-

ном направлении до 0,7–0,88. Открытая пористость 20–30 %, реже до 40 %. Дебиты разведочных скважин не превышают 40–80 м³/сут. при самоизливе.

Валанжинский водоносный комплекс стратиграфически связан с тарской свитой, которая выклинивается к востоку Томской области. Комплекс залегает на глубинах 2000–2800 м, сложен мелководно-морскими песчаными и песчано-алевритовыми отложениями относительно выдержанными по площади распространения, мощностью 45–200 м. Проницаемость песчаников составляет 0,6–2,0 Д, а открытая пористость достигает 30–40 %. Для водоносного комплекса характерна наибольшая однородность и выдержанность фильтрационно-ёмкостных свойств и песчаности, что обусловило его высокую продуктивность. Дебиты скважин варьируют в пределах 70–500 м³/сут, иногда достигая 700–850 м³/сут.

Результаты исследований

Определение глубин залегания водоносных комплексов.

Глубины залегания водоносных комплексов определялись по литологическим разбивкам скважин (данные Томского филиала ФБУ ТФГИ по СФО). Соответственно определялись границы апт-альб-сеноманского водоносного комплекса как кровля и подошва покурской (симоновской) свиты, готерив-барремского водоносного комплекса – как кровля и подошва киялинской (вартовской, илекской) свиты, валанжинского водоносного комплекса – как кровля и подошва тарской свиты.

Ниже приведены структурные карты по кровле и подошве изучаемых водоносных комплексов (рис. 1-5).

Построение структурной карты по кровле валанжинского водоносного комплекса отдельно не выполнялось. Поскольку готерив-барремский водоносный комплекс перекрывает валанжинский водоносный комплекс, то отметки кровли валанжинского комплекса совпадают с отметками подошвы готерив-барремского комплекса.

Видно, что некоторые поселки на всех картах попадают в зоны погружения структурного рельефа, например, поселки Киевский, Неготка, Новоникольское. На большой глубине вероятность существования в водоносном комплексе повышенных температур гораздо выше даже при среднем значении глубинного теплового потока.

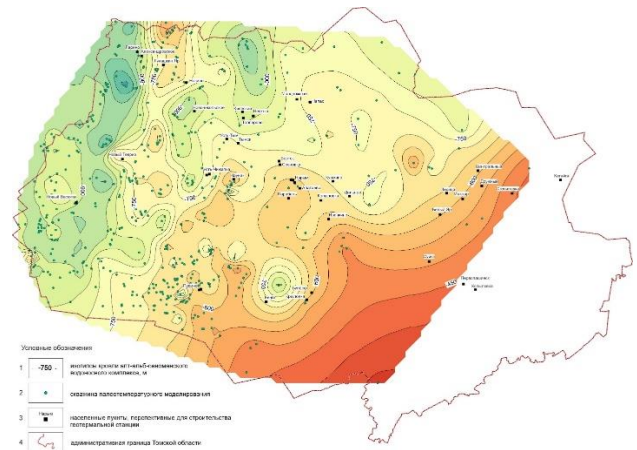


Рис. 1. Структурная карта по кровле апт-альб-сеноманского водоносного комплекса (покурская, симоновская свиты)

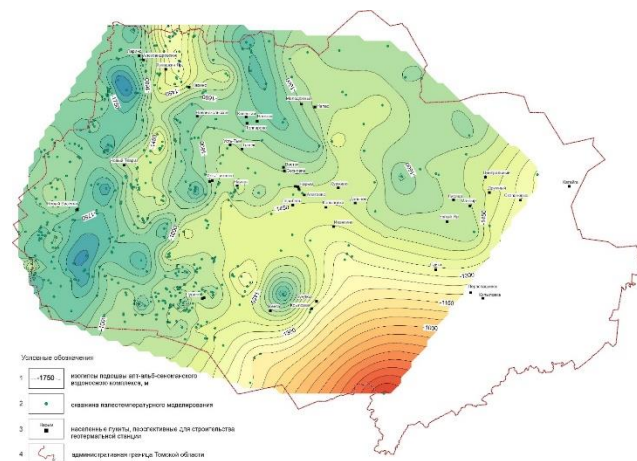


Рис. 2. Структурная карта по подошве апт-альб-сеноманского водоносного комплекса (покурская, симоновская свиты)

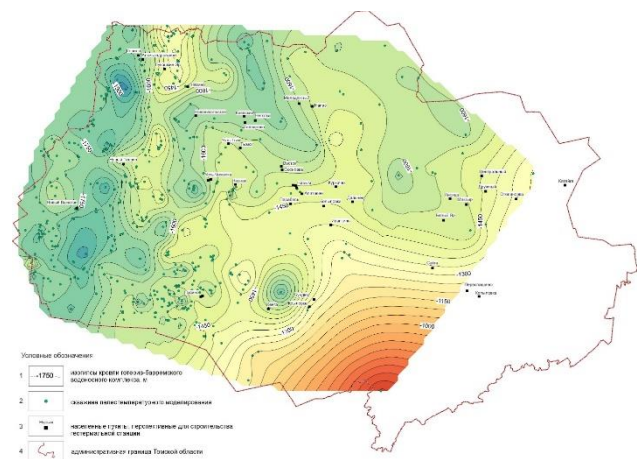


Рис. 3. Структурная карта по кровле готерив-барремского водоносного комплекса (киялинская, вартановская, илекская свиты)

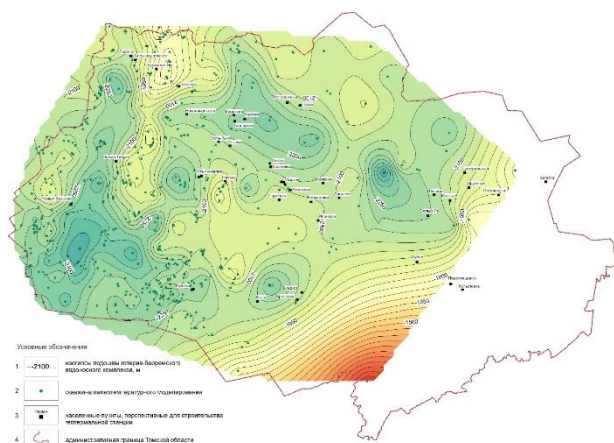


Рис. 4. Структурная карта по подошве готерив-барремского водоносного комплекса (киялинская, вартовская, илесская свиты)

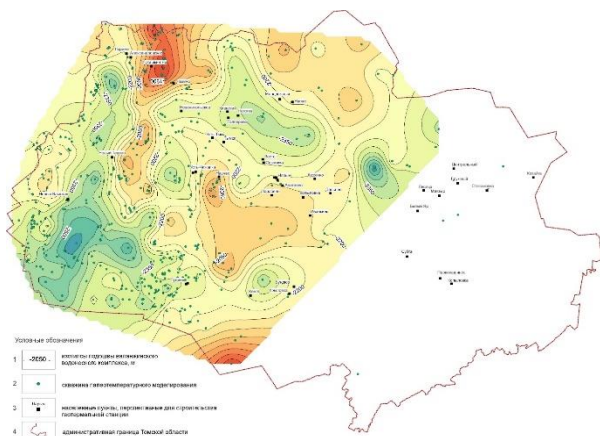


Рис. 5. Структурная карта по подошве валанжинского водоносного комплекса (тарская свита)

Расчет температур для водоносных горизонтов

Расчет температур выполнялся методом одномерного бассейнового моделирования решением прямой задачи геотермии с известным тепловым потоком.

Расчеты выполнялись для 452 скважин, распределенных по территории Томской области. Для каждой скважины была построена геотемпературная модель и рассчитан тепловой поток. В качестве входных данных использовались фактические измеренные температуры, в том числе пластовые температуры, полученные в результате испытания скважин, температуры, определенные по отражательной способности витринита (ОСВ), и температуры, определенные по термограммам геотемпературного градиента (ОГГ). Краевым условием модели является местный вековой ход температур. Наиболее полно и подробно методика моделирования изложена в

[5, 6].

Геотемпературные модели и расчеты тепловых потоков были выполнены аспирантами Крутенко Д.С. (438 моделей) и Меренковой А.С. (14 моделей) в рамках диссертационных исследований. С использованием этих моделей был выполнен расчет температур на заданную глубину в каждой скважине. Погрешность при определении температур не превышает 2-3 °С.

Анализ температурных карт

На карте температур кровли апт-альб-сеноманского водоносного комплекса (рис. 6) температуры изменяются от 12 до 51 °С. На карте температур подошвы комплекса (рис. 7) существует всего одна «горячая зона», где температуры превышают 80 °С. Она довольно мала по площади и удалена от всех интересующих поселков. Отсюда можно сделать вывод, что апт-альб-сеноманский водоносный комплекс бесперспективен для получения геотермальной энергии.

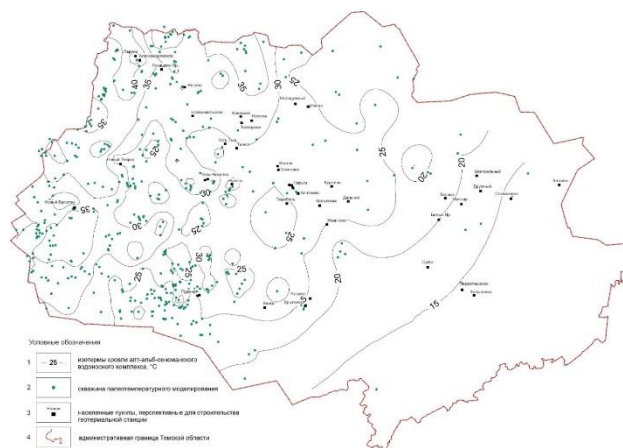


Рис. 6. Карта температур кровли апт-альб-сеноманского водоносного комплекса

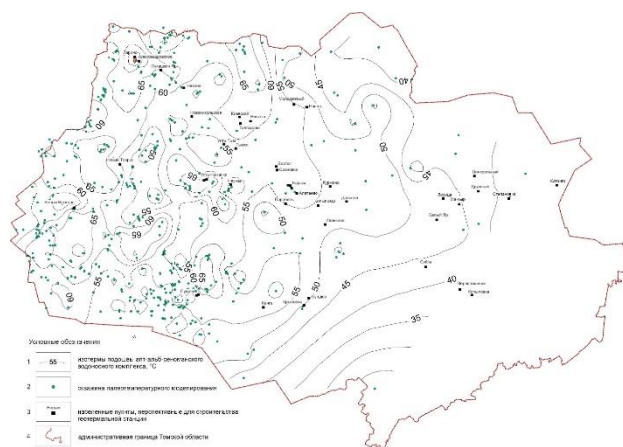


Рис. 7. Карта температур подошвы апт-альб-сеноманского водоносного комплекса

На карте температур на глубину кровли готерив-барремского водоносного комплекса (рис. 8) видно, что существует всего одна «горячая зона», которая мала по площади и находится удаленно от всех поселков.

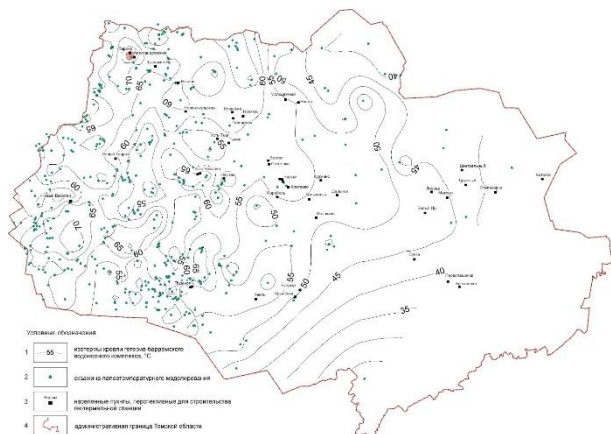


Рис. 8. Карта температур кровли готерив-барремского водоносного комплекса

На рисунке 9 представлена карта температур на глубину подошвы готерив-барремского водоносного комплекса. На этой карте заливкой показаны зоны, где температуры на этой глубине превышают 80 °C. Видим, что такие зоны находятся в районе поселков Усть-Чижалка (85-90 °C), Новый Тевриз (80-85 °C), Киевский (80-85 °C), Неготка (80-85 °C), Лукашкин Яр (80-85 °C), относительно близок к «горячей зоне» поселок Нарым (80 °C).

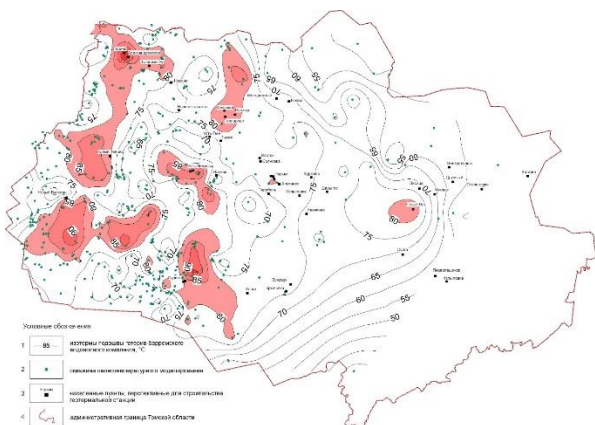


Рис. 9. Карта температур подошвы готерив-барремского водоносного комплекса

Следовательно, нижнюю часть готерив-барремского водоносного комплекса можно считать перспективной для получения геотермальной энергии для 6 из 28 поселков.

Анализ температур кровли валанжинского

водоносного комплекса совпадает с анализом температур подошвы готерив-барремского водоносного комплекса, приведенным выше.

Ниже представлена карта температур на глубину подошвы валанжинского водоносного комплекса (рис. 10). На этой карте заливкой показаны зоны, где температуры на этой глубине превышают 80 °C. Видим, что такие зоны уже достаточно выдержаны по площади, но они сосредоточены в основном на западе Томской области. Из целевых поселков в «горячие зоны» попадают Нарым (80-85 °C), Усть-Чижалка (85-90 °C), Новый Тевриз (80-85 °C), Киевский (80-85 °C), Неготка (80-85 °C), Лукашкин Яр (85-90 °C), очень близок к «горячей зоне» поселок Назино (80 °C).

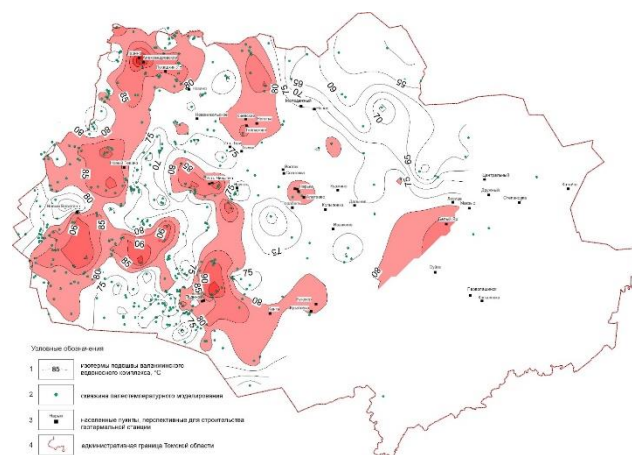


Рис. 10. Карта температур подошвы валанжинского водоносного комплекса

Для валанжинского водоносного комплекса сохраняется перспективность использования геотермальной энергии в 7 из 28 поселков.

Выводы

Апт-альб-сеноманский водоносный комплекс не представляет интереса для добычи термальной воды.

Готерив-барремский водоносный комплекс в нижней своей части может быть перспективен для 6 поселков: Новый Тевриз, Усть-Чижалка, Киевский, Неготка, Лукашкин Яр и, возможно, Нарым.

Валанжинский водоносный комплекс по критерию наличия в разрезе высоких температур является самым перспективным из рассматриваемых меловых водоносных комплексов. Он может быть перспективен для добычи термальной воды в 7 поселках: Новый Тевриз, Усть-Чижалка, Киевский, Неготка, Лукашкин Яр, Нарым и,

возможно, Назино.

Работа выполнена при финансовой поддержке в рамках программы Приоритет-2030-НИР/ЭБ-016-202-2024.

Список литературы

1. Bórawski P. Development of Renewable Energy Sources in the European Union in the Context of Sustainable Development Policy / P. Bórawski, R. Wyszomierski, A. Bėdycka-Bórawska, B. Mickiewicz, B. Kalinowska, J. W. Dunn, T. Rokicki // *Energies*. – 2022. – Vol. 15(4) – P. 1–20. <https://doi.org/10.3390/en15041545>.
2. Тепловые схемы геотермальной энергетики / С. А. Янковский, С. В. Лавриненко, С. А. Цибульский [и др.] // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2023. – Т. 334, № 7. – С. 122–136. <https://doi.org/10.18799/24131830/2023/7/4130>.
3. Мищенко М.В. Ресурсы термальных вод Колпашевской площади Томской области // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2007. – Т. 310. – № 1. – С. 34–38.
4. Мищенко М.В. Термальные воды меловых отложений юго-восточной части Западно-Сибирского артезианского бассейна: распространение, использование, прогнозы: автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата геолого-минералогических наук: спец. 25.00.07. – Томск, 2013. – 23 с.
5. Исаев В.И. Палеотемпературное моделирование осадочного разреза и нефтегазообразование // *Тихоокеанская геология*. – 2004. – Т. 23. – № 5. – С. 101–115.
6. Тепловой поток и нефтегазоносность (полуостров Ямал, Томская область) / В. И. Исаев, Г. А. Лобова, А. Н. Фомин [и др.] // *Георесурсы*. – 2019. – Т. 21. – № 3. – С. 125–135.

References

1. Bórawski P., Wyszomierski R., Bėdycka-Bórawska A., Mickiewicz B., Kalinowska B., Dunn J. W., Rokicki T. Development of Renewable Energy Sources in the European Union in the Context of Sustainable Development Policy // *Energies*, 2022. Vol. 15(4). P. 1–20. <https://doi.org/10.3390/en15041545>.
2. Yankovsky S.A., Lavrinenko S.V., Tsybulsky S.A. et al. Thermal schemes of geothermal energy // *Izvestiya Tomsk Polytechnic University. Georesource engineering*, 2023. Vol. 334(7). P. 122–136. <https://doi.org/10.18799/24131830/2023/7/4130>.
3. Mishchenko M.V. Thermal water resources of the Kolpashevskaya area of the Tomsk region // *Proceedings of Tomsk Polytechnic University. Georesource engineering*, 2007. Vol. 310(1). P. 34–

- 38.
4. Mishchenko M.V. Thermal waters of Cretaceous deposits of the southeastern part of the West Siberian Artesian basin: distribution, use, forecasts: abstract of the dissertation for the degree of Candidate of geological and mineralogical sciences: 25.00.07. Tomsk, 2013. 23 p.
5. Isaev V.I. Paleotemperature modeling of sedimentary section and oil and gas formation // *Pacific Geology*, 2004. Vol. 23(5). P. 101–115.
6. Isaev V.I., Lobova G.A., Fomin A.N. et al. Heat flow and oil and gas potential (Yamal Peninsula, Tomsk region) // *Georesources*, 2019. Vol. 21(3). P. 125–135.

УДК 620.92, 621.31

Гибридная система энергоснабжения на основе альтернативных источников энергии

Якимович Б.А.¹, Ивантеев И.С.¹, Жильцов А.С.¹, Владимиров А.С.¹,
Егоров Н.С.¹

ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», ул. Университетская, 33,
г. Севастополь, 299053, Россия

Статья поступила 12.11.2024 г.; после доработки 13.11.2024 г.

Аннотация

В установке используются альтернативные источники генерации и водородный накопитель. Предоставленная автономная система электроснабжения, предназначена для питания оборудования. Использование водородной энергетики позволяет значительно сократить вредные выбросы и уменьшить парниковый эффект. Предложенная установка позволяет получать «зеленый» водород при помощи солнечной или ветровой энергии. Представленная система значительно увеличивает эффективность преобразования энергии за счёт использования специального оборудования, в частности трёхходового клапана и управляемого и инвертора.

Ключевые слова: трехфазный преобразователь, комбинированные системы энергоснабжения, накопители энергии, солнечная генерация, электролизёр.

Hybrid power supply system based on alternative energy sources

Yakimovich B.A., Ivanteev I.S., Zhilcov A.S., Vladimirov A.V., Egorov N.S.
Sevastopol state university, Universitetskaya st., Sevastopol, 299053, Russia,

Received 12.11.2024 y.; received in final form 13.11.2024 y.

Abstract

The installation uses alternative generation sources and a hydrogen tank. Combined autonomous power supply system designed for backup power supply equipment. The use of hydrogen energy can significantly reduce harmful emissions and reduce the greenhouse effect. The proposed installation makes it possible to produce “green” hydrogen using solar or wind energy. The presented system significantly increases the efficiency of energy conversion through the use of special equipment, in particular a three-way valve and a controlled inverter.

Key words: three-phase converter, combined power supply systems, energy storage devices, solar generation, electrolyzed.

Введение

Для качественной работы основного и вспомогательного любого оборудования при различных условиях и длительных промежутках времени авторами предложены системы энергогенерации с водородными накопителями энергии. Такие системы можно назвать резервными источниками энергии, которые могут использоваться для обеспечения различных нужд потребителей.

Комбинированные системы питания и

накопления энергии, предложенные авторами в работе, используются в комбинации с энергоустановками на основе возобновляемых источников энергии (ВИЭ). Предложенная комбинированная автономная система электроснабжения, подключенная к потребителю электроэнергии, содержит внешний источник генерации электроэнергии на базе ВИЭ (солнечные или ветровые установки), накопитель энергии в составе электрохимического генератора на основе топливных элементов, электролизер и водородный

баллон. Техническое решение относится к области автономных систем электроснабжения отдельных объектов, удаленных от центральной электрической сети, а именно к комбинированным системам электроснабжения, включающим энергоустановки на базе возобновляемых источников энергии в качестве внешнего источника электроэнергии, электрохимический генератор, электролизер и баллоны для хранения реагентов (водорода и кислорода).

Постановка задачи

Использование экологически чистой энергии для курортного региона позволяет увеличить привлекательность для туристов и увеличивать мощностные характеристики энергосистемы без использования органических топлив, которые необходимо запасать в значительных количествах. Для повышения генерации энергии и мощностных характеристик установки в данной работе была предложена водородная система накопления энергии. Энергетические системы потребляют значительную электрическую нагрузку, превышающую возможности накопителей энергии малой и средней мощности. В случае, если система нагрузки рассчитана на большое количество электроприборов, необходимо создание большого массива накопителей энергии. В представленной работе была предложена комбинированная установка с электролизером и водородным накопителем энергии, проведены в натурных условиях экспериментальные исследования энергетических характеристик всей гибридной системы. Целью работы являлось использование специальных устройств и систем управления в комбинированной установке с целью повышения эффективности использования предложенных систем в энергокомплексах.

Результаты исследований

Предложенная энергогенерирующая установка относится к области комбинированных автономных систем электроснабжения отдельных потребителей, удаленных от линий электропередач. Предлагаемое использование внешнего источника генерации электроэнергии на базе ВИЭ, подключенного к шинам питания потребителя электроэнергии, на основе топливных элементов, электролизера, водородный и кислородный баллоны, соединенные с газовыми полостями топливных элементов и электролизера, снабженные датчиками давления, теплообменник, емкость теплоносителя, циркуляционный насос, а также общий контур циркуляции теплоносителя

для топливных элементов и электролизера, содержащий два управляемых трехходовых клапана, позволит расширить область применения комбинированной автономной системы электроснабжения, связанной с обеспечением потребителя электроэнергией требуемого параметра, упростить конструкцию и удешевить технологию изготовления системы, снизить энергозатраты и повысить быстродействие системы на переходных режимах, повысить надежность и эксплуатационные характеристики.

Для расчета количества используемых генерирующих систем учитывались такие факторы, как средний объем электропотребления, вид используемых батарей и т. д. Выбираемая мощность генератора полностью зависит от размера и качества используемого электролизера, преимущества такого устройства в его полной безопасности для внешней среды. Чтобы произвести расчет оборудования для энергосистемы нужно вычислить все источники потребления электроэнергии, время их работы и общую мощность. Использование таких установок может быть эффективно как для электрооборудования, так и для промышленных сооружений. Авторами предлагается увеличить генерирующие мощности для обеспечения оборудования за счет использования альтернативных источников энергии (например, солнечных панелей, такая схема позволяет потребителю использовать поток солнечной радиации). Фотоэлектрические панели для экономии места можно располагать на кровле здания, а оборудование и накопители в чердачном помещении. На рис. 1 изображена схема комбинированной автономной системы электроснабжения.

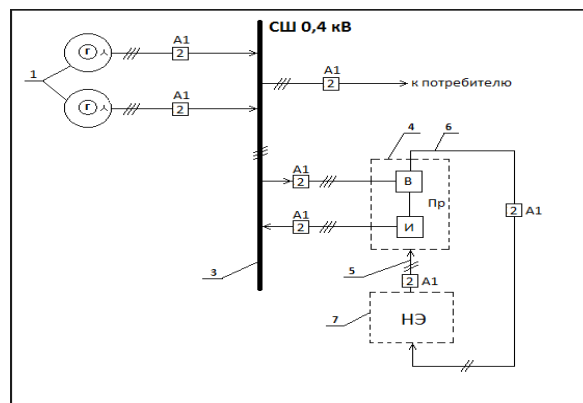


Рис. 1. Схема комбинированной автономной системы электроснабжения

Предлагаемая система (рис. 1) содержит внешний источник электроэнергии 1, солнечную

(СЭС) или ветроэнергетическую (ВЭС) установку, присоединенные через автоматические выключатели 2 к сборной шине 3, полностью управляемого полупроводникового трехфазного преобразователя 4, подключенного через шины питания 5, 6 к накопителю энергии 7 (рис. 2) в составе электролизера 8, водородного 9 и кислородного 10 баллонов, трубопроводов 11 и клапанов 12, 13 для соединения с соответствующими газовыми полостями топливного элемента 14 и электролизера 8, датчиков верхнего и нижнего предельно допустимых значений давлений водорода 15 и кислорода 16, контура циркуляции электролита 17 с емкостью 18, циркуляционным насосом 19, теплообменником 20, регулирующим трехходовым клапаном 21. Для контроля рабочей температуры ЭХГ 14 и электролизера 8 на трубопроводе с теплоносителем 17 до теплообменника 20 установлен датчик температуры 22, включенный в цепь управления насосом 19 и регулирующим трехходовым клапаном 23.

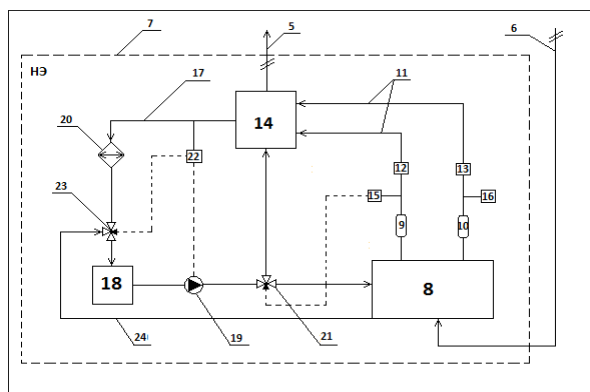


Рис. 2. Схема накопителя энергии

Комбинированная автономная система электроснабжения, подключенная к потребителю электроэнергии, содержит внешний источник генерации электроэнергии на базе ВИЭ с асинхронным, трехфазным генератором, накопитель энергии в составе электрохимического генератора на основе топливных элементов, электролизера, водородного и кислородного баллонов, соединенных посредством трубопроводов и клапанов с соответствующими газовыми полостями топливных элементов электрохимического генератора и электролизера, имеющих общий контур циркуляции электролита, отличающаяся тем, что дополнительно содержит полностью управляемый полупроводниковый трехфазный преобразователь, состоящий из соединенных между собой выпрямителя и инвертора,

которые через автоматические выключатели соединены со сборной шиной, а накопитель энергии дополнительно содержит два управляемых трехходовых клапана, один из которых расположен между электрохимическим генератором и приемной емкостью, а второй – между электрогенератором и электролизером.

Предлагаемое использование внешнего источника генерации электроэнергии на базе ВИЭ, подключенного к шинам питания потребителя электроэнергии, источник на основе топливных элементов, электролизер, водородный и кислородный баллоны, соединенные с газовыми полостями топливных элементов и электролизера, снабженные датчиками давления, теплообменник, емкость теплоносителя, циркуляционный насос, а также общий контур циркуляции теплоносителя для топливных элементов и электролизера, позволит расширить область применения автономной системы электроснабжения, связанной с обеспечением потребителя электроэнергией требуемого параметра, упростить конструкцию и удешевить технологию изготовления системы, снизить энергозатраты и повысить быстродействие системы на переходных режимах, повысить надежность и эксплуатационные характеристики.

Заключение

Автономная система электроснабжения, подключенная к потребителю электроэнергии, содержит внешний источник генерации электроэнергии на базе ВИЭ с асинхронным, трехфазным генератором, накопитель энергии в составе электрохимического генератора на основе топливных элементов, электролизера, водородного и кислородного баллонов, соединенных посредством трубопроводов и клапанов с соответствующими газовыми полостями топливных элементов электрохимического генератора и электролизера, имеющих общий контур циркуляции электролита, отличающаяся тем, что дополнительно содержит полностью управляемый полупроводниковый трехфазный преобразователь, состоящий из соединенных между собой выпрямителя и инвертора, которые через автоматические выключатели соединены со сборной шиной, а накопитель энергии дополнительно содержит два управляемых трехходовых клапана, один из которых расположен между электрохимическим генератором и приемной емкостью, а второй – между электрохимическим генератором и электролизером. Использование в установке альтернативных источников генерации и водородного

накопителя позволяет значительно сократить потребление органического топлива и уменьшить количество вредных выбросов и углекислого газа. Предоставленная автономная система электроснабжения, предназначена для питания оборудования в автономном режиме и позволяет обеспечивать дешёвой энергией потребителей. Предложенная установка позволяет получать «зеленый» водород при помощи солнечной или ветровой энергии. Представленная система значительно увеличивает эффективность преобразования энергии за счёт использования специального оборудования, в частности трёхходового клапана и управляемого и инвертора. Использование водородной энергетики позволяет значительно сократить вредные выбросы и уменьшить парниковый эффект.

Список литературы

1. Технологии использования солнечных установок совмещенных с крышей зданий // Тиман Д.И., Кувшинов В.В., Артеменко И.Д., Березняк В.А., Касницкий А.Д. / В сборнике: Перспективные технологии и материалы. Материалы Международной научно-практической конференции. Севастополь, 2022. С. 380-383.
2. Комбинированная автономная система электроснабжения // Муровский С.П., Кувшинов В.В., Кузнецов П.Н., Якимович Б.А., Штепа К.В. / Патент на изобретение RU 2811560 C1, 15.01.2024. Заявка от 22.02.2023.
3. Система электроснабжения жилого комплекса на базе преобразователей солнечной энергии с возможностью генерации электрической энергии в общую энергосеть // Кувшинов В.В., Сперанский М.Ю., Смокталь Н.Н., Жиганов И.Г., Бордин Д.Ф. / Энергетические установки и технологии. 2022. Т. 8. № 1. С. 96-105.
4. Использование солнечных установок для обеспечения энергетической безопасности крымского региона и города Севастополя // Кувшинов В.В., Парахнич А.С., Юфев Л.Ю. // Инновации в сельском хозяйстве. 2018. № 1 (26). С. 206-211.
5. Системы резервного питания для судовых энергетических установок // Жильцов А.С., Коломийченко В.П., Ивантеев И.С., Владимиров А.С., Артеменко И.Д. / Естественные и технические науки. 2024. № 1 (188). С. 230-233.
6. Устройство для извлечения водорода из жидкого органического носителя // Жильцов А.С., Кочетов В.А., Сверлов Д.А., Смирнов С.А. / Патент на изобретение RU 2823698 C1, 29.07.2024. Заявка от 05.09.2023.
7. Использование альтернативных источников энергии для резервных систем питания на основе судового электрооборудования // Артеменко И.Д., Кувшинов В.В., Шахова Н.В., Бордин Д.Ф.,

Скидан А.А. / Энергетические установки и технологии. 2022. Т. 8. № 4. С. 15-20.

References

1. Technologies for the use of solar installations combined with the roof of buildings // Timan D.I., Kuvshinov V.V., Artemenko I.D., Berezhnyak V.A., Kasnitsky A.D. / In the collection: Advanced technologies and materials. Materials of the International Scientific and Practical Conference. Sevastopol, 2022. pp. 380-383.
2. Combined autonomous power supply system // Murovsky S.P., Kuvshinov V.V., Kuznetsov P.N., Yakimovich B.A., Shtepa K.V. / Patent for invention RU 2811560 C1, 01/15/2024. Application dated 02/22/2023.
3. Power supply system for a residential complex based on solar energy converters with the possibility of generating electrical energy into the general power grid // Kuvshinov V.V., Speransky M.Yu., Smoktal N.N., Zhiganov I.G., Bordan D.F. / Energy installations and technologies. 2022. T. 8. No. 1. P. 96-105.
4. The use of solar installations to ensure the energy security of the Crimean region and the city of Sevastopol // Kuvshinov V.V., Parakhnich A.S., Yuferev L.Yu. // Innovations in agriculture. 2018. No. 1 (26). pp. 206-211.
5. Backup power systems for ship power plants // Zhiltsov A.S., Kolomiychenko V.P., Ivanteev I.S., Vladimirov A.S., Artemenko I.D. / Natural and technical sciences. 2024. No. 1 (188). pp. 230-233.
6. Device for extracting hydrogen from a liquid organic carrier // Zhiltsov A.S., Kochetov V.A., Sverlov D.A., Smirnov S.A. / Patent for invention RU 2823698 C1, 07.29.2024. Application dated 09/05/2023.
7. The use of alternative energy sources for backup power systems based on ship electrical equipment // Artemenko I.D., Kuvshinov V.V., Shakhova N.V., Bordan D.F., Skidan A.A. / Energy installations and technologies. 2022. T. 8. No. 4. P. 15-20.

**МЕТОДЫ И ПРИБОРЫ КОНТРОЛЯ И ДИАГНОСТИКИ МАТЕРИАЛОВ, ИЗДЕЛИЙ,
ВЕЩЕСТВ И ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ**

УДК 681.78

**Лабораторная установка для исследования контактного
инициирования высокоэнергетических материалов**Ф.А. Губарев¹, Л.Ю. Давыдова¹, Д.В. Торганов¹, М.С. Цирон¹¹ ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», ул. Университетская, 33, г. Севастополь,
299053, Россия, fagubarev@mail.sevsu.ru, lydavydova@mail.sevsu.ru

Статья поступила 06.11.2024 г.; после доработки 07.11.2024 г.

Аннотация

В работе представлена лабораторная установка для исследования контактного инициирования высокоэнергетических материалов. Предложена методика контактного инициирования с одновременным визуальным контролем. Визуализация осуществлялась с использованием лазерного монитора и скоростных камер Evercam F 1000-16-C. Для временного согласования видеозаписи и инициирования разработана схема синхронизации на основе микроконтроллера с гальванической развязкой входных и выходных сигналов. Приведены результаты реализации сценария инициирования горения образца термитной смеси, нанесенного на бумажную подложку, при взаимодействии с нагретым проводником. Предложенная методика исследования позволяет исследовать динамику воспламенения и условия зажигания различных высокоэнергетических материалов.

Ключевые слова: контактное инициирование, нагретый проводник, нанопорошок алюминия, термитная смесь, синхронизация, лазерный монитор, усилитель яркости.

**Laboratory installation for the study of contact initiation of high-energy
materials**F.A. Gubarev¹, L.Y. Davydova¹, D.V. Torganov¹, M.S. Tsiron¹¹Sevastopol state university, 33 Universitetskaya st., Sevastopol, 299053, Russia, fagubarev@mail.sevsu.ru, lydavydova@mail.sevsu.ru

Received .06.11.2024 y.; received in final form 07.11.2024 y.

Abstract

The paper presents a laboratory installation for the study of contact initiation of high-energy materials. A method of contact initiation with simultaneous visual control is proposed. Visualization was carried out using a laser monitor and high-speed cameras Evercam F 1000-16-C. For the time matching of video recording and initiation, a synchronization scheme based on a microcontroller with galvanic isolation of input and output signals has been developed. The results of the implementation of the combustion initiation scenario for a sample of a thermite mixture deposited on a paper substrate in interaction with a heated conductor are presented. The proposed research methodology makes it possible to study the ignition dynamics and ignition conditions of various high-energy materials.

Keywords: contact initiation, heated conductor, aluminum nanopowder, thermite mixture, synchronization, laser monitor, brightness amplifier.

Введение

Высокотемпературное горение является сложным комплексом взаимосвязанных химических и физических процессов [1, 2], поэтому исследовательские и инженерные работы по созданию оборудования и методик проведения экспериментов по инициированию и поддержанию режимов горения не теряют своей актуальности.

Воспламенение – это начальная стадия горения, в течение которой энергия, подводимая к системе от внешнего источника энергии, приводит к резкому ускорению химической реакции из-за прогрессивного накопления энергии или активных промежуточных частиц [2].

Горение может начаться самопроизвольно в результате самовоспламенения или может быть инициировано зажиганием. Зажигание – это два последовательных процесса: начальное очаговое зажигание, вызывающее первичное пламя, и распространение пламени от очага.

Источник зажигания (воспламенения) представляет собой источник теплоты, который способен нагреть горючее вещество до температуры воспламенения. Таким образом, тип источника зажигания лежит в основе классификации механизмов инициирования горения. Наиболее распространенные механизмы инициирования процесса горения:

1. инициирование воздействием открытого пламени – тепловое действие оказывает непосредственно очаг горения, а также высокотемпературные продукты сгорания [3–5];
2. инициирование электрическим разрядом – выделенное в разрядном канале количество теплоты приводит к мгновенному развитию химических реакций горения [6];
3. контактное инициирование – соприкосновение с нагретым телом, нагретыми поверхностями различной формы и геометрии [7];
4. инициирование лазерным излучением – воздействие импульсного излучения лазера, сфокусированного на образце, приводит к воспламенению [8, 9].

Для процессов горения характерно наличие критических условий возникновения и распространения пламени – некоторых фиксированных значений давления, температуры, размеров системы, состава и агрегатного состояния горючей смеси, при достижении которых происходит воспламенение [10].

Изучение, детализация количественных соотношений и комбинация начальных условий инициирования представляет интерес для исследова-

тельской работы с целью выявления закономерностей протекания начальной фазы процесса горения. Для многих практических задач инициирование и горение протекают в условиях атмосферного давления, часто на открытом пространстве.

Мониторинг горения – это наблюдение за изменением реагентов и окружающей их среды в процессе их физико-химических превращений в ходе горения в целях: выяснения законов горения; установления стадий горения, характера изменения температуры и яркости процесса; установления скорости распространения пламени; установления критических параметров воспламенения, развития и прекращения горения; анализа процессов, происходящих в области химической реакции и характера изменения веществ; выявления процессов, происходящих на поверхности реагирующих компонентов и др. Путём мониторинга возможно установить временную зависимость того или иного параметра горения.

В данной работе предложена лабораторная установка контактного инициирования высокоэнергетических материалов (ВЭМ) в условиях атмосферного давления с визуализацией в режиме реального времени. Рассмотрен метод исследования и предложен сценарий реализации контактного инициирования ВЭМ для последующего применения при исследовании горения ВЭМ и различных видов топлив.

Условия реализации эксперимента

Для инициирования горения высокоэнергетического материала путем контакта с нагретым телом необходимо наличие трех компонентов: горючее вещество (сам материал), окислитель (кислород) и источник энергии (накаленный проводник). Температура самовоспламенения одного и того же вещества зависит от внешних условий и может изменяться в широких пределах. Кроме параметров окружающей среды, то есть давления и температуры, она зависит от состава горючей смеси и от степени измельчения. Чем больше измельчено твердое вещество, тем ниже его температура самовоспламенения [2].

