

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. 11 № 4

**Севастополь
2025**

Э 651 Энергетические установки и технологии: науч. журнал. – Севастополь: ФГАОУ ВО СевГУ, 2025. – Т. 11. - № 4. – 103 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.

Богомолов 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», 2025

КОЛОНКА ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА



Уважаемые читатели научного журнала «Энергетические установки и технологии»!

Уважаемые авторы, научно-технический журнал «Энергетические установки и технологии» рад приветствовать Вас на страницах опубликованного в 2025 году нового четвертого номера. В этом сборнике представлены статьи по таким направлениям как энергетические системы и комплексы, методы и приборы контроля и диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды, ядерные энергетические установки, топливный цикл, радиационная безопасность, электротехнические комплексы и системы, техносферная безопасность в энергетике, процессы и аппараты химических технологий.

В представленном сборнике представлены разработки в областях возобновляемой энергетики, ядерно-химических технологий, техносферной безопасности и др. Хочется отметить работы по водородной энергетике и использованию комбинированных систем на основе преобразования потока солнечной радиации и энергии ветра, а также труды, связанные с использованием новых технологий в областях измерительной техники и методов диагностики материалов.

В работах, опубликованных в четвертом номере журнала представлены результаты новых научно-технических достижений, которые способствуют развитию технических отраслей и внедрению инноваций. Такие примеры передовых научных идей и практических решений способствуют переходу к экологически чистой и экономически эффективной энергетике.

Традиционные и возобновляемые источники энергии играют все большую значимость в мировой экономике. Их интеграция в комплексные энергосистемы требует разработки новых методов управления, накопления и распределения энергии, а также адаптации инфраструктуры под современные требования устойчивого функционирования энергетических комплексов.

Мы искренне надеемся, что работы, представленные в четвёртом номере научного сборника «Энергетические установки и технологии», вызовут интерес у научного сообщества, а также станут дискуссионной площадкой в выборе пути развития современной энергетики. Мы поддерживаем диалог между учёными, инженерами и практиками, который ускоряет развитие эффективных решений для устойчивого и безопасного энергетического будущего.

*С уважением, главный редактор журнала «Энергетические установки и технологии»
доктор технических наук, профессор,
Заслуженный деятель науки Российской Федерации
Б.А. Якимович*

СОДЕРЖАНИЕ

Энергетические системы и комплексы	10
<i>Артёменко И.Д., Шаповаленко В.В., Малюк Е.Г., Звягинцев Ю.М., Штепа К.В.</i> Солнечные электростанции для работы на южном побережье Крыма	10
<i>Егорова А.О., Якимович Б.А., Абейдулин С.А., Смычков Е.Е., Артёменко И.Д.</i> Исследование режимов работы фотоэлектрических установок малой генерации энергии	15
<i>Кувшинов В.В., Гусева Е.В., Галий В.А., Касницкий А.Д.</i> Разработка гибридной системы солнечного энергоснабжения с использованием накопителей энергии	22
<i>Кувшинов В.В., Шевчук А.А., Цалоев В.М., Абейдулин С.А., Рыбонька А.И.</i> Моделирование фотоэлектрической системы при использовании алгоритма контроля точки максимальной мощности	28
<i>Кувшинов В.В., Жильцов А.С., Владимиров А.С., Юферев Л.Ю., Касницкий А.Д.</i> Использование фотоэлектрических панелей для комбинированной судовой энергетической установки	34
<i>Шевчук А.А., Кувшинов В.В., Владимиров А.С., Бордан Д.Ф., Бурдин Н.С.</i> Применение алгоритма soft actor-critic для управления двухосной системой слежения за солнцем	38
Методы и приборы контроля и диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды	44
<i>Кузнецова Н.И., Губина Е.Д., Серова-Нашева Н.В.</i> Метод определения запасного имущества и принадлежностей для оборудования систем контроля и управления	44
Ядерные энергетические установки, топливный цикл, радиационная безопасность	49
<i>Корнеева Н.К., Пичугова Л.Н., Глушкова Е.В., Батарейная В.В.</i> Коррозия нержавеющей стали в ЯЭУ	49
<i>Корнеева Н.К., Пичугова Л.Н., Глушкова Е.В., Пантель В.О.</i> Оценка надежности трубопровода рециркуляции насосов ТПН турбинного блока №1	57
<i>Коротких Е.И., Шаповаленко В.В.</i> Использование в составе активной зоны реактора ВВЭР-1000 ТВС с РЕМИКС-топливом	61
<i>Коротких Е.И., Шаповаленко В.В., Кувшинов В.В.</i> Способы регулирования спектром нейронов в водо-водяных реакторах под давлением	66
Электротехнические комплексы и системы	70
<i>Бекиров О.С., Абдурахманов Р.Н., Бекиров Э.А., Кувшинов В.В.</i> Энергообеспечение индивидуального потребителя с использованием установок на основе возобновляемых источников энергии	70
<i>Таран А.А., Шаповаленко В.В., Нагирняк А.А., Скидан А.А., Смирнов В.В.</i> Некоторые результаты исследования модульной мобильной фотоэлектрической станции	74
<i>Халиляев А.Э., Абдурахманов Р.Н., Бекиров Э.А., Шевчук А.А.</i> Использование солнечных батарей для электроснабжения фермерского хозяйства	83

Техносферная безопасность (в энергетике)	89
<i>Контылева Е.А., Маврин С.А.</i> Исследование технологий искусственного интеллекта в мошенничестве	89
<i>Контылева Е.А., Эндрижикевич Ю.Ю.</i> Разработка решения, обеспечивающего защиту исполняемого кода от несанкционированного доступа и анализа посредством применения техник обфускации	94
<i>Контылева Е.А., Пупков Э.А., Сергиенко М.А., Грехов Н.А.</i> Исследование сравнительной эффективности алгоритмов обнаружения персональных данных в неструктурированных информационных ресурсах с учетом метрик точности и производительности	98

CONTENTS

Energy systems and complexes	10
<i>Artyomenko I.D., Shapovalenko V.V., Malyuk E.G., Zvyagintsev Yu.M., Shtepa K.V.</i> Solar power plants for operation on the southern coast of Crimea	10
<i>Egorova A.O., Yakimovich B.A., Abeydulin S.A., Smychkov E.E., Artemenko I.D.</i> Study of Operating Modes of Photovoltaic Installations for Small-Scale Energy Generation	15
<i>Kuvshinov V.V., Guseva E.V., Gali V.A., Kasnitskiy A.D.</i> Development of a hybrid solar power supply system using energy storage devices	22
<i>Kuvshinov V.V., Shevchuk A.A., Tsaloiev V.M., Abeydulin S.A., Rybonka A.I.</i> Modeling a photovoltaic system using a maximum power point tracking algorithm	28
<i>Kuvshinov V.V., Zhiltsov A.S., Vladimirov A.S., Yuferev L.Y., Kasnitsky A.D.</i> Using photovoltaic panels for a combined ship power plant	34
<i>Shevchuk A.A., Kuvshinov V.V.1, Vladimirov A.S., Bordan D.F., Burdin N.S.</i> Application of the soft actor-critic algorithm for controlling a dual-axis solar tracking system	38
Methods and devices for monitoring and diagnostics of materials, products, substances and the natural environment	44
<i>Kuznetsova N.I., Gubina E.D., Serova-Nasheva N.V.</i> Method for determining spare property and accessories for control and management system equipment	44
Nuclear power plants, fuel cycle, radiation safety	49
<i>Korneeva, N.K., Pichugova, L.N., Glushkova E.V., Batareynaya V.V.</i> Corrosion of stainless steels in nuclear power plants	49
<i>Korneeva, N.K., Pichugova, L.N., Glushkova E.V., Pantel V.O.</i> Assessment of the reliability of the walls of the feed water pressure pipeline VPEN block №1	57
<i>Korotkikh E.I., Shapovalenko V.V.</i> Using in reactor core VVER-1000 fuel assemblies with uranium-plutonium nuclear fuel - REMIX	61
<i>Korotkikh E.I., Shapovalenko V.V., Kuvshinov V.V.</i> Methods of regulation the spectrum of neutrons in pressurized water nuclear reactors	66
Electrical engineering complexes and system	70
<i>Bekirov O.S., Abdurakhmanov R.N., Bekirov E.A., Kuvshinov V.V.</i> Energy supply to the farm using installations using renewable energy sources	70
<i>Taran A.A., Shapovalenko V.V., Nagirnyak A.A., Skidan A.A., Smirnov V.V.</i> Some results of the study of a modular mobile photovoltaic station	74
<i>Khalilyaev A.E., Abdurakhmanov R.N., Bekirov E.A., Shevchuk A.A.</i> Use of solar panels for power supply of a farm enterprise	83
Technosphere safety (in the energy sector)	89
<i>Kontyleva E.A., Mavrin S.A.</i> Research on the use of artificial intelligence technologies in fraud	89
<i>Kontyleva E.A., Endrizhikevich Yu.Yu.</i> Development of a solution that	94