Одним из наиболее распространенных типов энергетических материалов являются термитные смеси на основе нанопорошка алюминия [11]. В данной работе в качестве горючего вещества использовался образец термитной смеси Al-CuO, приготовленной из нанопорошков алюминия и оксида меди с добавлением полимерного материала Импирон. Импирон – водораствори-

мый полимер, комплексообразователь (связывает активные вещества), имеет высокую адгезию к различным поверхностям. Подобные материалы имеют перспективу использования в технологиях 3D-печати энергетическими материалами [12], в том числе для получения энергетических метаматериалов [13, 14]. Состав образца в жидкой фазе нанесен на ровный лист бумаги и высушен до перехода в твердое состояние. Такая подготовка образца обеспечивает равномерность распределения состава по поверхности листа и минимальную толщину слоя термитного состава при сохранении энергетических свойств.

Окислителем является атмосферный воздух, так как реализация эксперимента не предполагает помещение образца в специальные емкости и создание искусственных сред. В состав атмосферного воздуха, кроме основных компонентов – кислорода O_2 и азота N_2 , входят инертные газы (аргон, неон, гелий, криптон, ксенон), озон O_3 , углекислый газ CO_2 , пары воды H_2O и частицы аэрозолей (пыль). Однако объем второстепенных компонентов не превышает 1 %, поэтому можно считать, что воздух состоит из двух компонентов – кислорода и азота [15]. В процессе горения участвует, в основном, кислород, концентрации которого в помещении вполне достаточно для инициирования и горения.

Эксперимент проводится при комнатной температуре (23 ± 5) °C и относительной влажности воздуха (50 ± 20) %. Лаборатория оборудована вытяжной вентиляцией, удовлетворяет действующим требованиям по электробезопасности и санитарно-гигиеническим требованиям в соответствии с ГОСТ 12.1.005. Лица, допущенные к проведению эксперимента, ознакомлены с техническим описанием и инструкцией по эксплуатации оборудования. Это обеспечивает безопасные условия проведения эксперимента по инициированию горения термитных смесей при взаимодействии с нагретым телом (электрическим проводником).

В процессе теплообмена электрический проводник должен обеспечить нагрев образца до температуры ~ 600 °C, при которой произошло бы воспламенение [16]. В свою очередь проводник нагревается под действием протекающего через него электрического тока (электронагрев). В работе осуществляется прямой электронагрев сопротивлением токопроводящего твердого вещества (проводника первого рода), который называют электроконтактным. Количество тепла, выделяемое проводником при прохождении тока, пропорционально времени протекания

тока, при этом скорость нагрева зависит от величины тока, материала и геометрических размеров проводника. При значительной величине тока, температура проводника может достигнуть температуры плавления материала. При нарушении целостности проводника, происходит обрыв электрической цепи, и температура проводника резко снижается. Таким образом, длительность протекания тока по проводнику (длина импульса нагрева) должна быть подобрана так, чтобы обеспечить сохранение целостности электроконтактной цепи и нагрев образца до воспламенения.

Горение высокоэнергетических материалов является быстропротекающим процессом, сопровождающимся ярким широкополосным свечением [1], поэтому для его визуализации целесообразно использовать скоростные камеры, с одной стороны, и методы исключения влияния засветки от пламени, с другой стороны. Скоростные камеры предоставляют возможность детального исследования динамики процессов во времени при обеспечении синхронизации момента подачи электрического импульса проводнику и начала съемки. Минимизировать или исключить засветку камеры ярким излучением пламени возможности с применением следующих основных методов: пассивная фильтрация [17], мощная широкополосная подсветка с пассивной фильтрацией [18], лазерная подсветка с узкополосной фильтрацией [4, 19], и лазерный мониторинг [9, 19–22]. На практике целесообразно сочетание данных методов для получения более высокой информативности визуализации. При использовании активных (лазерных) методов фильтрации потребуется синхронизация лазера подсветки и кадров записи скоростной камеры.

В зависимости от модели скоростной камеры может отличаться механизм синхронизации. В связи с чем, потребуется разработка технического решения для синхронизации работы камеры, лазерной подсветки (лазерного монитора) и системы контактного инициирования. Учитывая энергонасыщенность экспериментальной установки, для стабильной работы синхронизации требуется применение гальванической развязки блоков. Кроме того, схема синхронизации должна обеспечивать максимально возможную автоматизацию эксперимента.

Схема лабораторной установки

В работе используется научная лабораторная установка для исследования быстропротекающих процессов горения, функциональная

схема которой представлена на рис. 1. Образец высокоэнергетического материала 1 размещен на предметном столике 2 с линейным транслятором и зажимом, который обеспечивает как горизонтальное, так и вертикальное расположение, а также возможность перемещения образца вдоль оптической оси. Указанные степени свободы обеспечивают необходимую площадь и место контакта материала с проводящей частью системы контактного инициирования 3. Проводящая часть включает проводник, жестко закрепленный в контактах на текстолитовой основе. В качестве проводника использована скоба стальной волнообразной формы диаметром 0,6 мм. Скоба обеспечивает протекание электрического тока, а держатель из текстолита обладает диэлектрическими свойствами и выдерживает воздействие агрессивных веществ и повышенных температур. Источником кратковременного переменного тока является блок питания контактного инициирования (БПИ) 4, который включает однофазный понижающий трансформатор и твердотельное реле SSR-40 DA.

Съемка эксперимента осуществляется двумя способами. Скоростная камера 5 Evercam 1000-16-C (камера 1) с объективом Canon Macro Lens EF 100 мм и нейтральным светофильтром HC-13 осуществляет регистрацию изображения в собственном свечении. При недостаточной интенсивности собственного свечения до воспламенения применяется дополнительное освещение образца лампой подсветки 6. Второй канал визуализации представляет собой лазерный монитор, состоящий из собирающей линзы 7, которая служит объективом микроскопической системы, усилителя яркости 8, согласующей оптики 9 и скоростной камеры 10 Evercam 1000-16-C (камера 2).

Усилитель яркости реализован на основе лазерной среды на парах бромида меди, имеющей газоразрядную накачку, с газоразрядной трубкой (ГРТ) диаметром 3 см и длиной активной части (внутри внешнего нагревателя) 60 см. ГРТ имеет отпаиваемую конструкцию с внешним нагревом усиливающей среды. Частота следования импульсов (ЧСИ) накачки, а, следовательно, и ЧСИ лазерного излучения, составляет 20 кГц. Условия эксплуатации оптимизированы для обеспечения однородного профиля луча усиленного спонтанного излучения (УСИ) и относительно низкой средней мощности УСИ – 26 мВт на длине волны 510,6 нм. Малая средняя мощность УСИ при относительно большой области наблюдения обеспечивает чрезвычайно малую плотность мощности излучения лазерного монитора

на поверхности объекта исследования (1,6 мВт/мм²) и не оказывает заметного воздействия на объект наблюдения. Аналогичный усилитель яркости применялся в работах [9, 22].

Скоростная камера Evercam 1000-16-C является отечественным представителем скоростных видеокамер и позволяет регистрировать до 1000 кадров в секунду при разрешении матрицы 1920×1088 пикселей [23]. Стоит отметить, что применение камеры Evercam представляет новизну для лазерных систем с усилением яркости. В известных системах ранее применялись скоростные камеры других производителей [9, 19–22].

Согласующая оптика состоит из объектива Zenit, нейтрального (типа HC) и полосового (510±5 нм) светофильтров и держателей оптики, расположенных соосно усилителю яркости, и служит для проецирования усиленного изображения на матрицу камеры 10. Оборудование 1–10 размещено на рабочей поверхности оптического стола, который обладает значительной инерционностью, что важно для минимизации собственных вибраций оптической схемы.

Источником накачки активной среды усилителя яркости служит генератор высоковольтных импульсов – тиратронный модуль 11, работающий по принципу прямого разряда накопительного конденсатора через водородный тиратрон [24, 25]. Высоковольтный инверторный модуль 12 обеспечивает заряд накопительного конденсатора тиратронного модуля. Источник накачки содержит оптоволоконный модуль для формирования выходного сигнала, синхронного с импульсами накачки активной среды, который подается на модуль синхронизации 13 и используется для синхронизации скоростных камер. Частота повторения синхроимпульсов совпадает с ЧСИ импульсов накачки. Подробное описание работы используемого высоковольтного источника накачки приведено в работе [22].

Модуль синхронизации 13 выполнен на основе платы микроконтроллера STM32F103C8T6 и обеспечивает временное согласование видеозаписи скоростными камерами и инициирования горения образца. Оптические преобразователи 14 и 15 с электропитанием от скоростных камер предназначены для преобразования оптических синхросигналов в электрические импульсы для подачи на входы “SYNC IN” скоростных камер 5 и 10. Запуск эксперимента осуществляется нажатием кнопки 16. Персональный компьютер 17 с установленным сервисным программным обеспечением, выполняет функцию настройки и

управления режимами съемки, предварительного просмотра с целью определения объема за-

писи эксперимента (количества кадров), экспорта и сохранения информации на жесткий диск.

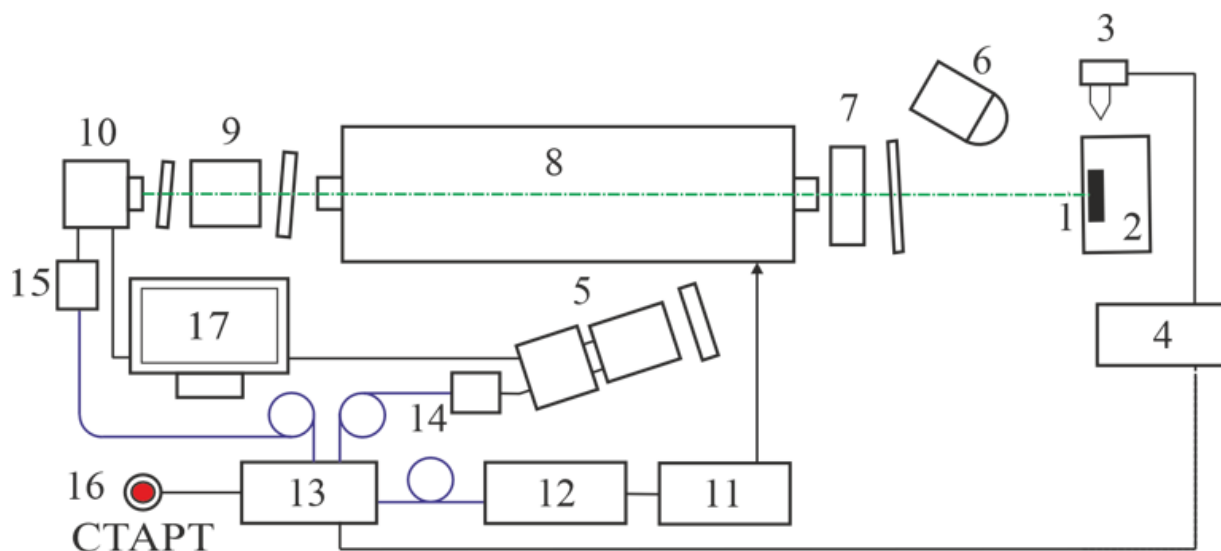


Рис. 1. Схема лабораторной установки. 1 – образец; 2 – предметный столик; 3 – проводящая часть системы контактного инициирования; 4 – блок питания контактного инициирования (БПИ); 5 – скоростная камера Evercam 1000-16-C (камера 1); 6 – лампа подсветки; 7 – собирающая линза; 8 – усилитель яркости; 9 – согласующая оптика; 10 – скоростная камера Evercam 1000-16-C (камера 2); 11 – тиратронный модуль; 12 – высоковольтный инверторный модуль; 13 – модуль синхронизации; 14, 15 – оптические преобразователи; 16 – кнопка «СТАРТ», 17 – персональный компьютер

Описание модуля и принципа синхронизации

Техническое решение для синхронизации работы системы контактного инициирования и системы высокоскоростной визуализации представлено в виде схемы на рис. 2. Принцип синхронизации иллюстрирован на рис. 3.

Модуль синхронизации, выполненный на основе платы микроконтроллера STM32F103C8T6 (DD1), осуществляет синхронную работу скоростных камер, усилителя яркости и БПИ. Гальваническая развязка микроконтроллера и внешних цепей обеспечивается применением оптронов и оптоволоконных линий связи. Оптический передатчик преобразует электрический сигнал в оптический, что позволяет работать в широком частотном диапазоне, а также снизить вероятность передачи импульсных и высокочастотных помех за счет низкой емкостной и индуктивной связи между входом и выходом.

Нечувствительность оптоволоконных линий связи к внешним электромагнитным полям позволило организовать каналы передачи данных с высокой помехозащищенностью. Модуль

синхронизации имеет два гальванически развязанных источника питания для микроконтроллера и внешних цепей. Для защиты от электромагнитных помех электронная схема помещена в металлический корпус.

Импульсы, синхронные с импульсами накачки активной среды и излучения усилителя яркости (оптический канал ОК1), с частотой 20 кГц поступают на вход микроконтроллера через оптический преобразователь DD4 (HFBR-2522Z). На практике предполагается установка частоты съемки равной 500, 1000, 2000 или 5000 кадров/с в зависимости от задач исследования. Так как частота съемки меньше частоты следования импульсов усилителя яркости, одной из функций микроконтроллера является деление частоты, т.е. синхроимпульсы для камер формируются по каждому 40-му, 20-му, 10-му и 4-му импульсу на входе оптического приемника DD4. Выбор режима деления частоты осуществляется переключателем КН2.

Управление записью камер Evercam 1000-16-C осуществляется путем подачи импульсов на вход SYNC IN, при этом запись осуществляется по каждому пришедшему импульсу и не за-

висит от состояния на входе TRIG IN. Таким образом, для синхронной работы камеры и усилителя яркости, необходимо согласовать последовательности импульсов усилителя яркости с импульсами управления камерой.

В данной работе микроконтроллер формирует выходную последовательность импульсов для внешней синхронизации камер, синхронную с импульсами излучения усилителя яркости, которая подается на оптические передатчики DD2 и DD3 посредством транзистора VT1.

Формирование последовательностей начинается по нажатию кнопки КН3 «СТАРТ», которая подключается к микроконтроллеру через оптрон АОТ2. После нажатия кнопки, вместе с началом записи формируется сигнал разрешения контактного инициирования, который подключается к реле ТТР1 через оптрон АОТ1. Длительность этого сигнала задается переключателями КН1. Таким образом, схема синхронизации имеет три выходных канала: первый канал – управление режимом БПКИ, два других канала – синхронизация видеосъемки.

Передача импульсов управления камерами осуществляется по оптоволоконным каналам связи длиной 5 м. Приемные части, выделенные пунктиром на рис. 3, помещены в металлические

корпуса для обеспечения помехозащищенности. Питание микросхем DD5 и DD6 напряжением 3,3 В осуществляется непосредственно с разъемов управления камерами. Транзисторы VT2 и VT3 служат для согласования по току выходов оптических приемников с входами SYNC IN камер.

Настройка схемы визуализации

Особенностью цифровых камер является зависимость активного разрешения матрицы от скорости съемки. С увеличением скорости съемки активное разрешение матрицы уменьшается. Поэтому при мониторинге выбирается компромисс между разрешением изображения и временем между кадрами. Для скорости съемки 500 и 1000 кадров/с у камер Evercam 1000-16-С возможна установка активного разрешения, равного физическому разрешению матрицы 1920×1088 пикселей. При скорости съемки 2000 кадров/с – 960×512 пикселей, при скорости 5000 кадров/с – 640×192 пикселей.

Экспозиция камеры настраивается, исходя из предполагаемой яркости изображений, таким образом, чтобы обеспечить оптимальное экспонирование матрицы.

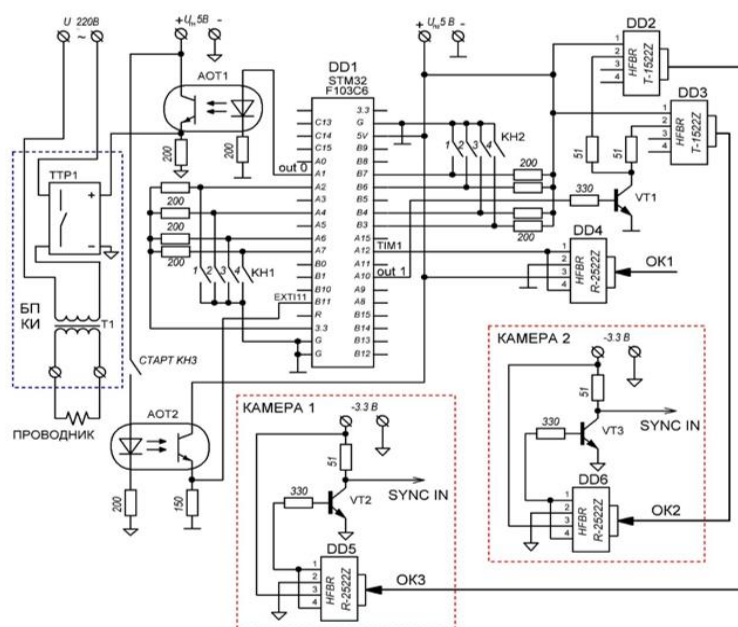


Рис. 2. Схема синхронизации

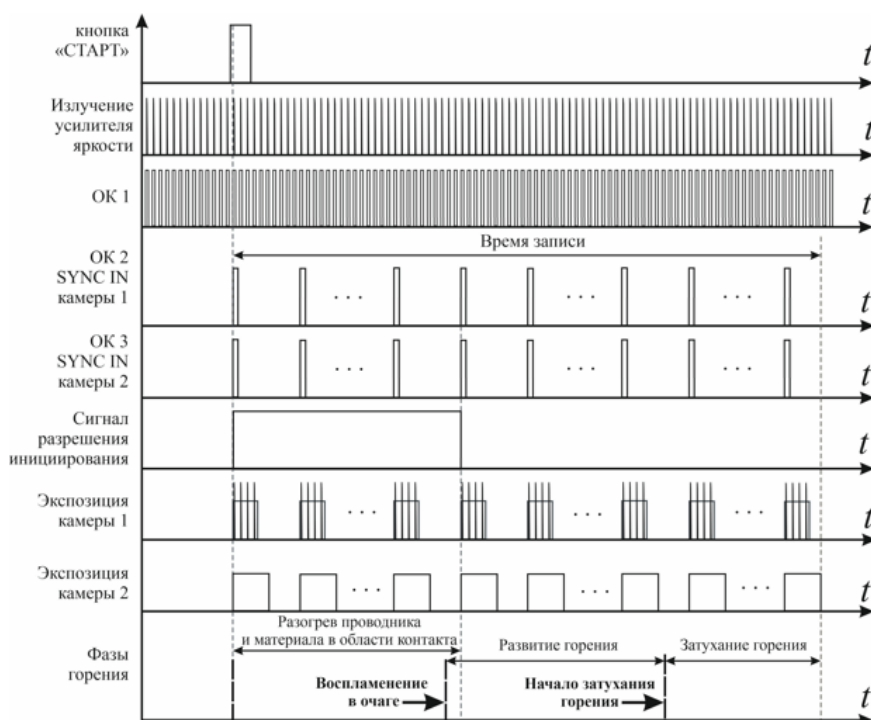


Рис. 3. Временная диаграмма работы лабораторной установки

Резкость изображений камеры 2 настраивается путем перемещения предметного столика по отношению к собирающей линзе 7 вдоль оси усилителя яркости. Перед началом экспериментов по исследованию горения ВЭМ, необходимо произвести калибровку изображения с использованием линейки, как показано на рис. 4. По результатам калибровки определяются размеры области зрения, в данном случае они составляют $4,6 \times 2,5$ мм.

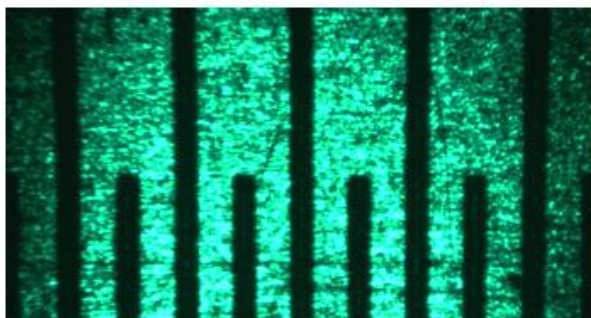


Рис. 4. Изображение калибровочной линейки, полученное камерой 2

Далее производится настройка и калибровка камеры 1, которая осуществляет съемку процесса горения в собственном свечении. Калибровка осуществляется при экспозиции $1/200$ с с включенной лампой подсветки 6. Расстояние до

объекта настраивается так, чтобы весь образец помещался в область зрения камеры, результат представлен на рис. 5. По результатам калибровки размеры области наблюдения составляют 64×35 мм.

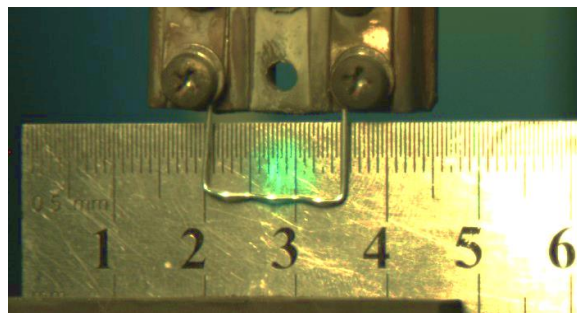


Рис. 5. Изображение камеры 1

Перед исследованием горения перед объективом камеры 2 устанавливается нейтральный светофильтр НС-13. Так как горение термитных смесей сопровождается разлетом продуктов сгорания, перед светофильтром дополнительно устанавливается защитное кварцевое стекло.

При реализации сценария контактного инициирования, тепло от нагретого проводника передается поверхности горючего материала. Тепловой контакт достигается путем размещения образца на предметном столике, как показано на

рис. 6. Разогрев проводника осуществляется путем пропускания через него электрического тока в течение 3–5 с. Соответственно, микроконтроллер необходимо запрограммировать таким образом, чтобы обеспечить соответствующую длительность сигнала разрешения инициирования. Длительность записи определяется экспериментально по времени горения образца. Результат эксперимента представлен в виде двух последовательностей кадров, полученных в собственном свечении и в лазерный монитор. Динамика процессов горения оценивается путем цифрового анализа записанных кадров.

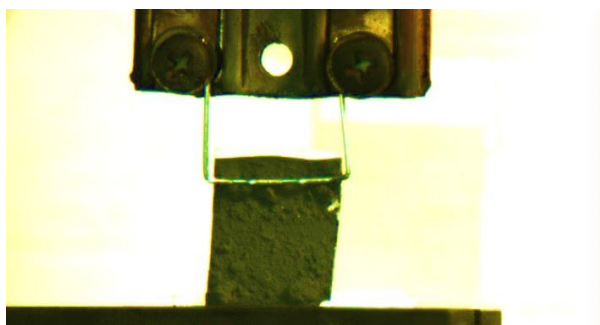


Рис. 6. Положение образца

Результаты реализации

В ходе экспериментальной части работы с двух камер получены последовательности изображений процесса горения приготовленного образца ВЭМ, которые приведены на рис. 7 и 8. Каждая подборка получена путем редукции полной записи (составляла около 13 000 кадров) в соответствии с основными фазами горения образца и дает представление о динамике протекания процессов.

При проведении анализа процесса контактного инициирования горения интерес представляет начальная фаза процесса. При съемке в собственном свечении (рис. 7) виден разогрев проводника по увеличению яркости свечения, воспламенение ВЭМ и распространение горения. После отключения нагрева проводника (4 с), его яркость уменьшается.

На рис. 8 представлена подборка кадров, записанных камерой 2 в схеме лазерного монитора. Лазерный монитор позволяет наблюдать изменение поверхности образца и проводника во время инициирования и последующего горения. На изображениях камеры лазерного монитора в начале воздействия выделяется темная область вдоль стальной скобы, характерная для объемного изображения ровной цилиндрической поверхности, которую имеет неиспользованный

проводник (рис. 5). При этом блики свидетельствуют о гладкой поверхности, хорошо отражающей лазерное излучение.

Далее происходит изменение геометрических и цветовых характеристик изображений проводника, что является следствием его накала и деградации в результате окисления. За время 2,5 с можно заметить, что поверхность проводника визуально изменилась, исчезли блики и темная область вдоль проводника.

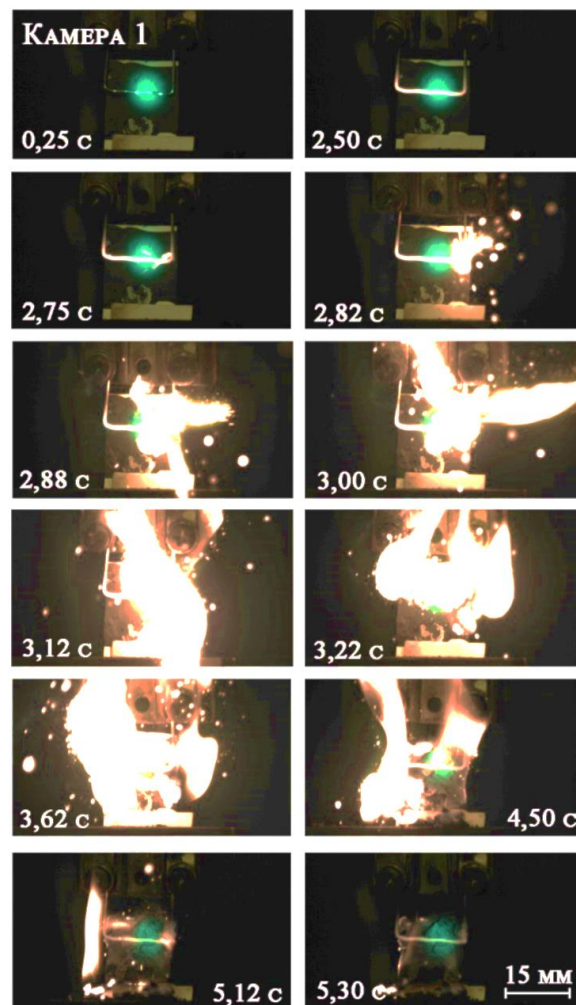


Рис. 7. Кадры видеозаписи контактного инициирования и горения смеси Al-CuO+Импирон в собственном свечении (камера 1).

При последующем разогреве наблюдается появление темных пятен на поверхности проводника, что свидетельствует о начале его разрушения (2,75 с на рис. 8).

Воспламенение данного образца произошло вне области зрения лазерного монитора в момент времени 2,75 с (рис. 7). Поэтому на изображениях лазерного монитора видно прохождение

волны горения по поверхности ВЭМ, которое соответствует промежутку времени между 3,12 и 4,50 с. Под волной горения мы понимаем область на поверхности материала, где происходит реакция. На изображениях волна горения видна в виде распространяющейся темной области. Рассчитанная скорость распространения волны горения для данного образца составила 6–20 мм/с.

В промежутке времени от 2,75 с до 5,12 с происходит выгорание ВЭМ с подложки, сопровождающееся отслоением материала. На кадре в момент времени 5,12 с фактически видна поверхность обугленной бумажной подложки.

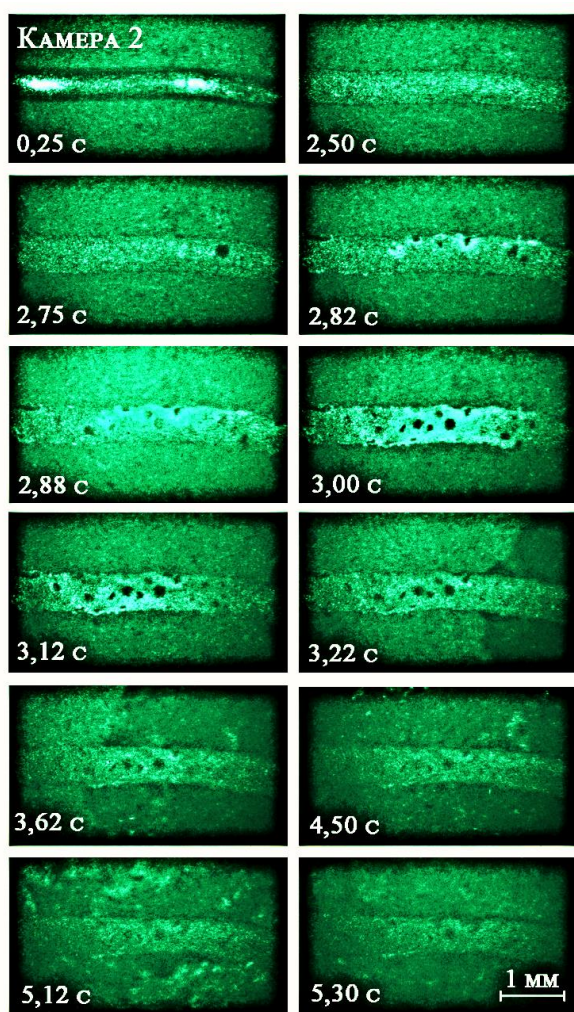


Рис. 8. Кадры видеозаписи поверхности материала и накаливаемого проводника, записанных камерой лазерного монитора (камера 2).

Заключение

В работе предложена методика контактного инициирования ВЭМ с одновременным визуальным контролем и лабораторная установка для ее

реализации. Установка имеет устройство контактного инициирования и двухканальную систему визуализации на основе лазерного монитора и двух скоростных камер Evercam F 1000-16-С, синхронизация которых реализована с применением платы микроконтроллера STM32F103C8T6. Такое техническое решение является универсальным и может быть сконфигурировано для исследования процессов с различной скоростью протекания.

Предложенная методика исследования и ее практическая реализация дает возможность осуществления мониторинга полного цикла горения ВЭМ в условиях атмосферного давления и комнатной температуры. На основе анализа данных мониторинга возможно составить представление об особенностях протекания процессов контактного инициирования и высокотемпературного горения термитной смеси, выделить этапы и определить длительность временных интервалов, характеризующих динамику процесса.

С использованием представленного в работе оборудования визуализировалось горение полимерного ВЭМ на основе термитной смеси Al-CuO и Импирона. Мы полагаем, что предложенная лабораторная установка и методика исследования позволят изучать горение различных ВЭМ, жидких и твердых топлив.

Авторы выражают благодарность сотрудникам Лаборатории физикохимии высокодисперсных материалов Института физики прочности и материаловедения СО РАН (г. Томск) за предоставленные образцы ВЭМ.

Список литературы

1. Громов А.А., Хабас Т.А., Ильин А.П., Попенко Е.М., Коротких А.Г., Архипов В.А., Дитц А.А., Строкова Ю.И., Толбанова Л.О. Горение нанопорошков металлов – Томск.: Дельтаплан, 2008. – 382 с.
2. Адамян В.Л. Теория горения и взрыва / В.Л. Адамян. – М.: Изд-во Лань, 2018. – 116 с.
3. Манжос, Е. В. Исследование инициирования волны фильтрационного горения газа открытым пламенем / Е. В. Манжос, А. А. Коржавин // Доклады Академии наук высшей школы Российской Федерации. – 2024. – № 2(63). – С. 54-66. – DOI 10.17212/1727-2769-2024-2-54-66. – EDN GMHQMС.
4. Губарев Ф. А. Визуализация горения нанопорошков металлов с применением импульсного и непрерывного лазерного подсветки / Ф. А. Губарев // Ползуновский вестник. – 2022. – № 4-2. – С. 151-158. – DOI 10.25712/ASTU.2072-

- 8921.2022.4.2.019. – EDN QKMHCE.
5. Янковский Б.Д., Ананьев С.Ю., Долгобородов А.Ю. Зажигание газовой смеси продуктами горения термитного состава Al/CuO // Горение и взрыв. – 2022. – Т. 15, № 1. – С. 72-81. – DOI 10.30826/CE22150109. – EDN FZWUCQ.
 6. Ефимов Б. Г. Иницирование и стабилизация горения при низких давлениях и температуре с помощью неравновесного электрического разряда / Б. Г. Ефимов, В. В. Иванов, В. В. Скворцов // Известия Российской академии наук. Механика жидкости и газа. – 2008. – № 5. – С. 153-160. – EDN JRGKCP.
 7. Архипов В.А., Басалаев С.А., Кузнецов В.Т. Моделирование процессов зажигания и горения боросодержащих твердых топлив // Физика горения и взрыва. – 2021. – Т. 57, № 3. – С. 58-64. – DOI 10.15372/FGV20210305. – EDN XVTBPP.
 8. Кириленко В.Г., Гришин Л.И., Долгобородов А.Ю. Особенности горения нанотермитов на основе наноалюминия при лазерном иницировании // Горение и взрыв. – 2022. – Т. 15, № 1. – С. 82-97. – DOI 10.30826/CE22150110. – EDN DHPXOG.
 9. Gubarev F. A. High-speed optical imaging technique for combusting metal nanopowders / F. A. Gubarev, A. V. Mostovshchikov, L. Li // Optics & Laser Technology. – 2023. – Vol. 159. – Art. No. 108981. – DOI 10.1016/j.optlastec.2022.108981. – EDN QRKIWP.
 10. Gromov A.A., Teipel U., Deluca L. T. Nanometals: Synthesis and Application in Energetic Systems // Energetic Nanomaterials: Synthesis, Characterization, and Application. – Amsterdam: Elsevier Inc., 2016. – P. 47-63. – DOI 10.1016/B978-0-12-802710-3.00003-9. – EDN WWHKFN.
 11. Pervikov A., Toropkov N., Kazantsev S., Bakina O.V., Glazkova E., Lerner M. Preparation of nano/micro bimodal aluminum powder by electrical explosion of wires // Materials (Basel). – 2021. – Vol. 21. – No 14, 2021. – Art. № 6602. – DOI:10.3390/ma14216602.
 12. Kudryashova, O., Lerner M., Vorozhtsov A., Sokolov S., Promakhov V. «Review of the Problems of Additive Manufacturing of Nanostructured High-Energy Materials» Materials –2021. 14, №. 23: 7394. <https://doi.org/10.3390/ma14237394>
 13. Шульга К.В., Черных И.А., Ю., Грищенко Ю.В., Роддатис В.В. Наноструктурированные метаматериалы. Получение и характеристика // Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения. – 2010. – Т. 10, № 1-2. – С. 11-12. – EDN NJAYGR.
 14. Лелюк Д. П. Получение метаматериалов на основе текстурированных пленок диоксида ванадия с переходом диэлектрик-металл / Д. П. Лелюк, С. С. Маклаков, А. Д. Мишин // Третий междисциплинарный молодежный научный форум с международным участием "Новые материалы": Сборник материалов, Москва, 21–24 ноября 2017 года. – Москва: ООО «Буки Веди», 2017. – С. 606-608. – EDN XOLFFJ.
 15. Валиева Э. Ф. Мониторинг атмосферного воздуха / Э. Ф. Валиева, В. И. Сафарова, Р. М. Хатмуллина // Наука, образование, производство в решении экологических проблем (Экология-2020): Материалы XVI Международной научно-технической конференции, посвященной 75-летию Победы в Великой Отечественной войне. В 2-х томах, Уфа, 22 апреля 2020 года. Том 2. – Уфа: Уфимский государственный авиационный технический университет, 2020. – С. 119-121. – EDN TGGSOA.
 16. Вернер Н.Д. Исследование температуры воспламенения эпоксидных композитов, наполненных нанопорошком алюминия. Ресурсосберегающие технологии в контроле, управлении качеством и безопасности: сборник научных трудов XII Международной конференции студентов, аспирантов, молодых ученых «Ресурсоэффективные системы в управлении и контроле: взгляд в будущее», г. Томск, 07-10 ноября 2023г. Томский политехнический университет, 2024.
 17. Pomeroy B., Wierman M., Anderson W.E. Use of filtered combustion light and backlit high-speed images in combustion stability studies // Progress in Propulsion Physics. 2013. – № 4. – P. 525-538. DOI: 10.1051/eucass/201304525
 18. Gottfried J. L., Smith D. K., Ch. Ch. Wu, Pantoya M. L. Improving the Explosive Performance of Aluminum Nanoparticles with Aluminum Iodate Hexahydrate (AIH) // Scientific Reports. – 2018. – Vol. 8, №. 1. – P. 1-12. – DOI 10.1038/s41598-018-26390-9. – EDN JOIVIF.
 19. Evtushenko G.S. Methods and instruments for visual and optical diagnostics of objects and fast processes. Nova Science Publishers. New York, USA, 2018.
 20. Asinovskii E.I., Batenin V.M., Klimovskii I.I., Markovets V.V. Laser-monitor-assisted investigation of the regions of closure of current on the electrodes of an atmospheric-pressure low-current carbon arc // High Temperature. – 2001. – Vol. 39, No 5. – pp. 739–752.
 21. Trigub M.V., Vasnev N.A., Gembukh P.I., Osipov V.V., Platonov V.V., Tikhonov E.V., Active optical system for high-speed imaging of oxides laser evaporation, Optics & Laser Technology, Volume 174, 2024, 110635, ISSN 0030-3992, <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2024.110635>.
 22. Губарев, Ф. А. Многофункциональная система визуализации на основе лазера и усилителя яркости на парах бромида меди / Ф. А. Губарев // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2023. – Т. 26, № 2. – С. 21-27. – DOI 10.21293/1818-0442-2023-26-2-21-27. – EDN MRDYUX.
 23. Высокоскоростные камеры EVERCAM, EVERCAM F, EVERCAM HR, EVERCAM HS,

EVERCAM L, EVERCAM FL. Руководство пользователя. Версия 5.00.
<https://evercam.ru/dokumentatsiya/>

24. Юдин Н.А., Костыря И.Д., Полуниин Ю.П., Юдин Н.Н. Формирование ВЧ-разряда в активной среде лазеров на парах металлов // Известия вузов. Физика. – 2013. – Т. 56, № 2. – С. 51-59. – EDN PXXBYL.
25. Юдин Н.А. Влияние параметров коммутатора на эксплуатационные характеристики лазера на парах меди // Квантовая электроника. – 2002. – Т. 32, № 9. – С. 815–819.