protects executable code from unauthorized access and analysis by using obfuscation techniques

Kontyleva E.A., Pupkov E.A., Sergienko M.A., Grekhov N.A. A study of the comparative effectiveness of algorithms for detecting personal data in unstructured information resources, taking into account accuracy and performance metrics

98

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И КОМПЛЕКСЫ

УДК 620.92, 621.311.24

**Солнечные электростанции для работы на южном побережье
Крыма**

И.Д. Артёменко¹, В.В. Шаповаленко¹, Е.Г. Малюк.¹, Ю.М. Звягинцев¹,
К.В. Штепа¹

¹ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», Университетская-33 г. Севастополь, 299053,
Россия

leftysingle@gmail.com, shapovalenkovita@rambler.ru, vmalyuk@mail.ru, kimeriya@mail.ru, stillen75@mail.ru

Статья поступила 17.11.2025 г. ; после доработки 20.11.2025 г.

Аннотация

В работе приведены исследования нескольких фотоэлектрических автономных станций расположенных на Южном берегу Крыма. С целью уменьшения негативного влияния непостоянства потока солнечной радиации на работу солнечных систем необходимо выявлять недостатки фотоэлектрических систем в натурных условиях.

Ключевые слова: солнечная радиация, южный берег Крыма, фотоэлектрическая панель, накопитель энергии, энергоснабжение.

Solar power plants for operation on the southern coast of Crimea

I.D. Artyomenko¹, V.V. Shapovalenko¹, E.G. Malyuk.¹, Yu.M. Zvyagintsev¹,
K.V. Shtepa¹

Sevastopol stat university, 33 Universitetskaya st., Sevastopol, 299053, Russia,
leftysingle@gmail.com, shapovalenkovita@rambler.ru, vmalyuk@mail.ru, kimeriya@mail.ru, stillen75@mail.ru

Received 17.11.2025y. ; received in final form 20.11.2025 y.

Abstract

This paper presents studies of several autonomous photovoltaic power plants located on the southern coast of Crimea. To reduce the negative impact of variable solar radiation on the operation of solar systems, it is necessary to identify the shortcomings of photovoltaic systems under natural conditions

Keywords: solar radiation, southern coast of Crimea, photovoltaic panel, energy storage, energy supply.

Введение

В работе приводятся натурные исследования фотоэлектрических станций, расположенных на прибрежной территории Республики Крым, в частности в городе Алушта. Также приводится сравнение их работы с электростанциями в городе Симферополь и других районах Крыма [1].

К сожалению выработка кремниевых фотоэлектрических панелей, может значительно

уменьшаться как при недостатках потока солнечной радиации или при негативных климатических последствиях, так и при отказе их основного или вспомогательного оборудования, или их частичной деградации [2].

Такие последствия могут быть вызваны влиянием неблагоприятного морского климата, ветровыми нагрузками или длительным попаданием соленой воды на рабочую поверхность солнечных батарей. Если установки применять непосредственно возле морского побережья или

непосредственно на морских платформах, то такие негативные факторы значительно усугубляются. Дegradaция компонентов фотоэлектрической системы может существенно повлиять на производительность и экономическую эффективность солнечных электростанций [3]. Для уменьшения деградации можно использовать специальные защитные покрытия или устанавливать солнечные панели с хорошо защищённой поверхностью. Также для своевременного определения повреждений рабочей поверхности солнечных панелей или оборудования фотоэлектрической системы необходимо провести анализ методов, позволяющих быстро реагировать на такие последствия. При использовании различных методов, позволяющих защищать такие системы можно вовремя предотвратить уменьшение генерации электрической энергии солнечными станциями и продолжать их использование в течение длительного времени [4].

Цель и постановка задачи

В последние десятилетия автономные солнечные электрические станции стали важным компонентом глобальной энергетической системы и могут быть установлены на ровных площадях дворов или придомовых территорий (рис. 1), а также непосредственно на крышах зданий (рис. 2).



Рис. 1. Солнечная фотоэлектрическая станция, расположенная в поселке Лучистое (г. Алушта)

При работе энергетических комплексов на основе фотоэлектрических преобразователей необходимо постоянно иметь некоторый резервный запас мощности с целью уменьшения негативного влияния непостоянства потока солнечной радиации на производительность электростанции. Такой запас можно получать как с общей сети, так и при использовании накопителей

энергии [5].

С увеличением объемов производства и внедрения технологий на основе фотоэлектрических преобразователей (ФЭП) возникает необходимость в эффективных методах диагностики и оценки состояния оборудования.

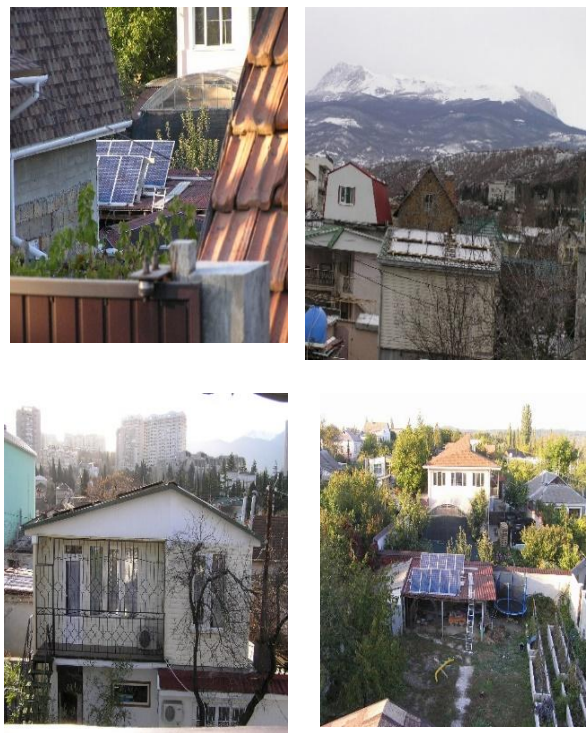


Рис. 2. Фотоэлектрические станции, расположенные непосредственно в городах Симферополь и Алушта на крышах зданий

Исследуемые солнечные электрические станции имеют малую мощность около 5-7 кВт. Также для эффективной работы на локальную сеть у них есть основное и дополнительное оборудование, в частности ёмкостные накопители энергии (аккумуляторные батареи), инвертора, контроллеры заряда-разряда и другое оборудование. Малая электростанция имеет солнечные панели и аккумуляторные батареи, расположенные на крышах и в подсобных помещениях в частных жилых домах на территории Крыма (рис. 1 и 2). Система расположена в г. Алушта имеет мощность 5,4 кВт, состоит из 12 фотоэлектрических панелей мощностью 450 Вт, расположенных на крыше и включает 44 аккумуляторные батареи (АКБ) ёмкостью по 96 А·ч, также система имеет два инвертора и другое оборудование, которое расположено на цокольном этаже дома (рис.3). Представленная система подключена к общей сети дома и имеет возможность работать параллельно.

Современные автономные солнечные электрические станции оснащены дополнительным оборудованием, системами автоматики и способны эффективно вырабатывать электрическую энергию для локальной сети. При этом станция подключена к городской сети и аккумуляторные батареи могут накапливать электрическую энергию в моменты недостатка потока солнечной радиации и обеспечивать потребителя длительное время при сбоях оборудования или недостатке мощности централизованного электроснабжения. Система автоматического управления способна своевременно выявлять сбои, что позволяет увеличить эффективность их использования, своевременно выявляя и устраняя дефекты оборудования.



Рис. 3. Автономная малая солнечная электростанция с накопителями энергии мощностью 5400 Вт (г.Алушта)

Результаты исследований

В процессе работы были разработаны схемы подключения (рис. 4) основного и вспомогательного оборудования энергокомплекса и его основные характеристики.

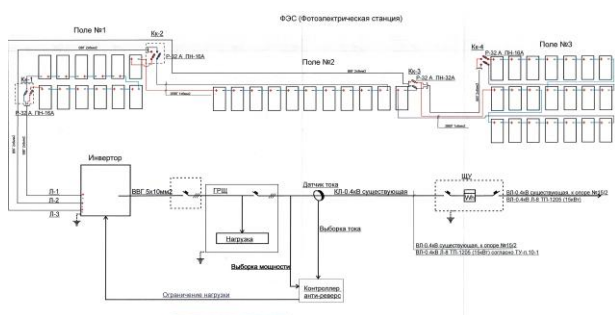


Рис. 4. Схема подключения основного и вспомогательного оборудования автономной солнечной электростанции

На рисунке 1 представлена фотоэлектрическая станция, находящаяся в поселке Лучистое Алуштинского района, находящаяся у подножья горы Демерджи на южном склоне горы. Эта фотоэлектрическая система не имеет накопителей

энергии и работает параллельно с общей энергосетью. Потребитель использует систему взаимозачета с энергоснабжающей организацией, что позволяет ему в среднем экономить 50 % электрической энергии, потребляемой из общей энергосистемы. На рисунке 2 представлены фотоэлектрические станции, расположенные в городе Симферополь и Алушта. Как видно из рисунков фотоэлектрические панели расположены на кровле зданий, а АКБ и другое оборудование в закрытом помещении. Такое расположение дало возможность использовать как энергию потока солнечного излучения, так и накопленную энергию, при этом обе установки были подключены к общей энергосистеме с возможностью заряда от сети. В представленной работе были проведены натурные исследования солнечных электростанций, что позволило эффективно установить необходимое электротехническое оборудование, которое представлено на рисунке 5.



Рис. 5. Основное и вспомогательное оборудования автономных солнечных электростанций (инверторы, аккумуляторные батареи, контроллеры и др.)

Основным элементов всех солнечных электростанций являются солнечные модули (панели), состоящие их набора фотоэлектрических преобразователей (ФЭПов). При натурных испытаниях стало возможным определение основных рабочих параметров всей станции. Мощностные характеристики фотоэлектрических панелей выбирались из нагрузочных характеристик бытового оборудования индивидуального потребителя, а электрические характеристики инвертора из параметров ФЭПов и накопителей энергии. Заводские характеристики используемого инвертора и фотоэлектрических панелей приведены на рисунке 6.

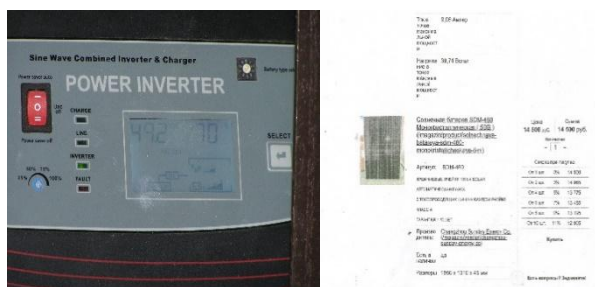


Рис. 6. Заводские характеристики инвертора и фотоэлектрических панелей солнечной станции

Возможная деградация фотоэлектрических панелей при работе в условиях морского климата

При работе в период длительного времени в условиях воздействия морской прибрежной среды (сильные ветра, воздействие влаги и соленой воды) на рабочей поверхности фотоэлектрических панелей могут появляться различные дефекты и нарушения внешнего вида, что приводит к уменьшению выработки станции или к выходу из строя отдельных модулей. Как видно из рисунка 7 на поверхности фотоэлектрических панелей станции в городе Алушта произошли непредвиденные изменения.



Рис. 7. Нормальная и деградировавшая панель солнечной станции в городе Алушта

Как видно из рисунка 7 произошла сильная деградация фотоэлектрического модуля под воздействием агрессивной морской среды. Для уменьшения потерь сгенерированной солнечными станциями электроэнергии и увеличения эффективности работы необходимо было обнаружить дефекты в панелях и своевременно произвести замену оборудования. Система автоматического управления помогает выявлять дефекты электростанции [6]. Своевременное определение дефекта и замена оборудования позволили восстановить работу станции и продолжить эксплуатацию.

Заключение

Как видно при использовании солнечных электростанций на прибрежных территориях

непосредственно на морском транспорте необходимо тщательно выбирать качество панелей и своевременно их менять при обнаружении дефектов. Методы диагностики деградации оборудования на солнечных электрических станциях продолжают развиваться. Эффективное использование современных технологий может существенно повысить надежность и производительность солнечных систем, что в свою очередь способствует более эффективному использованию возобновляемых источников энергии. Важно помнить, что регулярная диагностика не только увеличивает срок службы оборудования, но и оптимизирует его работу, что делает использование солнечной энергии более экономически выгодной.

Использование предложенных методов определения деградации модулей и замена оборудования может быть эффективно как для крупных фотоэлектрических станций, так и для автономных систем солнечной генерации малой мощности. Предложенное решение значительно увеличивает время постоянной генерации электрической энергии и позволяет использовать основное и вспомогательное оборудование в нормальном режиме.

Исследования, описанные в предложенной статье, дают возможность более полно ознакомиться с возможными деградациями фотоэлектрических установок и солнечных генерирующих станций, а также позволяют рассмотреть вопросы, связанные с использованием данных типов генерирующих систем для обеспечения различных энергетических объектов.