References

1. Gromov A.A., Khabas T.A., Ilyin A.P., Popenko E.M., Korotkikh A.G., Arkhipov V.A., Ditz A.A., Strokova Y.I., Tolbanova L.O. (2008) Metal nanopowders combustion. Tomsk: Deltaplan 2008. – 382 p.
2. Adamyan V.L. Combustion and explosion theory / V.L. Adamyan. – M.: Lan Publishing House, 2018. – 116 p.
3. Manzhos E. V. Investigation of initiation of a wave of filtration combustion of gas by an open flame / E. V. Manzhos A. A. Korzhavin // Reports of the Academy of Sciences of the Higher School of the Russian Federation. Combustion. – 2024. – № 2(63). – Pp. 54-66. – DOI 10.17212/1727-2769-2024-2-54-66. – EDN GMHQMC.
4. Gubarev F. A. Visualization of combustion nanopowders of metals using pulsed and continuous illumination lasers / F. A. Gubarev // Polzunovskiy vestnik. – 2022. – No. 4-2. – pp. 151-158. – DOI 10.25712/ASTU.2072-8921.2022.4.2.019. – EDN QKMHCE.
5. Yankovski B.D., Ananyev S.Yu., Dolgoborodov A.Yu. Ignition of a gas mixture by combustion products of the thermite composition Al/CuO // Combustion and explosion. – 2022. – Vol. 15, No. 1. – pp. 72-81. – DOI 10.30826/CE221501
6. Efimov B. G. Initiation and stabilization of combustion at low pressures and temperatures using a nonequilibrium electric discharge / B. G. Efimov, V. V. Ivanov, V. V. Skvortsov // Izvestiya Rossiyskoy akademii nauk. Skvortsov // Izvestiya Rossiyskoy akademii nauk. Composition [Proceedings of the Russian Academy of Sciences]. Mechanics of liquid and gas. – 2008. – No. 5. – pp. 153-160. – EDN JRGKCP.
7. Arkhipov V.A., Basalaev S.A., Kuznetsov V.T. Modeling of ignition and combustion processes of boron-containing solid fuels // Physics of combustion and explosion. – 2021. – vol. 57, №. 3. – pp. 58-64. – DOI 10.15372/FGV20210305. – EDN XVTBPB.
8. Kirilenko V.G., Grishin L.I., Dolgoborodov A.Yu. Combustion nanothermites based on nanoaluminum burning during laser initiation // Combustion and explosion – 2022. – Vol. 15, №. 1. – pp. 82-97. – DOI 10.30826/CE22150110. – EDN DHPXOG.
9. Gubarev F. A. High-speed optical imaging technique for combusting metal nanopowders / F. A. Gubarev, A. V. Mostovshchikov, L. Li // Optics & Laser Technology. – 2023. – Vol. 159. – Art. No. 108981. – DOI 10.1016/j.optlastec.2022.108981. – EDN QRKIWP.
10. Gromov A.A., Teipel U., Deluca L. T. Nanometals: Synthesis and Application in Energetic Systems // Energetic Nanomaterials: Synthesis, Characterization, and Application. – Amsterdam: Elsevier Inc., 2016. – P. 47-63. – DOI 10.1016/B978-0-12-802710-3.00003-9. – EDN WWHKFN.
11. Pervikov A., Toropkov N., Kazantsev S., Bakina O.V., Glazkova E., Lerner M. Preparation of nano/micro bimodal aluminum powder by electrical explosion of wires // Materials (Basel). – 2021. – Vol. 21. – No 14, 2021. – Art. No 6602. – DOI:10.3390/ma14216602.
12. Kudryashova O., Lerner M., Vorozhtsov A., Sokolov S., Promakhov V. 2021. «Review of the Problems of Additive Manufacturing of Nanostructured High-Energy Materials» Materials 14, No. 23: 7394. <https://doi.org/10.3390/ma14237394>
13. Shulga K.V., Chernykh I.A., Yu., Grishchenko Yu.V., Roddatis V.V. Nanostructured metamaterials. Obtaining and characterization // Fundamental problems of radioelectronic instrumentation. – 2010. – Vol. 10, No. 1-2. – pp. 11-12. – EDN NJAYGR.
14. Lelyuk D. P. Obtaining metamaterials based on textured vanadium dioxide films with a dielectric-metal transition / D. P. Lelyuk, S. S. Maklakov, A.D. Mishin // The third interdisciplinary youth scientific forum with international participation "New Materials": Collection of materials, Moscow, November 21-24, 2017. – Moscow: Buki Vedi LLC, 2017. – pp. 606-608. – EDN XOLFFJ.
15. Valieva E. F. Monitoring of atmospheric air / E. F. Valieva, V. I. Safarova, R. M. Khatmullina // Science, education, production in solving environmental problems (Ecology 2020): Materials of the XVI International Scientific and Technical Conference dedicated to the 75th anniversary of Victory in the Great Patriotic War. In 2 volumes, Ufa, April 22, 2020. Volume 2. Ufa: Ufa State Aviation Technical University, 2020. – pp. 119-121. – EDN TGGSOA.
16. Werner N.D. Investigation of the ignition temperature of epoxy composites filled with aluminum nanopowder. Resource-saving technologies in control, quality management and safety: collection of scientific papers of the XII International Conference of Students, postgraduates, young scientists "Resource-efficient systems in management and control: a look into the future", Tomsk, November 07-10, 2023. Tomsk Polytechnic University, 2024.
17. Pomeroy B., Wierman M., Anderson W.E. Use of filtered combustion light and backlit high-speed images in combustion stability studies // Progress in Propulsion Physics. 2013. – No. 4. – P. 525-538. DOI: 10.1051/eucass/201304525

18. Gottfried J. L., Smith D. K., Ch. Ch. Wu, Pantoya M. L. Improving the Explosive Performance of Aluminum Nanoparticles with Aluminum Iodate Hexahydrate (AIH) // *Scientific Reports*. – 2018. – Vol. 8, No. 1. – P. 1-12. – DOI 10.1038/s41598-018-26390-9. – EDN JOIVIF.
19. Evtushenko G.S. *Methods and instruments for visual and optical diagnostics of objects and fast processes*. Nova Science Publishers. New York, USA, 2018.
20. Asinovskii E.I., Batenin V.M., Klimovskii I.I., Markovets V.V. Laser-monitor-assisted investigation of the regions of closure of current on the electrodes of an atmospheric-pressure low-current carbon arc // *High Temperature*. – 2001. – Vol. 39, No 5. – pp. 739–752.
21. Trigub M.V., Vasnev N.A., Gembukh P.I., Osipov V.V., Platonov V.V., Tikhonov E.V., *Active optical system for high-speed imaging of oxides laser evaporation*, *Optics & Laser Technology*, Volume 174, 2024, 110635, ISSN 0030-3992, <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2024.110635>.
22. Gubarev F. A. Multifunctional imaging system based on a laser and a brightness amplifier based on copper bromide vapors / F. A. Gubarev // *Reports of the Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics*. - 2023. – Vol. 26, No. 2. – pp. 21–27. – DOI 10.21293/1818-0442-2023-26-2-21-27. – EDN MRDYUX.
23. High-speed cameras EVERCAM, EVERCAM F, EVERCAM HR, EVERCAM HS, EVERCAM L, EVERCAM FL. User's Guide. Version 5.00. <https://evercam.ru/dokumentatsiya/>
24. Yudin N.A., Kostyrya I.D., Polunin Yu.P., Yudin N.N. Formation of an RF discharge in the active medium of metal vapor lasers // *Izvestiya vuzov. Physics*. – 2013. – vol. 56, No. 2. – pp. 51–59. – EDN PXKBYL.
25. Yudin N.A. The influence of switch parameters on the operational characteristics of a copper vapor laser // *Quantum Electronics*. – 2002. – Vol. 32, No. 9. – pp. 815–819.

УДК 002.056.5

Аутентификация с применением биометрических данных термографических изображений на основе нейронных сетей

Кужель Д.Е.¹, Эндрижикевич Ю.Ю.²¹ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», студент 1-го курса магистратуры
Университетская, 33, г. Севастополь, 299053, Россия, bezdar1020@mail.ru²ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», д.т.н., доцент, профессор кафедры
«Информационная безопасность», Университетская, 33, г. Севастополь, 299053, Россия,
YYGoncharenko@sevsu.ru

Статья поступила 25.09.2024 г.; после доработки 26.09.2024 г

Аннотация

В данной статье представлен алгоритм биометрической аутентификации за счет преобразования био-метрических признаков термографических изображений на основе нейросетевых структур анализа изображений. Проанализированы существующие методы биометрической аутентификации, которые могут использовать нейросетевые технологии. Определен возможный процесс симбиоз существующих алгоритмов аутентификации на основе сверточных нейронных сетей и термографического анализа.

Ключевые слова: аутентификация, биометрические данные, сверточные нейронные сети, термография, термографические изображения.

Authentication using biometric thermographic image data based on neural networks

Kuzhel D.E.¹, Endrizhikevich Y.Y.²¹FGAOU VO "Sevastopol State University", first-year master's student, Universitetskaya, 33, Sevastopol, 299053, Russia, bezdar1020@mail.ru²FGAOU VO "Sevastopol State University", Universitetskaya, 33, Sevastopol, 299053, Russia, YYGoncharenko@sevsu.ru

Received 25.09.2024 y; received in final form 26.09.2024 y

Abstract

This paper presents an algorithm for biometric authentication by transforming biometric features of thermographic images based on neural network structures of image analysis. Existing biometric authentication methods that can use neural network technologies are analyzed. The possible process of symbiosis of existing authentication algorithms based on convolutional neural networks and thermographic analysis is defined.

Keywords: authentication, biometrics, convolutional neural networks, thermography, thermographic imaging.

Введение

Современный мир сталкивается с повышенными требованиями к безопасности, что приводит к усилению интереса к методам идентификации личности. В этом контексте, методы идентификации с помощью биометрических данных становятся все более актуальными и востребованными [1-3]. Биометрические данные сложнее

подделать, чем пароли, и не могут быть утеряны или забыты.

Они могут быть быстро и эффективно проверены в режиме реального времени и используются в различных областях, таких как финансы, здравоохранение, государственная безопасность и т.д. В связи с этим, изучение и разработка эффективных методов аутентификации с помощью биометрии является актуальной и перспективной

темой для данной работы [4-6].

В свою очередь, биометрические системы аутентификации на основе применения технологий искусственного интеллекта имеют ряд недостатков:

- необходимость переобучения нейронной сети при добавлении пользователя, что может быть решено с помощью модульной структуры системы;
- данные системы подвержены ошибке второго рода, которая выражается в вероятности допуска в систему нелегитимного пользователя.

Таким образом, системы необходимо совершенствовать с помощью создания комплексных систем, учитывающих несколько источников биометрических образов, и использовать методы с использованием искусственного интеллекта, таких как распознавания лица на термографическом изображении на основе нейронных сетей.

Цели и задачи

Целью работы является совершенствование алгоритмов биометрической аутентификации за счет нейросетевого преобразования биометрических признаков термографического изображения. Для достижения данной цели необходимо решить следующие задачи:

- 1) проанализировать существующие биометрические системы;
- 2) охарактеризовать термографию на предмет распознавания лица;
- 3) усовершенствовать алгоритм аутентификации нейросетевого преобразования исходных биометрических признаков с использованием термографического изображения.

Сравнительный анализ существующих биометрических систем

На данный момент, не все системы, которые связаны с обработкой биометрии, могут применять алгоритмы нейронных сетей. Существующие методы биометрических систем, которые могут быть использованы с применением нейронных систем, рассмотрены в таблице 1.

Каждый из этих методов уникальный имеет высокий показатель достоверности, по сравнению с не биометрическими методами аутентификации. Однако, при их сравнении друг с другом,

у каждого методами появляются преимущества и недостатки [7-9]. Наиболее надежным методом аутентификации является комбинированный. Суть комбинированного метода аутентификации заключается в двухфакторной аутентификацией с применением биометрических данных. На данный момент самым точным методом не только биометрической аутентификации, но и не биометрической, является метод «глаз + палец», при котором аутентификации происходит на основе результатов проверки сетчатки глаза и отпечатка пальца. В то же время, самым перспективным методом аутентификации на основе нейронных сетей является метод на основе уникальных черт лица. Данный метод, в комбинации с проверкой по термографическим изображением, может перестать иметь уязвимости, в виде головных уборов, маски, а также близнецов.

Анализ термографии на предмет распознавания лица

Термография, будучи одним из молодых, но стремительно набирающим популярность направлений аутентификации, может обрабатывать данные из изображения, которое регистрирует инфракрасное излучение человека. Достоинством метода является бесконтактное применение, наглядность, высокая информативность, а также безопасность.

Термографический анализ позволяет:

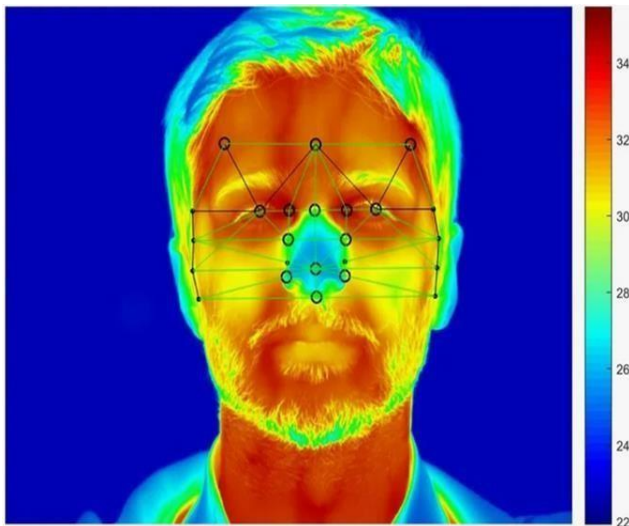
- сканировать данные, когда объект находится на удаленном расстоянии;
- сканировать данные в полной темноте;
- отличать близнецов и близких родственников;
- сканировать данные, в независимости от наличия головных уборов и предметов маскировки.

Процесс термографического анализа включает в себя использование инфракрасной термографии для выявления тепловых излучений, преобразования их в цветное изображение и дальнейшей обработки для извлечения информации о тепловых характеристиках.

После съемки инфракрасная информация (рис. 1) преобразуется в визуальное изображение, которое может быть в виде различных цветовых схем, псевдоцветных изображений, на которых различаются тепловые уровни.

Таблица 1. Методы биометрических систем, использующие системы нейронных связей.

	Обработка на основе уникальных черт лица	Обработка уникальных характеристик голоса	Обработка сетчатки глаза	Обработка отпечатков пальца
Особенности	преобразование изображения в ключевые точки черт лица и форматирование их в данные	формирование механики колебаний голосовых складок.	преобразование структуры кровеносных сосудов из отраженной сетчатки в данные	формирование шаблона отпечатка из матриц расстояний между узорами кожного покрова
Ложное срабатывание	0,1-10%	0,1-15%	0,1-0,5%	0,1-3,6%
Достоинства	многофункциональность; легкое распространение; скорость;	скорость;	точность;	простота;
Недостатки	несовершенство техники; возможность подделки;	несовершенство техники;	несовершенство техники; скорость;	несовершенство техники; скорость; наличие биометрии для аутентификации;
Уязвимости	головные уборы; близнецы; маски;	подделка; изменение голоса;	болезни глаз;	загрязнение; влага; болезни кожи;

**Рис. 1.** Термограмма лица

Термограмма лица указывает на расположение и глубину кровеносных сосудов в зонах лица). В зависимости от температуры цвет термограммы меняется от красного (высокая) к синему (низкая). Именно поэтому оттенки кожи и румянец на лице являются уникальными. После преобразования изображение подвергается обработке для улучшения качества и выявления характерных признаков.

Характерными признаками выявленных на термограммах являются градиенты, тепловые области, изменения температуры. Далее полученные данные интерпретируются в результат

наличия определенных признаков на человеческом лице.

Существует два основных направления распознавания личности по термографическим изображениям:

- методы, использующие тепловые диапазоны, для получения уникальных характеристик;
- модификация методов распознавания видимых особенностей на термографическом изображении.

К первому направлению относятся два самых популярных метода распознавания лиц – метод собственных лиц и метод главных компонент. Оказалось, что термографические портреты более устойчивы для распознавания, в то время как обычные изображения имеют свойство затруднять процесс распознавания.

Это происходит из-за того, что термографические изображения намного больше похожи друг на друга, нежели чем обычные. Исследователи отдают предпочтение этому методу, когда инфракрасное изображение более предпочтительно.

Второе направление является более вариативным. В нем используются эллиптические маски (рис. 2), на которые накладываются изо-термы слоев лица.

Ко второму направлению относятся методы, где идентификация лица основано на выделении областей с одинаковой температурой, которые свя-

заны рисунком кровеносных сосудов. По объединенной области лица формируется 8 эквипотенциальных регионов, которые называются изотермами. Изображения обрабатываются и до-рисовываются пробелы между участками, выделяется структура черепа. Эти скелеты являются ключевыми факторами признаков для распознавания лиц на термографических изображениях.

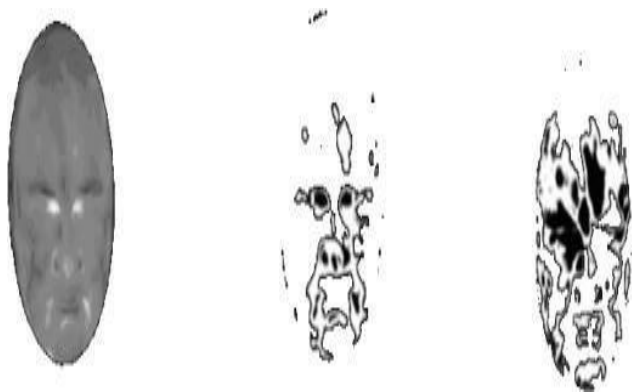


Рис.2. Изотермы лица

Исследователи применяют данный метод для наглядности и легкости воспроизведения [10,11]. Таким образом, метод, использующий тепловые диапазоны, для получения уникальных характеристик, является более подходящим для работы с нейронными сетями из-за высокой вариативности.

Составление алгоритма аутентификации нейросетевого преобразования биометрических признаков по термографическому изображению

Нейросетевой алгоритм распознавания лиц по термографии будет состоять из нескольких этапов:

- этап обучения;
- этап использования.

Каждый из этих этапов состоит из схожего алгоритма действий, но с различными входными данными.

Этап обучения

Обучение нейронной сети начинается с подготовки данных. Производится сбор большого объема данных изображений лиц с различными углами обзора, выражением лица, освещением и соответствующими идентификаторами. Параллельно необходимо получать изображения в инфракрасных лучах, для определения распределения тепла на поверхности тела.

После сбора данных изображения проходят через предобработку. Во время предобработки определенные на изображениях лица выравниваются, происходит нормализация освещения, удаляется шум, а также определяется область источника тепла.

Таким образом, после обработки изображений, они переводятся в нормальный формат, который нейронная сеть способна обработать.

Путем линейной нормализации традиционные единицы измерения переходят к формату нормализованным и обратно, при необходимости.

Когда данные нормализованные, необходимо разработать архитектуру нейронной сети, которая будет способна извлекать не только признаки из обычных изображений, но и инфракрасных, после чего делать предсказания об их идентичности. Данная процедура возможна только на основании сверточных нейронных сетей, которые специально разработаны для анализа изображений, так как рекуррентные не смогут обработать такое количество признаков из изображения. После завершения обучения нейронной сети, ее необходимо оценить на предмет производительности и провести тестирование. Отдельное внимание необходимо уделить тестированию термограмм. Для этого нужно прогнать изображения, лица на которых находится в масках или головных уборах. Если результат удовлетворяет требованиям, то можно переходить к этапу использования.

Этап использования

Когда нейронная сеть обучена идентифицировать лица, можно использовать ее для распознавания в реальном времени. С помощью камеры или другого устройства с инфракрасными датчиками необходимо получить изображение лица человека. Оно пройдет процесс предобработки и повысится качество изображения, для улучшения точности распознавания.

Далее изображение подается на вход нейронной сети, где произойдет математический анализ особенностей лица, а также тепловых оттенков. На основе анализа изображений нейронная сеть сделает вывод о том, к какому лицу принадлежит данное или принадлежит ли вообще.

Областями применения систем распознавания личности по термографическим изображениям лица могут стать: системы контроля доступа [12-14]. Такие системы могут обеспечить дополнительный контроль доступа как к физическим объектам, так и к различным информаци-

онным ресурсам [15,16]. Применение термографических данных позволит эффективно распознавать людей даже в помещениях без освещения или на открытом воздухе в темное время суток [17].

Заключение

Самым перспективным методом аутентификации на основе нейронных сетей является метод на основе уникальных черт лица. Данный метод, в комбинации с проверкой по термографическим изображением, может перестать иметь уязвимости, в виде головных уборов, маски, а также близнецов. Термографический анализ позволяет распознать лицо на основании тепловых зон, градиента, а также определенных температурных точек.

Метод, использующий тепловые диапазоны для получения уникальных характеристик, является более подходящим для работы с нейронными сетями из-за высокой вариативности. Совершенствование алгоритма аутентификации нейросетевого преобразования исходных биометрических признаков с использованием термографического изображения избавит от уязвимостей в виде головных уборов, масок, а также ложных срабатываний при аутентификации близнецов. Для этого необходимо в структуру сверточной нейронной сети добавить признаки, характерные для термографического анализа.

Список литературы

1. Лебеденко А. В. Система биометрической идентификации пользователя на основе сверточной нейронной сети для небольшой организации / А. В. Лебеденко, Ю. Ю. Гончаренко, В. Р. Нестеренко // Сборник докладов XXIII пленума ФУМО ВО ИБ и Всероссийской научной конференции "Фундаментальные проблемы информационной безопасности в условиях цифровой трансформации" (ИНФОБЕЗОПАСНОСТЬ - 2019): доклады XXIII пленума ФУМО ВО ИБ и Всероссийской научной конференции, Ставрополь, 01–05 октября 2019 года / Отв. редактор: В.И. Петренко. – Ставрополь: Северо-Кавказский федеральный университет, 2019. – С. 22-25.
2. Нестеренко В. Р. Анализ нейросетевых методов и средств в биометрических системах контроля доступа / В. Р. Нестеренко, Ю. Ю. Гончаренко // Морская стратегия и политика России в контексте обеспечения национальной безопасности и устойчивого развития в XXI веке: Сборник научных трудов. Том Выпуск 2. – Севастополь: Черноморское высшее военно-морское ордена Красной Звезды училище им. П.С. Нахимова, 2019. – С. 273-276.
3. Карцан И. Н. Биометрические данные: новые возможности и риски / И. Н. Карцан // Современные инновации, системы и технологии. – 2023. – Т. 3, № 3. – С. 201-211. – DOI 10.47813/2782-2818-2023-3-3-0201-0211.
4. Аверьянов В. С. Запрещенный контент социкиберфизических систем: методы нейросетевой обработки информации / В. С. Аверьянов, И. Н. Карцан // Информатика: проблемы, методы, технологии: Материалы XXII Международной научно-практической конференции им. Э.К. Алгазина, Воронеж, 10–12 февраля 2022 года / Под редакцией Д.Н. Борисова. – Воронеж: Общество с ограниченной ответственностью "Вэ-лборн", 2022.
5. Камара А. С. Современные методы аутентификации и авторизации веб-приложений: от многофакторной аутентификации до биометрических данных / А. С. Камара // Интернаука. – 2024. – № 9-2(326). – С. 16-20.
6. Соломатин М. С. Использование методов биометрической аутентификации в автоматизированных системах управления с использованием клавиатурного почерка / М. С. Соломатин, Д. В. Митрофанов // Труды МАИ. – 2020. – № 114. – С. 17. – DOI 10.34759/trd-2020-114-18.
7. Лобов А. В. Анализ статических методов биометрической аутентификации / А. В. Лобов // Современные научные исследования и инновации. – 2021. – № 11(127).
8. Дедела А. С. Разработка модифицированного метода биометрической аутентификации по геометрии лица пользователя / А. С. Дедела // Гагаринские чтения - 2020: Сборник тезисов докладов, Москва, 27 декабря 2020 года. – Москва: Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), 2020. – С. 292-293.
9. Белов Н. И. Методика формирования набора данных для задач аутентификации по термографическому снимку лица / Н. И. Белов, А. Ю. Кузнецов // Вестник компьютерных и информационных технологий. – 2022. – Т. 19, № 12(222). – С. 3-11. – DOI 10.14489/vkit.2022.12.pp.003-011.
10. Kartsan P. The Digital Revolution of the Transportation Industry / P. Kartsan, S. Mavrin // Transportation Research Procedia: Collection of materials XIII International Conference on Transport Infrastructure: Territory Development and Sustainability, Irkutsk-Krasnoyarsk, 26-28.10.2022. Krasnoyarsk: Elsevier B.V., 2023. P. 116-119. DOI: 10.1016/j.trpro.2023.02.014.
11. Mavrin S. Traditional technique application V/S YOLOv5 model for marine underwater objects detection by computer vision method / S. Mavrin, A. Mavrin, A. Mikhaylova // BIO WEB OF CONFERENCES. XVII International Scientific and Practical Conference "State and Development Prospects of

- Agribusiness" (INTERAGROMASH 2024), Rostov-on-Don, 22–25.05.2024: EDP Sciences, 2024. C. 05035. DOI: 10.1051/bioconf/202411305035.
12. Mavrin S. Algorithm for assessing the promptness of earth space sensing information delivery / S. Mavrin, S. Golikov. E3S Web of Conferences. II International Conference on Environmental Technologies and Engineering for Sustainable Development (ETESD-II 2023). Tashkent, 13–15.09.2023. Tashkent, 2023. C. 06008. DOI: 10.1051/e3sconf/202344306008/
 13. Гончаренко Ю. Ю. Особенности идентификации радиолокационных целей при обеспечении безопасности критической информационной инфраструктуры / Ю. Ю. Гончаренко // Вопросы кибербезопасности. – 2024. – № 1(59). – С. 124-131. – DOI 10.21681/2311-3456-2024-1-124-131.
 14. Modeling the Stakeholder's Behavior on the Base of Online Inquiries about Tertiary / H. Kucheroва, D. Ocheretin, Y. Honcharenko, O. Mykoliuk // 2021 11th International Conference on Advanced Computer Information Technologies, ACIT 2021 - Proceedings : 11, Deggendorf, 15–17 сентября 2021 года. – Deggendorf, 2021. – P. 35-40. – DOI 10.1109/ACIT52158.2021.9548363.
 15. Assessment of Information Security in Integrated Systems / T. Y. Khashirova, I. I. Mamuchiev, M. I. Mamuchieva [et al.] // Proceedings of the 2021 IEEE International Conference "Quality Management, Transport and Information Security, Information Technologies", T and QM and IS 2021, Yaroslavl, 06–10 сентября 2021 года. – Yaroslavl, 2021. – P. 201-205. – DOI 10.1109/ITQMIS53292.2021.9642824.
 16. Analysis of Carbon Nanomaterials Produced by the Electric Arc Methods / Z. V. Shomakhov, A. M. Apekov, A. Kh. Dyshekhova [et al.] // Nano Hybrids and Composites. – 2020. – Vol. 28. – P. 136-145. – DOI 10.4028/www.scientific.net/NHC.28.136.
 17. Conductivity Studies of Glasses for Electronics / Z. V. Shomakhov, O. A. Molokanov, A. M. Karmokov [et al.] // Nano Hybrids and Composites. – 2020. – Vol. 28. – P. 9-13. – DOI 10.4028/www.scientific.net/NHC.28.9.
- ## References
1. Lebedenko A. V., Honcharenko Y. Y. Biometric user identification system based on convolutional neural network for a small organization. *Sbornik dokladov XXIII plenuma FUMO VO IB i Vse-rossijskoj nauchnoj konferencii "Fundamental'nye problemy informacionnoj bezopasnosti v usloviyakh cifrovoj transformacii" (INFOBEZOPASNOST' - 2019): doklady XXIII plenuma FUMO VO IB i Vse-rossijskoj nauchnoj konferencii* [Collection of reports of XXIII plenum of FUMO VO IS and All-Russian scientific conference "Fundamental problems of information security in the conditions of digital transformation" (INFOBESOPERABILITY - 2019): reports of XXIII plenum of FUMO VO IS and All-Russian scientific conference, Stavropol, October 01-05, 2019 / Editor-in-Chief: V.I. Petrenko], Stavropol, North Caucasus Federal University, 2019, pp. 22-25.
 2. Nesterenko V. R., Honcharenko Y. Y. Analysis of neural network methods and tools in biometric access control systems. *Morskaya strategiya i politika Rossii v kontekste obespecheniya nacional'noj bezopasnosti i ustojchivogo razvitiya v KHKHI veke* [Maritime strategy and policy of Russia in the context of ensuring national security and sustainable development in the XXI century: Collection of scientific papers. Volume Issue 2: Black Sea Higher Naval School of the Order of Red Star named after P.S. Nakhimov], Sevastopol, 2019, pp. 273-276.
 3. Kartsan I. N. Biometric data: new opportunities and risks. *Sovremennye innovacii, sistemy i tekhnologii* [Modern Innovations, Systems and Technologies], 2023, 3(3), pp. 201-211. DOI 10.47813/2782-2818-2023-3-3-0201-0211.
 4. Averyanov V. S., Kartsan I. N. Forbidden content of sociocyber-physical systems: methods of neural network information processing. *Informatika: problemy, metody, tekhnologii: Materialy XXII Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii im. E.H.K. Algazinova* [Informatics: problems, methods, technologies: Proceedings of the XXII International Scientific and Practical Conference named after E. K. Algazinov, Voronezh, February 10-12, 2022 / Edited by D. N. Borisov], Voronezh, Limited Liability Company "Welborn", 2022.
 5. Kamara A. S. Modern methods of authentication and authorization of web applications: from multi-factor authentication to biometrics. *Internauka* [Internauka], 2024, No 9-2(326), pp. 16-20.
 6. Solomatin M. S., Mitrofanov D. V. Use of the biometric authentication methods in the automated control systems using the keyboard handwriting. *Trudy MAI* [Proceedings of MAI], 2020, No 114, P. 17. DOI 10.34759/trd-2020-114-18.
 7. Lobov, A. V. Analysis of static methods of biometric authentication. *Sovremennye nauchnye issledovaniya i innovacii* [Modern Scientific Research and Innovations], 2021, pp. 11(127).
 8. Dedela, A. S. Development of a modified method of biometric authentication based on the geometry of the user's face. *Gagarinskie chteniya - 2020* [Gagarin Readings, 2020 : Collection of abstracts, Moscow, December 27, 2020], Moscow, Moscow Aviation Institute (National Research University), 2020, pp. 292-293.
 9. Belov N. I., Kuznetsov A. Y. Methodology of data set formation for authentication tasks by thermographic facial image. *Vestnik komp'yuternykh i informacionnykh tekhnologij* [Bulletin of computer and information technologies], 2022, No. 12(222), pp. 3-11. DOI 10.14489/vkit.2022.12.pp.003-011.
 10. Kartsan P., Mavrin S. The Digital Revolution of the Transportation Industry. *Transportation Research*

Procedia: Collection of materials XIII International Conference on Transport Infra-structure: Territory Development and Sustainability, Irkutsk-Krasnoyarsk, 26-28.10.2022. Krasnoyarsk: Elsevier B.V., 2023. pp. 116-119. DOI: 10.1016/j.trpro.2023.02.014.

11. Mavrin S., Mavrin A., Mikhaylova A. Traditional technique application V/S Yolov5 model for marine underwater objects detection by computer vision method. *BIO WEB OF CONFERENCES. XVII International "Scientific and Practical Conference State and Development Prospects of Agribusiness" (INTERAGROMASH 2024)*, Rostov-on-Don, 22–25.05.2024; EDP Sciences, 2024. P. 05035. DOI: 10.1051/bioconf/202411305035.
12. Mavrin S. Golikov S. Algorithm for assessing the promptness of earth space sensing information delivery. *E3S Web of Conferences. II International Conference on Environmental Technologies and Engineering for Sustainable Development (ETESD-II 2023)*, Tashkent, 2023. P. 06008. DOI: 10.1051/e3sconf/202344306008/
13. Honcharenko Y. Y. Features of identification of radar targets while ensuring the security of critical information infrastructure. *Voprosy kiberbezopasnosti*, 2024, No. 1(59), pp. 124-131. DOI 10.21681/2311-3456-2024-1-124-131.
14. Kucherova H., Ocheretin D., Honcharenko Y., Mykoliuk O. Modeling the Stakeholder's Behavior on the Base of Online Inquiries about Tertiary. *2021 11th International Conference on Advanced Computer Information Technologies, ACIT 2021 - Proceedings: 11*, Deggendorf, 2021, pp. 35-40. DOI 10.1109/ACIT52158.2021.9548363.
15. T. Y. Khashirova, I. I. Mamuchiev, M. I. Mamuchieva [et al.]. Assessment of Information Security in Integrated Systems. *Proceedings of the 2021 IEEE International Conference "Quality Management, Transport and Information Security, Information Technologies", T and QM and IS 2021, Yaroslavl, 06-10.09.2021*, Yaroslavl, 2021, pp. 201-205. DOI 10.1109/ITQMIS53292.2021.9642824.
16. Z. V. Shomakhov, A. M. Apekov, A. Kh. Dyshekova [et al.]. Analysis of Carbon Nano-materials Produced by the Electric Arc Methods. *Nano Hybrids and Composites*, 2020 No. 28, pp. 136-145. DOI 10.4028/www.scientific.net/NHC.28.136.
17. Shomakhov V., Molokanov O. A., Karmokov A. M. [et al.] Conductivity Studies of Glasses for Electronics. *Nano Hybrids and Composites*, 2020, Vol. 28, pp. 9-13. DOI 10.4028/www.scientific.net/NHC.28.9.

ЯДЕРНЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ, ТОПЛИВНЫЙ ЦИКЛ, РАДИАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

УДК: 621.039.7

Обзор мирового опыта в области обращения с РАО

Павлова И.А.¹, Губин А.В.¹

¹ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», Севастополь, 299053, Россия,
pavlovaira2001@mail.ru, avgubin@mail.sevsu.ru

Статья поступила 24.10.2024 г.; после доработки 25.10.2024 г.

Аннотация

В статье представлен обзор мирового опыта в области захоронения радиоактивных отходов. Рассмотрены существующие концептуальные решения, обеспечивающие безопасное и эффективное хранение РАО, и их особенности. Представлена последовательность действий при выборе геологических формаций для дальнейшего захоронения радиоактивных отходов.

Ключевые слова: радиоактивные отходы, захоронение отходов, геологические формации, утилизация.

Review of world experience in the field of radioactive waste management

Pavlova I.A.¹, Gubin A.V.¹

¹Sevastopol State University, Sevastopol, 299053, Russia, pavlovaira2001@mail.ru, avgubin@mail.sevsu.ru,

Received 24.10.2024 y.; received in final form 25.10.2024 y.

Abstract

This paper presents an overview of world experience in the field of radioactive waste disposal. The existing conceptual solutions that ensure safe and effective storage of radioactive waste and their features are considered. The sequence of actions for choosing geological formations for further disposal of radioactive waste is presented.

Keywords: radioactive waste, waste disposal, geological formations, utilization.

Введение

Ядерная энергия однозначно является одним из самых важных аспектов жизни современного человека, обеспечивая электрической энергии как жилые дома, так и различные промышленные предприятия. Однако вместе с этим возникает проблема обращения с радиоактивными отходами, которая требует серьезного и внимательного подхода. Неправильный выбор способа хранения РАО и ОЯТ в перспективе может привести к пагубному влиянию на окружающий мир

и здоровье человечества.

Различные дозы облучения приводят к различным последствиям на здоровье человека, начиная от тошноты и рвоты, вплоть до летального исхода [1].

Для человеческого, и других видов живых организмов, вероятность отрицательного влияния излучения на жизнедеятельность возрастает при условии, что доза воздействующей радиации превышает дозу естественного облучения [2]. В связи с этим, все мировое сообщество вынуждено искать рациональные и эффективные пути

обращения с радиоактивными отходами различных сфер деятельности.

В данной работе рассмотрены вопросы политики обращения с РАО и ОЯТ в России и мире, а также выбора геологических формаций для создания пунктов захоронения РАО. Исследование направлено на изучение и анализ сложной проблематики обращения с ядерными отходами и радиоактивными материалами, а также на поиск путей и решений для обеспечения безопасности, экологической устойчивости и управления радиоактивными отходами в современном мире.

Политика обращения с РАО в мире

В настоящее время наблюдается устойчивый рост спроса на строительство новых атомных электростанций, при этом вопрос обращения с отработавшим ядерным топливом (ОЯТ) становится всё более важным фактором в любой ядерной программе. Большинство организаций согласны с тем, что глубокое геологическое захоронение является самым безопасным и подходящим долгосрочным решением [3].

Целесообразность использования того или иного способа переработки ОЯТ перед его захоронением для дальнейшего хранения, требуется учитывать такие экономические факторы как: стоимость урана, стоимость переработки топлива, наличие доступных технологий захоронения, а также политического и социального влияния.

На сегодняшний день существует несколько этапов разработки подземных хранилищ окончательного захоронения, обобщенных Международным агентством по атомной энергии [4]. В основном они включают разработку и оценку общей концепции, определение требований к площадке, выбор площадки и подробную характеристику площадки, проектирование хранилища, строительство и эксплуатацию, а также закрытие [4].

Многие страны инициировали свои собственные национальные программы развития глубокого геологического захоронения, каждая из которых находится на определенной стадии. В настоящее время, наиболее успешные проекты разработаны в Швеции и Финляндии. Среди них были представлены программы глубокого геологического захоронения высокоактивных отходов (ВАО) в кристаллических горных породах. Данные, проекты находятся на стадии обустройства площадки, при этом основное внимание уделяется детальной характеристике площадки, окончательному проектированию и строительству.

В 1972 году была создана Шведская компания по обращению с ядерными топливом и отходами (SKB) [5]. С 1970-х годов SKB разрабатывает концепцию геологического захоронения. В январе 2022 года правительство Швеции одобрило заявку SKB на строительство глубоких геологических хранилищ в Форсмарке. Ожидается, что строительные работы начнутся в середине 2020-х годов и станут крупнейшим экологическим проектом в Швеции.

В Финляндии ядерными отходами и отработавшим топливом управляет PosivaOy, финская компания, которой совместно владеют финские атомные энергетические компании. Подготовка и предварительные исследования площадки для геологического захоронения ведутся на Олкилуото с 1980-х годов. В 2000 году правительство Финляндии приняло принципиальное решение о захоронении отходов в кристаллических породах и одобрило строительство подземной установки для определения характеристик горных пород ОНКАЛО в Олкилуото. При строительстве подземной горной лаборатории ОНКАЛО были начаты полевые испытания для конкретной площадки [6]. Строительство последнего объекта глубокого геологического захоронения в Олкилуото, Финляндия, началось в 2016 году после одобрения Финского регулятора ядерной безопасности. Ожидалось, что проект будет завершен к 2023 году и станет первым в мире глубоким геологическим хранилищем для отработанного ядерного топлива.

Карта объекта, представленная на рисунке 1а, указывает на географическое местоположение подземных исследовательских лабораторий, а также на выбранные площадки для филиала захоронения ВАО в Финляндии и Швеции, в населенных пунктах Олкилуото и Форсмарке, соответственно [7]. На Рисунках 1б и 1в показан концептуальный дизайн окончательных репозиториях в указанном ранее местоположении [8-9]. Концептуальный подход, разработанный SKB и окончательно принятый для геологического захоронения отработавшего ядерного топлива как в Швеции, так и в Финляндии, известен как KBS-3. KBS-3 основан на трех защитных барьерах: медных канистрах, бентонитовой глине и кристаллической коренной породе, как показано на Рисунке 1г [10]. При таком подходе отработавшее ядерное топливо сначала инкапсулируется в медные контейнеры. Запечатанные медные канистры затем хранятся в подземных хранилищах, построенных в редко раздробленной кристаллической породе на глубине около 500 м и замурованных в бентонитовой глине. Медные

канистры и бентонитовая глина считаются инженерным барьером, в то время как окружающая кристаллическая порода считается естественным барьером, удерживающим отходы от распространения в биосферу. Осуществимость и безопасность подхода KBS-3 были тщательно изучены и проверены в подземных лабораториях за последние несколько десятилетий. Между тем, подход KBS-3 был принят в ведущих программах геологического захоронения ВАО (в Финляндии и Швеции). В настоящее время исследования и разработки по безопасному захоронению ВАО в Швеции и Финляндии все еще продолжаются, в основном сосредотачиваясь на детальной характеристике площадок, их строительстве и анализе безопасности после закрытия [11].