Список литературы

1. Автономная гибридная энергетическая система на основе солнечных преобразователей и водородных топливных элементов // Исса Х.А.И., Велькин В.И., Абдали Л.М.А., Кувшинов В.В., Муровский С.П. / Транспорт Азиатско-Тихоокеанского региона. 2025. № 2 (43). С. 36-46.
2. Мониторинг состояния поверхности фотоэлектрических модулей при использовании беспилотных летательных аппаратов / Котельников Д.Ю., Кузнецов П.Н., Якимович Б.А., Бани Мардже М. // Экологическая, промышленная и энергетическая безопасность - 2023. Сборник статей по материалам международной научно-практической конференции, Севастополь, 2023. С.494-497.
3. Методы устранения негативного влияния на энергетические сети работы фотоэлектрических станций / Меджитов М.Р., Фролова А.Н., Кувшинов В.В., Касницкий А.Д., Жильцов А.С. / Энергетические установки и технологии. 2023.

- Т.9.№1. С.63-67.
4. Combined energy systems based on renewable energy sources // Kuvshinov V.V., Abdali L.M., Almaliki M.N., Hejeejo R.H., Issa H.A., Yakimovich B.A., Shcheklein S.E., Velkin V.I. / MM Science Journal. 2023. T. 2023.№5.
5. Эффективность управления двухосными солнечными трекерами с применением PID и FOPID-регуляторов // Исса Хайдер А.И., Велькин В.И., Абдали Лаит М.А., Кувшинов В.В., Муровский С.П., Щеклеин С.Е. / Транспорт Азиатско-Тихоокеанского региона. 2025. №3(44). С. 87-95.
6. Мониторинг параметров фотоэлектрической установки // Кузнецов П.Н., Губин В.Е., Котельников Д.Ю., Янковский С.А., Лавриненко С.В. / Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2024613544, 14.02.2024. Заявка №2024612687 от 14.02.2024.

References

1. Autonomous hybrid power system based on solar converters and hydrogen fuel cells // Issa H.A.I., Velkin V.I., Abdal L.M.A., Kuvshinov V.V., Murovsky S.P. / Transport of the Asia-Pacific region. 2025. No. 2 (43). Pp. 36-46.
2. Monitoring the condition of the surface of photovoltaic modules using unmanned aerial vehicles / Kotelnikov D.Yu., Kuznetsov P.N., Yakimovich B.A., Bani Marje M.// Environmental, Industrial, and Energy Security - 2023. Collection of articles based on the materials of the international scientific and practical conference, Sevastopol, 2023. P.494-497.
3. Methods of eliminating the negative impact on energy networks of the operation of photovoltaic stations / Medzhitov M.R., Frolova A.N., Kuvshinov V.V., Kasnitsky A.D., Zhiltsov A.S. / Energy Plants and Technologies. 2023. V.9. No. 1. P.63-67
4. Combined energy systems based on renewable energy sources // Kuvshinov V.V., Abdali L.M., Almaliki M.N., Hejeejo R.H., Issa H.A., Yakimovich B.A., Shcheklein S.E., Velkin V.I. / MM Science Journal. 2023. T. 2023. № 5.
5. The Effectiveness of PID and FOPID Control of Two-Axle Solar Trackers // Issa Haider A.I., Velkin V.I., Abdali Laith M.A., Kuvshinov V.V., Murovsky S.P., Shcheklein S.E. / Transport in the Asia-Pacific Region. 2025. No. 3 (44). Pp. 87-95.
6. Monitoring the Parameters of a Photovoltaic Installation // Kuznetsov P.N., Gubin V.E., Kotelnikov D.Yu., Yankovsky S.A., Lavrinenko S.V. / Certificate of Registration of a Computer Program RU 2024613544, 14.02.2024. Application No. 2024612687 dated 14.02.2024.

УДК 621.311.2:535.24

Исследование режимов работы фотоэлектрических установок малой генерации энергии

А.О. Егорова¹, Б.А. Якимович², С.А. Абейдулин³, Е.Е. Смычков⁴,
И.Д. Артеменко⁵

¹Севастопольский государственный университет, Севастополь, Россия, aokalita@mail.sevsu.ru

^{2,3,4,5} Севастопольский государственный университет, Севастополь, Россия

Статья поступила 07.11.2025 г.; после доработки 10.11.2025 г.

Аннотация

Представлены результаты исследования установившихся режимов работы солнечных фотоэлектрических станций (СЭС) малой мощности. Разработана методика анализа статической устойчивости режимов на основе якобиана уравнений установившегося режима. Определены допустимые области работы СЭС в пространстве напряжений и мощностей. Предложенные решения позволяют повысить эффективность и надёжность эксплуатации фотоэлектрических установок.

Ключевые слова: Фотоэлектрические станции, микрогенерация, статическая устойчивость, режимы работы, солнечная энергетика, сетевые инверторы, электроэнергетические системы.

Study of Operating Modes of Photovoltaic Installations for Small-Scale Energy Generation

A.O. Egorova¹, B.A. Yakimovich², S.A. Abeydulin³, E.E. Smychkov⁴, I.D. Artemenko⁵

¹Sevastopol State University, Sevastopol, Russia, aokalita@mail.sevsu.ru

^{2,3,4,5} Sevastopol State University, Sevastopol, Russia

Received 07.11.2025 y.; received in final form 10.11.2025 y.

Abstract

The research presents the results of studying steady-state operating modes of low-capacity solar photovoltaic power plants (PVPS). A methodology has been developed for analysing static stability of modes based on the Jacobian of steady-state equations. The permissible operating areas for PVPS in voltage and power space have been determined. The proposed solutions enhance the efficiency and reliability of photovoltaic installations operation.

Keywords: Photovoltaic power plants, microgeneration, static stability, operating modes, solar energy, grid inverters, electric power systems

Введение

Актуальность данного исследования обусловлена увеличивающимся спросом на электроэнергетические системы малой мощности, а также на технологии возобновляемой энергетики.

Для проведения исследований были взяты материалы профильных международных ведомств и агентств, Министерства энергетики

Российской Федерации. Кроме того, источниками данных являются публикации и исследования российских и зарубежных ученых по исследуемой проблематике. Малая электроэнергетика на данном жизненном этапе – энергетически эффективный инструмент в реформировании энергетики Российской Федерации, способствующий отказу от традиционной централизованной системы, основанной на применении круп-

ных источников электроэнергетического производства и переходу на альтернативные способы получения электроэнергии, основанных на использовании источников энергии, актуализированных под конкретные природные условия и запросы потенциальных потребителей.

Уменьшение загрязняющих и являющихся вредными для здоровья человека выбросов позволяет снизить уровень сложившейся нагрузки на экономику страны и дать толчок для развития ее потенциала за счет высвободившихся ресурсов, уменьшить нагрузку на экономику, тем самым определяя ресурсы для ее роста. Безусловно, переход от традиционных экономических моделей к модели зеленого роста может быть реализован только в случае приложения существенных усилий, направленных на расширение международного сотрудничества в этой области. Одновременно с этим возникает необходимость в последовательном проведении мероприятий различного уровня.

Развитие технологий микрогенерации на основе возобновляемых источников энергии требует детального исследования режимов работы фотоэлектрических установок. Актуальность исследования обусловлена растущим спросом на децентрализованные системы электроснабжения и необходимостью оптимизации их взаимодействия с энергосистемой. Цель работы — разработка методики анализа установившихся режимов работы СЭС и определение условий их устойчивой эксплуатации.

Постановка задачи

Принятый в декабре 2019 г. Государственной думой РФ Федеральный закон № 35-ФЗ «Об электроэнергетике» [1] вводит такое понятие, как «Объект микрогенерации», тем самым упрощая возможность установки, подключения к общей сети электрической системы, например, небольшой солнечной электростанции (СЭС) потребителя.

Объектом микрогенерации являются устройства по производству электрической энергии, принадлежащие на праве собственности или ином законном основании потребителю (частному лицу или организации). Такими устройствами могут выступать как мощности ВИЭ (солнечные батареи, ветрогенераторы, приливные/волновые электростанции и т. д.) [1], например, СЭС (рис. 1).

Технологическое присоединение объектов микрогенерации должно предусматривать их

подключение к сетям гарантирующего поставщика на напряжении до 1000 В и обеспечение технического ограничения выдачи электрической энергии в сеть с максимальной мощностью, не превышающей величину максимальной мощности принимающих устройств потребителя электрической энергии, которому принадлежат на праве собственности или ином законном основании объекты микрогенерации, и составляющей не более 15 кВт [1].

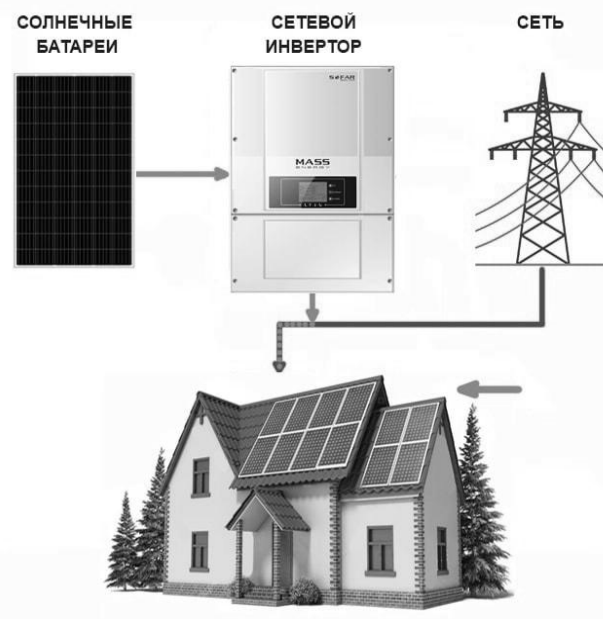


Рис. 1. Фотоэлектрическая установка с сетевым инвертором, как объект микрогенерации

Требование по подключению СЭС к сети [2] состоит в перетекании по ЛЭП тока от нее в сеть, синхронизированного по частоте и фазе, при этом напряжение сетевого инвертора СЭС должно быть чуть выше напряжения в сети.

Если же задачей ввода СЭС является продажа в сеть электроэнергии по «зеленому» тарифу и заработок, то сетевой инвертор необходимо подбирать по следующим параметрам [3]:

- мощность инвертора не больше разрешенной мощности (можно повысить до 30 кВт);
- потребляемая нагрузкой собственника СЭС электроэнергия должна быть не больше генерируемой солнечными батареями и выдаваемой сетевым инвертором;
- сетевой инвертор должен быть сертифицированным;
- сетевой инвертор должен быть смонтирован организацией, имеющей лицензию на стро-

ительство объектов 4 и 5 категории сложности.

Электрическая энергия, произведенная на объектах микрогенерации и не потребленная их собственниками и иными законными владельцами в целях удовлетворения собственных бытовых и (или) производственных нужд, реализуется на розничных рынках в порядке, установленном основными положениями функционирования розничных рынков. Реализация физическими лицами электрической энергии, произведенной на объектах микрогенерации, не является предпринимательской деятельностью. Заключение договора купли-продажи электрической энергии, произведенной на объектах микрогенерации, расположенных в зоне деятельности гарантирующего поставщика, с обратившимися к гарантирующему поставщику собственником или иным законным владельцем объектов микрогенерации является обязательным для гарантирующего поставщика.

Учёт потреблённой и отданной электроэнергии между СЭС и сетевой организацией можно контролировать, например, многофункциональным двунаправленным счетчиком ПСЧ-4ТМ.05МД.21 [4].

Гарантирующий поставщик, функционирующий в ценовых и неценовых зонах оптового рынка, приобретает на розничных рынках у собственников и иных законных владельцев объектов микрогенерации электрическую энергию, произведенную на объектах микрогенерации, по ценам, не превышающим цен на приобретаемые на оптовом рынке гарантирующими поставщиками электрическую энергию и мощность [1].

Если разделить стоимость, например, сетевой солнечной электростанции мощностью 20 кВт от «Технолайн» [4] на её суточную выработку, умноженную на примерную цену электроэнергии на оптовом рынке, то срок окупаемости СЭС составит около 15 лет. Такой срок сопоставим со сроком службы солнечных панелей и почти вдвое больше срока службы сетевого инвертора [3-6]. Поэтому СЭС как объект микрогенерации не выгодно покупать для получения прибыли от продажи электроэнергии при отсутствии «зелёного тарифа». Также не получится использовать сеть, как огромный внешний аккумулятор, куда можно складировать избыток выработанной электроэнергии, поскольку у потребителя стоит двунаправленный счётчик, считающий отдельно объём отданной в сеть электроэнергии и объём полученной электроэнергии из сети. При расчетах в конце месяца составляется

баланс и, если СЭС сгенерировала электроэнергии больше, чем потребил её владелец, ему выплачивают разницу, рассчитанную по оптовым ценам рынка. Если же он сгенерировал на СЭС электроэнергии меньше, чем потребил, то он оплачивает разницу уже по розничной цене [1].

Результаты исследований

Предложенная методика анализа статической устойчивости установившихся режимов работы сетевой СЭС на основе якобиана уравнений установившегося режима и построения допустимых областей в пространстве напряжений и мощностей может быть применена к СЭС произвольной мощности. В процессе настройки устройств контроля электрических параметров СЭС следует учитывать ограничения не только на модули, но и на углы напряжения станций. Перенапряжения в сети, снижения модуля напряжения в узле СЭС, вызванные, например, пуском мощного электродвигателя, а также сбои в работе сетевого инвертора станции могут привести к переходу установившегося режима в статически неустойчивую область.

Рассмотрим установившийся режим работы СЭС совместно с сетью электрической системы (рис. 2). Установившийся режим должен удовлетворять не только техническим ограничениям на уровень напряжения СЭС ($1,1 U_n \geq U_1 \geq 0,9 U_n$) и длительно допустимый ток в ЛЭП, связывающий СЭС с сетью, но и быть статически устойчивым [7].

Уравнения установившегося режима для системы рис. 3 представляют собой уравнения баланса мощности в узле 1 СЭС, т. е. полная мощность генерации СЭС (обычно принимается отрицательной) должна полностью передаваться по ЛЭП в сеть или потребляться нагрузкой узла (1)

$$-S_1 = \sqrt{3} U_1 I^* \quad (1)$$

где $-S_1$ - полная мощность генерации СЭС, U_1 - комплексное напряжение сетевого инвертора СЭС, I^* - сопряженный комплекс тока, протекающий от СЭС в сеть или из сети в узел по ЛЭП.