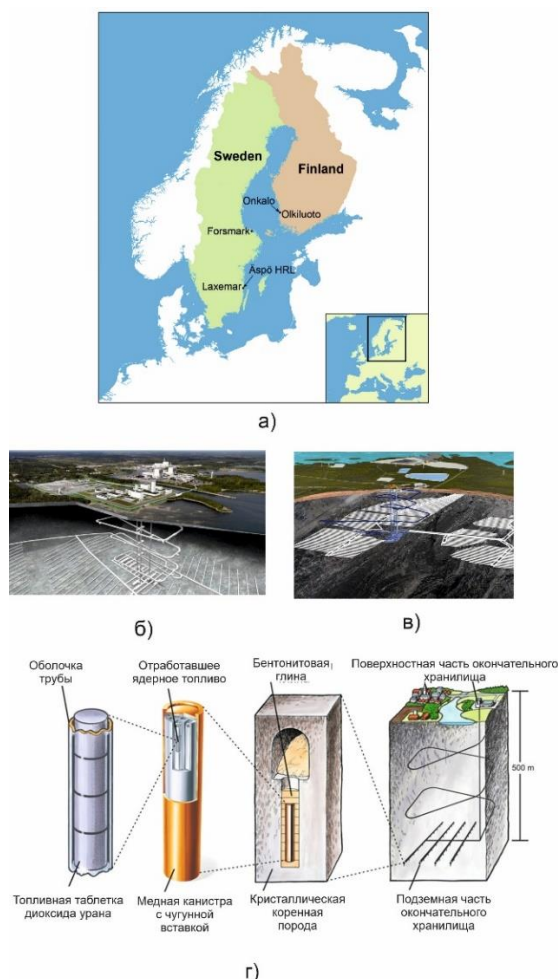


Рис. 1. а – Карта объекта с указанием местонахождения подземных лабораторий и выбранных площадок для окончательного захоронения ВАО в Швеции и Финляндии; б – концептуальный проект площадки в Форсмарке; в – концептуальный проект участка Олкилуото; и г – иллюстрация подхода KBS-3, принятого для безопасного захоронения ВАО в Швеции и Финляндии

Первая корейская эталонная система утилизации (KRS) была предложена в 2007 году на основе шведской концепции утилизации KBS-3, и недавно она была обновлена как улучшенная Корейская система утилизации эталонных образцов (KRS+) для повышения эффективности захоронения с точки зрения сокращения площади захоронения. Кроме того, можно рассмотреть различные варианты уменьшения площади захоронения, как показано на Рисунке 2, на котором продемонстрировано, что плотность утилизации при использовании многослойной и многоконтейнерной концепции утилизации может быть увеличена на 200–400 % по сравнению с концепцией однослойной утилизации. Было исследовано совместное поведение для концепций одно- и многослойного захоронения, включая смещение на поверхности земли, но пространственное распределение смещения грунта не оценивалось, поскольку численные модели были построены только в масштабе ближнего поля с использованием симметричного блока. В исследовании представлен анализ потенциала сдвига и подъема грунта для эталонной и альтернативной концепций захоронения с использованием численного моделирования ТНМ с трехмерными моделями хранилища в дальней зоне. Во-первых, модели хранилища в дальней зоне были построены на основе ожидаемого количества контейнеров и расстояния между захоронениями, определенного термическим анализом, чтобы удовлетворить тепловой критерий 100°C . Впоследствии возможность сдвигового скольжения, а также величина и пространственное распределение поднятия грунта были оценены для эталонных и альтернативных концепций захоронения с двойным, тройным, двухслойным и трехслойным захоронением. Наконец, были проведены параметрические исследования для изучения влияния разломов и свойств горных пород на потенциал сдвига и подъем грунта, представленных в работе [12].

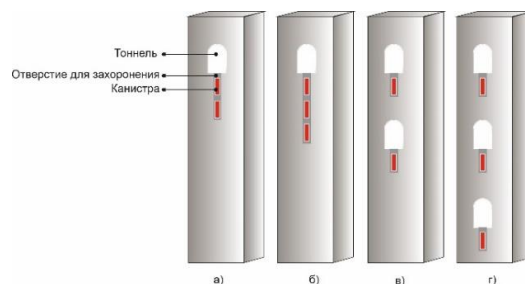


Рис. 2. Геометрия альтернативных концепций захоронения [12]: а – Двойная канистра, б – Тройная канистра, в – Двухслойная, г – Концепция трехслойной утилизации

По результатам исследований концепция трехслойной утилизации имеет самый большой потенциал кулоновского напряжения разрушения (ΔCFS) среди всех концепций утилизации. Однако ΔCFS ниже критерия сдвигового скольжения, когда все концепции захоронения расположены на расстоянии более 2 км от разлома. Наибольший подъем грунта наблюдается при двухслойной схеме захоронения. Концепция двухслойного захоронения имеет наибольший подъем грунта, однако максимальная скорость и уклон подъема грунта очень малы, поэтому воздействие на наземные объекты можно считать незначительным. Параметрические исследования свойств разломов и массива горных пород показывают, что потенциал сдвигового сдвига и поднятие грунта во многом зависят от этих параметров. Таким образом, было доказано, что комплексное исследование площадки имеет важное значение для проектирования глубокого геологического хранилища, обеспечивающего достаточное расстояние от разлома [12].

Основным решением проблемы захоронения РАО в отвержденной форме, является глубинное захоронение. Каменная соль является наиболее привлекательной геологической средой для захоронения и дальнейшего хранения РАО. Данный материал обладает свойством, называемым «самозалечивание», заключающееся в закрытии трещин за счет физических свойств [13]. Помимо этого, данная среда вызывает интерес для захоронения РАО, так как она обладает удовлетворительными свойствами радиационной стойкости и высокой теплопроводностью [14,15].

Существуют работы, где описывается такой способ как «самозахоронение» - сверхглубокого захоронения РАО в каменную соль [15]. Процесс осуществляется за счет свойств радиоактивного распада РАО. Тепловая энергия, которая выделяется отходами в процессе распада позволяет достичь таких условий, когда температура контейнера превышает температуру плавления среды, в которой захоронены РАО. При выполнении определенных условий, контейнер будет располагаться на дне области расплава, что приведет к плавлению дна и кристаллизации расплава в верхней области.

На рисунке 3 показан способ захоронения в Соединенных Штатах Америки, штат Техас. Данный способ осуществляется заглублением РАО относительно поверхности земли котловане. В качестве геологической формации используется глина. Благодаря жаркому климату, данный способ позволяет избежать издержки на

создание защитных систем для ограждения грунтовых вод от попадания радиоактивных веществ и отвода воды, накопленной из-за осадков. Получаемая при раскопках котлована красная глина используется для ликвидации возникающих трещин [16].



Рис. 3. Захоронение РАО в США (штат Техас) [16]

Климатические условия, которые сопровождаются частыми осадками, создают проблему отвода воды, накапливающейся после осадков или же при изменении уровня грунтовых вод. Опыт исследований различных способов захоронения, проведенных учеными из Франции, показывает, что для полузаглубленных пунктов характерно наличие следующих проблем [17]:

- Смещение дна пунктов захоронения ниже отметки планировки приводит к соприкосновению этой части с грунтовой водой, что вызывает риск выхода радионуклидов в окружающую среду;
- Из-за регулярных осадков, требуется регулярная откачка воды из отсеков захоронения в процессе заполнения их водой. Полузаглубленный вариант в данном случае должен предусматривать напорную систему водоотвода.

В отечественных работах [20-21] приводится сравнение наземного и полузаглубленного

способов захоронения РАО. Таким образом, авторы приходят к выводу о том, что наиболее целесообразным для большинства территорий Российской Федерации способом захоронения РАО является именно наземный. Это обосновано лучшей экономической (исключает многие затраты, связанные с раскопками и подготовкой территории) и технической (полузаглубленный способ

устанавливает более строгие требования к подбору грунта для выбора местности захоронения) характеристиками данного способа.

На рисунке 5 указаны некоторые ключевые темы исследований, направленных на разработку площадки для безопасной утилизации высокоактивных отходов в кристаллической породе.

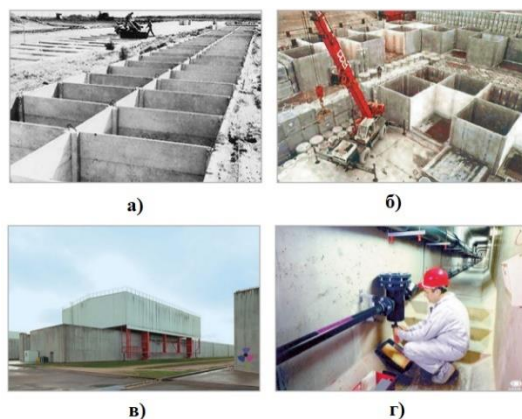


Рис. 4. Этапы выбора способов захоронения РАО во Франции: а — в заглубленных траншеях (1969 г.) [17]; б — на наземном бетонном основании без использования укрытия от осадков (1985 г.) [18]; в — современное наземное ПЗРО с бетонными отсеками, укрытием для защиты от осадков и инспекционной галереями для сбора и контроля протечек [17], г — отбор проб в инспекционной галерее [19]



Рис. 5. Определение ключевых вопросов развития площадки для безопасного захоронения ВАО в кристаллических породах [11].

На Рисунке 6 изображены примеры зарубежных ППЗРО с РАО в железобетонных отсеках, ограждающих РАО от воздействия атмосферного воздуха, и без них.

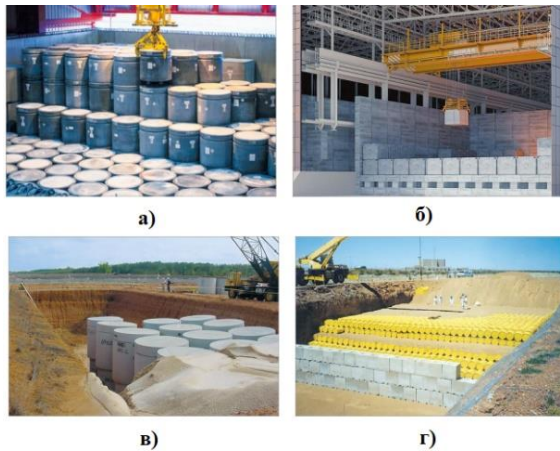


Рис.6. Захоронение железобетонных контейнеров с РАО с использованием ограждающих конструкций и без них: а — Франция [22]; б — Бельгия [23]; в — США, штат Южная Каролина [24]; г — ЮАР [25]

Заключение

Обращение с ядерными отходами – сложная задача, но она имеет решающее значение для обеспечения для безопасности и устойчивого развития ядерной энергетики, что отмечает целесообразность проведения дальнейших исследований в данной тематике.

В работе рассмотрены основные достижения и мировой опыт в области обращения с ОЯТ и РАО, основные особенности, которые позволяют обеспечить безопасное и эффективное решение для управления ядерными отходами в течение длительного промежутка времени.

Список литературы

1. Всемирная организация здравоохранения [Электронный ресурс] // Радиация и здоровье. URL: <https://www.who.int/ru/news-room/questions-and-answers/item/radiation-and-health> (дата обращения: 01.09.2024).
2. Гордон Л. Радиация и окружающая среда: оценка воздействия излучения на флору и фаун: Обзор отчета, недавно опубликованного Научным комитетом Организации Объединенных Наций по действию атомной радиации. МАГАТЭ. URL: https://www.iaea.org/sites/default/files/39102681720_ru.pdf (дата обращения: 17.09.2024)
3. IAEA [Электронный ресурс] // Status and trends in spent fuel and radioactive waste management. URL: <https://www.iaea.org/publications/14739/status-and-trends-in-spent-fuel-and-radioactive-waste-management> / (дата обращения: 23.08.2024).
4. IAEA [Электронный ресурс] // Scientific and Technical Basis for the Geological Disposal of Radioactive Wastes URL: <https://www.iaea.org/publications/6568/scientific-and-technical-basis-for-the-geological-disposal-of-radioactive-wastes/> (дата обращения: 23.08.2024).
5. SKB [Электронный ресурс] // MANAGING THE SWEDISH NUCLEAR WASTE. URL: <https://skb.com/> (дата обращения: 23.08.2024).
6. Posiva. Oy. Oy, Posiva. “ONKALO Underground Characterisation and Research Programme (UCRP).” – 2003. URL: <https://www.semanticscholar.org/paper/ONKALO-Underground-Characterisation-and-Research-Oy/e6570c0b8f2a1f1cdbc57e3b3cd783a8c29eb7a>
7. Selroos, J.-O.; Gylling, B. How Findings from a Multi-Annual International Modeling Initiative Are Implemented in a Nuclear Waste Management Organization. *Energies* 2023, 16, 684. <https://doi.org/10.3390/en16020684>
8. BuildingTECH [Электронный ресурс] // В Швеции создали новую систему хранения ядерных отходов, она обеспечит безопасность 100000 лет. URL: <https://buildingtech.org/%D0%AD%D0%BD%D0%B5%D1%80%D0%B3%D0%B8%D1%8F/v-shvetsyy-sozdaly-novuyu-sistemu-khraneniya-yadernikh-otkhodov-ona-obespechyt-bezopasnost-100-000-let> (дата обращения: 25.08.2024).
9. Атомная энергия 2.0. [Электронный ресурс] // Представители ФГУП «НО РАО» приняли участие в международном семинаре. URL: <https://www.atomic-energy.ru/news/2015/11/13/61147> (дата обращения: 25.08.2024).
10. Andrea Lisjak, Omid Mahabadi, Johnson Ha, Diego Mas Ivars, Analysis of thermo-mechanical damage around tunnel and deposition boreholes of an underground nuclear waste disposal facility at the Forsmark site (Sweden) by 3D coupled FDEM simulations, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, Volume 171, 2023, 105586, ISSN 1365-1609, <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2023.105586>
11. Liangchao Zou, Vladimir Cvetkovic, Disposal of high-level radioactive waste in crystalline rock: On coupled processes and site development, *Rock Mechanics Bulletin*, Volume 2, Issue 3, 2023, 100061, ISSN 2773-2304, <https://doi.org/10.1016/j.rockmb.2023.100061> (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2773230423000343>)
12. Eunjin Seo, Kwang-Il Kim, Hwajung Yoo, Jeonghwan Yoon, Ki-Bok Min, Far-field analysis of shear slip potential and ground uplift by high-level radioactive waste repositories with single- and multi-canister and multi-layer disposal con-

- cepts, Tunnelling and Underground Space Technology, Volume 145, 2024, 105611, ISSN 0886-7798, <https://doi.org/10.1016/j.tust.2024.105611> (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0886779824000294>)
13. Chen J, Ren S, Yang C, Jiang D, Li L. Self-Healing Characteristics of Damaged Rock Salt under Different Healing Conditions. *Materials* (Basel). 2013 Aug 12;6(8):3438-3450. doi: 10.3390/ma6083438. PMID: 28811444; PMCID: PMC5521314
 14. Скачек, Михаил Андреевич. Радиоактивные компоненты АЭС: обращение, переработка, локализация [Текст] : учебное пособие для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению подготовки "Ядерная энергетика и теплофизика" / М. А. Скачек. — Москва : Изд. дом МЭИ, 2014. — 551 с. : ил., табл. : 24 см.; ISBN 978-5-383-00734-1.
 15. Аренс Виктор Жанович, Труфанов Д. В., Лейзерович С. Г., Аллилуев В. Н., Британ И. В., Гостюхин П. О. Захоронение РАО в каменной соли // ГИАБ. 1999. №2. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/zahoronenie-rao-v-kaменноy-soli> (дата обращения: 24.09.2024).
 16. BuildingTECH [Электронный ресурс] // В New Texas radwaste site takes pressure off Utah URL: <https://building-https://archive.slttrib.com/article.php?id=55239477&itype=cmsid> (дата обращения: 28.08.2024).
 17. Andra's Disposal Facilities Feedback of 40-year Operations in France, National Radioactive Waste Management Agency, ATOMECO . Moscow, 2013 . — URL: http://www.atomeo.org/mediafiles/u/filPrezentation_31_10_2013/Bolia.pdf (дата обращения: 20.09.2023).
 18. Jousselin D., Medal G., Augustin X. French Experience in Design and Construction of Near Surface Disposal Facilities for Low-Level Waste. INIS IAEA, NCL Collection . 200—213 p. — URL: https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/26/050/26050947.pdf (дата обращения: 15.09.2024)
 19. Д. И. Павлов, Г. С. Неуважаев, А. В. Дёмин, Г. С. Шульман, Е. Д. Демченко. К вопросу выбора способа захоронения низко- и среднерadioактивных РАО // Радиоактивные отходы №1 (26) / (дата публикации: 19 декабря 2023);
 20. Павлов Д. И., Сорокин В. Т., Баринев А. С., Дёмин А. В., Сыченко Д. В. Научно-технические и проектные основы создания конструкций приповерхностных пунктов захоронения низко- и среднеактивных отходов // Радиоактивные отходы . 2021 . № 4 (17) . С . 65—77 . DOI: 10.25283/258-9707-2021-4-65-77
 21. Сорокин В. Т., Павлов Д. И. Технологии окончательной изоляции радиоактивных отходов: европейский опыт и тенденции // Радиоактивные отходы . 2018 . № 4 (5) . С. 24—32
 22. Andra: A Collective International Dynamic for The Disposal of Radioactive Waste, Aube Waste Disposal Facility (CSA), — URL: <https://international.andra.fr/operational-facilities/aube-waste-disposal-facility-csa/concept-and-design> (дата обращения: 15.09.2024)
 23. General Data required under Article 37 of the Euratom Treaty. Repository for the surface disposal of radioactive waste in Dessel, Belgium . Belgian Agency for Radioactive Waste and Enriched Fissile Materials, 2019 . — URL: <https://afcn.be/fr/system/files/2019-11-14-euratom-art3-rapport.pdf> (дата обращения: 15.09.2024)
 24. Bee M . Dealing with America's nuclear waste: a promising new patent. American Security Project, posted 01.10.201 — URL: <https://www.american-securityproject.org/dealing-with-americas-nuclear-waste-a-promising-new-patent/> (дата обращения: 15.09.2024)
 25. National Radioactive Waste Disposal Institute (NRWDI): Vaalputs low and medium level nuclear waste facility disposal. — URL: <https://www.nwdi.org.za/vaalputs.html> (дата обращения: 15.09.2024)

References

1. World Health Organization [Electronic resource] // Radiation and health. URL: <https://www.who.int/ru/news-room/questions-and-answers/item/radiation-and-health> (date of access: 09/01/2024).
2. Gordon L. Radiation and the environment: assessment of the effects of radiation on flora and fauna: Review of the report recently published by the United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. IAEA. URL: https://www.iaea.org/sites/default/files/39102681720_ru.pdf (date of access: 09/17/2024)
3. IAEA [Electronic resource] // Status and trends in spent fuel and radioactive waste management. URL: <https://www.iaea.org/publications/14739/status-and-trends-in-spent-fuel-and-radioactive-waste-management/> (date of access: 23.08.2024).
4. IAEA [Electronic resource] // Scientific and Technical Basis for the Geological Disposal of Radioactive Wastes URL: <https://www.iaea.org/publications/6568/scientific-and-technical-basis-for-the-geological-disposal-of-radioactive-wastes/> (date of access: 23.08.2024).
5. SKB [Electronic resource] // MANAGING THE SWEDISH NUCLEAR WASTE. URL: <https://skb.com/> (date of access: 23.08.2024).
6. Posiva. Oy. Oy, Posiva. "ONKALO Underground Characterisation and Research Programme (UCRP)." — 2003. URL: <https://www.semanticscholar.org/paper/ONKALO-Underground-Characterisation-and-Research-Oy/e6570c0b8f2a1f1cd9bcb57e3b3cd783a8c29eb7a>
7. Selroos, J.-O.; Gylling, B. How Findings from a

- Multi-Annual International Modeling Initiative Are Implemented in a Nuclear Waste Management Organization. *Energies* 2023, 16, 684. <https://doi.org/10.3390/en16020684>
8. BuildingTECH [Electronic resource] // A new nuclear waste storage system has been created in Sweden, it will ensure safety for 100,000 years. URL: <https://building-tech.org/%D0%AD%D0%BD%D0%B5%D1%80%D0%B3%D0%B8%D1%8F/v-shvetsyy-sozdaly-novuyu-sistemu-khraneniya-yadernikh-otkhodov-ona-obespechyt-bezopasnost-100-000-let> (date of access: 08/25/2024).
 9. Atomic Energy 2.0. [Electronic resource] // Representatives of FSUE NO RAO took part in an international seminar. URL: <https://www.atomic-energy.ru/news/2015/11/13/61147> (date of access: 08/25/2024).
 10. Andrea Lisjak, Omid Mahabadi, Johnson Ha, Diego Mas Ivars, Analysis of thermo-mechanical damage around tunnel and deposition boreholes of an underground nuclear waste disposal facility at the Forsmark site (Sweden) by 3D coupled FDEM simulations, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, Volume 171, 2023, 105586, ISSN 1365-1609, <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2023.105586>
 11. Liangchao Zou, Vladimir Cvetkovic, Disposal of high-level radioactive waste in crystalline rock: On coupled processes and site development, *Rock Mechanics Bulletin*, Volume 2, Issue 3, 2023, 100061, ISSN 2773-2304, <https://doi.org/10.1016/j.rockmb.2023.100061>. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2773230423000343>)
 12. Eunjin Seo, Kwang-Il Kim, Hwajung Yoo, Jeonghwan Yoon, Ki-Bok Min, Far-field analysis of shear slip potential and ground uplift by high-level radioactive waste repositories with single- and multi-canister and multi-layer disposal concepts, *Tunnelling and Underground Space Technology*, Volume 145, 2024, 105611, ISSN 0886-7798, <https://doi.org/10.1016/j.tust.2024.105611>. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0886779824000294>)
 13. Chen J, Ren S, Yang C, Jiang D, Li L. Self-Healing Characteristics of Damaged Rock Salt under Different Healing Conditions. *Materials* (Basel). 2013 Aug 12;6(8):3438-3450. doi: 10.3390/ma6083438. PMID: 28811444; PMCID: PMC5521314
 14. Skachek, Mikhail Andreevich. Radioactive components of NPPs: handling, processing, localization [Text]: a textbook for students of higher educational institutions studying in the field of training "Nuclear Power Engineering and Thermal Physics" / M. A. Skachek. - Moscow: MPEI Publishing House, 2014. - 551 p.: ill., tab.: 24 cm; ISBN 978-5-383-00734-1.
 15. Arens Viktor Zhanovich, Trufanov D. V., Leizerovich S. G., Alliluyev V. N., Britan I. V., Gostyukhin P. O. Disposal of radioactive waste in rock salt // GIAB. 1999. No. 2. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/zahoroneniye-rao-v-kamennoy-soli> (date of access: 24.09.2024).
 16. BuildingTECH [Electronic resource] // In New Texas radwaste site takes pressure off Utah URL: <https://building-tech.org/> <https://archive.slttrib.com/article.php?id=55239477&itype=cmsid> (date of access: 28.08.2024).
 17. Andra's Disposal Facilities Feedback of 40-year Operations in France, National Radioactive Waste Management Agency, ATOMECO . Moscow, 2013 . — URL: http://www.atomeco.org/mediafiles/u/filPrezentation_31_10_2013/Bolia.pdf (date of access: 20.09.2023).
 18. Jouselin D., Medal G., Augustin X. French Experience in Design and Construction of Near Surface Disposal Facilities for Low-Level Waste. INIS IAEA, NCL Collection. 200—213 p. — URL: https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/26/050/26050947.pdf (access date: 09/15/2024)
 19. D. I. Pavlov, G. S. Neuvazhaev, A. V. Demin, G. S. Shulman, E. D. Demchenko. On the issue of choosing a method for disposing of low- and medium-level radioactive waste // *Radioactive waste* No. 1 (26) / (date of publication: December 19, 2023);
 20. Pavlov D. I., Sorokin V. T., Barinov A. S., Demin A. V., Sychenko D. V. Scientific, technical and design foundations for the creation of structures for near-surface disposal sites for low- and intermediate-level waste // *Radioactive waste*. 2021. No. 4 (17). P. 65–77. DOI: 10.25283/258-9707-2021-4-65-77
 21. Sorokin V. T., Pavlov D. I. Technologies have finally led to radioactive waste: European experience and is spreading // *Radioactive waste*. 2018. No. 4 (5). P. 24–32
 22. Andra: A Collective International Dynamic for the Disposal of Radioactive Waste, Aube Waste Disposal Facility (CSA), - URL: <https://international.andra.fr/operational-facilities/aube-waste-disposal-facility-csa/concept-and-design> (accessed 15.09.2024)
 23. General Data required under Article 37 of the Euratom Treaty. Repository for the surface disposal of radioactive waste in Dessel, Belgium. Belgian Agency for Radioactive Waste and Enriched Fissile Materials, 2019 . — URL: <https://afcn.be/fr/system/files/2019-11-14-euratom-art3-rapport.pdf> (access date: 09/15/2024)
 24. Bee M . Dealing with America's nuclear waste: a promising new patent. American Security Project, posted 01.10.201 — URL: <https://www.america-securityproject.org/dealing-with-americas-nuclear-waste-a-promising-new-patent/> (date of access: 15.09.2024)
 25. National Radioactive Waste Disposal Institute (NRWDI): Vaalputs low and medium level nuclear waste facility disposal. — URL: <https://www.nwdi.org.za/vaalputs.html> (date of access: 15.09.2024).

УДК 621.039.58

Контейнерное хранение отработавшего ядерного топлива на Запорожской атомной электростанции

Л.Н. Пичугова¹, А.Н. Фролова², А.Н. Вишняков³ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», Университетская-33,
г. Севастополь, 299053, Россия, ¹kebpf2015@mail.ru, ²anfrolova@mail.sevsu.ru, ³2012vian04@gmail.com3

Статья поступила 12.11.2024 г.; после доработки 15.11.2024 г.

Аннотация

В связи с увеличивающимися объемами ежегодно выгружаемого отработавшего ядерного топлива (ОЯТ) наблюдается тенденция к истощению вместимости водных бассейнов, что вызывает проблему хранения ОЯТ. В данной статье рассмотрен один из способов хранения ОЯТ в вентилируемых бетонных контейнерах на Запорожской атомной станции.

Ключевые слова: хранение отработавшего ядерного топлива, атомная станция, вентилируемые бетонные контейнеры, отработавшие топливные сборки.

Container storage of spent nuclear fuel at the Zaporizhzhya Nuclear Power Plant

L.N. Pichugova¹, A.N. Frolova², A.N. Vishnykov³Sevastopol state University, 33, Universitetskaya st., Sevastopol, 2990053, Russia, ¹kebpf2015@mail.ru, ²anfrolova@mail.sevsu.ru, ³2012vian04@gmail.com3

Received 12.11.2024y.; received in final form 15.11.2024y.

Abstract

Due to the increasing volumes of annually discharged spent nuclear fuel (SNF), there is a tendency to deplete the capacity of water basins, which causes the problem of storing SNF. This article examines one of the methods of storing SNF in ventilated concrete containers at the Zaporizhzhya Nuclear Power Plant.

Keywords: spent nuclear fuel storage, nuclear power plant, ventilated concrete containers, spent fuel assemblies.

Введение

В современном мире функционирует около 450 атомных реакторов, которые ежегодно производят примерно 900 тонн отработанного ядерного топлива (ОЯТ). Эта проблема представляет собой сложный вызов, решение которого откладывается на неопределённое время. В России на атомных электростанциях (АЭС) для хранения ОЯТ в основном используются хранилища мокрого типа. Однако с увеличением объемов отработанного топлива, которое выгружается каждый год, наблюдается тенденция к исчерпанию вместимости водных бассейнов, что ставит под

угрозу возможность безопасного хранения ОЯТ. Согласно прогнозам, в ближайшие десятилетия большинство ядерных энергоблоков могут столкнуться с заполнением своих приреакторных хранилищ. Это создаст необходимость в переходе на более эффективные методы хранения, такие как сухое хранение, либо в увеличении количества мокрых хранилищ. Первый вариант, то есть переход на сухое хранение, является сложным, так как для этого требуется предварительная выдержка ОЯТ в мокрых хранилищах. Второй вариант, увеличение числа мокрых хранилищ, также не может быть реализован быстро,

так как требует значительных финансовых вложений и времени для строительства новых объектов. Таким образом, в настоящее время важными задачами для атомной энергетики России являются: увеличение количества сухих хранилищ и модернизация существующих мокрых хранилищ ОЯТ.

История контейнерных хранилищ началась в 1986 году, когда ядерный регулятор США выдал лицензию на эксплуатацию первого сухого контейнерного хранилища ОЯТ на площадке АЭС Сарри в штате Вирджиния. С тех пор ряд стран, таких как Канада, Германия, Швейцария, Великобритания и Япония, успешно внедрили практику сухого хранения отработанного ядерного топлива. Сухое хранение имеет несколько преимуществ, включая снижение риска утечек радиации и меньшие затраты на обслуживание по сравнению с мокрыми хранилищами. Важно отметить, что в ближайшем будущем решения о внедрении сухого контейнерного хранения также будут приняты в таких странах, как Испания, Южная Корея и Тайвань. Эти шаги подчеркивают глобальную тенденцию к улучшению методов обращения с ОЯТ.

Существует несколько методов хранения отработанного ядерного топлива. Один из наиболее распространенных – это использование контейнеров, которые обеспечивают надежную защиту от радиации и внешних воздействий. Контейнеры, как правило, изготавливаются из прочных материалов, способных выдерживать высокие температуры и механические нагрузки. Они могут быть установлены на специальных площадках, что позволяет эффективно использовать пространство и минимизировать риски. Также стоит упомянуть о важности разработки новых технологий в области хранения ОЯТ. Исследования в этой области продолжаются, и учёные работают над созданием более безопасных и эффективных методов. Например, разрабатываются системы, которые позволят более эффективно контролировать состояние хранилищ и предотвращать возможные аварии. Важно учитывать, что с увеличением объёмов ОЯТ возрастает и ответственность за его безопасное хранение.

Таким образом, проблема хранения отработанного ядерного топлива требует комплексного подхода. Необходимы инвестиции в новые технологии, модернизацию существующих хранилищ и разработку эффективных стратегий управления ОЯТ, чтобы обеспечить безопасность и устойчивое развитие атомной энергетики в будущем.

В данной работе проанализирован опыт сухого хранения отработанного ядерного топлива (ОЯТ) на Запорожской АЭС по проекту американской Duke Engineering & Services (DE&S).

Постановка задачи

АЭС являются важным источником электроэнергии, использующим процесс деления ядер топлива для генерации тепла. Этот процесс начинается с размещения ядерного топлива в тепловыделяющих элементах, известных как ТВЭЛы. Эти элементы объединяются в тепловыделяющие сборки (ТВС), которые размещаются в реакторе. Когда происходит деление ядер, выделяется значительное количество тепловой энергии, которая затем преобразуется в электрическую. При делении ядер топлива происходит не только выделение энергии, но и образование продуктов деления, которые накапливаются в отработавших ТВЭЛлах. Эти продукты, как правило, обладают способностью поглощать нейтроны, что может влиять на дальнейший процесс деления. В результате реакции выгорания топлива, его структурные и ядерные свойства также изменяются, что требует периодической перезагрузки реактора. Без этой перезагрузки эффективность работы реактора снижается, и он не может поддерживать необходимую мощность.

Отработавшие тепловыделяющие элементы продолжают выделять тепло, хотя и в меньших объемах, благодаря распаду радиоактивных продуктов деления. Это тепло может достигать высоких температур, что делает необходимым охлаждение ТВС. Для этого отработавшие ТВЭЛы помещаются в специальные бассейны выдержки, где происходит снижение остаточного тепловыделения до 2–10 кВт от одной сборки. В этих бассейнах также происходит распад наиболее активных короткоживущих радионуклидов, что снижает радиационную нагрузку. Минимальное время, в течение которого отработанные ТВЭЛы должны находиться в бассейне, зависит от степени выгорания топлива и определяется отраслевыми стандартами. Например, для каждой модификации ТВС существуют установленные нормативы, которые регулируют время выдержки.

После завершения этого периода ТВЭЛы могут быть безопасно транспортированы на долгосрочное хранение в специальные хранилища, которые могут быть как сухими, так и мокрыми. Это позволяет избежать перегрева ТВЭЛов и

предотвращает их достижение критических температур. Хранилища для отработанного ядерного топлива (ОЯТ) должны выполнять несколько ключевых задач.

Во-первых, они должны эффективно отводить остаточные тепловыделения, чтобы предотвратить перегрев.

Во-вторых, необходимо обеспечить защиту персонала и окружающей среды от ионизирующего излучения, которое может возникнуть в процессе хранения. Для этого используются различные технологии, такие как свинцовые экраны и бетонные конструкции, которые помогают минимизировать радиационное воздействие.

В-третьих, важно предотвратить выход радиоактивных веществ в окружающую среду, что требует строгого контроля за состоянием хранилищ и соблюдения всех норм безопасности.

Кроме того, обеспечение ядерной безопасности является одной из главных задач при работе с ОЯТ. Это включает в себя не только физическую защиту хранилищ, но и разработку надежных систем мониторинга, которые могут обнаруживать любые утечки или аномалии. Также важно проводить регулярные проверки и техническое обслуживание хранилищ, чтобы гарантировать их безопасную эксплуатацию на протяжении многих лет. Таким образом, атомные станции играют ключевую роль в производстве электроэнергии, но требуют тщательного управления процессом деления ядер и безопасного обращения с отработанным топливом. Современные технологии и строгие стандарты безопасности помогают минимизировать риски и обеспечивают надежное функционирование АЭС.

Результаты исследований

Сухое хранение – это способ хранения отработавшего ядерного топлива (ОЯТ) после его предварительной «мокрой» выдержки в бассейнах в течение нескольких лет. Обычно ОЯТ находится в герметичных контейнерах, которые представляют собой цилиндрические конструкции из сварного или болтового толстого металла, обычно стали или чугуна. Тепловыделяющие элементы или сборки внутри этих контейнеров располагаются в среде инертного газа, что помогает эффективно отводить остаточное тепло.

Преимущества сухих хранилищ ОЯТ включают:

- условия, минимизирующие деградацию защитных оболочек топлива;

- пассивное охлаждение хранящегося топлива;
- низкие уровни радиационной нагрузки на работников;
- уменьшенная вероятность воздействия на окружающую среду;
- низкие капитальные и эксплуатационные затраты на сооружение хранилищ;
- возможность модульного расширения объемов хранения;
- простота в обслуживании;
- минимальный объем вторичных отходов.

Кроме того, в сухих хранилищах отсутствует риск утечки радиоактивной воды из-за отсутствия системы охлаждения, и они защищены от последствий отключения электричества. На Запорожской АЭС с 2001 года функционирует сухое хранилище отработавшего ядерного топлива (СХОЯТ).

Рассмотрим систему вентилируемого бетонного контейнера для хранения топливных сборок ВВЭР (ВКХ) используемых на ЗАЭС. Компоненты системы ВКХ представлены на рисунке 1.

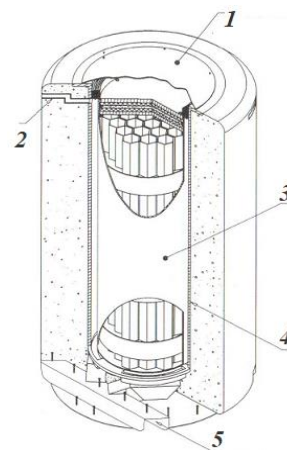


Рис.1 Система ВКХ для хранения топливных сборок ВВЭР

- 1 – крышка контейнера;
- 2 – выход воздуха;
- 3 – герметичная корзина хранения;
- 4 – обечайка;
- 5 – вход воздуха и направляющие для транспортировки.

Компоненты системы ВКХ:

- многосекционная герметичная корзина для топливных сборок – это сосуд высокого давления, изготовленный из углеродистой стали, предназначенный для размещения отработанных топливных сборок; при нормальной эксплуатации давление в нем не

превышает атмосферное;

- вентилируемый контейнер хранения – армированная бетонная структура с внутренней металлической оболочкой и отверстиями для естественной вентиляции;
- перегрузочный контейнер – цилиндрическая конструкция из стали и свинца для перемещения отработанного топлива из бассейна хранения в корзину;
- ходовой механизм контейнеров хранения – транспортное средство на стальной раме, которое обеспечивает подъем и перемещение контейнеров на площадке хранения;
- вакуумная система осушения – насос для извлечения воды из корзины;
- сварочная система – полуавтоматический сварочный агрегат для закрепления крышки к корзине.

Система ВКХ для ЗАЭС имеет ряд ключевых преимуществ:

- возможность размещения до 24 отработанных сборок в каждой корзине;
- пассивная конструкция, которая не требует обслуживания двигателей или насосов;
- использование доступных материалов для контейнеров и корзин;
- снижение радиационной нагрузки на персонал;
- вертикальная форма ВКХ способствует улучшению естественной вентиляции.

Основная цель проектирования и эксплуатации системы заключается в обеспечении безопасности и экологической приемлемости хранения.

На рисунке 2 изображена схема защитных барьеров хранения топливных сборок ВВЭР в вентилируемых бетонных контейнерах.

Вопросы, касающиеся безопасности и охраны окружающей среды, решаются на основе следующих факторов и концепций:

- В течение первых пяти лет хранения отработанного ядерного топлива происходит распад короткоживущих радионуклидов, что приводит к заметному снижению остаточного тепла в сборках. За этот период температура каждой отработавшей сборки падает до уровня 1 киловатта и ниже.
- В вентилируемых контейнерах хранятся только неповрежденные сборки, которые не показывают выбросов радиации из оболочек ТВЭЛ ни в процессе интенсивного тепловыделения, ни во время хранения в бассейне. Это подтверждает, что первый защитный

барьер, оболочка ТВЭЛ, сохраняет свою целостность при значительном тепловом воздействии, и вероятность её разрушения во время медленного охлаждения в среде с гелием крайне мала.

- Для хранения 24 отработавших сборок используются направляющие трубы шестиугольного сечения в герметичной корзине, выполненной из углеродистой стали, что делает её вторым защитным барьером от радиации. Корзина также помогает в отводе остаточного тепла из сборок, а гелий создает в ней химически инертную среду.
- При транспортировке корзины в здании реактора помещают в перегрузочный контейнер для биологической защиты персонала и предотвращения механических повреждений.

Герметичная корзина устанавливается внутри бетонного контейнера, который отводит тепло и защищает от внешних воздействий. Загруженный контейнер вывозится на участок хранения, который находится в защищенной зоне и соответствует критериям сейсмической устойчивости и предотвращения несанкционированного доступа [3].

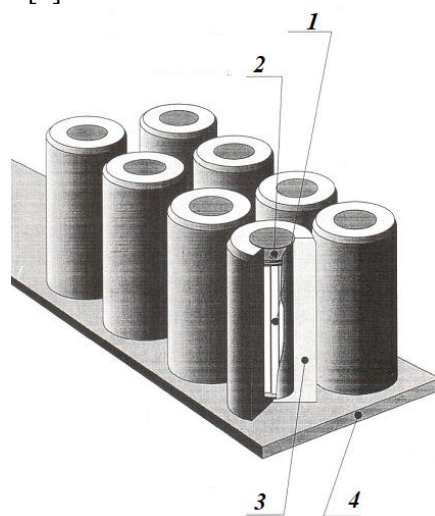


Рис.2. Схема защитных барьеров хранения топливных сборок ВВЭР в вентилируемых бетонных контейнерах

- 1 – первый барьер локализации радиоактивности – оболочка ТВЭЛ;
- 2 – второй барьер локализации радиоактивности – корзина, заполненная гелием;
- 3 – вентилируемый бетонный контейнер (уменьшает поток радиоактивного излучения и обеспечивает механическую защиту);
- 4 – бетонированная площадка хранения (обеспечивает конструкционную и сейсмическую устойчивость)

Мощность гамма-излучения на расстоянии 50 метров от внешнего ограждения площадки составляет 0,11-0,12 мкЗв/ч (11-12 мкР/ч), что соответствует фоновым значениям. По результатам радиационного контроля атмосферных осадков и атмосферного воздуха, проб воды скважин, сточной воды, за весь период эксплуатации свидетельствуют, что содержание радионуклидов в районе площадки СХОЯТ соответствует природному фону и уровню глобального загрязнения.

Заключение

Зона для хранения предназначена для безопасного хранения отработавшего ядерного топлива (ОЯТ) на срок не менее 50 лет. Она состоит из площадки, образованной железобетонной плитой, на которой устанавливаются контейнеры для ОЯТ. Этот район имеет отдельный контур физической защиты. Сухой комплекс хранения ОЯТ вмещает до 380 вентилируемых контейнеров, которые могут содержать более 9000 тепловыделяющих сборок. На данной площадке можно размещать ОЯТ на протяжении всей эксплуатации Запорожской АЭС, однако условия лицензии позволяют принимать ОЯТ только с энергоблоков этой станции. В настоящее время на складе хранения размещено 173 контейнера, что соответствует 4145 отработанным тепловыделяющим сборкам.

Хранение отработавшего ядерного топлива на Запорожской АЭС связано с множеством опасностей, что требует повышенного внимания. Неправильное размещение или авария могут вызвать утечку радиоактивных веществ, угрожая здоровью людей и экологии. Для снижения рисков принимаются строгие меры безопасности, включая специализированные хранилища, постоянный мониторинг радиации и аварийные планы. Соблюдение федеральных норм и регулярное обновление технологий обеспечивают безопасное хранение и предотвращение чрезвычайных ситуаций.