Для дальнейшего анализа удобно представить в уравнении (1) комплекс полной мощности в алгебраической форме, а комплекс напряжения

в тригонометрической форме

$$-(P_1 + jQ_1) = \sqrt{3}(U_1 \cos \delta_1 + jU_1 \sin \delta_1) I^* \quad (2)$$

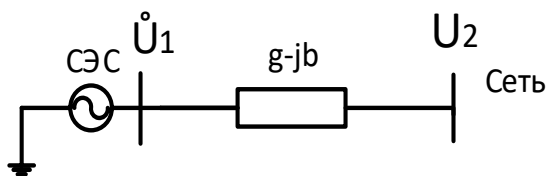


Рис. 2. Схема выдачи мощности СЭС в общую распределительную сеть электрической системы

Напряжение сети U_2 принимаем за базисное и вещественное ($\delta_2 = 0$), а комплекс тока в ЛЭП определим по закону Ома

$$I = (U_1 - U_2)(g - jb). \quad (3)$$

Активную g и реактивную b проводимости ЛЭП можно определить по соответствующим активной r_0 и реактивной x_0 погонным сопротивлениям провода, связывающего СЭС с сетью, и его длине L

$$\left\{ \begin{aligned} g &= \frac{r_0}{L(r_0^2 + x_0^2)} \\ b &= \frac{x_0}{L(r_0^2 + x_0^2)} \end{aligned} \right\}. \quad (4)$$

Из (1) можно определить комплекс тока в ЛЭП, если разделить сопряженный комплекс полной мощности на сопряженный комплекс

напряжения U_1

$$I = \frac{-S_1^*}{\sqrt{3}U_1^*}. \quad (5)$$

Подставляя полученное выражение для тока в (3) и заменяя фазные напряжения в нем на линейные, получим комплексное уравнение, описывающее установившийся режим в электрической сети рис. 3.

$$-S_1^* = U_1^*(U_1 - U_2)(g - jb) \quad (6)$$

Выполнив умножение в правой части (6), получим:

$$-(P_1 - jQ_1) = U_1^2 g - jU_1^2 b - U_1 U_2 g \cos \delta_1 + jU_1 U_2 b \cos \delta_1 + jU_1 U_2 g \sin \delta_1 + U_1 U_2 b \sin \delta_1 \quad (7)$$

Комплексное уравнение (7) может быть сведено к двум вещественным уравнениям, определяющим баланс в сети активной и реактивной

мощности:

$$P_1 + U_1^2 g - U_1 U_2 g \cos \delta_1 + U_1 U_2 b \sin \delta_1 = W_a \quad (8)$$

$$-Q_1 - U_1^2 b + U_1 U_2 b \cos \delta_1 + U_1 U_2 g \sin \delta_1 = W_r. \quad (9)$$

В (8) и (9) W_a и W_r — небалансы соответственно активной и реактивной мощности, в узле СЭС, представляющие собой неявные функции переменных U_1 , δ_1 , P_1 , Q_1 и U_2 , которые в установившемся режиме должны быть равны нулю. В свою очередь переменные U_1 , δ_1 будут зависимыми от P_1 , Q_1 и U_2 . В работе [7] показано, что судить о статической устойчивости режима электрической системы можно по якобиану уравнений установившегося режима, который совпадает со свободным членом характеристического уравнения малых колебаний, а в работах [8] приводятся примеры таких исследований для электрических систем высокого напряжения.

Рассмотрим якобиан уравнений установившегося режима (8) – (9), который может характеризовать устойчивость работы СЭС в составе электрической системы (10).

$$\det = \begin{bmatrix} \frac{\partial W_a}{\partial \delta_1} & \frac{\partial W_a}{\partial U_1} \\ \frac{\partial W_r}{\partial \delta_1} & \frac{\partial W_r}{\partial U_1} \end{bmatrix} = \frac{\partial W_a}{\partial \delta_1} \cdot \frac{\partial W_r}{\partial U_1} - \frac{\partial W_r}{\partial \delta_1} \cdot \frac{\partial W_a}{\partial U_1}, \quad (10)$$

Здесь $\frac{\partial W_a}{\partial \delta_1}$, $\frac{\partial W_r}{\partial \delta_1}$, $\frac{\partial W_a}{\partial U_1}$, $\frac{\partial W_r}{\partial U_1}$ — соответственно частные производные небалансов активной и реактивной мощности в узле СЭС по углу и модулю напряжения. Вычислив производные и выполнив арифметические действия по (10), получим следующее достаточно простое выражения для якобиана

$$\det = U_1 U_2 (g^2 + b^2) (U_2 - 2U_1 \cos \delta_1) \quad (11)$$

Уравнение (11) позволяет определить границу предельных по статической устойчивости установившихся режимов работы СЭС, на которой $\det$ становится равным нулю. Учитывая, что в реально существующих режимах ни один из параметров: U_1 , U_2 и $(g^2 + b^2)$ не может быть равным нулю уравнение (11), можно записать в виде $U_1 = \frac{U_2}{2 \cos \delta_1}$.

Используя уравнение (12), определяющее предельные состояние уравнений установившегося режима, рассмотрим работу СЭС, подключенную к сети 0,4 кВ электрической системы воздушной линией электропередачи, выполненной проводом СИП 2а 4х16 мм². Напряжение в точке присоединения СЭС к сети U_2 будем считать равным $U_n = 0,4$ кВ. Погонные параметры провода ЛЭП из [8] равны: $r_0 = 1,91$ Ом/км; $x_0 = 0,0865$ Ом/км. Длину ЛЭП примем равной 50 м. Рассчитанные по (4) активная и реактивная со-

ставляющие проводимости ЛЭП будут равны соответственно: $g = 10,45 \text{ См}$; $b = 0,47 \text{ См}$.

На рис. 3 для указанных параметров сети и ЛЭП показана построенная по (12) кривая, на которой якобиан уравнений (8) – (9) обращается в ноль. Область D_x , показанная на этом же рисунке, соответствует статически апериодически устойчивым режимам работы СЭС, в ней $\det > 0$. Вне этой области установившийся режим работы СЭС будет неустойчивым и его реализация невозможна. При $\delta_1 > 0$ СЭС генерирует мощность в сеть, а при $\delta_1 < 0$, СЭС переходит в режим потребления мощности из сети.

Если кривую $\det = 0$ в пространстве $U_1 - \delta_1$ с помощью уравнений (8) – (9) отобразить в пространство активных и реактивных мощностей СЭС, то получим область существования установившихся режимов D_y , показанную на Рис. 4. Для любых мощностей, принадлежащих D_y , существует установившийся режим, который можно показать в координатах $U_1 - \delta_1$. Для P_1 и Q_1 вне D_y установившихся режимов СЭС не существует.

Внутри области устойчивых режимов D_x (рис. 3) выделена область установившихся режимов СЭС, допустимых по уровню напряжения $U_1 - D_{xл}$, в которой установившиеся режимы СЭС будут устойчивыми и допустимыми.

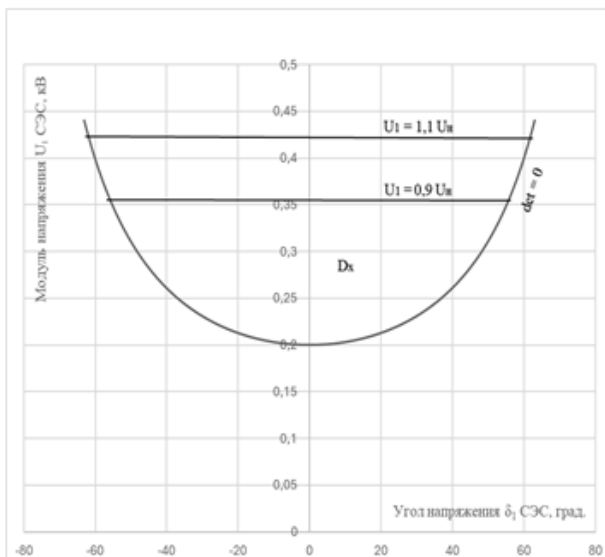


Рис. 3. Граница установившихся режимов СЭС, в координатах U_1 и δ_1

Для того, чтобы U_1 и δ_1 в установившемся режиме находились в допустимой области $D_{xл}$ эту область необходимо отобразить в пространство $P_1 - Q_1$. На рис. 5 показана полученная об-

ласть $D_{уд}$ допустимых значений P_1 и Q_1 при задании которых на СЭС будут выполняться технические ограничения по уровню напряжения U_1 . Как видно из Рис. 5 в области микрогенерации активной мощности или ее потребления из сети ($-0,1 \text{ МВт} < P_1 < 0,1 \text{ МВт}$) установившиеся режимы СЭС полностью находятся в допустимой области $D_{уд}$. Однако, для каждого значения P_1 и Q_1 даже из $D_{уд}$ в пространстве $U_1 - \delta_1$ существуют 2 установившихся режима, один из которых, принадлежащий $D_{xл}$ будет статически устойчивым, а вне области D_x будет статически неустойчивым [9]. Поэтому задание P_1 и Q_1 из $D_{уд}$ является необходимым условием, но недостаточным для того, чтобы установившийся режим СЭС обладал статической устойчивостью.

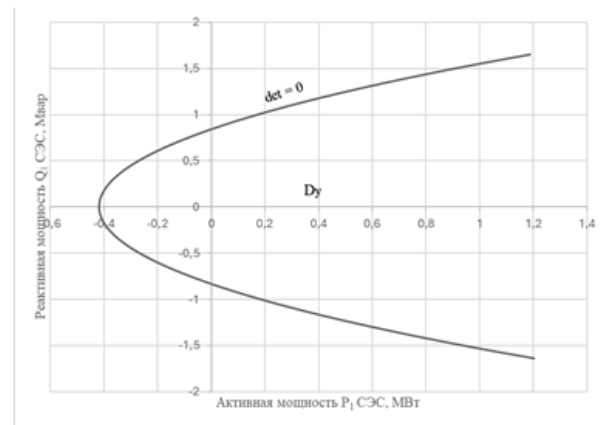


Рис. 4. Область существования установившихся режимов СЭС D_y в координатах генерации ее активной P_1 и реактивной Q_1 мощности

Для обеспечения статической устойчивости установившегося режима СЭС необходимо контролировать как модуль напряжения станции, так и угол этого напряжения относительно напряжения U_2 . В области допустимых значений U_1 этот угол не должен превышать $\pm 63^\circ$ для $U_1 = 1,1 U_n$ и $\pm 56,3^\circ$ для $U_1 = 0,9 U_n$.

При работе СЭС в составе электрической системы нарушение статической устойчивости ее установившихся режимов могут возникнуть, например, при внезапном повышении напряжения сети U_2 , вызванным коммутационными переключениями или атмосферными явлениями, поскольку сети 0,4 кВ часто устанавливаются на одних опорах с сетями 10 кВ.

Также к выходу параметров установившегося режима из области статической устойчивости могут приводить кратковременное снижение U_1 , вызванное, например, пуском мощного дви-

гателя в узле СЭС или сбой в работе сетевого инвертора СЭС, приведшему к выходу δ_1 за указанные выше пределы.

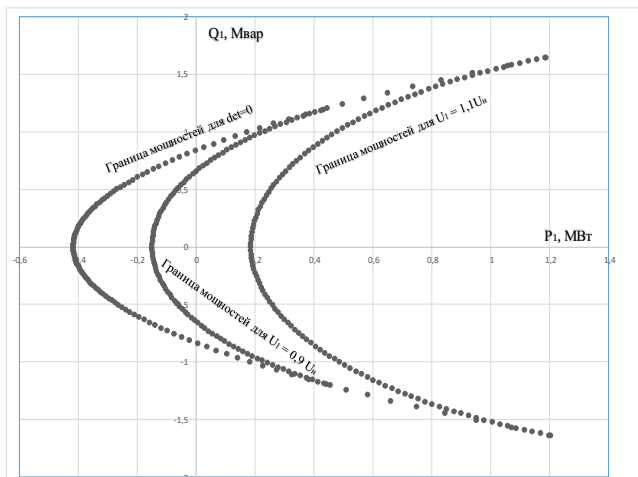


Рис. 5. Область допустимых значений P_1 и Q_1 СЭС (Дуд) внутри области существования установившихся режимов Ду, при которых напряжение U_1 находится в диапазоне $(0,9 \div 1,1) U_n$

Заключение

В работе было проведено исследование установившихся режимов работы солнечных фотоэлектрических станций, что позволяет значительно повысить надёжность использования оборудования и избежать негативных последствий при работе в переходных режимах при резком изменении солнечной инсоляции.

При использовании полученных данных возможно значительно поднять эффективность использования солнечных электрогенерирующих установок и значительно увеличить срок службы дополнительного оборудования, разработанная в работе методика может быть применена к СЭС произвольной мощности.

В процессе контроля энергетических характеристик солнечной электростанции по предложенной методике можно избежать таких факторов как, сбой в работе сетевого инвертора станции, при перенапряжениях в сети, снижения напряжения модулей в узле СЭС, вызванные, например, пуском мощного электродвигателя, а также переходные процессы установившегося режима в статически неустойчивой области.

Таким образом, разработана методика анализа статической устойчивости режимов работы СЭС, основанная на использовании якобиана уравнений установившегося режима. Определены допустимые области работы СЭС в про-

странстве напряжений и мощностей. Установлены критические параметры, влияющие на устойчивость работы СЭС: уровень напряжения, угол напряжения, мощность генерации. Предложенные решения применимы для СЭС различной мощности и могут быть использованы при настройке систем управления. Практическая реализация разработанных рекомендаций позволит повысить надёжность эксплуатации фотоэлектрических установок и продлить срок службы оборудования.

Список литературы

1. Российская Федерация. Федеральный закон об электроэнергетике (с изменениями на 27 декабря 2019 года) (редакция, действующая с 1 июля 2020 года). 227 с.
2. Investigation of existence of steady states of a solar power plant operating in the distribution network of an electric power system // Guryev V.V., Kuvshinov V.V., Yakimovich B.A., Al Bairmani A.G., Kaku-shina E.G. / Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova. 2022. Т. 25. № 2. С. 89–96.
3. Анализ методов управления производительностью преобразователей постоянного тока солнечных элементов и выбор оптимального метода // Абдали Л.М.А., Аль-Малики М.Н.К., Аль Баирмани А.Г., Якимович Б. А., Сяктерева В. В., Кувшинов В. В. / Интеллектуальные системы в производстве. 2023. Т. 21. № 1. С. 125–137.
4. Веников В. А., Строев В. А., Виноградов А. А., Идельчик В.И. Расчет запаса статической устойчивости электроэнергетической системы // Известия АН СССР. Энергетика и транспорт. – 1984. № 3. – с. 56-63.
5. Tawora C.J., Smith O.J.M. Characterization of Equilibrium & Stability in Power Systems. – “IEEE Trans. on Power Appar. & Syst.” Vol. PAS – 91, 1972, N 3, pp. 1141–1153.
6. Исследование установившихся режимов солнечной электростанции, работающей в распределительной сети электроэнергетической системы // Гурьев В.В., Кувшинов В. В., Якимович Б. А., Аль Баирмани А.Г., Какушина Е.Г. / Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова.
7. Виноградов А. А., Идельчик В.И., Лазебник А. И. Расчетное исследование области существования решения уравнений установившегося режима и соотношения между пределами по существованию и статической устойчивости. – В кн. Вопросы применения математических методов при управлении режимами и развитием электрических систем. Изд-во Иркутского политехнич. ин-та, 1975, с. 22-49.
8. Гук О. М. и др. Исследование возможности применения числового значения определителя матрицы Якоби для анализа статической устойчивости энергосистем. Изд-во СПб Государственный

политехнический университет, Проблемы электроэнергетики, № 3–4, 2012, с. 55–59.