Список литературы

1. Материал с интернет портала <https://1prime.ru/20230825/841567774.html>.
2. Хранение отработанного ядерного топлива / Р. Е. Шурыгин, В. Н. Хохлов, Е. Д. Исаева, О. Е. Сорокина // Молодой ученый. – 2019. – № 24(262). – С. 159-163. – URL: <https://moluch.ru/archive/262/60580/> (дата обращения: 10.11.2024).
3. Защитные сооружения хранилища отработавшего ядерного топлива Запорожской АЭС / И. И.

Залюбовский, С. А. Письменецкий, В. Г. Рудычев [и др.] // Атомная энергия. – 2012. – Т. 112, № 4. – С. 215-220. – EDN OZCTTZ.

4. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии «Пункты сухого хранения отработавшего ядерного топлива. Требования безопасности» НП-035-02.
5. Обзор зарубежных практик захоронения ОЯТ и РАО, М. "Комтехпринт", 2015.
6. Калинин, В. И. Хранение отработавшего ядерного топлива энергетических реакторов / В. И. Калинин и др. - М.: Препринт, 2009-122с.

References

1. Material from the Internet portal <https://1prime.ru/20230825/841567774.html>.
2. Storage of spent nuclear fuel / R. E. Shurygin, V. N. Khokhlov, E. D. Isaeva, O. E. Sorokina // Young scientist. - 2019. - No. 24 (262). - P. 159-163. - EDN DVEQYV.
3. Protective structures of the spent nuclear fuel storage facility of the Zaporizhzhya NPP / I. I. Zalyubovsky, S. A. Pismenetsky, V. G. Rudychov [et al.] // Atomic energy. - 2012. - Vol. 112, No. 4. - P. 215-220. - EDN OZCTTZ.
4. Federal norms and rules in the field of use of atomic energy "Dry storage facilities for spent nuclear fuel. Safety requirements" NP-035-02.
5. Review of foreign practices of SNF and RW disposal, M. "Komtekhpriint", 2015.
6. Kalinkin, V. I. Storage of spent nuclear fuel of power reactors / V. I. Kalinkin et al. - M.: Preprint, 2009-122s.

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

УДК 544.6;546.05

Сравнение двух типов суперконденсаторов по результатам экспериментальных исследований**Э.А. Бекиров¹, Л.Н. Циперко¹, М.М. Асанов¹, В.В. Кувшинов²**¹ФГАОУ ВО «Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского», Физико-технический институт, ул. Киевская, 181, г. Симферополь, 295004, Россия, bekirov.e.a@cfuv.ru²ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», ул. Университетская, 33, г. Севастополь, 299053, Россия

Статья поступила 10.10.2024 г.; после доработки 11.10.2024 г.

Аннотация

Актуальность исследования заключается в экспериментальном анализе различных способов изготовления суперконденсаторов и сравнении выходных характеристик полученных устройств. Были рассмотрены современные устройства – суперконденсаторы или ионисторы, способные удовлетворить возрастающие требования к характеристикам накопителей. Описаны существующие типы суперконденсаторов, проанализированы их компоненты и перспективы усовершенствования. Проведен ряд экспериментов с целью сравнения методов изготовления суперконденсаторов. Были созданы два суперконденсатора: в первом для создания обкладок на медную подложку, толщиной 50 нм, в виде пасты наносился активированный уголь, смешанный с электролитом. Во втором для создания обкладок активированный уголь наносился на полиуретановую подложку, а слой меди, толщиной 50 нм, наносился гальваническим способом. Получены зависимости сопротивления и напряжения изготовленных суперконденсаторов от времени разряда.

Ключевые слова: суперконденсатор, активированный уголь, ионисторы, накопители энергии.

Comparison of two types of supercapacitors based on experimental results**E.A. Bekirov¹, L.N. Tsiperko¹, M.M. Asanov¹, V.V. Kuvshinov²**¹ V.I. Vernadsky Crimean Federal University, Institute of Physics and Technology, 181, Kievskaya St., Simferopol, 295004, Russia, bekirov.e.a@cfuv.ru² Sevastopol state university, 33, Universitetskaya st., Sevastopol, 299053, Russia

Received 10.10.2024 y.; received in final form 11.10.2024 y.

Abstract

The relevance of the study lies in the experimental analysis of various methods for manufacturing supercapacitors and comparison of the output characteristics of the obtained devices. Modern devices - supercapacitors or ionistors, capable of satisfying the increasing requirements for the characteristics of storage devices were considered. The existing types of supercapacitors are described, their components and prospects for improvement are analyzed. A number of experiments were conducted to compare the methods of manufacturing supercapacitors. Two supercapacitors were created: in the first, activated carbon mixed with electrolyte was applied in the form of a paste to a copper substrate 50 nm thick to create the plates. In the second, activated carbon was applied to a polyurethane substrate to create the plates, and a copper layer 50 nm thick was applied by galvanic means. The dependences of the resistance and voltage of the manufactured supercapacitors on the discharge time were obtained.

Keywords: supercapacitor, activated carbon, ionistors, energy storage devices.

Введение

Одной из главных проблем современной энергетической отрасли является создание эффективного и надежного аккумулятора энергии. Эффективное накопление электрической энергии является важнейшей задачей современной науки и техники, требующей безотлагательного решения. Создаются все более мощные бытовые приборы, для которых крайне необходимы компактные и ёмкие аккумуляторы энергии. Однако надежные накопители требуются не только для всевозможных электронных устройств. Энергетическая отрасль нуждается в эффективных аккумуляторах, способных накапливать энергию для выдачи ее в сеть во время максимального потребления с целью снижения нагрузки на энергосистему. Наиболее актуальной эта проблема является для энергосистем с возобновляемыми источниками энергии. Работа таких энергоустановок напрямую зависит от переменчивых погодных условий. В связи с этим, генерирование ими энергии может не совпадать по времени с периодом, когда в энергосистеме наблюдается недостаток этой энергии. Поэтому для более эффективной эксплуатации возобновляемых источников энергии крайне необходимо аккумулировать выработанную ими энергию с последующей выдачей в энергосистему по мере необходимости. Это позволит не только повысить надежность и обеспечить бесперебойность энергоснабжения потребителей, но и снизить объемы вредных выбросов в атмосферу при сжигании ископаемого топлива за счет перераспределения энергии в энергосистеме.

Для достижения перечисленных выше целей перспективными, по мнению авторов, являются ионисторы или, так называемые, суперконденсаторы.

Литературный обзор

Разработка этих устройств ведется довольно давно. Работа суперконденсаторов схожа с обычными конденсаторами. Однако, в них используются электроды большей поверхностной площадью и более тонкие диэлектрики в качестве сепараторов. Благодаря этому они обладают большей плотностью энергии, чем конденсаторы, и большей плотностью мощности, чем аккумуляторы [1]. Другими преимуществами суперконденсаторов является низкое время заряда-разряда, большое количество циклов заряда-разряда, универсальная рабочая температура [2, 3].

Выделяют три типа суперконденсаторов:

электрохимические двухслойные конденсаторы, псевдоконденсаторы и гибридные конденсаторы. Они различаются принципами хранения заряда. Они, соответственно, нефаарадеевский, фарадеевский и комбинация двух. Фарадеевские процессы, такие как окислительно-восстановительные реакции, включают перенос зарядов между электродом и электролитом. Нефаарадеевский принцип, наоборот, не использует химический механизм. Заряды, в этом случае, распределяются по поверхностям за счет физических процессов, которые не включают в себя образование или разрыв химических связей [1].

Характеристики электродов во многом определяют эффективность работы суперконденсаторов. Основным их параметром является емкость материала. В каждом из указанных типов суперконденсаторов используются свои типы электродов. В двухслойных конденсаторах применяются электроды из различных углеродных соединений, в псевдоконденсаторах – оксидов металлов или электропроводящих полимеров, в гибридных конденсаторах – комбинаций углеродных материалов и оксидов металлов или углеродных материалов и электропроводящих полимеров [3].

В качестве электролита в суперконденсаторах используются три типа растворов. Очень важно, чтобы размер ионов электролита были меньше или равны размерам пор используемых электродов.

Органический растворитель, такой как ацетонитрил (ACN) или пропиленкарбонат (PC), является основным компонентом органических электролитов. Два этих раствора нашли наиболее широкое распространение благодаря низкой вязкости, высокой проводимости и электрохимической стабильности. Суперконденсаторы на их основе способны обеспечить высокую мощность и высокую циклическую стабильность. Органические ионы солей, растворенных в растворителе, имеют относительно большие размеры. Эти ионы должны иметь доступ к порам электрода, чтобы способствовать накоплению энергии. Следовательно, электроды с микропорами, которые не могут удерживать ионы, не подходят для использования с органическими электролитами. Тем не менее, органические электролиты очень популярны, а научные исследования в этой сфере касаются разработки новых, безопасных растворителей для обеспечения более высоких плотностей энергии.

Водный электролит состоит из небольших молекул кислоты, растворенных в воде. Эти

неорганические ионы имеют небольшие размеры и используются с электродами с микропорами, в частности, электродами из различных углеродных соединений. Ученые работают над улучшением электрохимических свойств водных электролитов.

Ионные жидкости комнатной температуры первоначально рассматривались как альтернативные растворители для водных электролитов. Однако, в настоящее время они могут стать заменой твердым электролитам. Имея широкий интервал рабочего напряжения, что ведет к потенциально высокой плотности энергии, эти электролиты имеют большие перспективы использования. Их разработка находится только на начальной стадии [4].

В качестве сепараторов могут использоваться натуральные материалы, такие как, керамика, стекло или целлюлоза. В последнее время, начали широко применяться полимерные сепараторы. Их отличает невысокая цена, гибкость и высокая пористость [3].

Для анализа электрических характеристик суперконденсаторов существует целый ряд моделей.

RC цепь состоит из идеального конденсатора с последовательно подключенным резистором, который характеризует несовершенство параметров суперконденсатора. Это простая модель, зачастую используемая для определения объема системы аккумулялирования и приблизительного расчета ее эффективности [5].

Существуют модели, состоящие из нескольких RC цепей, соединенных параллельно с различными временными постоянными. Эти цепи моделируют процесс диффузии ионов через поры электрода [6].

Динамические модели включают в себя последовательно соединенные конденсаторы, отображающие первичную емкость суперконденсатора и несколько RC цепей [7].

Существуют также модели, являющиеся комбинацией описанных выше трех моделей [8].

Тепловое моделирование суперконденсаторов используется для расчета их рабочей температуры [4]. Входными сигналами таких моделей, как правило, являются рабочие напряжение и ток суперконденсатора, а также температура окружающей среды. Изменение рабочей температуры зависит от целого ряда процессов, происходящих в суперконденсаторе. Среди них можно выделить зависимость температуры от омических потерь, от изменения энтропии в двухслойном суперконденсаторе,

от возможности суперконденсатора передавать тепло окружающей среде.

Можно отметить, что толщина каждого электродного слоя, нанесенного на токосъемники, и технология нанесения имеют решающее значение для достижения хороших электрохимических свойств и длительного срока службы устройства [].

Большинство суперконденсаторов на рынке имеют цилиндрическую форму. Эта форма получается путем скручивания двух токосъемников из алюминиевой фольги, на обе стороны которых нанесен активный материал в качестве электрода. Сепаратор расположен между двумя электродами. Недостатком такой формы является плохой отвод тепла из многослойной структуры суперконденсатора.

Плоские суперконденсаторы, так называемые «pouch style», обеспечивают более высокую теплопроводность. В этом случае токосъемники, электроды и сепараторы укладываются друг на друга.

Основная часть

В данной работе была поставлена цель сравнить характеристики суперконденсаторов, изготовленных разными способами.

Для создания суперконденсатора первого типа активированный уголь размалывался и сортировался в зависимости от размера фракции. Порошок смешивался с электролитом и в виде пасты наносилось на медную подложку толщиной 50 нм. Из полученных обкладок собирался ионистор.

Для создания суперконденсатора второго типа такое же количество порошка активированного угля наносилось на полиуретановую подложку. Слой меди толщиной 50 нм наносился гальваническим способом. Из полученных обкладок собирался ионистор.

В качестве сепаратора в обоих случаях использовалась стекловуаль.



Рис 1. Порошок активированного угля

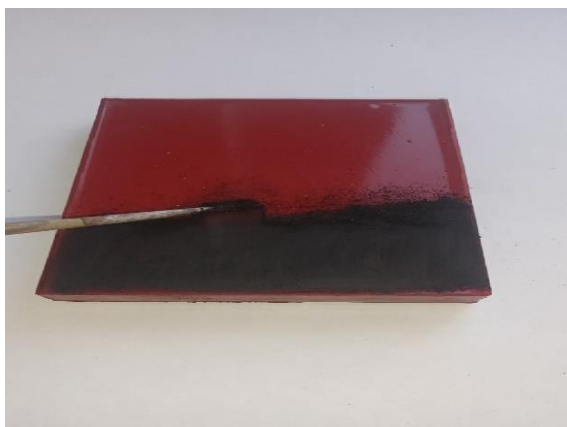


Рис 2. Порошок активированного угля, нанесенный на полиуретановую подложку



Рис 3. Медные обкладки с нанесенным на них слоем активированного угля

В результате эксперимента были получены данные зависимостей сопротивления от времени и характеристики напряжения от времени. Произведен расчет энергии ионистора. Результаты сведены в таблицу 1.

Потенциальную энергию заряженного ионистора найдем по формуле 1.

$$W = U \cdot q = U \cdot I \cdot t, \quad (1)$$

где U – напряжение; I – сила тока; t – время

$W1 = 75,13$ Дж – сорбент нанесен в виде пасты;

$W2 = 1933$ Дж – сорбент нанесен гальваническим методом.

Эксперименты показали, что сопротивление суперконденсатора первого типа очень велико, а значения тока малы. Это связано с высоким внутренним сопротивлением ионистора, что делает невозможным его применение на практике.

Характеристики суперконденсатора второго типа значительно лучше. Это связано с большей площадью соприкосновения частиц сорбента и медной обкладки. Еще одним преимуществом является то, что слой сорбента остается надежно закреплен и при воздействии

механических нагрузок не отрывается от подложки и не попадает в электролит. Это обеспечивает минимальные токи утечки и дает возможность применять в качестве сепаратора тонкие пленочные материалы с разными по диаметру порами.

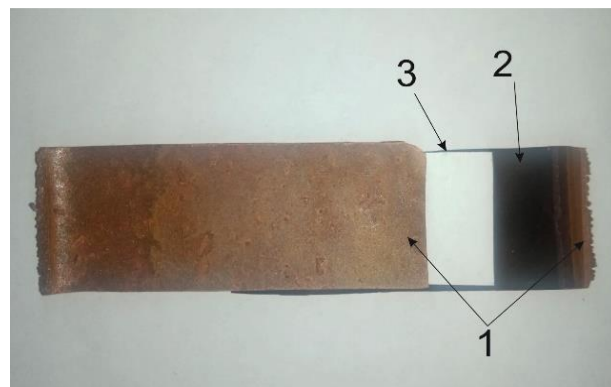


Рис 4. Ионистор в сборе: 1. Медные обкладки; 2. Сорбент; 3. Сепаратор.

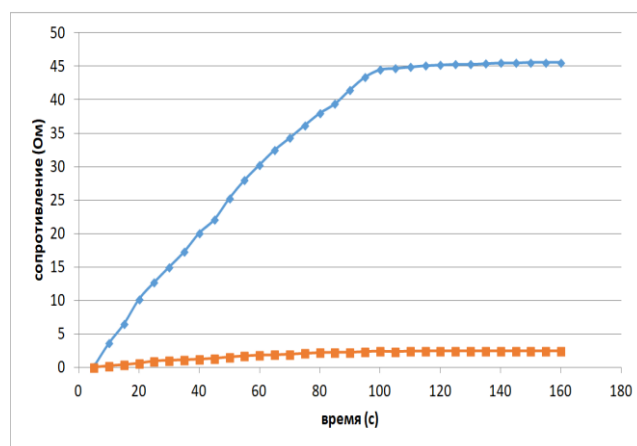


Рис 5. График зависимости сопротивления от времени для разных способов нанесения сорбента

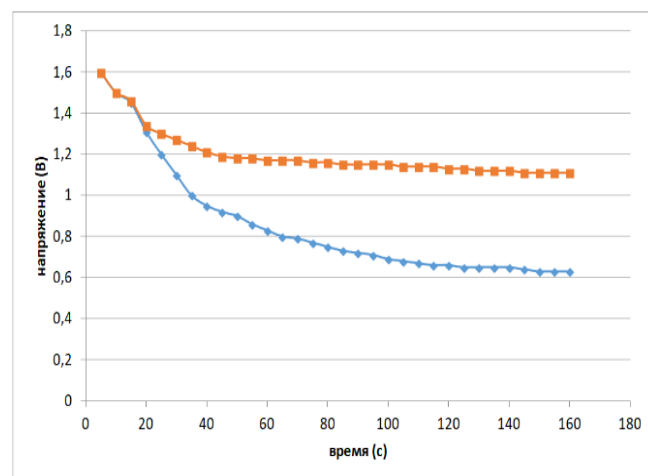


Рис 6. Характеристика разряда ионистора для разных методов нанесения сорбента

Таблица 1. Сравнительная характеристика сопротивления и напряжения ионистора от времени разряда для разных способов нанесения сорбента

t- время разряда (с)	Сопротивление ионистора с нанесен- ным в виде пасты сорбентом (Ом)	Сопротивление ионистора с гальвани- ческим методом нане- сения обкладок (Ом)	Напряжение (В) ионистора с нанесенным в виде пасты сорбентом (Ом)	Напряжение ио- нистора с гальваниче- ским методом нанесе- ния обкладок (Ом)
5	0,1	0,006	1,6	1,6
10	3,6	0,24	1,5	1,5
15	6,5	0,4	1,45	1,46
20	10,2	0,63	1,31	1,34
25	12,7	0,97	1,2	1,3
30	15	1,07	1,1	1,27
35	17,3	1,15	1	1,24
40	20,1	1,25	0,95	1,21
45	22,1	1,38	0,92	1,19
50	25,3	1,58	0,9	1,18
55	28	1,75	0,86	1,18
60	30,3	1,86	0,83	1,17
65	32,5	1,91	0,8	1,17
70	34,3	2,01	0,79	1,17
75	36,2	2,13	0,77	1,16
80	38	2,24	0,75	1,16
85	39,4	2,31	0,73	1,15
90	41,5	2,3	0,72	1,15
95	43,4	2,41	0,71	1,15
100	44,5	2,47	0,69	1,15
105	44,7	2,48	0,68	1,14
110	44,9	2,49	0,67	1,14
115	45,1	2,5	0,66	1,14
120	45,2	2,51	0,66	1,13
125	45,3	2,51	0,65	1,13
130	45,3	2,51	0,65	1,12
135	45,4	2,52	0,65	1,12
140	45,5	2,52	0,65	1,12
145	45,5	2,52	0,64	1,11
150	45,6	2,52	0,63	1,11
155	45,6	2,52	0,63	1,11
160	45,6	2,52	0,63	1,11

Выводы

В работе рассмотрены суперконденсаторы или ионисторы, которые призваны решить проблему накопления энергии. Показано, что они выгодно отличаются от широко используемых в настоящее время аккумуляторов благодаря большой плотности мощности и энергии, низкому времени заряда-разряда, большому количеству циклов заряда-разряда.

Анализ существующих типов суперконденсаторов и методов их изготовления показал, что нахождение наиболее оптимальных параметров и структуры этих устройств довольно сложная научная и инженерная задача, которая еще требует своего решения.

С целью сравнения для последующего выбора лучшей техники изготовления суперконденсаторов были произведены эксперименталь-

ные исследования. Были изготовлены два суперконденсатора.

Первый - порошок активированного угля был смешан с электролитом и наносился на две медные подложки толщиной 50 нм. Второй - порошок активированного угля наносился на полиуретановую подложку, а слой меди толщиной 50 нм наносился гальваническим способом. Между двумя медными пластинами помещался сепаратор (стеклоуаль). Характеристики суперконденсатора первого типа оказались значительно хуже, чем второго. А именно, значения сопротивления были выше более чем в 15 раз, а значения тока меньше. Это является следствием того, что площадь соприкосновения частиц активированного угля с медной обкладкой в суперконденсаторе второго типа значительно больше. Кроме того, активированный уголь под нанесенным гальваническим способом слоем меди защищен

от механического воздействия и не попадает в электролит.

Список литературы

1. M. S. Halper, J. C. Ellenbogen. Supercapacitors: A Brief Overview. The MITRE Corporation. USA. 2006.
2. A. Yu, V. Chabot, J. Zhang. Electrochemical supercapacitors for energy storage and delivery. Fundamentals and applications. Taylor and Francis Group. USA. 2017
3. N. I. Jalal, R. I. Ibrahim, and M. K. Oudah. A review on Supercapacitors: types and components // Journal of Physics: Conference Series. 2021. 1973. 012015
4. A. Berrueta, A. Ursua, I. San MARTIN, A. Eftekhari, and P. Sanchis. Supercapacitors: Electrical Characteristics, Modeling, Applications, and Future Trends // IEEE Access. 2019. 7. Pp. 50869 – 50896
5. C.-T. Goh and A. Cruden, Bivariate quadratic method in quantifying the differential capacitance and energy capacity of supercapacitors under high current operation // J. Power Sources. 2014. 265. Pp. 291-298.
6. S. Fletcher, I. Kirkpatrick, R. Dring, R. Puttock, R. Thring, and S. Howroyd, The modelling of carbon-based supercapacitors: Distributions of time constants and Pascal equivalent circuits // J. Power Sources. 2017. 345. Pp. 247-253.
7. Y. Parvini, J. B. Siegel, A. G. Stefanopoulou, and A. Vahidi. Supercapacitor electrical and thermal modeling, identification, and validation for a wide range of temperature and power applications // IEEE Trans. Ind. Electron. 2016. 63. 3. Pp. 1574-1585.
8. D. Torregrossa, M. Bahramipanah, E. Namor, R. Cherkaoui, and M. Paolone. Improvement of dynamic modeling of supercapacitor by residual charge effect estimation // IEEE Trans. Ind. Electron. 2014. 61. 3. Pp. 1345-1354.

References

1. M. S. Halper, J. C. Ellenbogen. Supercapacitors: A Brief Overview. The MITRE Corporation. USA. 2006.
2. Yu, V. Chabot, J. Zhang. Electrochemical supercapacitors for energy storage and delivery. Fundamentals and applications. Taylor and Francis Group. USA. 2017
3. N. I. Jalal, R. I. Ibrahim, and M. K. Oudah. A review on Supercapacitors: types and components // Journal of Physics: Conference Series. 2021. 1973. 012015
4. Berrueta, A. Ursua, I. San MARTIN, A. Eftekhari, and P. Sanchis. Supercapacitors: Electrical Characteristics, Modeling, Applications, and Future Trends // IEEE Access. 2019. 7. Pp. 50869 – 50896
5. C.-T. Goh and A. Cruden, Bivariate quadratic method in quantifying the differential capacitance

and energy capacity of supercapacitors under high current operation // J. Power Sources. 2014. 265. Pp. 291-298.

6. S. Fletcher, I. Kirkpatrick, R. Dring, R. Puttock, R. Thring, and S. Howroyd, The modelling of carbon-based supercapacitors: Distributions of time constants and Pascal equivalent circuits // J. Power Sources. 2017. 345. Pp. 247-253.
7. Y. Parvini, J. B. Siegel, A. G. Stefanopoulou, and A. Vahidi. Supercapacitor electrical and thermal modeling, identification, and validation for a wide range of temperature and power applications // IEEE Trans. Ind. Electron. 2016. 63. 3. Pp. 1574-1585.
8. D. Torregrossa, M. Bahramipanah, E. Namor, R. Cherkaoui, and M. Paolone. Improvement of dynamic modeling of supercapacitor by residual charge effect estimation // IEEE Trans. Ind. Electron. 2014. 61. 3. Pp. 1345-1354.

УДК 621.31

Разработка и исследование алгоритмов синхронизации высоковольтного асинхронного электродвигателя с фазным ротором в режиме машины двойного питания

В.М. Завьялов¹, Ю.А. Майорова², Н.Н. Смокталь³, С.В. Гайдук⁴

Севастопольский государственный университет (СевГУ), Университетская-33,

г. Севастополь, 299053, Российская Федерация

¹vmzavyalov@sevsu.ru, ²YAMayorova@sevsu.ru, ³nnsmoktal@sevsu.ru, ⁴svgaidyk@sevsu.ru

Статья поступила 20.11.2024 г.; после доработки 22.11.2024 г.

Аннотация

В статье изложены вопросы построения высоковольтного регулируемого электропривода переменного тока. С использованием математической модели на основе обобщенной электрической машины получены алгоритмы и сформулированы условия синхронизации вектора ЭДС статора машины двойного питания с вектором напряжения сети. Представлены результаты исследований для различных режимов синхронизации.

Ключевые слова: асинхронный двигатель, фазный ротор, машина двойного питания, электропривод, высоковольтный двигатель, регулирование

Development and research of synchronization algorithms of high-voltage asynchronous electric motor with a wound rotor in the double-feed Machine mode

V.M. Zavyalov¹, Y.A. Mayorova², N.N. Smoktal³, S.V. Gayduk⁴

Sevastopol State University (SevSU), 33 Universitetskaya st.,

Sevastopol, 299053, Russian Federation

¹vmzavyalov@sevsu.ru, ²YAMayorova@sevsu.ru, ³nnsmoktal@sevsu.ru, ⁴svgaidyk@sevsu.ru

Received 20.11.2024 y.; received in final form 22.11.2024 y.

Abstract

The article presents the issues of constructing a high-voltage adjustable AC electric drive. Using a mathematical model based on a generalized electric machine, algorithms are obtained and conditions for synchronizing the stator EMF vector of a double-feed machine with the network voltage vector are formulated. The results of studies for various synchronization modes are presented.

Keywords: asynchronous motor, wound rotor, dual-fed machine, electric drive, high-voltage motor, regulation

Введение

Массовое использование мощных частотно-управляемых электроприводов в последние годы продемонстрировало их исключительные возможности как инструмента для комплексной автоматизации и энергосбережения в различных отраслях народного хозяйства. Наиболее энер-

гоэффективным способом регулирования частоты вращения высоковольтных электродвигателей является применение преобразователей частоты. Однако применение этих устройств может быть ограничено из-за сложности и высокой стоимости оборудования, а также необходимости обеспечения электромагнитной совместимости и защиты от помех [1].

Одной из основных проблем при проектировании преобразователей частоты для высоковольтных электродвигателей является отсутствие компонентной базы силовой электроники на соответствующий класс напряжения.

На данный момент можно выделить следующие основные схемы построения высоковольтного частотно-регулируемого электропривода 6кВ [2]:

1. Высоковольтные преобразователи с низковольтным звеном (ПЧВН), это так называемая двухтрансформаторная схема. Основана на двойной трансформации напряжения с помощью понижающего и повышающего трансформаторов. Низковольтный преобразователь частоты (ПЧ) используется для регулирования частоты, а силовые высоковольтные трансформаторы обеспечивают необходимое напряжение.
2. Схема с многоуровневым ПЧ высокого напряжения (ПЧВМ). Основана на применении совместно с ПЧВМ на входе одного многообмоточного трансформатора, имеющего сложное устройство и повышенную стоимость.

Сравнивая эти два метода использования ПЧ в высоковольтном электроприводе, можно сделать вывод, что схемы регулирования частоты вращения с использованием ПЧ для высоковольтных АД характеризуются значительными капитальными затратами, связанными с высокой стоимостью и количеством используемого оборудования, а также сложностью и громоздкостью систем управления [3].

Асинхронный двигатель с фазным ротором с управлением со стороны ротора

Одним из перспективных путей модернизации установок с высоковольтными асинхронными двигателями с фазным ротором (АДФР) является использование его в режиме машины двойного питания (МДП) [4], где возбуждение производится переменным током. Это решение улучшает регулировочные параметры, особенно обеспечивая стабильный момент на малых оборотах. Кроме того, важным преимуществом является то, что благодаря низковольтному питанию возбуждения со стороны ротора можно использовать низковольтный ПЧ.

Функциональная схема частотного регулирования АДФР со стороны ротора показана на рисунке 1.

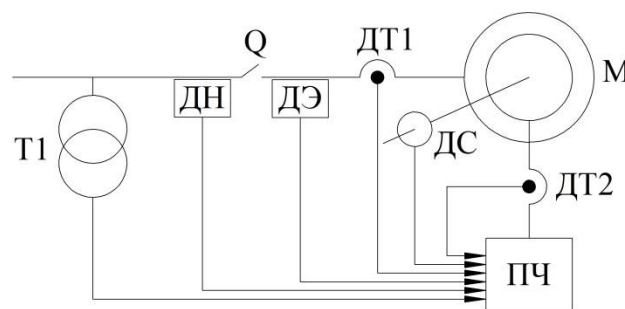


Рис.1. Функциональная схема управления высоковольтным АДФР по ротору

Статорная обмотка электродвигателя напрямую подключена к сети напряжением 6 кВ, а обмотка ротора подсоединена через понижающий трансформатор и преобразователь частоты, который отвечает за регулирование угловой частоты вращения ротора.

Однако подключение такого электропривода к высоковольтной сети питания 6 кВ без дополнительных мероприятий будет формировать большие пусковые токи в обмотках статора и высокое значение ЭДС обмотки ротора, которые негативно отразятся на надежности машины [5]. Для исключения этого фактора целесообразно до подключения обмотки статора к сети синхронизировать по амплитуде и фазе векторы ЭДС статора и напряжения сети.

Для формирования функции регулирования система снабжена следующими датчиками: ДН – датчик напряжения сети, ДЭ – датчик ЭДС обмотки статора двигателя, ДТ1 – датчик тока в статоре, ДТ2 – датчик тока в роторе, ДС – датчик скорости.

Согласно представленной функциональной схеме ротор питается от низковольтного ПЧ. В схеме представлен датчик напряжения ДН и датчик ЭДС статора ДЭ, которые установлены до и после выключателя Q соответственно. Выключатель Q замыкается после синхронизации ЭДС статора с напряжением сети, осуществляя подключение статорной обмотки двигателя к питающей высоковольтной сети. При этом осуществляется запуск ротора электродвигателя. Датчик тока ДТ2 необходим как для использования в системе управления частотой вращения, так и для процесса синхронизации. Датчики тока ДТ1 и скорости ДС используются только в режиме регулирования частоты вращения ротора двигателя.

Математическая модель АДФР в такой

схеме включения имеет вид:

$$\begin{cases} u_{1x} = i_{1x}R_1 + \frac{d\psi_{1x}}{dt} - \omega_{0эл}\psi_{1y} \\ u_{1y} = i_{1y}R_1 + \frac{d\psi_{1y}}{dt} + \omega_{0эл}\psi_{1x} \\ u_{2x} = i_{2x}R_2 + \frac{d\psi_{2x}}{dt} - (\omega_{0эл} - \omega_{эл})\psi_{2y} \\ u_{2y} = i_{2y}R_2 + \frac{d\psi_{2y}}{dt} + (\omega_{0эл} - \omega_{эл})\psi_{2x} \end{cases} \quad (1)$$

где $u_{1x,y}; u_{2x,y}$ – составляющие векторов напряжений, прикладываемых к обмоткам статора и ротора соответственно; $\omega_{0эл}$ – синхронная угловая скорость вектора напряжения статора; $\omega_{эл}$ – электрическая угловая скорость вращения ротора; $i_{1x,y}; i_{2x,y}$ – токи обмоток статора и ротора по осям x-y соответственно; R_1, R_2 – активные сопротивления обмоток статора и ротора соответственно; $\psi_{1x,y}; \psi_{2x,y}$ – потокосцепление обмоток статора и ротора соответственно; $\psi_1 = i_{1x}L_1 + i_{2x}L_m$ и $\psi_2 = i_{2x}L_2 + i_{1x}L_m$ – потокосцепления по статору и ротору, выраженные через токи и индуктивности.

Для исключения больших пусковых токов в момент коммутации статорной обмотки двигателя с сетью 6 кВ необходимо обеспечить условия синхронизации ЭДС обмотки статора с напряжением сети. Для этого в момент коммутации Q нужно обеспечить равенство векторов электродвижущей силы (ЭДС) статора и напряжения сети $\vec{U}_c = \vec{E}_1$.

С этой целью модель (1) рассмотрена в системе координат x-y, где вектор напряжения направлен вдоль оси x [6], в следствии чего $U_{cx} = U_{cmax}$, $U_{cy} = 0$.

При осуществлении управления только со стороны ротора машины составляющие напряжения, подводимого к статору будут отсутствовать, и как следствие: $U_{1x} = 0$, $U_{1y} = 0$, $i_{1x}R_1 = 0$, $i_{1y}R_1 = 0$, $i_{1x}L_1 = 0$, $i_{1x}L_{1m} = 0$.

Условия синхронизации вектора напряжения ЭДС статора с вектором напряжения сети можно записать в виде:

$$\begin{aligned} u_{2x} &= \frac{L_m}{L_2} U_{cmax} + R_2 i_{2x} \\ u_{2y} &= R_2 i_{2y} \end{aligned}$$

Учитывая, что $\frac{L_m}{L_2} \approx 1$, а $R_2 i_{2x} \ll U_{cmax}$ и $R_2 i_{2y} \ll U_{cmax}$, [7] с достаточной точностью условие синхронизации можно представить в следующем виде:

$$u_{2x} = U_{cmax}; \quad u_{2y} = 0. \quad (2)$$

Исходя из этих условий, математическую

модель АДФР до включения Q можно представить в виде системы уравнений:

$$\begin{cases} E_x = \frac{d}{dt} i_{2x} L_m - \omega_{эл} i_{2y} L_m \\ E_y = \frac{d}{dt} i_{2y} L_m + \omega_{эл} i_{2x} L_m \\ U_{2x} = i_{2x} R_2 + P i_{2x} L_2 - \omega_{0эл} i_{2y} L_2 \\ U_{2y} = i_{2y} R_2 + P i_{2y} L_2 + \omega_{0эл} i_{2x} L_2 \end{cases} \quad (3)$$

На базе полученных уравнений (3) составлена структурная схема, представленная на рисунке 2.

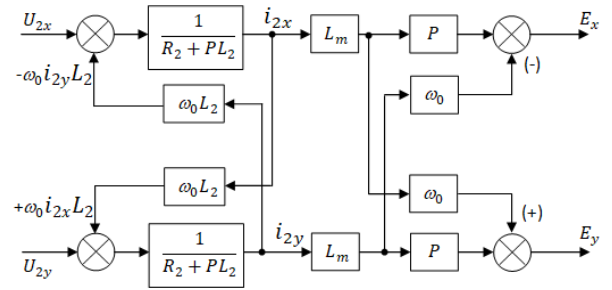


Рис.2. Структурная схема модели для системы уравнений (3) с учетом разомкнутой обмотки статора

Пренебрегая потоком рассеяния и сопротивлением обмотки ротора у мощных высоковольтных двигателей, получим задачу формирования напряжения ротора U_{2x} пропорционально напряжению питающей сети.

Для осуществления синхронизации статорной обмотки АДФР с питающей сетью необходимо задаться и скомпенсировать падение напряжение на сопротивлении роторной обмотки двигателя:

$$U_{2x} = \frac{L_m}{L_2} E_{2x} - R_2 i_{2x}. \quad (4)$$

Исследование алгоритмов синхронизации

В среде Matlab Simulink была сформирована модель для исследования системы электропривода на базе уравнений МДП с учетом полученных условий синхронизации (2). В модели предусмотрен блок компенсации задающих сигналов по ротору для осуществления синхронизации вектора ЭДС обмотки статора с вектором напряжения сети по модулю и по фазе.

$$U_{2x} = \frac{L_m}{L_2} E_{2x} - R_2 i_{2x}.$$

Учитывая, что в алгоритме синхронизации

отсутствуют параметры электродвигателя, которые могут изменяться при изменении теплового режима электродвигателя [8] или отличаться от каталожных данных [9], в модель была включена возможность намеренного внесения погрешностей параметров при задании управляющих сигналов на ротор электродвигателя.

С помощью данного блока оценивания задавались параметры управления системой в четырёх режимах с компенсацией по обратной связи через ротор:

- с полной компенсацией – то есть режим точной синхронизации статорной обмотки с сетью 6 кВ;
- со специально внесённой погрешностью при задании активного сопротивления ротора R_2 ;
- со специально внесённой погрешностью при задании индуктивности цепи намагничивания L_m ;
- без учёта параметров ротора, для оценивания влияния индукции рассеяния на качество синхронизации.

Для каждого способа управления построены и проанализированы полученные временные зависимости ЭДС статорной обмотки $\bar{E}_{1\max}$, фазового сдвига α между векторами ЭДС статора и напряжения сети, небалансной ЭДС $|\delta|$ и пускового тока $I_{\text{пм}}$ в обмотке статора.

На первоначальном этапе исследования было выполнено моделирование системы для режима, когда питание на двигатель подаётся со стороны ротора через преобразователь частоты, а обмотка статора разомкнута. Затем при достижении вектором ЭДС статора величины, равной по амплитуде и фазе вектору напряжения сети (Рис. 3), обмотка статора коммутируется на сеть (Рис. 4).

Таким образом, выполняется точная синхронизация вектора ЭДС статора и вектора напряжения сети. При этом в момент включения обмотки статора АДФР в сеть возникает небалансная ЭДС, равная

$$|\delta| = \bar{E}_1 - \bar{U}_{\text{сети}}.$$

По сути, эта величина представляет из себя погрешность, которая вносит неточность в синхронизацию.

Из графика на рисунке 5 видно, что при выполнении условий точной синхронизации (2) эта небалансная ЭДС составила 0,015 В.

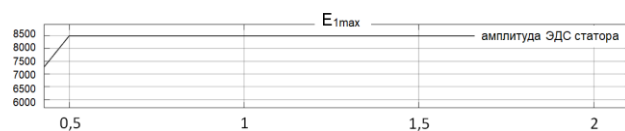


Рис.3. Амплитуда вектора ЭДС обмотки статора

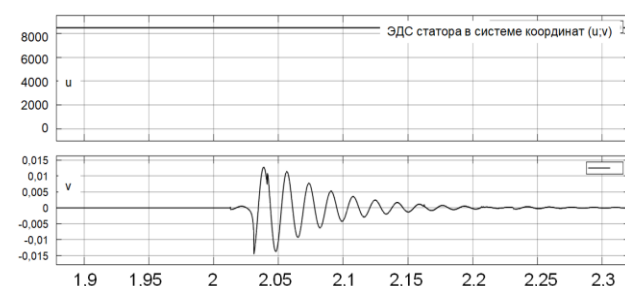


Рис.4. Вектор ЭДС статора в неподвижной системе координат (u; v)

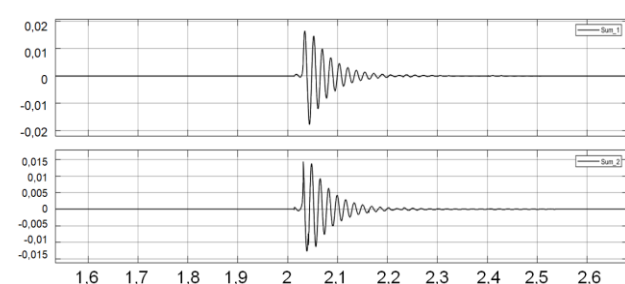


Рис.5. Вектор небалансной ЭДС в неподвижной системе координат (u; v) для метода точной синхронизации

На рисунке 6 показан фазовый сдвиг α между вектором ЭДС статора $\bar{E}_1$ и вектором напряжения сети $\bar{U}_{\text{сети}}$ в радианах.

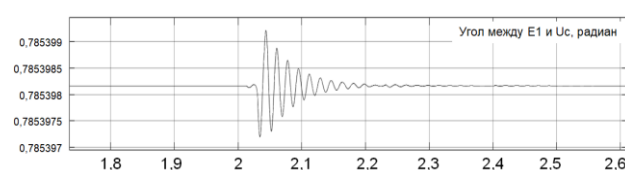


Рис.6. Угол α фазового сдвига векторов ЭДС статора и напряжения сети для метода точной синхронизации

Погрешность по фазе и амплитуде между векторами ЭДС статора и напряжения сети $|\delta|$ вызывает протекание пускового тока в обмотке статора, величина и характер изменения которого показаны на графиках (рисунок 7).

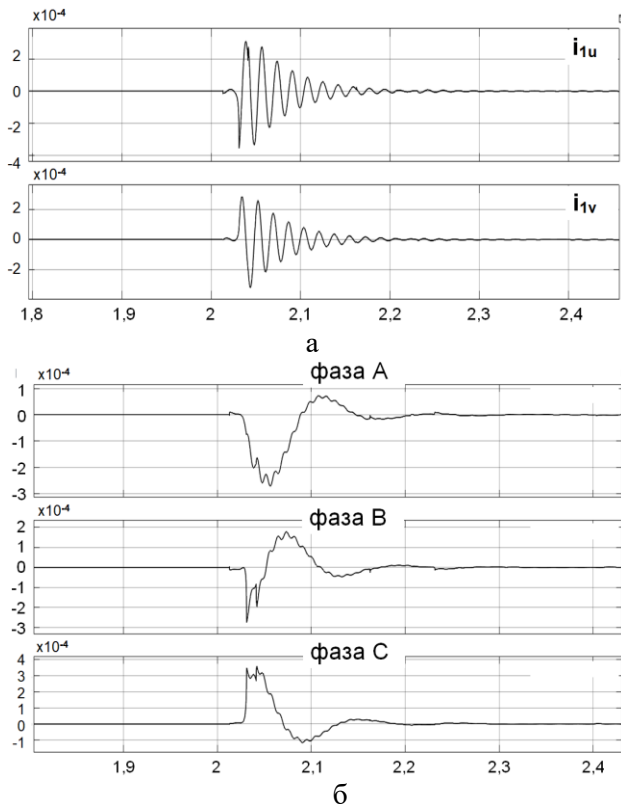


Рис.7. Ток статора асинхронного двигателя: а) вектор тока в неподвижной системе координат (u ; v) во время точной синхронизации; б) трёхфазный ток при точной синхронизации.

На рисунке 8б видно, что пусковой ток возникает только на время переходного процесса, после которого колебания тока затухают.

Разработанный алгоритм включения МДП на базе АДФР в высоковольтную сеть обеспечивает исключение пусковых токов (0,00035 А) по сравнению с номинальным током данного двигателя. Данный способ синхронизации является наиболее оптимальным и может называться точным, так как позволяет осуществить полную компенсацию небалансной ЭДС в обмотке статора по фазе и амплитуде, согласно выражения (4).

Проведён анализ использования упрощённой модели синхронизации без использования блока компенсации параметров. При этом амплитуда ЭДС (рисунок 8) в обмотке статора асинхронной машины составляет 12500 В, что более чем в 1,5 раза имеет расхождение с напряжением в питающей сети.

Полученные значения угла α отклонения вектора ЭДС статорной обмотки от вектора напряжения сети показаны на рисунке 9. Фазовый сдвиг составил до подключения обмотки статора к сети 0,67 радиан, порядка 0,95 радиан в момент коммутации обмотки с сетью, затем

колебания значения угла отклонения затухали и вышли на установившийся уровень 0,76 радиан.

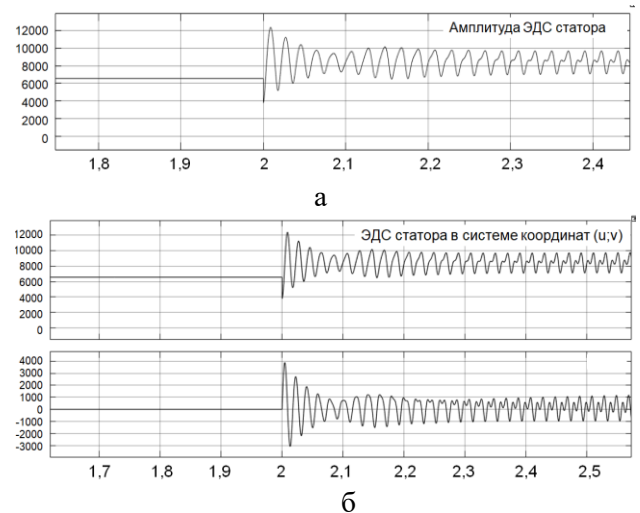


Рис. 8. Индуцируемая электродвижущая сила в обмотке статора АДФР: а) амплитуда ЭДС; б) вектор ЭДС в неподвижной системе координат (u ; v).

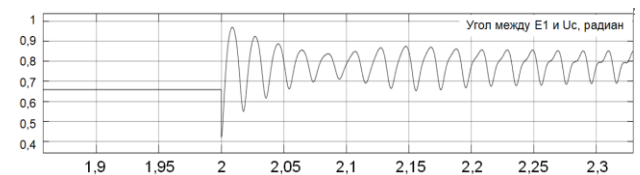


Рис.9. Значение угла α отклонения между векторами ЭДС статора и напряжения сети, радиан.

Отсутствие действия блока компенсации делает синхронизацию максимально неточной, о чем свидетельствует наибольшая по величине небалансная ЭДС (Рис. 10), появляющаяся в обмотке статора при подключении асинхронной машины к высоковольтной сети.

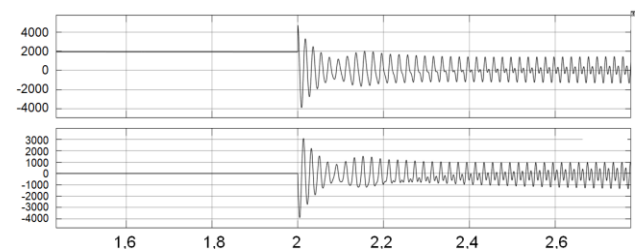


Рис.10. Вектор небалансной ЭДС в неподвижной системе координат (u ; v) для упрощённой модели

Амплитудное значение небалансной ЭДС, возникающей в обмотке статора асинхронного двигателя, является соизмеримым с номинальным напряжением обмотки статора электродвигателя и составляет :

$|\delta| = 2000$ В до замыкания обмотки статора на сеть; $|\delta| = 4600$ В в момент коммутации статорной обмотки с сетью; $|\delta| \approx 1700$ В после окончания переходного процесса при подключении обмотки статора к сети.

В этом случае большая небалансная ЭДС вызывает броски пусковых токов в статоре, которые превышают величину номинального тока статора в несколько раз.

Таким образом, подключение управляемого через ротор с помощью ПЧ асинхронного электродвигателя к высоковольтной сети без выполнения предпусковой синхронизации вектора ЭДС статора и вектора напряжения сети приводит к появлению больших пусковых токов, достигающих по амплитуде 160 А, что более чем в три раза превышает номинальный ток.

Результаты моделирования токов в обмотке статора двигателя упрощённой модели без компенсации представлены на рисунке 11.

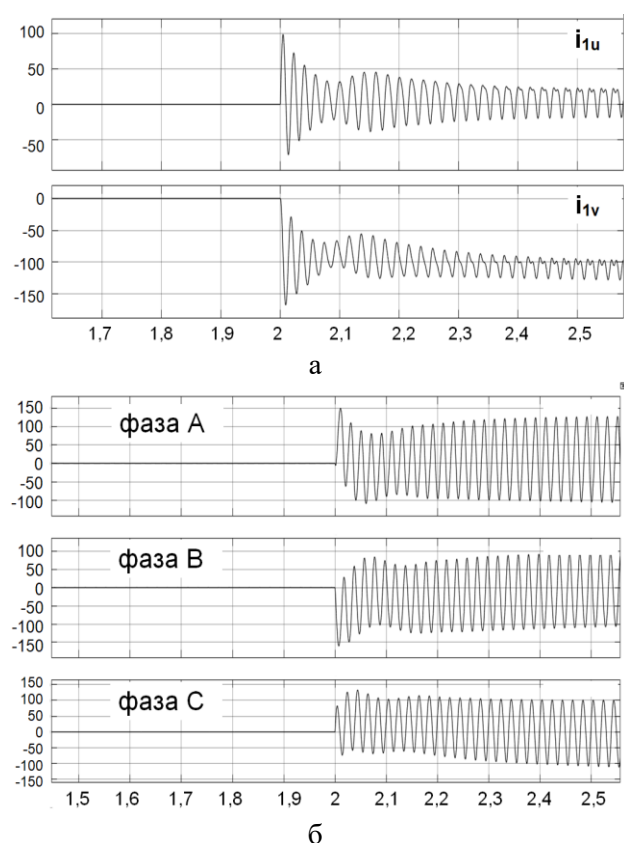


Рис.11. Ток статора:

- а) вектор тока в неподвижной системе координат (u; v) без компенсации;
б) трехфазный ток в модели без компенсации.

Результаты моделирования для всех вышеперечисленных режимов сведены в таблицу 1.

Таблица 1. Результаты моделирования

Модель/ режим	Полученные результаты			
	$\bar{E}_{1max}$, В	α , рад	$ \delta $, В	I_{1m} , А
Точная синхронизация	8500	0,7853	0,015	0,00035
Ошибка в задании R_2 , 30%	8500	0,7854	2,5	0,7
Ошибка в задании L_m , 15%	10400	0,9	2500	90
Ошибка в задании R_2 и L_m , $L_m = L_2$, $R_2 = 0$	12100	0,94	4400	158
Упрощённая без компенсации	12500	0,95	4600	160

Заключение

Как показывают результаты моделирования наименьший (практически нулевой по сравнению с номинальным) пусковой ток в обмотке статора АДФР при подключении к сети питания возникают когда выполнены заданные условия синхронизации. Внесение с помощью блока оценивания параметров погрешностей до 30% в задание величины активного сопротивления роторной обмотки влияет на систему незначительно, и подключение обмотки статора к сети происходит с током значительно меньшим номинального. Самые неприемлемые значения пусковых токов были получены при формировании напряжения подводимого к обмоткам ротора без учёта параметров самого ротора, когда внесена погрешность и по R_2 и L_m . Значения пусковых токов в этом случае близки к параметрам упрощённой модели без компенсации управляющих воздействий, и в 3,13 раза превышают номинальный ток обмотки статора АДФР.

Список литературы

- Лезнов, Б. С. Энергосбережение и регулируемый привод в насосных и воздушных установках / Б. С. Лезнов. – М. : Энергоатомиздат, 2006. – 360 с. - ISBN 5-283-00806-1.
- Кайгородов, А. В. Преобразователи частоты для высоковольтных асинхронных электроприводов / А. В. Кайгородов, С. С. Дзюбан, О. А. Киселева // Прикладные задачи электромеханики, энергетики, электроники : Труды Всероссийской студенческой научно-технической конференции, Воронеж, 14–15 мая 2018 года. – Воронеж: Во-

- ронезский государственный технический университет, 2018. – С. 245-247.
3. Завьялов, В. М. Перспективы использования асинхронного двигателя с фазным ротором в режиме машины двойного питания в высоковольтном приводе / В. М. Завьялов, Ю. А. Майорова // Повышение эффективности эксплуатации электромеханических преобразователей энергии в промышленности и на транспорте : Материалы X всероссийской научно-технической конференции с международным участием, посвященной 120-летию со дня рождения заслуженного деятеля науки и техники РСФСР, д.т.н., профессора М.Ф. Карасева и 80-летию со дня образования кафедры "Электрические машины и общая электротехника", Омск, 05–06 декабря 2023 года. – Омск: Омский государственный университет путей сообщения, 2023. – С. 325-331.
 4. Поползин, И. Ю. Обзор способов управления скоростью асинхронных двигателей и преимущества машины двойного питания / И. Ю. Поползин, А. В. Дроздова // ИННОВАЦИОННОЕ РАЗВИТИЕ науки и ОБРАЗОВАНИЯ : сборник статей Международной научно-практической конференции. В 2 частях, Пенза, 15 февраля 2018 года. Том Часть 1. – Пенза: МЦНС «Наука и Просвещение», 2018. – С. 136-139. – EDN VYONED.
 5. Ляпин, А. С. Модельное исследование машины двойного питания с токовым управлением / А. С. Ляпин // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2016. – Т. 16, № 4. – С. 731-737. – DOI 10.17586/2226-1494-2016-16-4-731-737. – EDN WHJVOB.
 6. Копылов, И. П. Математическое моделирование электрических машин: учеб. для вузов / И.П. Копылов. – 3-е изд., перераб. и доп. – Москва: Высш. шк., 2001. – 327 с. – ISBN 9781119682639.
 7. Самосейко, В. Ф. Алгоритм векторного управления асинхронным электроприводом с оценкой сопротивления ротора / В. Ф. Самосейко, В. О. Гуськов // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова. – 2021. – Т. 13, № 3. – С. 419-429. – DOI 10.21821/2309-5180-2021-13-3-419-429.
 8. Вопросы теории и проектирования электрических машин. Параметры и характеристики электрических машин в статических и динамических режимах: сборник научных трудов / Ульяновский гос. техн. ун-т. – Ульяновск : Ульяновский государственный технический университет, 2013. – 236 с. – ISBN 978-5-9795-1189-4.
 9. Усольцев, А. А. Определение параметров модели асинхронного двигателя по справочным данным / А. А. Усольцев, Д. В. Лукичев // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – 2008. – Т. 51, № 10. – С. 35-41. [Energy Saving and Variable Drive in Pumping and Blowing Systems]. Moscow, Energoatomizdat, 2006, 360 p.
 2. Kaygorodov A.V., Dzyuban S.S., Kiseleva O.A. Frequency converters for high-voltage asynchronous electric drives. *Trudy Vserossiyskoy studencheskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Proceedings of the All-Russian Student Scientific and Technical Conference], Voronezh, Voronezh State Technical University, 2018, pp. 245-247.
 3. Zav'yalov V.M., Mayorova Yu.A. Prospects for using an asynchronous motor with a wound rotor in dual-power machine mode in a high-voltage drive. *Materialy X vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem, posvyashchennoy 120-letiyu so dnya rozhdeniya zaslužennogo deyatelya nauki i tekhniki RSFSR, d.t.n., professora M.F. Karaseva i 80-letiyu so dnya obrazovaniya kafedry "Elektricheskie mashiny i obshchaya elektrotekhnika"* Increasing the operating efficiency of electromechanical energy converters in industry and transport, Omsk, Omsk State Transport University, 2023, pp. 325-331/
 4. Popolzin I.Yu., Drozdova A.V. Review of speed control methods for asynchronous motors and advantages of a dual-fed machine. Innovative development of science and education. *Sbornik statey Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii*. [Collection of articles of the International Scientific and Practical Conference], Penza, ICNS "Science and Enlightenment", 2018, pp. 136-139.
 5. A. S. Lyapin. Model Study of Current Controlled Dual Fed Machine. *Nauchno-tekhnicheskiiy vestnik informatsionnykh tekhnologiy, mekhaniki i optiki*. 2016. vol. 16, no. 4, pp. 731-737.
 6. I. P. Kopylov. *Mathematical modeling of electrical machines*. Moscow: Higher. school, 2001. 327 p.
 7. V.F. Samoseyko, V.O. Gus'kov. Vector control algorithm for an asynchronous electric drive with estimation of rotor resistance. *Bulletin of the State University of Sea and River Fleet named after. Admiral S.O. Makarova*. 2021. Vol. 13, no. 3. pp. 419-429.
 8. Questions of theory and design of electrical machines. Parameters and characteristics of electrical machines in static and dynamic modes. *Sbornik nauchnykh trudov* [Collection of scientific works], Ul'yanovsk, Ul'yanovsk State Technical University, 2013. p. 236
 9. A.A. Usoltsev, D.V. Lukichev. Determining the parameters of an asynchronous motor model using reference data. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Priborostroenie*. 2008. Vol. 51, no. 10. pp. 35-41.

References

1. Leznov B.S. *Energoberezhenie i reguliruemyy privod v nasosnykh i vozdukhoduvnykh ustanovkakh*

УДК 621.396.1

Разработка виртуальной лабораторной работы «Исследование двухкаскадного усилителя переменного тока с обратной связью»

А.А. Скидан¹, В.А. Шадрина¹

ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», ИЯЭиП, ул. Курчатова, 7,
г. Севастополь, 299015, Россия, a.a.skidan@mail.sevsu.ru

Статья поступила 12.10.2024 г.; после доработки 18.11.2024 г.

Аннотация

В данной статье представлено описание виртуальной лабораторной работы, посвященной исследованию двухкаскадного усилителя переменного тока с обратной связью. Работа позволяет определить амплитудные и амплитудно-частотные характеристики усилителя как с использованием обратной связи, так и без. Исследование проводится с помощью программного пакета «Electronics Workbench» и может быть выполнено студентами самостоятельно на компьютере, что особенно актуально в условиях отсутствия лабораторного оборудования, например, при дистанционном обучении.

Ключевые слова: двухкаскадный усилитель, обратная связь, переменный ток, характеристики.

Development of a virtual laboratory work «Research of a two-stage AC amplifier with feedback»

A.A. Skidan, V.A. Shadrina

Sevastopol state university, INEaI, Kurchatova st., Sevastopol, 299015, Russia, a.a.skidan@mail.sevsu.ru

Received 12.10.2024 y.; received in final form 18.11.2024 y.

Abstract

This article describes a virtual laboratory work devoted to the study of a two-stage AC amplifier with feedback. The work makes it possible to determine the amplitude and amplitude-frequency characteristics of the amplifier both using feedback and without. The research is carried out using the «Electronics Workbench» software package and can be performed by students independently on a computer, which is especially important in the absence of laboratory equipment, for example, in distance learning.

Key words: two-stage amplifier, feedback, alternating current, characteristics.

Введение

Присущим атрибутом учебного процесса при изучении технических дисциплин является лабораторный практикум, задачей которого является формирование у студентов практических навыков работы, таких как умение работать с принципом устройства оборудования, получать и обрабатывать экспериментальные данные, анализировать полученные результаты и сравнивать с опубликованными данными. Основное направление информатизации в учебных заведениях является распространение различных электронных

видов обучения: e-learning (сокращение от electronic learning) - система электронного обучения, главной особенностью которой является максимальный учет потребностей пользователей[1]. В России в качестве аналогов e-learning принято применять такие понятия, как дистанционное обучение, сетевое обучение, виртуальное обучение и т.д.

С развитием компьютерных технологий обучения все больше дискутируется вопрос о необходимости создания виртуальных лабораторных работ и частичном или полном переводе практикумов из лабораторий в компьютерные

классы.

Постановка задачи

Авторами данной работы предложена разработка виртуальной лабораторной работы "Исследование двухкаскадного усилителя переменного тока с обратной связью" с целью создания интерактивной образовательной платформы, которая позволит студентам и специалистам в области электроники проводить исследование работы двухкаскадного усилителя переменного тока с обратной связью. Схема для исследования разработана с помощью пакета прикладных инструментов программы «Electronics Workbench»[2].

Описание исследования

Усилителями называют устройства, предназначенные для усиления электрических сигналов. Непосредственно усиление сигналов осуществляется усилительными элементами за счет электроэнергии, потребляемой от источников питания. Свойства усилителей характеризуют рядом эксплуатационных и качественных показателей. К эксплуатационным показателям относятся коэффициенты усиления, чувствительность, мощность на выходе и коэффициент полезного действия. Качественными показателями работы усилителя являются диапазон усиливаемых частот, вносимые усилителем искажения, уровень помех и т.д.



Рис. 1. Структурная схема многокаскадного усилителя.

Структурная схема на рис. 1 показывает принцип работы усилителя. В каскадах предварительного усиления от каскада к каскаду происходит повышение уровня сигнала до величины, при которой выходной каскад создает в нагрузке заданную выходную мощность. В многокаскадных усилителях выходной сигнал предыдущего каскада является входным для последующего.

Усилитель работает следующим образом (рис. 2). Входной сигнал $\sim u_{ВХ}$ поступает на делитель переменного напряжения, состоящий из конденсатора C_1 и резистора R_2 . Как мы видим, этот резистор является нижним плечом двух делителей напряжения: постоянного тока (от E_K) и

переменного (от $u_{ВХ}$). Следовательно, возникающее на нем падение напряжения определяется токами, создаваемыми этими источниками. Поскольку ток делителя смещения I_D течет всегда в одном направлении (от плюса E_K к его минусу), а направление входного тока $i_{ВХ}$ определяется фазой входного напряжения $u_{ВХ}$ и дважды изменяется за период. Таким образом, сигнал усиливается поэтапно.

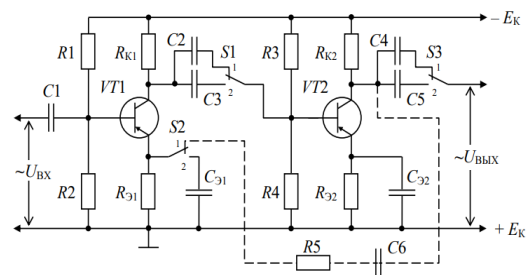


Рис. 2. Схема транзисторного усилителя с RC – связью.

Основным преимуществом RC-усилителей является отсутствие дрейфа нуля — конденсаторы не пропускают постоянную составляющую.

Недостаток таких усилителей заключается в ограниченности частотного диапазона, что постепенно способствует сокращению их области применения.

В лабораторной работе исследуется усилитель с RC – связью. Далее представлена схема на рис. 3 для исследования усилителя с использованием программы Electronics Workbench.

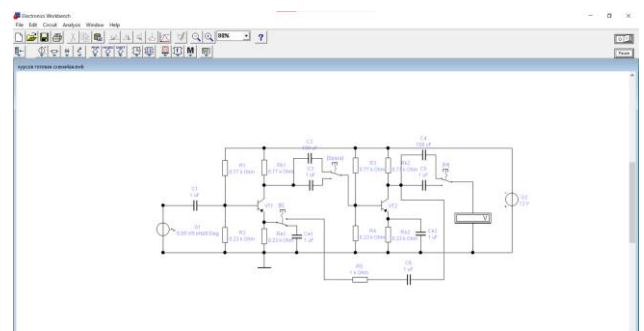


Рис. 3. Схема для исследования транзисторного усилителя с RC – связью с использованием программы Electronics Workbench.

Electronics Workbench (EWB) - система схемотехнического моделирования, предназначенная для моделирования и анализа электрических схем. Программа Electronics Workbench позволяет моделировать аналоговые, цифровые и цифро-аналоговые схемы большой степени

сложности [3]. Имеющиеся в программе библиотеки включают в себя большой набор широко распространенных электронных компонентов.

В состав схемы виртуальной лабораторной работы входят:

- VT_1 – транзистор p-n-p типа;
- VT_2 – транзистор p-n-p типа;
- G_1 – генератор напряжения входного сигнала;
- G_2 – источник питания цепи;
- V – вольтметр для измерения напряжения на выходе усилителя;
- R_2, C_1 – делитель переменного напряжения, состоящий из конденсатора C_1 и резистора R_2 ;
- W – переключение измеряемого напряжения на вольтметре на выходе;
- E – переключатель обратной связи;
- R_1 и R_2, R_3 и R_4 – делители напряжения;
- R_{K1}, R_{K2} – резисторы нагрузки;
- $C_1 \dots C_5$ – разделительные конденсаторы;
- $R_{Э1}, R_{Э2}$ – резисторы цепи эмиттера для стабилизации точки покоя при повышении температуры;
- $C_{Э1}, C_{Э2}$ – шунтирующие конденсаторы для устранения отрицательной обратной связи по переменному току;
- **Space** – переключение конденсатора на каскаде.

Настройка схемы виртуальной лабораторной работы имеет особенности:

1. Лабораторная работа проводится при английской раскладке клавиатуры;
2. Включение и отключение схемы производится переключателем «O – I» в правом верхнем углу экрана;
3. Переключатели **E**, **W**, **Space** переключаются клавишами **E**, **W**, **Space** соответственно;
4. Изменение подаваемого напряжения и частота изменяются с помощью двойного клика левой кнопки мыши на генераторе G_1 ;
5. Амплитудная и амплитудно-частотная характеристики представляют собой зависимость $U_{ВЫХ} = f(U_{ВХ})$ при $f_{ВХ} = \text{const}$ и $U_{ВЫХ} = f(f_{ВХ})$ при $U_{ВХ} = \text{const}$ соответственно.

Существуют три основных способа связи между каскадами в многокаскадном усилителе: связь через разделительные конденсаторы, или RC-связь, непосредственная или гальваническая связь и связь с помощью трансформаторов (трансформаторная связь). Наибольшее распространение в схемах усилителей переменного тока получила RC-связь. Если усилительное устройство состоит из нескольких последова-

тельно включенных каскадов, то его общий коэффициент усиления равен произведению коэффициентов усиления отдельных каскадов

$$K = K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot \dots \cdot K_n, \quad (1)$$

где n – число каскадов. Выходная мощность усилителя зависит от напряжения на его входе. Номинальное входное напряжение $U_{ВХ}$, при котором усилитель отдает в нагрузку заданную выходную мощность, называют чувствительностью усилителя. Номинальная выходная мощность, отдаваемая усилителем в нагрузку, P_H при синусоидальной форме выходного напряжения и тока равна:

$$P_{ВЫХ} = I_{ВЫХ} \cdot U_{ВЫХ} = I_{ВЫХ}^2 \cdot R_H = \frac{U_{ВЫХ}^2}{R_H}, \quad (2)$$

где $U_{ВЫХ}$, $I_{ВЫХ}$ – действующие значения напряжения и тока на резисторе нагрузки R_H .

Работа усилителя описывается двумя характеристиками: амплитудной и частотной (ее часто называют амплитудно-частотной), приведенными на рис.4.

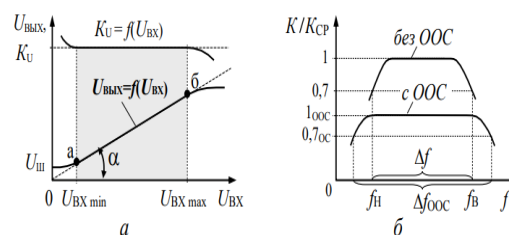


Рис. 4. Характеристики усилителя: а – амплитудная; б – амплитудно-частотная.

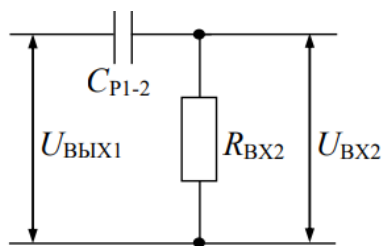
Амплитудная характеристика усилителя представляет собой зависимость выходного напряжения от входного $U_{ВЫХ} = f(U_{ВХ})$ при $f_{ВХ} = \text{const}$ (рис. 4, а). Иногда определяют амплитудную характеристику как зависимость коэффициента усиления по напряжению от входного сигнала постоянной

частоты $K_U = f(f_{ВХ})$. [4] Обе эти зависимости приведены на рис.4, а.

В рабочем диапазоне амплитуд входного сигнала $U_{ВХ \text{ МАКС}} - U_{ВХ \text{ МИН}}$ амплитудная характеристика имеет форму практически прямой линии (участок а-б), что свидетельствует о линейной зависимости $U_{ВЫХ} = f(U_{ВХ})$, а угол ее наклона α определяется значением коэффициента усиления усилителя на данной частоте ($\text{tg} \alpha = \Delta U_{ВЫХ}$

$/\Delta U_{BX})$.

Частотная характеристика усилителя представляет собой зависимость коэффициента усиления от частоты усиливаемых колебаний $K_U = f(f)$ при $U_{BX} = \text{const}$. Графическое изображение частотной характеристики усилителя с RC-связью показано на рис. 4, б. Как видно из графика, коэффициент усиления не остается постоянным на разных частотах, а имеет явно выраженный “завал” (снижение) на низких и высоких частотах. Это свойство усилителя обуславливают частотные искажения – отклонение формы выходного сигнала от входного с изменением его частоты. В области средних частот коэффициент усиления практически не зависит от частоты. Снижение коэффициента усиления на низких и высоких частотах связано с влиянием на сигнал реактивных элементов, входящих в состав усилителя и объясняется следующим [5]. С переходом в область низких частот заметно увеличивается падение напряжения на разделительных конденсаторах межкаскадной связи (конденсатор C_{P1-2}). Это вызвано тем, что с уменьшением частоты емкостное сопротивление конденсатора увеличивается, как видно из формулы:



$$X_c = \frac{1}{2\pi f C}, \quad (3)$$

где X_c – емкостное сопротивление конденсатора;

f – частота входного сигнала;

C – емкость разделительного конденсатора.

Следовательно, на входном сопротивлении R_{BX2} следующего каскада (см. рис. справа), составляющем с конденсатором связи делитель напряжения, создастся меньшее входное напряжение (вспомнить принцип действия делителя напряжения), что, естественно, приведет к уменьшению $U_{ВЫХ}$ каскада и коэффициента усиления.

Коэффициент усиления (по напряжению) усилителя, охваченного ООС, определяется выражением:

$$K^{ООС} = \frac{K}{1 + \beta K}, \quad (4)$$

из которого видно, что коэффициент усиления усилителя, охваченного отрицательной обратной связью КООС, в $1/(1+\beta K)$ меньше коэффициента усиления самого усилителя K . Из выражения, таким образом, обнаруживается влияние ООС на характеристики усилителя. Так, при построении амплитудной характеристики усилителя с ООС, каждому значению U_{BX} будет соответствовать напряжение $U_{ВЫХ}$ меньшее, чем при отсутствии ООС. Следовательно, экспериментальные точки и сама кривая пройдут ниже характеристики ЭУ без ООС, а динамический диапазон усилителя расширится. Изменения частотной характеристики при введении ООС обусловлены следующим. В средней области частот, где выходное напряжение является наибольшим, напряжение обратной связи, определяемое выражением $U_{OC} = \beta \cdot U_{ВЫХ}$, оказывается также наибольшим. Это приводит к значительному спаду усиления и результирующего выходного напряжения на средних частотах. В области нижних и верхних частот действие ООС сказывается слабее вследствие меньшего значения выходного напряжения и соответственно меньшей величины U_{OC} . Поэтому влияние отрицательной обратной связи на средних частотах сказывается сильнее, чем на крайних частотах. Вследствие этого частотная характеристика усилителя с ООС (см. рис. 4, б) располагается ниже кривой ЧХ без ООС и становится более прямолинейной (сглаженной). В том случае, когда на частотной характеристике усилителя имеется локальный подъем, то есть возрастает коэффициент усиления, действие ООС носит обратный характер и также вызывает спрямление частотной характеристики [6]. Совершенно очевидно, что спрямление формы частотной характеристики усилителя, вызванное действием ООС, сопровождается расширением полосы пропускания (то есть $\Delta f_{ООС} > \Delta f$, где $\Delta f_{ООС} = f_{В} \text{ ООС} - f_{Н} \text{ ООС}$) и, следовательно, уменьшением частотных искажений.

Заключение

В данной статье представлена разработка виртуальной лабораторной работы «Исследование двухкаскадного усилителя переменного тока с обратной связью», разработана принципиальная схема для исследования двухкаскадного усилителя в программной среде Electronics Workbench, представлена методика определения амплитудной и амплитудно-частотной характеристик, показаны формулы для определения основных параметров усилителя. Представленная

виртуальная лабораторная работа позволяет студентам получить практический навык работы с реальными устройствами, находясь за пределами учебного заведения. Это улучшает качество образования, благодаря тому, что появляется больше времени на изучение теории в образовательном учреждении.

Список литературы

1. Е., Turuta Интегральные микросхемы - усилители мощности НЧ/Integrated Circuits - Power Audio Amplifier / Е. Turuta, L. Danci. - М.: Virginia, 2018.
2. Быковский Ю.М Компьютерный конструктор для исследования электронных элементов систем автоматики: Руководство для пользователей. – Симферополь: “Таврида”, 1998. – 168 с.: ил.
3. Коротков, А. С. Интегральные (микроэлектронные) радиоприемные устройства систем связи – обзор [Текст] / А.С. Коротков // Микроэлектроника, 2006. – Том. 35, № 4. – С. 285-305
4. Кирюха В.В. Измерительные преобразователи в системе автоматики. Теория, устройство, применение (лекционный курс). Владивосток, Дальрыбвтуз, 2007. – 216 с.
5. Колосов С.П. и др. Элементы автоматики. Л.: Машиностроение, 1987. – 512 с.
6. Королев Г.В. Электронные устройства автоматики. Учебное пособие. М.: Высшая школа, 1991. – 265с.

References

1. Е., Turuta Integrated circuits - low-frequency power amplifiers/Integrated Circuits - Power Audio Amplifier / Е. Turuta, L. Dance. - М.: Virginia, 2018.
2. Bykovsky Yu.M. Computer designer for the study of electronic elements of automation systems: A user's guide. – Simferopol: “Tavrida”, 1998. – 168 p.: ill.
3. Korotkov, A. S. Integrated (microelectronic) radio receivers of communication systems – review [Text] / A.S. Korotkov // Microelectronics, 2006. – Vol. 35, No. 4. – pp. 285-305 4.
4. Kiriukha V.V. Measuring transducers in the automation system. Theory, device, application (lecture course). Vladivostok, Dalrybvtuz, 2007. – 216 p .
5. Kolosov S.P. et al. Elements of automation. L.: Mechanical Engineering, 1987. – 512 p.
6. Korolev G.V. Electronic automation devices. Textbook. M.: Higher School, 1991. – 265s.

УДК 534

Колебания связанных осцилляторов

А.Г. Рипп, О.В. Матузаева, С.А. Чернявская

ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», Университетская-33, г. Севастополь, 299053, Россия, ripp1946@mail.ru, olga-matuzaeva@mail.ru, svalch74@mail.ru

Статья поступила 20.11.2024 г.; после доработки 21.11.2024 г.

Аннотация

Целью данной работы является исследование колебаний систем, у которых число степеней свободы больше единицы. Для достижения поставленной цели рассмотрено достаточно подробное решение задачи о связанных колебаниях. Гипотеза исследования состоит в предположении, что тесное взаимодействие физики и высшей математики в вузе при преподавании этих предметов может улучшить качество подготовки инженеров технических вузов. Для подтверждения гипотезы поставленная задача решена с использованием методов линейной алгебры. Результат решения интересен и важен – как с точки зрения физического явления, так и с точки зрения того, как анализировать непростые математические выкладки.

Ключевые слова: Осцилляторы, колебание, дифференциальные уравнения, нормальные колебания, независимые гармонические осцилляторы, нормальные моды, уравнение колебаний.

Oscillations of coupled oscillators

A.G. Ripp, O.V. Matuzaeva, S.A. Chernyavskaya

Sevastopol state University, Sevastopol, 299053, Russia, ripp1946@mail.ru, olga-matuzaeva@mail.ru, svalch74@mail.ru

Received 20.11.2024 y.; received in final form 21.11.2024 y.

Annotation

The purpose of this work is to study the oscillations of systems in which the number of degrees of freedom is greater than one. In order to achieve this goal, a sufficiently detailed solution of the problem of related fluctuations was considered. The hypothesis of the study is the assumption that the close interaction of physics and higher mathematics in higher education when teaching these subjects can improve the quality of training of engineers of technical universities. To confirm the hypothesis, linear algebra methods were chosen to solve the problem. The result of the solution is interesting and important – both from the point of view of a physical phenomenon, and from the point of view of how to analyze sometimes difficult mathematical calculations.

Keywords: Oscillators, oscillation, differential equations, normal oscillations, independent harmonic oscillators, normal modes, oscillation equation.

Введение

В учебном процессе очень важен принцип преемственности. Он состоит в том, что при изучении каждой дисциплины студентам необходимо использовать знания, полученные ими в предшествующих дисциплинах. В частности, это проявляется во взаимодействии преподавателей физики и математики. Правда, и здесь

ещё используются не все возможности.

Например, математики традиционно преподают студентам первого курса линейную алгебру, но физики её практически не используют. И тем не менее, есть такие важные задачи физики, в которых применение линейной алгебры очень эффективно. Одна из таких задач – исследование колебаний систем, у которых число степеней свободы больше единицы. Эта задача

особенно интересна с точки зрения применения в других прикладных дисциплинах. Так при изучении электротехнических комплексов рассмотренная задача может помочь понять, как колебания связанных осцилляторов влияют на работу энергетических систем в целом.

В настоящей статье рассматривается решение задачи о связанных колебаниях – оно показывает пример применения аппарата линейной алгебры.

Постановка задачи

Изучаемый объект – это два связанных пружинных маятника, показанные на рисунке 1.

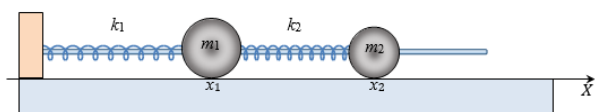


Рис. 1. Связанные пружинные маятники

Массы маятников равны m_1 и m_2 , жёсткость пружинок – k_1 и k_2 , их собственные длины (длины в недеформированном состоянии) – ℓ_1 и ℓ_2 .

Требуется выяснить характер колебаний шариков $x_1(t)$ и $x_2(t)$. Ясно, эти колебания не гармонические, однако оказывается, что системе всё равно можно считать системой двух гармонических осцилляторов.

Дифференциальные уравнения движения осцилляторов

Примем для определённости, что в момент времени t левая пружинка растянута, а вторая сжата. Применение Второго закона Ньютона даёт:

$$\ddot{x}_1 = \frac{F_{11x} + F_{21x}}{m_1}, \quad \ddot{x}_2 = \frac{F_{22x}}{m_2}. \quad (1)$$

В соответствии с законом Гука,

$$\begin{aligned} F_{11x} &= -k_1(x_1 - \ell_1); \\ F_{21x} &= -F_{22x} = k_1(x_2 - x_1 - \ell_2) \end{aligned} \quad (2)$$

Подстановка (2) в (1) даёт следующую систему уравнений:

$$\begin{cases} \ddot{x}_1 = -\frac{k_1 + k_2}{m_1}x_1 + \frac{k_2}{m_1}x_2 + \frac{k_1\ell_1 - k_2\ell_2}{m_1}; \\ \ddot{x}_2 = \frac{k_2}{m_2}x_1 - \frac{k_2}{m_2}x_2 + \frac{k_2\ell_2}{m_2} \end{cases} \quad (3)$$

Систему (3) можно упростить, введя обозначения

$$\begin{cases} a_{11} = \frac{k_1 + k_2}{m_1}; & a_{21} = -\frac{k_2}{m_1}; \\ a_{21} = -\frac{k_2}{m_2}; & a_{22} = -a_{21} = \frac{k_2}{m_2}; \\ C_1 = \frac{k_1\ell_1 - k_2\ell_2}{m_1}; & C_2 = \frac{k_2\ell_2}{m_2}. \end{cases} \quad (4)$$

Теперь система (3) имеет вид:

$$\begin{cases} \ddot{x}_1 + a_{11}x_1 + a_{12}x_2 = C_1; \\ \ddot{x}_2 + a_{21}x_1 + a_{22}x_2 = C_2. \end{cases} \quad (5)$$

Эту систему удобно записать в виде одного векторного уравнения:

$$\ddot{x} + Ax = C \quad (6)$$

где x и c – это векторы, A – матрица:

$$x = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix}, \quad C = \begin{pmatrix} c_1 \\ c_2 \end{pmatrix}, \quad A = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{pmatrix}.$$

Систему (5) можно свести к независимым уравнениям при условии, что $a_{12} = 0$ и $a_{21} = 0$, которое означает, что матрица A диагональная. Добиться этого можно, перейдя от (x_1, x_2) к переменным (z_1, z_2) , линейно связанным с (x_1, x_2) .

Замена переменных

Линейное преобразование означает переход от вектора x к вектору z :

$$x = Uz; \quad z = U^{-1}x;$$

$$UU^{-1} = U^{-1}U = I; \quad (7)$$

Здесь $I = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$;

U – не зависящая от времени матрица. Подстановка (7) в (6) даёт:

$$U\ddot{z} + AUz = C.$$

Умножим слева это уравнение на матрицу U^{-1} , обратную матрице U :

$$\ddot{z} + U^{-1}AUz = U^{-1}C. \quad (8)$$

Введём обозначения

$$A' = U^{-1}AU; \quad \alpha = U^{-1}C.$$

В результате (8) приводится к виду:

$$\ddot{z} + A'z = \alpha. \quad (9)$$

Матрицу A' можно сделать диагональной подбором матрицы U .

Нормальные осцилляторы

Рассмотрим решение уравнение (9) при условии, что A' диагональная:

$$A' = \begin{pmatrix} \lambda_1 & 0 \\ 0 & \lambda_2 \end{pmatrix},$$

где λ_1 и λ_2 – собственные числа (СЧ) матрицы A . При этом уравнение (9) можно записать в виде системы двух независимых уравнений:

$$\begin{cases} \ddot{z}_1 + \omega_1^2 z_1 = \alpha_1 \\ \ddot{z}_2 + \omega_2^2 z_2 = \alpha_2. \end{cases} \quad \begin{cases} \omega_1^2 = \lambda_1, \\ \omega_2^2 = \lambda_2. \end{cases} \quad (10)$$

Решением этих уравнений являются функции:

$$z_i(t) = A_i \cos(\omega_i t + \varphi_i) + B_i. \quad (11)$$

Смещения косинусоид B_i можно найти, подставив (11) в (10):

$$B_i = \frac{\alpha_i}{\omega_i^2}.$$

Итак, нам удалось найти две независимые гармонические функции состояния $z_1(t)$ и $z_2(t)$. Их называют *нормальными* осцилляторами, а их частоты ω_1 и ω_2 – *нормальными модами*. Нормальные осцилляторы – это абстракция, однако она позволяет представить сложную систему состоящей из двух простых. Рассмотренный метод пригоден и для системы с s степенями свободы. Полезным этот подход оказался, например, в теории теплоёмкости Дебая.

Нахождение нормальных мод

Как следует из (10), нормальные моды связаны с СЧ λ_1 и λ_2 матрицы A :

$$\omega_1 = \sqrt{\lambda_1}, \quad \omega_2 = \sqrt{\lambda_2}.$$

Для нахождения СЧ в линейной алгебре решают уравнение $\det(A - I\lambda) = 0$.

Будем считать для простоты, что $l_1 = l_2 = l$, и введём обозначения:

$$p = \frac{m_2}{m_1}, \quad r = \frac{k_1}{k_2}, \quad \omega = \sqrt{\frac{k_2}{m_2}}$$

При этом матрицу A и вектор C можно выразить в виде:

$$A = \omega_0^2 E, \quad E = \begin{pmatrix} p(r+1) & -p \\ -1 & 1 \end{pmatrix},$$

$$C = l\omega_0^2 c, \quad c = \begin{pmatrix} p(r-1) \\ 1 \end{pmatrix}.$$

Матрица E и вектор c безразмерные, а СЧ матриц A и E отличаются только множителем ω_0^2 :

$$\lambda_1 = \omega_0^2 \mu_1, \quad \lambda_2 = \omega_0^2 \mu_2. \quad (12)$$

Решение уравнения на СЧ матрицы E даёт:

$$\mu_1 = \frac{[p(r+1)+1] + \sqrt{D}}{2},$$

$$\mu_2 = \frac{[p(r+1)+1] - \sqrt{D}}{2},$$

$$D = [p(r+1)+1]^2 - 4pr.$$

Получение выражений для нормальных мод – главный результат настоящей статьи. Интересно ещё найти уравнения колебаний реальных осцилляторов $x_1(t)$ и $x_2(t)$. Об этом мы планируем написать в следующей статье.

Заключение

Изучение колебаний связанных осцилляторов позволяет не только понять основные законы динамики системы и предсказать ее поведение в различных условиях, но и оптимизировать их работу для достижения определенных целей.

Использование аппарата линейной алгебры позволяет наглядно и компактно решить физическую задачу о колебаниях связанных осцилляторов, показать, что эти колебания можно свести к колебаниям независимых гармонических осцилляторов (нормальных осцилляторов) и получить выражения для частот колебаний (нормальных мод). Главную ценность решения авторы усматривают в эффектном сочетании двух разделов физики и математики: теории колебаний и линейной алгебры. А так же это помогает студентам технических вузов сформировать цельное представление о роли математики в физике при изучении прикладных задач.

Список литературы

1. Сивухин Д. В. Общий курс физики. Учеб, пособие: Том. III. Электричество. – М.: ФИЗМАТ-ЛИТ; Изд-во МФТИ, 2004. – 656 с.
2. Путилов К.А. Курс физики. Том I. – М., Физматгиз, 1963. – 560 с.
3. Стрелков С.П. Введение в теорию колебаний. – СПб., Изд-во «Лань». 2005. – 438 с.
4. Бабаков И.М. Теория колебаний. – М.: Наука, 1968. – 559 с.
5. Мигулин В.В., Медведев В.И., Мустель Е.Р., Парыгин В.Н. Основы теории колебаний. – М.: Наука, 1978. – 392 с.
6. Смирнов В. И. Курс высшей математики. Том III, часть 2. — М.: Наука, 1974. – 672 с.
7. Ильин В.А., Позняк Э.Г. Линейная алгебра. – М.: Наука, 1978. – 304 с.
8. Письменный Д.Т. Конспект лекций по высшей математике: полный курс. – 9 изд. – М.: Айрис-пресс, 2009. – 608 с.
9. Бугров Я.С., Никольский С.М. Высшая математика: Учеб. для вузов. Том 1 – М.: Дрофа, 2004. – 284 с.
10. Магазинников Л.И., Магазинникова А.Л. Линейная алгебра и аналитическая геометрия: Учебное пособие. – Томск: Томский государственный университет систем управления и ра-

диоэлектроники, 2010. – 176 с.

References

1. Sivukhin D. V. General course of physics. Textbook: Volume III. Electricity. – M.: FIZMATLIT; MIPT Publishing House, 2004. – 656 p .
2. Putilov K.A. Course of physics. Volume I. – M., Fizmatgiz, 1963. – 560 p.
3. Strelkov S.P. Introduction to the theory of oscillations. – St. Petersburg, Publishing house "Lan". 2005. – 438 p .
4. Babakov I.M. Theory of oscillations. – M.: Nauka, 1968. – 559 p .
5. Migulin V.V., Medvedev V.I., Mustel E.R., Parygin V.N. Fundamentals of the theory of oscillations. - M.: Nauka, 1978. – 392 p.
6. Smirnov V. I. Course of higher mathematics. Volume III, part 2. — Moscow: Nauka, 1974. – 672 p.
7. Ilyin V.A., Poznyak E.G. Linear algebra. – M.: Nauka, 1978. – 304 p.
8. Written D.T. Lecture notes on higher mathematics: a complete course. – 9th ed. – Moscow: Iris Press, 2009. - 608 p .
9. Bugrov Ya.S., Nikolsky S.M. Higher Mathematics: Studies for universities. Volume 1 – M.: Bustard, 2004. – 284 p.
10. Shopinnikov L.I., Shopinnikova A.L. Linear algebra and analytical geometry: A textbook. Tomsk: Tomsk State University of Control Systems and Radio

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ И ПРИКЛАДНАЯ ТЕПЛОТЕХНИКА

УДК 533.9.07

Исследование влияния режима работы электродугового реактора на процесс и продукт электродугового синтеза в системе «вольфрам-углерод»

А.И. Кокорина¹, Р.Д. Герасимов¹¹ Национальный исследовательский Томский политехнический университет, пр. Ленина 30, г. Томск, 634050, Россия, aik48@tpu.ru, rdg2@tpu.ru

Статья поступила 14.10.2024 г.; после доработки 16.10.2024 г.

Аннотация

В работе оценено влияние режимов работы электродугового реактора, а именно продолжительности поддержания дугового разряда и силы тока разрядного контура, при практически неизменном количестве подведенной энергии с целью определения наилучшего режима электродугового синтеза карбида вольфрама WC в открытой воздушной среде. Была установлена квадратичная зависимость скорости эрозии анода от силы тока и оценено влияние соотношения тока разрядного контура ко времени синтеза на количество эродировавшей массы, выявлено, что количество эродировавшей массы в большей степени зависит от силы тока, а не от времени синтеза. По данным рентгенофазового анализа образцов, полученных при различных параметрах синтеза, определен режим работы электродугового реактора, обеспечивающий наибольший выход карбида вольфрама WC в продукте синтеза.

Ключевые слова: безвакуумный электродуговой синтез, карбид вольфрама, плазма, электроэрозия, скорость эрозии, рентгенофазовый анализ

Investigation of the impact of the electric arc reactor's operation mode on the process and product of the synthesis in the «tungsten-carbon» system

A.I. Kokorina¹, R.D. Gerasimov¹¹ National Research Tomsk Polytechnic University, 30 Lenin Ave., Tomsk, 634050, Russia, aik48@tpu.ru, rdg2@tpu.ru

Received 14.10.2024 y.; received in final form 16.10.2024 y.

Abstract

The present work evaluates the influence of the reactor operating modes, the duration of maintaining arc discharge and the current strength of the discharge circuit, with an almost unchanged amount of supplied energy in order to determine the best mode of the electric arc synthesis of tungsten carbide WC in an open air environment. A quadratic dependence of the anode erosion rate on the current strength was established and the influence of the ratio of the discharge circuit current to the synthesis time on the amount of eroded mass was estimated; it was found that the amount of eroded mass depends to a greater extent on the current strength, rather than the synthesis time. Based on the X-ray phase analysis of the samples obtained with different synthesis parameters, the operating mode of the electric arc reactor was determined that provides the highest yield of tungsten carbide WC in the synthesis product.

Keywords: non-vacuum arc synthesis, tungsten carbide, plasma, electroerosion, erosion rate, X-Ray phase analysis

Введение

В данный момент существует потребность в керамике, характеризующейся высокой температурой плавления, высокой твердостью и износостойкостью, особенно в сфере обрабатывающей промышленности. Перспективным материалом в данной области является карбид вольфрама WC в силу таких свойств, как высокая температура плавления (~ 3000 K), износостойкость, высокая твердость (18 ГПа), а также высокая теплопроводность (84 Вт/(м·K)) и низкое удельное электрическое сопротивление (4,96-5,3 мкОм·см) [1-3]. Ввиду своих механических свойств WC распространен в качестве абразивного материала и в защитных покрытиях для режущих инструментов [2-6, 8], при этом он также может применяться в области электроники [6-7]. Согласно теоретическим исследованиям [9], каталитические свойства карбида вольфрама близки к свойствам металлов платиновой группы (Pt, Pd и т.д.). Сочетание каталитических свойств, стабильности в агрессивных щелочных и кислотных средах и коррозионной стойкости делает WC перспективным материалом для получения композитных электрокатализаторов, в которых он является носителем катализатора [10-11]. Данный подход снижает стоимость электрокатализа, энергию активации реакции и повышает активность катализатора.

Получение карбида вольфрама осуществляется множеством методов. Для получения покрытий из WC применяют химическое осаждение из паровой фазы [12] или воздействуют на поверхность вольфрама высокоинтенсивными ионными пучками водорода и углерода [13]. Методами карботермического восстановления [14] и обработкой потоками плазмы с последующей карбонизацией [15] можно получить карбид вольфрама из оксидов вольфрама. Также стоит отметить цементацию в вакуумной печи [16-17], так как данный метод широко распространен, в том числе и в промышленности.

Помимо вышеперечисленных подходов, также существует электродуговой метод [18]. В данной работе представлена модификация электродугового метода, в которой дуговой разряд инициируется в открытой воздушной среде. Отсутствие необходимости в вакуумном оборудовании и защитной газовой среде снижает энергоемкость синтеза и продолжительность рабочего цикла. В ранних работах научной группы была рассмотрена зависимость фазового состава продукта безвакуумного электродугового синтеза в

системе “вольфрам - углерод” от времени синтеза [19] и тока разрядного контура [20], однако не было изучено влияние режима синтеза (тока разрядного контура и времени синтеза) при практически неизменной введенной в систему энергии на процесс синтеза и его продукт, чему посвящена данная работа.

Материалы и методы

В качестве прекурсоров использовали технический углерод П 803 и вольфрамовый порошок марки ПВЧ (чистота 99,99%, размер частиц 1-5 мкм) в атомарном соотношении 1:1. Затем порошки перемалывали в планетарной шаровой мельнице Retsch PM 100 в течение 30 мин при частоте вращения 300 об/мин.

Для проведения экспериментальных исследований был использован электродуговой реактор постоянного тока с вертикальным расположением электродов (Рис. 1).

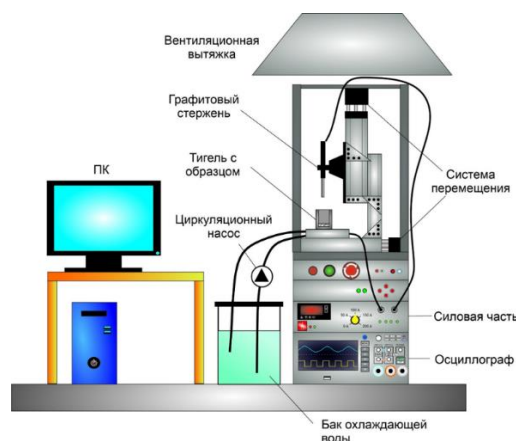


Рис. 1. Схема электродугового реактора.

Данный реактор включает в себя силовой источник питания, который позволяет генерировать электрическую дугу, с помощью которой производится нагрев смеси. Масса загрузки составила ~ 18 г. Синтез проводился по методике, представленной ранее [21].

Для соосного перемещения анода относительно катода используется автоматизированная система перемещения. После контакта электродов анод отводится на расстояние разрядного промежутка ($\sim 1-2$ мм) от дна тигля.

Также установка включает в себя осциллограф и системы охлаждения и вентиляции. В процессе синтеза цифровой осциллограф марки Rigol DS1052E регистрирует значения тока и напряжения, на основе которых была определена

введенная в систему энергия. Использование осциллографа позволяет оценить стабильность горения дуги и количество подведенной энергии. Система вентиляции позволяет избежать задымления и накопления продуктов горения графита и газов, которые могут генерироваться при протекании реакции в шихте. Для увеличения скорости отвода тепла от тигля после проведения опыта используется система охлаждения.

Запуск цикла синтеза осуществляется с помощью разработанного программного обеспечения после установки и обеспечения соосности электродов. Перед синтезом выбираются параметры: тип конфигурации, сила тока, время горения дуги.

Исследование продуктов синтеза проводилось на рентгеновском дифрактометре Shimadzu XRD 7000s ($\lambda=1,54060 \text{ \AA}$) с использованием базы данных PDF4+. Эталонные рентгеновские дифрактограммы строились в программной среде Search-Match по данным карточек базы данных PDF4+.

По данным рентгенофазового анализа также был проведен расчет массовой доли w_k каждой из идентифицируемых фаз методом корундовых чисел по формуле (1):

$$w_k = \frac{I_k^{max}/RIR_k}{\sum_i I_i^{max}/RIR_i} \quad (1)$$

где RIR (Reference Intensity Ratio) – корундовое число;

I_k^{max}, I_i^{max} – интенсивность самого высокого рефлекса на картине рентгеновской дифракции для k -ой и i -ой фазы соответственно.

Корундовые числа RIR были взяты из базы данных PDF4+.

Результаты и обсуждение

Синтез был проведен для четырех разных режимов работы электродугового реактора: 50 А и 360 с, 100 А и 180 с, 150 А и 120 с и 200 А и 90 с. По данным осциллографа введенная в систему энергия варьировалась от 105 до 111 Вт·ч. Равномерный прогрев исходной шихты зависит от роста катодного депозита на дне внутреннего тигля, поэтому важно рассмотреть зависимость эрозии анода от параметров синтеза (тока разрядного контура и времени синтеза).

Ранее было установлено [19], что изменение массы анода линейно зависит от времени синтеза. Процесс эрозии можно описать формулой 2:

$$W = v \cdot t \quad (2)$$

Где W – эродировавшая масса, г;

v – скорость эрозии, г/с;

t – время синтеза, с.

Скорость эрозии анода была определена как отношение разности масс анода до и после синтеза к времени синтеза. Изменение скорости эрозии в зависимости от величины тока разрядного контура отражено на Рис. 2.

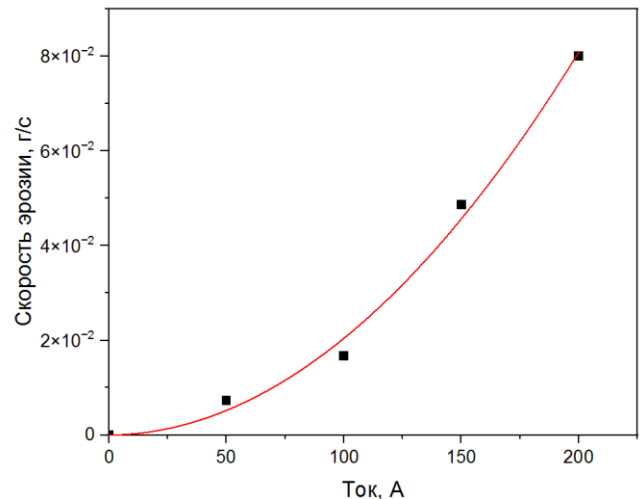


Рис. 2. Зависимость скорости эрозии анода от силы тока разрядного контура.

Была установлена квадратичная зависимость скорости эрозии анода от тока разрядного контура, что совпадает с данными, представленными в литературе [22], и может быть описано уравнением (3):

$$v(I) = 4,3 \cdot 10^{-6} I^2 + 2,3 \cdot 10^{-6} I \quad (3)$$

Данные на Рис. 3 позволяют оценить влияние параметров синтеза на эрозию анода.

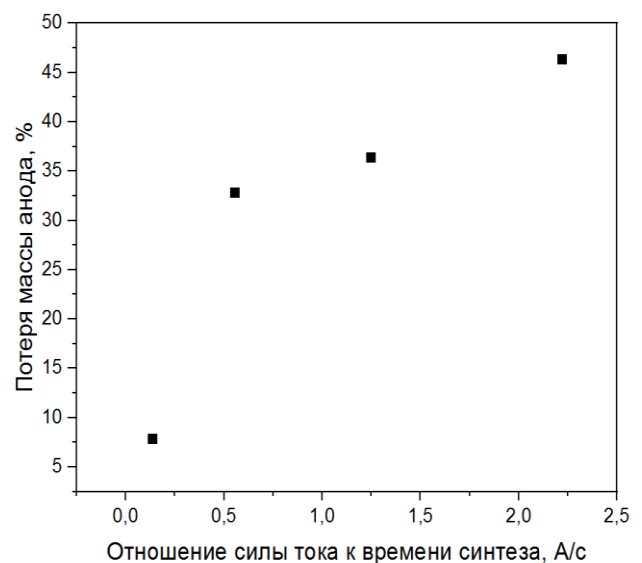


Рис. 3. Зависимость относительной потери массы анода от отношения силы тока и времени синтеза.

Определено, что, чем больше отношение тока ко времени синтеза, тем больше относительная потеря массы анода, то есть значение силы тока влияет на эрозию анода в большей степени, чем время синтеза.

Даже с учетом времени синтеза 360 с, при токе разрядного контура 50 А мощности дугового разряда недостаточно для равномерного прогрева исходной шихты. По данной причине был проведен рентгенофазовый анализ только для трех остальных режимов синтеза, результаты которого представлены на Рис. 4

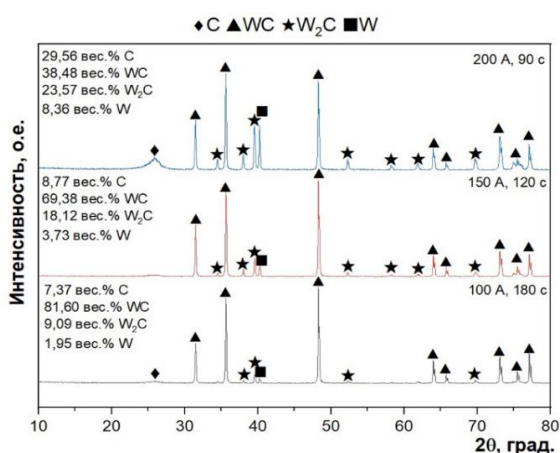


Рис. 4. Картины рентгеновской дифракции образцов, полученных при различных режимах работы электродугового реактора.

По данным на Рис. 4 видно, что при увеличении силы тока и снижении времени синтеза массовая доля WC снижается, что связано с недостатком времени для равномерного прогрева смеси исходных реагентов, о чем свидетельствует и увеличение содержания исходных реагентов в продукте синтеза. При этом также значительно возрастает доля карбида вольфрама W_2C , являющегося промежуточной фазой. Резкое увеличение доли графита в продукте синтеза в результате синтеза в режиме 200 А, 90 с является следствием интенсивной эрозии электродов в условиях высоких температур.

Заключение

В результате серии экспериментов было установлено, что различные режимы работы электродугового реактора влияют на процесс и продукт синтеза при практически неизменной введенной энергии. Наблюдается квадратичная зависимость скорости эрозии анода от силы тока разрядного контура. Было определено, что сила тока определяет количество эродировавшей

массы анода в большей степени, чем время синтеза.

Введенной в систему энергии ~ 6 Вт·ч/г достаточно для образования фазы WC. Уменьшение времени синтеза при росте силы тока приводит к неравномерному прогреву исходной смеси и увеличению доли графита в продукте в результате интенсивной эрозии электродов.

Таким образом, сочетание тока разрядного контура 100 А и времени синтеза 180 с, соответствующее 108 Вт·ч введенной в систему энергии, является наиболее подходящим режимом работы электродугового реактора, так как он обеспечивает равномерный прогрев исходной шихты, малое по сравнению с остальными режимами количество графита, поступившее в продукт синтеза в результате эрозии, а также наилучший по в сравнении с другими экспериментами фазовый состав (81,60 вес. % WC, 7,37 вес. % C (графит), 9,09 вес. % W_2C , 1,95 вес. % W).

Благодарности (Acknowledgements). Работа выполнена при поддержке программы Государственного задания вузам (проект № FSWW-2022-0018).

Список литературы

1. Tripathy H. High temperature thermophysical properties of spark plasma sintered tungsten carbide / H. Tripathy, C. Sudha, V.T. Paul, R. Thirumurugesan, T.N. Prasanthi, R. Sundar, N. Vijayashanthi, P. Parameswaran, S. Raju // International Journal of Refractory Metals and Hard Materials. – 2022. – Vol. 104. – №. 105804. – P. 1-10.
2. Haus L. Wear properties of carbon-rich tungsten carbide films / L. Haus, M. Wildfeuer, J.-E. Grochowski, J. Wöckel, M. Müller, F. Köhn, W. Schulz, C. Wüstefeld, D. Rafaja, J. Albrecht // Wear. – 2022. – Vol. 488–489. – № 204146. – P. 1-9.
3. Agudelo-Morimitsu L.C. Substrate heating and post-annealing effect on tungsten/tungsten carbide bilayers grown by non-reactive DC magnetron sputtering / L.C. Agudelo-Morimitsu, J.D.L. Roche, D. Escobar, R. Ospina, E. Restrepo-Parra // Ceramics International. – 2013. – Vol. 39. – № 7. – P. 7355–7365.
4. Zmbrano G. Hardness and morphological characterization of tungsten carbide thin films / G. Zmbrano, P. Prieto, F. Perez, C. Rincon, H. Galindo, L. Cota-Araiza, J. Esteve, E. Martinez // Surface and Coatings Technology. – 1998. – Vol. 108–109. – P. 323–327.
5. Chitra V. Determination of specific wear rate of steel coated with tungsten carbide using Taguchi technique for textile applications / V. Chitra, S. Ramachandran, V. Anandaraj // Materials Today: Proceedings. – 2021. – Vol. 47. – P. 4558–4561.
6. Khechba M. Study of structural and mechanical

- properties of tungsten carbides coatings / M. Khechba, F. Hanini, R. Halimi // *Nature & Technology*. – 2011. – Vol. 3. – № 2. – P. 9–11.
7. Uhlmann E. Application of Additive Manufactured Tungsten Carbide Tool Electrodes in EDM / E. Uhlmann, A. Bergmann, R. Bolz, W. Gridin // *Procedia CIRP*. – 2018. – Vol. 68. – P. 86–90.
8. Zhang H. Effects of sputtering condition on tribological properties of tungsten coatings / H. Zhang, D.Y. Li // *Wear*. – 2003. – Vol. 255. – №. 7–12. – P. 924–932.
9. Levy R.B. Platinum-like behavior of tungsten carbide in surface catalysis / R.B. Levy, M. Boudart // *Science*. – 1973. – Vol. 181. – Iss. 4099. – P. 547–549.
10. Vijayakumar P. Facile synthesis of tungsten carbide nanorods and its application as counter electrode in dye sensitized solar cells / P. Vijayakumar, M.S. Pandian, S.P. Lim, A. Pandikumar, N.M. Huang, S. Mukhopadhyay, P. Ramasamy // *Materials Science in Semiconductor Processing*. – 2015. – Vol. 39. – P. 292–299.
11. Fang H. Structural tuning and catalysis of tungsten carbides for the regioselective cleavage of C–O bonds / H. Fang, A. Roldan, Ch. Tian, Ya. Zheng, X. Duan, K. Chen, L. Ye, S. Leoni, Yo. Yuan // *Journal of Catalysis*. – 2019. – Vol. 369. – P. 283–295.
12. Ikenoue T. Fabrication and mechanical properties of tungsten carbide thin films via mist chemical vapor deposition / T. Ikenoue, T. Yoshida, M. Miyake, R. Kasada, T. Hirato // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2020. – Vol. 829. – №. 154567. – P. 1–7.
13. Remnev G.E. Formation of nanoscale carbon structures in the surface layer of metals under the impact of high intensity ion beam / G.E. Remnev, V.V. Uglov, V.I. Shymanski, S.K. Pavlov, A.K. Kuleshov // *Applied Surface Science*. – 2014. – Vol. 310. – P. 204–209.
14. Wang K.F. Fabrication of ultrafine and high-purity tungsten carbide powders via a carbothermic reduction–carburization process / K.F. Wang, G.D. Sun, Y.D. Wu, G.-H. Zhang // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2019. – Vol. 784. – P. 362–369.
15. Enneti R.K. Synthesis of nanocrystalline tungsten and tungsten carbide powders in a single step via thermal plasma technique // *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. – 2015. – Vol. 53. – P. 111–116.
16. Polini R. Toward Greener Synthesis of WC Powders for Cemented Tungsten Carbides Manufacturing // *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*. – 2021. – Vol. 9. P. 8458–8466.
17. Transition of W_2C to WC during carburization of tungsten metal powder / G. Mühlbauer, G. Kremser, A. Bock, J. Weidow, W.-D. Schubert // *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. – 2018. – Vol. 72. – P. 141–148.
18. Kuz'michev E.N. Preparation of Tungsten Carbide from Scheelite Concentrate using Concentrated Energy Fluxes / E.N. Kuz'michev, S. V. Nikolenko, D.I. Balakhonov // *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*. – 2018. – Vol. 52. – №. 4. – P. 619–623.
19. Pak A.Ya. Effect of Energy on the Phase Composition of the Product of Arc Discharge Synthesis in the Tungsten–Carbon System Obtained in a Self-Shielding Autonomous Gas Environment / A.Ya. Pak, A. I. Kokorina // *Inorganic Materials: Applied Research*. – 2021. – Vol. 12. – №. 2. – P. 544–550.
20. Пак А.Я. Влияние энергетики процесса безвакуумного электродугового синтеза на продукт переработки вольфрамового рудного концентрата / А.Я. Пак, А.И. Кокорина, Ю.Л. Шаненкова (Колганова), И.И. Шаненков // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2024 – Т. 335 - № 1. – С. 174–183.
21. Поваляев П.В. Исследование режимов работы трехфазного электродугового реактора постоянного тока для синтеза карбида вольфрама / П.В. Поваляев, А.Я. Пак, А.И. Кокорина, А.В. Власов, Ж.С. Болатова // *Вестник Башкирского университета*. – 2024. – Т. 28. – № 3. – С. 278–285.
22. Bera D. A parametric study on the synthesis of carbon nanotubes through arc-discharge in water / D. Bera, G. Johnston, H. Heinrich, S. Seal // *Nanotechnology*. – 2006 – Vol. 17. – №. 6. – P. 1722–30.

References

1. Tripathy H., Sudha C., Paul V.T., Thirumurugesan R., Prasanthi T.N., Sundar R., Vijayashanthi N., Parameswaran P., Raju S. High temperature thermophysical properties of spark plasma sintered tungsten carbide. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 2022, Vol. 104, No. 105804.
2. Haus L., Wildfeuer M., Grochowski J.-E., Wöckel J., Müller M., Köhn F., Schulz W., Wüstefeld C., Rafaja D., Albrecht J. Wear properties of carbon-rich tungsten carbide films. *Wear*, 2022, Vol. 488–489, No. 204146.
3. Agudelo-Morimitsu L.C., Roche J.D.L., Escobar D., Ospina R., Restrepo-Parra E. Substrate heating and post-annealing effect on tungsten/tungsten carbide bilayers grown by non-reactive DC magnetron sputtering. *Ceramics International*, 2013, Vol. 39, No. 7, pp. 7355–7365.
4. Zmbrano G., Prieto P., Perez F., Rincon C., Galindo H., Cota-Araiza L., Esteve J., Martinez E. Hardness and morphological characterization of tungsten carbide thin films. *Surface and Coatings Technology*, 1998, Vol. 108–109, pp. 323–327.
5. Chitra V., Ramachandran S., Anandaraj V. Determination of specific wear rate of steel coated with tungsten carbide using Taguchi technique for textile applications. *Materials Today: Proceedings*, 2021, Vol. 47, pp. 4558–4561.
6. Khechba M., Hanini F., Halimi R. Study of structural and mechanical properties of tungsten carbides coatings. *Nature & Technology*, 2011, Vol. 3, No. 2,

- pp. 9–11.
7. Uhlmann E., Bergmann A., Bolz R., Gridin W. Application of Additive Manufactured Tungsten Carbide Tool Electrodes in EDM. *Procedia CIRP*, 2018, Vol. 68, pp. 86–90.
 8. Zhang H, Li D.Y. Effects of sputtering condition on tribological properties of tungsten coatings. *Wear*, 2003, Vol. 255, No. 7–12, pp. 924–932.
 9. Levy R.B., Boudart M. Platinum-like behavior of tungsten carbide in surface catalysis. *Science*, 1973, Vol. 181, No. 4099, pp. 547–549.
 10. Vijayakumar P., Pandian M.S., Lim S.P., Pandikumar A., Huang N.M., Mukhopadhyay S., Ramasamy P. Facile synthesis of tungsten carbide nanorods and its application as counter electrode in dye sensitized solar cell. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 2015, Vol. 39, pp. 292–299.
 11. Fang H., Roldan A., Tian Ch., Zheng Y., Duan X., Chen K., Ye L., Leoni S., Yuan Y. Structural tuning and catalysis of tungsten carbides for the regioselective cleavage of C–O bonds. *Journal of Catalysis*, 2019, Vol. 369, pp. 283–295.
 12. Ikenoue T., Yoshida T., Miyake M., Kasada R., Hirato T. Fabrication and mechanical properties of tungsten carbide thin films via mist chemical vapor deposition. *Journal of Alloys and Compounds*, 2020, Vol. 829, No. 154567, pp. 1–7.
 13. Remnev G.E., Uglov V.V., Shymanski V.I., Pavlov S.K., Kuleshov A.K. Formation of nanoscale carbon structures in the surface layer of metals under the impact of high intensity ion beam. *Applied Surface Science*, 2014, Vol. 310, pp. 204–209.
 14. Wang K.F., Sun G.D., Wu Y.D., Zhang G.-H. Fabrication of ultrafine and high-purity tungsten carbide powders via a carbothermic reduction–carburization process. *Journal of Alloys and Compounds*, 2019, Vol. 784, pp. 362–369.
 15. Enneti R.K. Synthesis of nanocrystalline tungsten and tungsten carbide powders in a single step via thermal plasma technique. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 2015, Vol. 53, pp. 111–116.
 16. Polini R. Toward Greener Synthesis of WC Powders for Cemented Tungsten Carbides Manufacturing // *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2021, Vol. 9, P. 8458–8466.
 17. Mühlbauer G., Kremser G., Bock A., Weidow J., Schubert W.-D. Transition of W₂C to WC during carburization of tungsten metal powder. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 2018, Vol. 72, pp. 141–148.
 18. Kuz'michev E.N., Nikolenko S.V., Balakhonov D.I. Preparation of Tungsten Carbide from Scheelite Concentrate using Concentrated Energy Fluxes. *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*, 2018, Vol. 52, No. 4, pp. 619–623.
 19. Pak A.Ya., Kokorina A.I. Effect of Energy on the Phase Composition of the Product of Arc Discharge Synthesis in the Tungsten–Carbon System Obtained in a Self-Shielding Autonomous Gas Environment. *Inorganic Materials: Applied Research.*, 2021, Vol. 12, No. 2, pp. 544 - 550.
 20. Pak. A. Ya, Kokorina A.I., Shanenkova (Kologanova) Yu. L., Shanenkov I.I. Influence of non-vacuum electric arc synthesis energy on the product of tungsten ore concentrate processing. *Izvestia Tomskogo Polytechnicheskogo Universiteta. Inginiring georesursov*, 2024, Vol. 335, No. 1, pp. 174–183. (In Russ.)
 21. Povalyaev P.V., Pak A.Ya., Kokorina A.I., Vlasov A.V., Bolativa J.S. Study of operating modes of a three-phase DC electric arc reactor for synthesis of tungsten carbide. *Vestnik Bashkirskogo universiteta*, 2023, Vol. 28, No. 3, pp. 278–285 (In Russ.)
 22. Bera D., Johnston G., Heinrich H., Seal S. A parametric study on the synthesis of carbon nanotubes through arc-discharge in water. *Nanotechnology*, 2006, Vol. 17, No. 6. pp. 1722–30.

ТЕХНОСФЕРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ (В ЭНЕРГЕТИКЕ)

УДК 656.612

Повышение качественных показателей системы очистки нефтесодержащих трюмных водС.Е. Тверская¹, А.Ю. Гаршин²*ФГАОУ ВО «Севастопольского государственного университета», ул. Университетская, 33,
г. Севастополь, 299053, Россия, ¹svetterskaya@mail.ru, ²aleksander.garshin@mail.ru*

Статья поступила 22.10.2024 г.; после доработки 23.10.2024 г.

Аннотация

С целью повышения очистной способности и ресурса работы системы очистки судовых трюмных вод в работе предложено использование дополнительного фильтра, преимуществом которого является возможность регенерации (восстановление очистной способности) без его разборки. В результате модернизированная установка будет иметь высокую очистную способность и продолжительный ресурс, что соответствует требованиям Международной морской организации ИМО.

Ключевые слова: нефтесодержащие воды; очистка; ресурс работы; фильтр.

Increasing the quality performance of the oil-containing bilge water treatment systemS.E. Tverskaya², A.Yu. Garshin²*Sevastopol State University, 33 Universitetskaya st, c. Sevastopol,
299053, Russia, ¹svetterskaya@mail.ru, ²aleksander.garshin@mail.ru*

Received 22.10.2024 y.; received in final form 23.10.2024 y.

Abstract

In order to increase the purification capacity and service life of the ships bilge waters purification system, the work proposes the use of an additional filter, the advantage of which is the possibility of regeneration (restoration of purification capacity) without disassembling it. As a result, the modernized installation will have cleaning capacity and f long service life, which meets the requirements of the International Maritime Organization IMO.

Keywords: oil-containing waters; cleaning; service life; filter.

Введение

При эксплуатации судовой энергетической установки в машинно-котельных отделениях судна образуются нефтесодержащие воды (НСВ) (вода с любым содержанием нефтепродуктов), которые собираются в трюмных колодцах. Международная конвенция по предотвращению загрязнения с судов MARPOL-73/78 разрешает сброс очищенных трюмных НСВ при концентрации нефтепродуктов в воде менее 15 частей на

миллион (15 млн⁻¹) [1].

С этой целью суда, задействованные в Международных рейсах, оборудуются системой для очистки НСВ. Эти системы имеют самые разнообразные конструкции. В самом общем случае в их состав входят сборные танки, насосы для перекачки НСВ, сепаратор, фильтроэлементы различной конструкции и приборы концентрации нефтепродуктов (или сигнализаторы предельного содержания нефтепродукта в сбросе) с

электромагнитным клапаном, автоматически переключающим сброс НСВ в сборный танк при недостаточной степени очистки.

Современные системы для очистки НСВ характеризуются целым комплексом эксплуатационных и конструктивных параметров, наиболее важными из которых являются:

- требуемая очистная способность, составляющая менее 15 млн^{-1} ;
- оптимальная производительность (пропускная способность);
- как можно больший ресурс работы;
- как можно меньшие массогабаритные показатели.

Производительность системы определяется суточным объемом накопления НСВ, который зависит от типа, возраста, водоизмещения судна и мощности главной энергетической установки. Системы с повышенной производительностью используются неэффективно, имеют большие вес и габариты, а значит и стоимость. Системы же с заниженной производительностью могут не обеспечить качественную очистку НСВ.

Также системы по очистке НСВ должны обладать большим ресурсом работы до замены фильтроэлементов (не менее $200 \div 300$ часов). В противном случае необходима частая замена фильтроэлементов, а следовательно, наличие большого количества их на судне, что существенно увеличивает расходы на содержание установки (стоимость одного фильтроэлемента составляет порядка $1500 \div 3000$ долларов США) и усложняет ее обслуживание.

Из всех существующих методов очистки НСВ на судах мирового флота наибольшее распространение получили адсорбция и коалесценция [2].

При адсорбции сорбент (зола, кокс, активированный уголь), имеющий мелкопористую структуру ($0,004 \div 2 \text{ мкм}$), поглощает и удерживает нефтепродукт своей поверхностью. Метод имеет высокую очистную способность (до 10 млн^{-1}), однако быстрое загрязнение пор сорбента приводит к снижению эффективности очистки с течением времени, невозможность регенерации (очистки) сорбента, а следовательно, необходимость его замены.

При коалесценции капли нефти сливаются при прохождении через поры коалесцентного элемента (стекловолокно, полипропилен, полиуретан, песок, гравий, хлопок, шерсть и пр.). Укрупненные капли всплывают на поверхность НСВ и собираются в нефтесборнике для их последующего удаления. Метод имеет несколько худшую степень очистки, чем адсорбция (до 15

млн^{-1}). Однако анализ последних исследований показал перспективность использования метода в плане повышения ресурса работы системы при условии применения регенерируемых коалесцентов (очистки без разборки) [3]

Эксплуатируемые в настоящее время отечественные и зарубежные системы для очистки НСВ не вполне отвечают всем перечисленным требованиям.

Поэтому является актуальным и своевременным проведение исследований в области совершенствования систем для очистки НСВ, имеющих высокую очистную способность, оптимальную производительность, большой ресурс работы и обладающих простотой конструкции и эксплуатации.

Задачей исследования является повышения очистной способности и ресурса работы установки очистки НСВ путем совершенствования ее конструкции, а также выбора ее оптимальной производительности.

Изложение основного материала

Исследования представлены на примере системы для очистки НСВ SKIT/S-DEB RWO (Германия), принципиальная схема которой представлена на рис. 1.

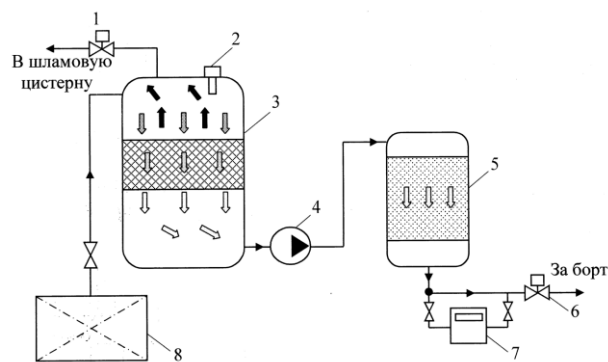


Рис. 1. Принципиальная схема системы для очистки НСВ SKIT/S-DEB RWO:

- 1, 6 – электромагнитный клапан; 2 – датчик уровня нефтепродуктов; 3 – сепаратор; 4 – винтовой насос; 5 – адсорбционный фильтр; 7 – блок автоматики и контроля концентрации нефтепродуктов; 8 – отстойная цистерна

Система включает отстойную цистерну, сепаратор, винтовой насос и адсорбционный фильтр.

Принцип работы следующий. При запуске системы насос 4 создает вакуум, и нефтесодержащая вода из отстойной цистерны 8 поступает в сепаратор 3. На первом этапе в гравитационно-

разделительной камере сепаратора происходит отделение от воды наиболее крупных частиц нефтепродукта (за счет разности плотностей).

Затем НСВ проходит через специальный коалесцентный элемент с открытыми порами, на котором мелкие частицы нефти задерживаются, укрупняются, всплывают и собираются в нефтесборнике. После заполнения нефтесборника срабатывает датчик 2, электромагнитный клапан 1 открывается, электродвигатель насоса начинает вращаться в противоположную рабочему направлению сторону, и нефтепродукты вытесняются в шламовую цистерну. После откачки нефтепродуктов установка начинает работать в обычном режиме.

Предварительно очищенная вода выводится из нижней части сепаратора и поступает в адсорбционный фильтр 5, где происходит окончательное отделение нефтепродуктов в слое активированного угля. Очищенная вода сбрасывается за борт. Концентрация нефтепродуктов в очищенной воде контролируется блоком автоматики и контроля концентрации 7.

Установка обеспечивает очистку до содержания нефти в стоке не более 15 млн^{-1} и оснащена устройством сигнализации ОМД 24 и автоматического прекращения любого сброса нефтесодержащей смеси при превышении содержания нефти в стоке более 15 млн^{-1} .

К преимуществам системы относятся:

- простота и надежность в эксплуатации;
- наличие отстойной цистерны НСВ, что позволяет осуществлять предварительную очистку от нефтепродуктов, а следовательно, увеличить ресурс работы фильтроэлемента сепаратора;
- установка сепаратора не на нагнетании, а на всасывании насоса, что исключает дополнительное эмульгирование нефтепродуктов перекачивающим насосом, а следовательно, повышает качество очистки.

К недостаткам системы следует отнести незначительный ресурс работы адсорбционного фильтра. Быстрое загрязнение пор адсорбента приводит к снижению эффективности очистки. При этом адсорбенты не регенерируются, а следовательно, необходима частая их замена.

Для повышения очистной способности и ресурса работы системы предлагается в качестве второй ступени очистки использование дополнительного коалесцентного фильтра [4], преимуществом которого является возможность регенерации без разборки, что существенно повысит продолжительность работы адсорбционного

фильтра до его замены.

Конструкция фильтра изображена на рис. 2.

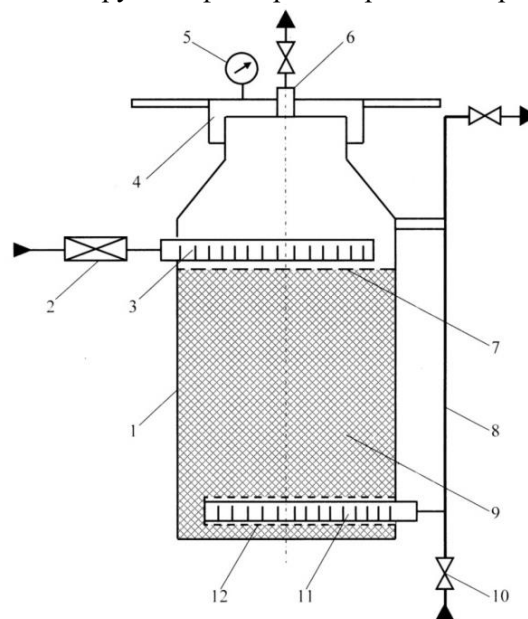


Рис. 2. Регенерируемый фильтр:

- 1 – корпус; 2 – дроссельный клапан;
3 – перфорированный коллектор для подачи очищаемых НСВ; 4 – крышка; 5 – манометр;
6 – патрубок вывода нефтепродуктов; 7 – верхняя ограничительная сетка; 8 – патрубок вывода очищенной воды; 9 – фильтрующая загрузка;
10 – клапан для подачи промывочной воды;
11 – перфорированный коллектор для вывода очищенной воды; 12 – защитная металлическая сетка

Фильтр работает следующим образом. Нефтесодержащая вода через дроссельный клапан 2 и перфорированный коллектор 3 подается в корпус фильтра 1 и поступает на очистку в фильтрующую загрузку 9, заполненную дважды просеянным морским песком с размером частиц $0,5 \div 1 \text{ мм}$, где происходит очистка НСВ методами коалесценции и фильтрования. Очищенная вода выводится из корпуса фильтра через перфорированный коллектор 11 и патрубок вывода очищенной воды 8. Отделенные нефтепродукты выводятся из корпуса фильтра через патрубок 6.

По показаниям манометра 5 определяется загрязненность фильтра. При перепаде давления на фильтре более $0,05 \text{ МПа}$ производится промывка фильтрующей загрузки подачей промывочной воды через клапан 10.

Дроссельный клапан служит для регулирования скорости фильтрации, которая не должна превышать 3 м/час , так как при большей скорости значительно снижается качество очистки. Съёмная крышка 4 с резьбой и ручками служит

для быстрого открытия-закрытия корпуса фильтра при замене фильтрующей загрузки. Верхняя 7 и нижняя 12 защитные металлические сетки с размером ячейки 0,5 мм служат для предотвращения вымывания фильтрующей загрузки из корпуса фильтра соответственно в процессе промывки и очистки.

На рис. 3 представлена модернизированная система для очистки НСВ типа SKIT/S-DEB RWO с дополнительным фильтром.

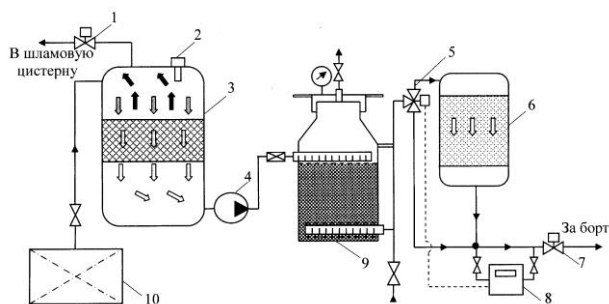


Рис. 3. Модернизированная система для очистки НСВ типа SKIT/S-DEB RWO с дополнительным фильтром:

1, 5, 7 – электромагнитный клапан; 2 – датчик уровня нефтепродуктов; 3 – сепаратор; 4 – винтовой насос; 6 – адсорбционный фильтр; 8 – блок автоматики и контроля концентрации нефтепродуктов; 9 – регенерируемый фильтр; 10 – отстойная цистерна

Благодаря включенному в систему электромагнитному клапану 5, адсорбционный фильтр используется только по необходимости при превышении заданной степени очистки после второй ступени, что позволяет увеличить ресурс работы адсорбционного фильтра и снизить затраты по эксплуатации установки. В результате модернизированная система будет работать более эффективно, иметь высокую очистную способность и продолжительный ресурс.

Выбор производительности системы производится в зависимости от общего объема суточного накопления НСВ, подлежащих очистке.

Общий объем суточного накопления НСВ с учетом возраста и типа судна определяется по формуле:

$$V_{\text{сут}}^* = V_{\text{сут}} \cdot k_1 \cdot k_2,$$

где $V_{\text{сут}}$ – суточный объем накопления НСВ, определяемый в зависимости от мощности ГД и водоизмещения судна;

k_1 и k_2 – поправочные коэффициенты, учитывающие соответственно возраст и тип судна.

Нормы суточного накопления НСВ судовой энергетической установки (СЭУ) $V_{\text{сут}}$ в зависимости от водоизмещения судна и мощности

главного двигателя (ГД) представлены в таблице 1 [5].

Таблица 1. Нормы суточного накопления НСВ СЭУ

Водоизмещение судна, тыс. тонн	Мощность ГД, тыс. кВт	Суточное накопление НСВ, $V_{\text{сут}}$, м ³
0,4 ÷ 0,2	0,2 ÷ 1,5	0,1 ÷ 0,2
2 ÷ 5	1,5 ÷ 3	0,2 ÷ 0,4
5 ÷ 10	3 ÷ 5	0,4 ÷ 0,6
10 ÷ 15	5 ÷ 7,5	0,6 ÷ 0,8
15 ÷ 20	7,5 ÷ 10	0,8 ÷ 1,0
20 ÷ 30	10 ÷ 12,5	1,0 ÷ 1,4
30 ÷ 40	12,5 ÷ 15	1,4 ÷ 1,8
40 ÷ 50	15 ÷ 17,5	1,8 ÷ 2,2
50 ÷ 60	17,5 ÷ 20	2,2 ÷ 2,6
60 ÷ 70	20 ÷ 22,5	2,6 ÷ 3,0
70 ÷ 80	22,5 ÷ 25	3,0 ÷ 3,4
80 ÷ 90	25 ÷ 27,5	3,4 ÷ 3,8
90 ÷ 100	27,5 ÷ 30	3,8 ÷ 4,2
100 ÷ 150	30 ÷ 35	4,2 ÷ 4,6
более 150	более 35	4,6 ÷ 5,0

Коэффициент k_1 определяется по формуле:

$$k_1 = 1 + 0,0028 \cdot T^{1.76},$$

где T – возраст судна.

Значение коэффициента k_2 определяется из таблицы 2.

Таблица 2. Зависимость коэффициента k_2 от типа судна

k_2	Тип судна
1,0	Сухогрузы, балкеры, ролкеры, транспортные суда
1,2	Специализированные суда, пассажирские суда
1,4	Рыболовные суда, рефрижераторы, танкеры

Производительность системы для очистки НСВ должна быть достаточной, чтобы удалить суточный объем НСВ один раз за вахту с продолжительностью работы около одного часа.

Заключение

В работе предложены мероприятия по повышению эффективности и ресурса работы системы для очистки НСВ. Для повышения очистной способности и ресурса работы системы предложено в качестве второй ступени очистки использование дополнительного коалесцентного фильтра, преимуществом которого является возможность регенерации (помывки) без разборки, что существенно повысит продолжительность работы адсорбционного фильтра до его замены.

В результате модернизированная установка работать более эффективно, иметь высокую очистную способность и продолжительный ресурс.

Список литературы

1. Международная Конвенция по предотвращению загрязнения с судов 1973 г., измененная протоколом 1978 года (МАРПОЛ 73/78). Книги I и II. – СПб.: ЗАО "ЦНИИМФ", 2017 – 760 с.
2. Истомин В.И. Комплексная очистка судовых нефтесодержащих вод / В.И. Истомин. – Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2004. – 202 с.
3. Истомин В.И. Совершенствование технических средств систем контроля и охраны морской природной среды от загрязнения нефтью / В.И. Истомин, С.Е. Тверская // Системы контроля окружающей среды: науч.-техн. журнал. – Севастополь: ФГБОУ "Институт природно-технических систем", 2021. – Вып. 4(46). – С. 63-70.
4. Пат. 2781068 Российская Федерация. RU 2781068 C1. Фильтр для очистки нефтесодержащих вод / Истомин В.И., Тверская С.Е., Хлебникова В.В.; Заявитель и патентообладатель ФГБНУ «Институт природно-технических систем». – № 2021129141; заяв. 05.10.2021; опубл. 05.10.22. – 6 с.
5. Истомин В.И. Рекомендации по разработке нового стандарта РФ «Нормы суточного накопления нефтесодержащих вод машинных помещений судов и расчет производительности системы очистки» / Истомин В.И., Хлебникова В.В., Тверская С.Е. // Актуальные вопросы проектирования, постройки и эксплуатации морских судов и сооружений: труды региональной научно-практической конференции, г. Севастополь, 15-16 ноября 2017 г. – Севастополь: СевГУ, 2018. – 280 с. – С. 117-124.

References

1. The International Convention for the Prevention of Pollution from Ships, 1973, as amended by the Protocol of 1978 (MARPOL 73/78). Books I and II. – SPb.: ZAO TsNIIMF, 2017. – 760 p.
2. Istomin V.I. Complex purification of ship oil-containing waters. – Sevastopol: SevNTU Publ., 2004. – 202 p.
3. Istomin V.I. Improvement of technical means of control systems and protection of marine natural environment from oil pollution / V.I. Istomin, S.E. Tverskaya // Environmental control systems: scientific and technical magazine. – Sevastopol: FSBEI Institute of Natural and Technical Systems, 2021. – Vol. 4(46). – P. 63-70.
4. Pat. 2781068 Russian Federation. RU 2781068 C1. Filter for Oily Water Treatment / Istomin V.I., Tverskaya S.E., Khlebnikova V.V.; Applicant and patent holder of the Institute of Natural and Technical Systems. – № 2021129141; application.

05.10.2021; publ. 05.10.22. – 6 p.

5. Istomin V.I., Khlebnikova V.V., Tverskaya S.E. Recommendations for the development of a new standard of the Russian Federation "Norms of daily accumulation of oil-containing waters in engine rooms of ships and the calculation of the productivity of the cleaning system" / Istomin V.I., Khlebnikova V.V., Tverskaya S.E. // Actual issues of design, construction and operation of marine vessels and structures: proceedings of the regional scientific and practical conference, Sevastopol, November 15-16, 2017 – Sevastopol: Sevastopol, 2018. – 280 p. – P. 117-124.

ПРОЦЕССЫ И АППАРАТЫ ХИМИЧЕСКИХ ТЕХНОЛОГИЙ

УДК 66.067.9

Сравнительная оценка использования наноструктурированного SiO_2 для очистки модельных сред, содержащих Pb^{2+} , Ni^{2+} и Co^{2+}

С.А. Федорова, Э.В. Ткаченко, А.Д. Сербин

ФГАУ ВО «Севастопольский государственный университет», Университетская-33, г. Севастополь, 299053, Россия. s.a.fedorova@sevsu.ru, evtkachenko@mail.sevsu.ru

Статья поступила 15.10.2024 г.; после доработки 17.10.2024 г.

Аннотация

Рассмотрена сорбция наноструктурированным SiO_2 модельных растворов, содержащих катионы Pb^{2+} , Ni^{2+} и Co^{2+} с концентраций 1 мг/л на протяжении 14 дней. Отмечено, что в течение суток катионы Pb^{2+} были полностью сорбированы. Катионы Ni^{2+} были сорбированы наноструктурированным SiO_2 на 75% в течение 7 суток. Через 14 суток после начала эксперимента концентрация катионов Co^{2+} составляла 37,4%.

Ключевые слова: наноструктурированный SiO_2 , сорбция, катионы Pb^{2+} , Ni^{2+} и Co^{2+}

Comparative assessment of the use of nanostructured SiO_2 for the purification of model media containing Pb^{2+} , Ni^{2+} and Co^{2+}

S.A. Fedorova, E.V. Tkachenko, A.D. Serbin

Sevastopol State University, 33 Universitetskaya St., Sevastopol, 299053, Russia
s.a.fedorova@sevsu.ru, evtkachenko@mail.sevsu.ru

Received 15.10.2024 y.; received in final form 17.10.2024 y.

Abstract

The sorption of model solutions containing Pb^{2+} , Ni^{2+} and Co^{2+} cations with concentrations of 1 mg/l by nanostructured SiO_2 over 14 days was considered. It was noted that Pb^{2+} cations were completely sorbed within 24 hours. Ni^{2+} cations were sorbed by nanostructured SiO_2 by 75% within 7 days. After 14 days from the start of the experiment, the concentration of Co^{2+} cations was 37.4%.

Keywords: nanostructured SiO_2 , sorption, cations. Pb^{2+} , Ni^{2+} and Co^{2+} .

Введение

В Стратегии экологической безопасности Российской Федерации на период до 2025 [1] отмечается, что состояние окружающей среды на территории РФ, где сосредоточены большая часть населения страны, производственных мощностей и сельскохозяйственных угодья, оценивается как неблагоприятное по экологическим параметрам. Кроме того, ситуация с качеством воды в водных объектах продолжает оставаться неблагоприятной, в первую очередь, вследствие

сбросов промышленных и бытовых сточных вод, поверхностных стоков вод с сельскохозяйственных угодий. Так, без очистки сбрасывается порядка 19% сточных вод, недостаточно очищенными до 70 %, до ПДК очищается не более 11%.

К сточным водам относятся сбросы промышленных предприятий, объектов коммунального хозяйства и сельскохозяйственных угодий. В Российской Федерации насчитывается более 5 тысяч предприятий машиностроения, порядка 2 тысяч предприятий химической и горной про-

мышленности [2]. Среди сбросов этих предприятий присутствуют тяжелые металлы, которые могут быть извлечены и повторно запущены в производство.

Группы предприятий промышленной индустрии производят во внешнюю среду различные группы загрязнителей. Так, целлюлозно-бумажные комбинаты являются поставщиками сбросов растворенной органики, каолинов и различных типов волокон. Сбросы текстильных предприятий характеризуются наличием взвешенных веществ, различных красителей, синтетических поверхностно-активных веществ (ПАВ), обрывками волокон, солями таких тяжелых металлов как хром и медь.

Пищевая промышленность сбрасывает взвешенные вещества, растворенные соли, жиры, растворенные органические вещества, биогенные элементы – азот и фосфор, ПАВ (моющие средства). Также в таких водах могут присутствовать различные микроорганизмы, в том числе и патогенные. Нефтепродуктами, хлоридами и различными взвешенными веществами загрязняют окружающую среду нефтепромыслы и предприятия нефтеперерабатывающей промышленности. Основными компонентами сточных вод черной и цветной металлургии являются взвешенные минеральные вещества, металлы, сульфаты, хлориды, смолы и масла. Коксохимические предприятия добавляют во внешнюю среду аммиак, цианиды, сероводород, сульфаты, хлориды, различные ПАВ, ртуть, мышьяк, альдегиды, спирты, масла, смолы, фенолы, нефтепродукты, стойкие органические загрязнители, ионы тяжелых металлов. Взвешенные минеральные вещества, ионы тяжелых металлов, сульфаты, хлориды, смолы и различные масла присутствуют в сбросах предприятий черной металлургии. Типовыми загрязнителями окружающей среды машиностроения являются смеси нефтепродуктов, окарины, масла, цианиды, такие тяжелые металлы, как хром, никель, свинец, медь, кадмий, цинк, олово, серебро, кобальт.

Мы привели наиболее общие составы выбросов различных групп промышленных предприятий. На тех же машиностроительных предприятиях или судоремонтных верфях могут быть оборудованы цеха гальванических производств, которые, в соответствии с наносимым покрытием, добавляют соответствующие компоненты: при никелировании – никельсодержащие вещества, при хромировании – соединения хрома в различных степенях окисления и т.п.

Как видим, в сточных водах промышленных предприятий в том или ином количественном и

качественном составе присутствуют ионы тяжелых металлов. Они считаются одними из наиболее опасных и трудноочищаемых загрязнений.

В исследованиях по вопросам очистки технологических сред широко распространены сорбционные методы очистки. Наблюдается тенденция к использованию в качестве сорбентов наноструктурированных материалов [3-4]. Больше половины выпускаемых промышленностью наноструктурированных оксидов составляет SiO_2 . В ряде работ [5-8] показана целесообразность его использования для технологических сред.

Объектом исследования являются модельные растворы Pb^{2+} , Ni^{+2} и Co^{+2} , концентрацией 0,1 г/л.

Цель исследования

Определение в статических условиях возможности использования для очистки модельных сред наноструктурированным SiO_2 .

Задача исследования

Экспериментальное исследование сорбционной очистки растворов Pb^{2+} , Ni^{+2} и Co^{+2} , концентрацией 0,1 г/л, наноструктурированным SiO_2 .

Определение свинца (Pb^{2+})

Для определения катионов свинца наиболее распространенными среди фотоколориметрических методов являются дитизиновый и плюмбоновый [9].

Дитизиновый метод имеет существенный недостаток: для маскировки цинка и других металлов, препятствующих определению свинца, требуется применение цианистого калия, являющегося сильнодействующим ядом. Поэтому мы остановились на плюмбоновом методе. Он основан на образовании при pH 7,0 – 7,3 соединения свинца с плюмбоном (сульфарсазеном), окрашенного в желто-оранжевый цвет.

С плюмбоном образуют окрашенные соединения также медь, цинк, кадмий, кобальт, никель, лантан, уран, марганец (IV), железо (III), титан, цирконий, ванадий, молибден. Для устранения влияния мешающих элементов (Mg, Fe, V, Mo, Ti, Zr, U) введена предварительная экстракция свинца дитизоном в присутствии солянокислого гидроксилamina. Резэкстракция свинца 0,05 н. HCl устраняет влияние меди, кад-

мия, кобальта, никеля. Влияние цинка устраняется комплексованием его железисто-синеродистым калием (желтой кровяной солью). В нашей работе используются модельные растворы, которые не содержат катионов, образующих окрашенные соединения с плюмбоном. Поэтому этап устранения влияния мешающих ионов не проводили.

Построение калибровочного графика

Вначале определили оптимальную длину волны для исследования изменения концентрации Pb^{2+} в процессе сорбции наноструктурированным SiO_2 . Определение оптимальной длины волны проводили путем построения спектра поглощения для раствора максимальной концентрации, представленного на рис. 1.

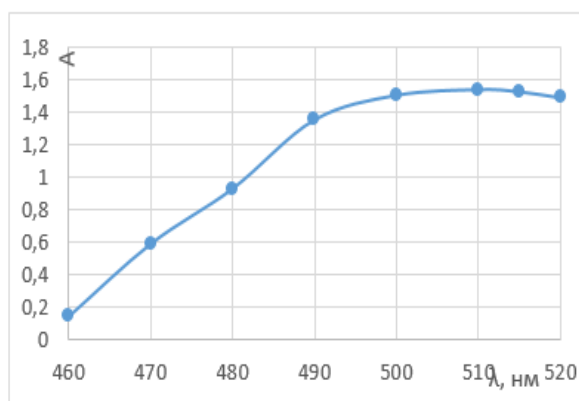


Рис. 1. Спектр поглощения для Pb^{2+} концентрацией 1,0 мг/л

Оптимальная длина волны составила 510 нм.

Приготовили серию стандартных растворов с содержанием Pb^{2+} 0,0; 0,2; 0,4; 0,6; 0,8; 1,0 мг/л.

В мерные колбы на 50 мл внесли 0; 1; 2; 3; 4; 5 мл раствора нитрата свинца, 4,5 мл 0,05 М раствора тетраборнокислого натрия и перемешали. Добавили 0,5 мл 0,05%-ного раствора плюмбона, довели до метки дистиллированной водой и снова перемешали содержимое колбы. Для развития окраски полученные растворы оставили на 30 мин.

Оптическую плотность измеряли на КФК-3.

По приготовленным растворам нитрата свинца построили калибровочный график, представленный на рис.2.

Было определено уравнение и рассчитан $R^2=0,996$.

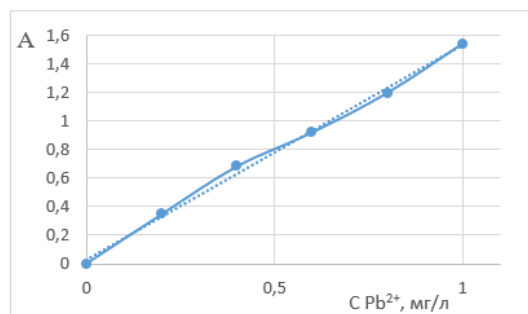


Рис. 2. Калибровочный график для определения Pb^{2+} в интервале 0,2 – 1 мг/л

Определение никеля (Ni^{2+})

Массовую концентрацию Ni^{2+} определяли фотометрическим методом, основанным на взаимодействии ионов Ni^{2+} с диметилглиоксимом [10] в присутствии окислителя с образованием комплексного соединения коричнево-красного цвета.

Диметилглиоксим плохо растворяется в воде, поэтому использовали спиртовой раствор диметилглиоксима.

Построение калибровочного графика

Для проведения исследования изменения концентрации Ni^{2+} при взаимодействии с диметилглиоксимом на КФК-3 вначале определили оптимальную длину волны. Для раствора максимальной концентрации Ni^{2+} 1,0 мг/л построили спектр поглощения (рис.3).

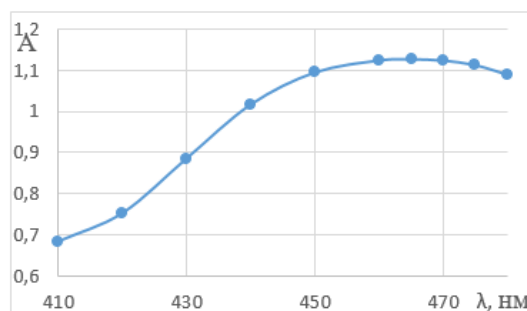


Рис.3. Спектр поглощения для определения Ni^{2+} для раствора 1,0 мг/л

Максимальная оптическая плотность раствора Ni^{2+} наблюдалась при длине волны 465 нм. При этой длине волны производились все измерения концентрации Ni^{2+} .

Для построения стандартной шкалы готовили серию растворов с содержанием Ni^{2+} 0,0; 0,2; 0,4; 0,6; 0,8; 1,0 мг/л.

В мерные колбы на 100 мл вносили 0; 2; 4;

6; 8; 10 мл рабочего стандартного раствора нитрата никеля, затем приливали 2 мл пероксодисульфата натрия 0,05 М, 3 мл концентрированного раствора аммиака, 1 мл раствора 1% диметилглиоксима, доводили дистиллированной водой до метки и перемешивали. Через 10 минут измеряли оптическую плотность полученных растворов на КФК-3 при длине волны 465 нм. Градуировочный график для определения Ni^{2+} представлен на рис. 4.

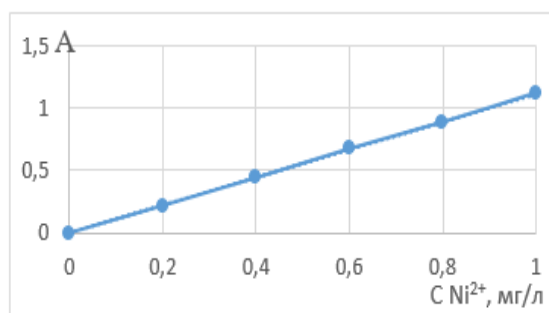


Рис. 4. Градуировочный график для определения Ni^{2+} в интервале 0,2 – 1 мг/л

Было определено уравнение и рассчитан $R^2=0,999$.

Определение кобальта (Co^{2+})

Определение Co^{2+} фотометрически можно проводить с дитиооксамидом (рубеноводородной кислотой), с нитрозо-Р-солью, с 1-нитрозо-2-нафтолом и с 2-нитрозо-1-нафтолом. В нашей работе, ввиду большей доступности последних, использовали нитрозо-нафтолы, которые образуют при взаимодействии с Co^{2+} желто-оранжевый комплекс [11]. Этот метод является специфичным для кобальта и поэтому позволяет его определять в присутствии небольших количеств других компонентов.

Построение калибровочного графика

Так же, как и в предыдущих случаях, работу начинали с определения оптимальной длины волны путем построения спектра поглощения для раствора максимальной концентрации Co^{2+} 1,0 мг/л

Спектр поглощения для определения кобальта изображен на рис. 5.

Максимальная оптическая плотность раствора Co^{2+} наблюдалась при длине волны 470 нм.

Для построения градуировочного графика готовили стандартную шкалу из серии стандартных растворов с содержанием Co^{2+} 0,0; 0,2; 0,4; 0,6; 0,8; 1,0 мг/л.

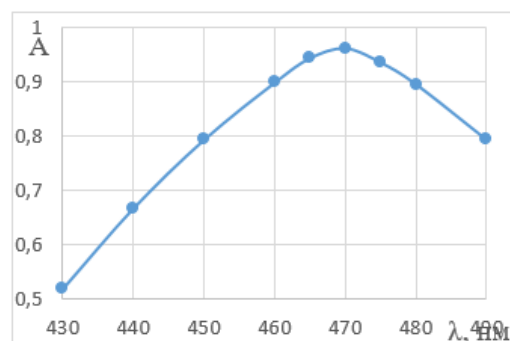


Рис. 5. Спектр поглощения для определения Co^{2+} для раствора 1,0 мг/л

В мерные колбы на 100 мл внесли 0; 2; 4; 6; 8; 10 мл рабочего стандартного раствора нитрата кобальта, затем приливали пару капель концентрированного раствора аммиака и прибавляли 3 мл 0,05% раствора реагента, доводили дистиллированной водой до метки и перемешивали. Затем измеряли оптическую плотность полученных растворов на КФК-3 при длине волны 470 нм.

По методике, для устранения влияния мешающих ионов, необходимо добавлять в раствор 60% раствор цитрата аммония. Но мы готовили модельные растворы, не содержащие других ионов, поэтому добавлять его не было смысла. Кроме того, он добавлял мутности в растворы и не влиял на интенсивность окраски.

Градуировочный график для определения кобальта представлен на рис. 6.

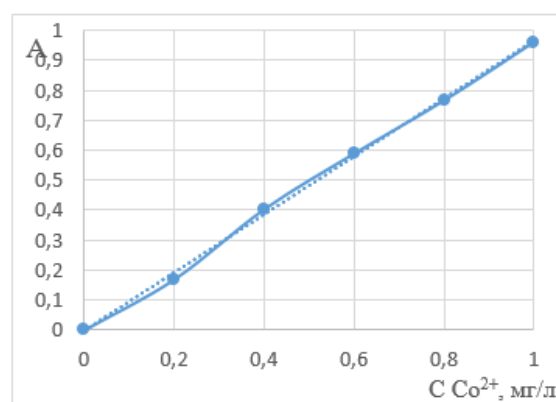


Рис. 6 Градуировочный график для определения Co^{2+} в интервале 0,2 – 1 мг/л

Было определено уравнение и рассчитан $R^2=0,998$.

Приготовление модельных растворов и проведение эксперимента

Для приготовления модельных растворов использовали растворы солей свинца, никеля и кобальта с концентрациями Pb^{2+} , Ni^{2+} и Co^{2+} 0,1 г/л. В анализируемые растворы вносили наноструктурированный SiO_2 , выдерживали в статических условиях. Через 1, 7 и 14 дней проводили измерение оставшегося после сорбции катиона Pb^{2+} , Ni^{2+} и Co^{2+} с плюмбоном, дитизоном и 1-нитрозо-2-нафтолом соответственно. На КФК-3 определяли оптическую плотность полученных растворов, по калибровочным кривым пересчитывали концентрации соответствующих катионов. Результаты измерений представлены на рис.7.

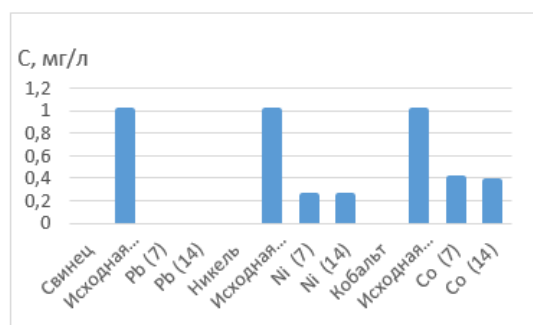


Рис.7. Изменение концентраций Pb^{2+} , Ni^{2+} и Co^{2+} на протяжении 14 дней при сорбции наноструктурированным SiO_2

Выводы

Итак, в ходе проведенного исследования был определено:

В течение суток катионы Pb^{2+} из исходной концентрации 1,0 мг/л были полностью сорбированы наноструктурированным SiO_2 . Катионы Ni^{2+} были сорбированы наноструктурированным SiO_2 на 75% в течение 7 суток, последующий контакт с сорбентом в течение 7 суток уменьшил

Список литературы

1. Стратегия экологической безопасности Российской Федерации на период до 2025 года. <https://normativ.kontur.ru/document?moduleId=1&documentId=292172> (Дата обращения 13.11.2024г)
2. Заводы по отраслям промышленности РФ (Дата обращения <https://fabricators.ru/sitemap/rubriki> (Дата обращения 10.11.2024)

3. Гавриш В.М., Чайка Т.В., Баранов Г.А., Федорова С.А. Влияние добавок нанопорошковых смесей WC, TiC, TaC на прочностные свойства бетона// Materialstoday: proceedings, Том 19, Часть 5, 2019, Страницы 1961-1964, Available online 25 July 2019 <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.07.051>, ISSN: 2214-7853, 2019 г.
4. Ничкова Л.А., Баранов Г.А., Шагова Ю.О., Федорова С.А. Исследование влияния нанопорошков оксида вольфрама на предельную длительность действия бетона, гипса и керамики // Materials today: proceedings, Том 19, Часть 5, 2019, Страницы 1941-1944. Available online 27 July 2019. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.07.046>, ISSN: 2214-7853.
5. Федорова С.А., Купов А.Б. Влияние нанопорошка SiO_2 на очистку модельных сред (Pb^{2+} , Ni^{2+} , Cu^{2+} , Cd^{2+} , Zn^{2+}) // Инновационные подходы в современной науке. сб. ст. по материалам СХVIII междунар. науч.-практ. конф. – № 10 (118). – М., Изд. «Интернаука», 2022– С.95-98
6. Федорова С.А., Магдыч Е.А. Анализ сорбционных свойств нанопорошка SiO_2 по отношению к Cu^{2+} Естественные и технические науки: научный журнал – Москва, 2023. № 1 (176). С. 186-187.
7. Федорова С.А., Ткаченко Э.С., Сербин А. Д., Русяев С. В. Химический мониторинг ионов свинца в морской воде г. Севастополя // Инновационные подходы в современной науке. сб. ст. по материалам СХХV междунар. науч.-практ. конф. – № 17 (125). – М., Изд. «Интернаука», 2022. –С18-22.
8. Федорова С.А. Влияние нанопорошка диоксида кремния на электропроводность модельных сред, содержащих катионы Na^+ , Mg^{2+} , Fe^{3+} // Энергетические установки и технологии: научный журнал. – Севастополь: СевГУ, 2020. Т. 6. № 2. - С. 105-110.
9. ГОСТ 18293-72 Вода питьевая. Методы определения содержания свинца, цинка, серебра // <https://ohranatruda.ru/upload/iblock/578/4294850601.pdf> (Дата обращения 13.11.2024г).
10. ГОСТ Р 51232-98. Вода питьевая Общие требования к организации и методам контроля качества https://vodakanazer.ru/docs/doc_gost-51232-98.pdf (Дата обращения 13.11.2024г).
11. Нитрозо нафтол определение кобальта - Справочник химика 21 // <https://www.chem21.info/info/1231004/> (Дата обращения 10.11.2024г).

References

1. Strategiya ekologicheskoy bezopasnosti Rossij-skoj Federacii na period do 2025 goda. <https://normativ.kontur.ru/document?moduleId=1&documentId=292172> (Data obrashcheniya 13.11.2024g)

2. Zavody po otraslyam promyshlennosti RF /(Data obrashcheniya//<https://fabricators.ru/sitemap/rubriki> (Data obrashcheniya 10.11.2024)
3. Gavrish V.M., Chajka T.V., Baranov G.A., Fedorova S.A. Vliyanie dobavok nanoporoshkovykh smesey WC, TiC, TaC na prochnostnye svoystva betona// Materialstoday: proceedings, Tom 19, Chast' 5, 2019, Stranicy 1961-1964, Available online 25 July 2019
4. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.07.051>, ISSN: 2214-7853, 2019 g.
5. Nichkova L.A., Baranov G.A., Shagova Yu.O., Fedorova S.A. Issledovanie vliyaniya nanoporoshkov ok-sida vol'frama na predel'nyuyu dlitel'nost' deystviya betona, gipsa i keramiki // Materials today: proceedings, Tom 19, Chast' 5, 2019, Stranicy 1941-1944. Available online 27 July 2019. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.07.046>, ISSN: 2214-7853.
6. Fedorova S.A., Kupov A.B. Vliyanie nanoporoshka SiO₂ na ochistku model'nykh sred (Pb²⁺, Ni²⁺, Cu²⁺, Cd²⁺, Zn²⁺) // Innovacionnye podhody v sovremen-noj nauke. sb. st. po materialam CXVIII mezhdunar. nauch.-prakt. konf. – № 10 (118). – M., Izd. «Internauka», 2022– S.95-98
7. Fedorova S.A., Magdych E.A. Analiz sorbcion-nykh svoystv nanoporoshka SiO₂ po otnosheniyu k Cu²⁺ Estestvennye i tekhnicheskie nauki: nauchnyy zhurnal – Moskva, 2023. № 1 (176). S. 186-187.
8. Fedorova S.A., Tkachenko E.S., Serbin A. D., Rusyaev S. V..Himicheskij monitoring ionov svinca v morskoy vode g. Sevastopolya // Innovacionnye podhody v sovremennoj nauke. sb. st. po materialam CXXV mezhdunar. nauch.-prakt. konf. – № 17 (125). – M., Izd. «Internauka», 2022. –S18-22.
9. Fedorova S.A. Vliyanie nanoporoshka dioksida kremniya na elektroprovodnost' model'nykh sred, sodержashchih kationy Na⁺, Mg²⁺, Fe³⁺ //Energeticheskie ustanovki i tekhnologii: nauchnyy zhurnal. – Sevastopol': SevGU, 2020. T. 6. № 2. - S. 105-110.
10. GOST 18293-72 Voda pit'evaya. Metody opredeleniya sodержaniya svinca, cinka, serebra // <https://ohranatruda.ru/upload/iblock/578/4294850601.pdf> (Data obrashcheniya 13.11.2024g).
11. GOST R 51232-98. Voda pit'evaya Obshchie trebovaniya k organizacii i metodam kontrolya kachestva https://vodakanazer.ru/docs/doc_gost-51232-98.pdf (Data obrashcheniya 13.11.2024g).
12. Nitrozo naftol opredelenie kobal'ta - Spra-vochnik himika 21 // <https://www.chem21.info/info/1231004/> (Data obra-shcheniya 10.11.2024g).

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ТЕХНОЛОГИИ

Научный журнал

Выпуск № 4, Том 10 2024 г.

16+

Рубрики в соответствии с номенклатурой научных специальностей:

2.4.5. Энергетические системы и комплексы; 2.4.2 Электротехнические комплексы и системы; 2.4.6. Теоретическая и прикладная теплотехника; 2.4.9. Ядерные энергетические установки, топливный цикл, радиационная безопасность; 2.4.10. Техносферная безопасность (в энергетике); 2.2.8. Методы и приборы контроля и диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды; 2.6.13. Процессы и аппараты химических технологий.

Адрес редакции:

299015, г. Севастополь, ул. Курчатова, 7.

Телефон редакции: 8(692) 710164

<https://old.sevsu.ru/nauka/pechat-izdaniya/item/1272-njeut>

e-mail: nauchnyyzhurnal@mail.ru

Отпечатано в издательстве СевГУ.

Публикуемые материалы прошли обязательную процедуру рецензирования и экспертного отбора. Авторы опубликованных материалов несут полную ответственность за подбор и точность приведенных фактов, цитат, данных, имен собственных и прочих сведений.

Редакция не несет ответственности за нарушение авторами исключительных прав на результаты интеллектуальной деятельности третьих лиц. Мнение редакционной коллегии может не совпадать с позицией авторов статей. При перепечатке материалов ссылка на научный журнал «Энергетические установки и технологии» обязательна.

Учредитель и издатель:

ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»,
ул. Университетская, 33. Севастополь, 299053.

№ рег. СМИ: ПИ № ФС 77 – 64120 от 25.12.2015 г.

Главный редактор: Якимович Борис Анатольевич

Подписано к печати 13.12.2024. Заказ 36/24. Дата выхода в свет: 30.12.2024 Тираж 30 экз. Цена: Бесплатно. Формат 60×84/8. Бумага офсетная. Объем усл. печ. л. 13,23.

Севастополь, 2024