References

1. Russian Federation. Federal Law on Electric Power Industry (as amended on December 27, 2019) (version effective from July 1, 2020). — 227 p.
2. Guryev, V.V., Kuvshinov, V.V., Yakimovich, B.A., Al Bairmani, A.G., Kakushina, E.G. Investigation of existence of steady states of a solar power plant operating in the distribution network of an electric power system // Bulletin of IzhGTU named after M.T. Kalashnikov. — 2022. — Vol. 25, No. 2. — P. 89-96.
3. Abdali, L.M.A., Al-Maliki, M.N.K., Al Bairmani, A.G., Yakimovich, B.A., Syaktereva, V.V., Kuvshinov, V.V. Analysis of methods for controlling the performance of solar cell DC converters and selection of the optimal method // Intelligent Systems in Production. — 2023. — Vol. 21, No. 1. 125-137.
4. Venikov, V.A., Stroeve, V.A., Vinogradov, A.A., Idelchik, V.I. Calculation of static stability margin of electric power system // Proceedings of the USSR Academy of Sciences. Power and Transport. — 1984. — No. 3. — P. 56-63.
5. Tawora, C.J., Smith, O.J.M. Characterization of Equilibrium & Stability in Power Systems // IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems. — 1972. — Vol. PAS-91, No. 3. — P. 1141-1153.
6. Guryev, V.V., Kuvshinov, V.V., Yakimovich, B.A., Al Bairmani, A.G., Kakushina, E.G. Research of steady-state modes of a solar power plant operating in the distribution network of an electric power system // Bulletin of IzhGTU named after M.T. Kalashnikov.
7. Vinogradov, A.A., Idelchik, V.I., Lazebnik, A.I. Calculation study of the existence of solutions to steady-state equations and the relationship between existence limits and static stability // Issues of Application of Mathematical Methods in Managing Modes and Development of Electrical Systems. — Irkutsk: Irkutsk Polytechnic Institute Publ., 1975. 22-49.
8. Guk, O.M. et al. Research on the possibility of using the numerical value of the Jacobian determinant for analysis of static stability of power systems // Problems of Electric Power Engineering. — St. Petersburg: SPbSPU Publ., 2012. — No. 3-4. — P. 55-59.

УДК 621.311.2:537.312

Разработка гибридной системы солнечного энергоснабжения с использованием накопителей энергии

В.В. Кувшинов¹, Е.В. Гусева², В.А. Галий³, А.Д. Касницкий⁴
ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», Севастополь, Россия,
1VVKuvshinov@mail.sevsu.ru

Статья поступила 11.11.2025 г.; после доработки 12.11.2025 г.

Аннотация

В статье представлены результаты исследования установившихся режимов работы солнечных фотоэлектрических станций (СЭС) малой мощности. Разработана методика анализа статической устойчивости на основе якобиана уравнений установившегося режима. Определены допустимые области работы СЭС в пространстве напряжений и мощностей. Показано, что для обеспечения устойчивой работы угол напряжения станции не должен превышать $\pm 63^\circ$ при $U=1,1U_n$ и $\pm 56,3^\circ$ при $U=0,9U_n$. Результаты применимы к СЭС произвольной мощности.

Ключевые слова: фотоэлектрические установки, солнечная энергетика, микрогенерация, статическая устойчивость, сетевые инверторы, режимы работы СЭС, якобиан, распределительные сети.

Development of a hybrid solar power supply system using energy storage devices

V.V. Kuvshinov¹, E.V. Guseva², V.A. Gali³, A.D. Kasnitskiy⁴
Sevastopol State University, Sevastopol, Russia, VVKuvshinov@mail.sevsu.ru

Received 11.11.2025 y.; received in final form 12.11.2025 y.

Abstract

The article presents the results of research into steady-state operating modes of low-power solar photovoltaic power plants (SPPs). A methodology has been developed for analysing static stability based on the Jacobian of steady-state equations. The permissible operating areas for SPPs in the voltage and power space have been determined. It has been shown that for stable operation, the station voltage angle should not exceed $\pm 63^\circ$ at $U=1.1U_n$ and $\pm 56.3^\circ$ at $U=0.9U_n$. The results are applicable to SPPs of arbitrary power.

Keywords: photovoltaic installations, solar energy, microgeneration, static stability, grid inverters, SPP operating modes, Jacobian, distribution networks

Введение

Основными видами источников энергии являются ископаемые виды топлива и возобновляемые источники. Тип ископаемого топлива имеет ограниченный срок службы и подвергается риску ухудшения состояния окружающей среды и способствует глобальному потеплению. Возобновляемые источники энергии могут быть получены из нескольких источников, таких как геотермальная, приливная, солнечная, ветровая

и биомасса.

Развитие технологий малой энергетики и возобновляемых источников энергии требует детального исследования режимов работы фотоэлектрических установок. Актуальность исследования обусловлена необходимостью повышения эффективности и надежности эксплуатации солнечных электростанций в составе распределительных сетей.

В работе рассматриваются особенности функционирования объектов микрогенерации в

соответствии с действующим законодательством РФ. Особое внимание уделяется анализу установившихся режимов работы солнечных фотоэлектрических станций и их влиянию на устойчивость энергосистемы.

Целью исследования является разработка методики анализа статической устойчивости режимов работы СЭС и определение допустимых областей их функционирования.

Поэтому важно развивать современные возобновляемые источники энергии (ВИЭ) [1]. Есть заметные положительные эффекты для окружающей среды, такие как снижение токсичных выбросов, и это доступно по сравнению с электростанциями, работающими на ископаемом топливе [2]. Развитие ветровой и солнечной энергетики ограничено случайностью и колебаниями выходной мощности [3], гибридная фотоэлектрическая система с системой накопления энергии использует дополнительную систему для уменьшения неблагоприятного воздействия ветровой и солнечной энергетики на энергосистему. Гибридная фотоэлектрическая ветро-аккумуляторная система — это своего рода гибридная энергосистема для достижения переключения пиковой нагрузки, сочетающая ресурсы энергии ветра и солнца [4]. Перед строительством станции решается проблема оптимизации размещения гибридной системы хранения фотоэлектрических и ветряных батарей в соответствии с климатическими и региональными характеристиками, а также характером устройств. Предыдущие исследования были сосредоточены на минимизации затрат, в то время как в этой статье в качестве целевой функции используется максимизация среднегодового чистого дохода, что может лучше отражать преимущества электростанций [1-4].

Постановка задачи

В этой статье была построена модель ветряных турбин, фотоэлектрических устройств и батарей, в первую очередь, в соответствии со статистическими данными и выходными характеристиками [3-5]. Затем модель размещения гибридной фотоэлектрической ветро-аккумуляторной системы строится в объектной функции со среднегодовым чистым доходом и ограничениями с планируемым масштабом и площадью [5]. Выработка как ветровой, так и солнечной энергии очень зависит от погодных условий. Таким образом, ни один источник энергии не способен обеспечить экономически эффективное и надежное

энергоснабжение. Комбинированное использование нескольких источников энергии может быть жизнеспособным способом достижения компромиссных решений [6]. При использовании комбинации возобновляемых систем возможны колебания мощности. Чтобы смягчить или даже свести на нет эти колебания, можно использовать технологии накопления энергии, например, аккумуляторные батареи. Правильный размер системы хранения зависит от конкретного объекта и зависит от количества возобновляемой генерации и нагрузки [4].

Необходимая аккумулирующая способность может быть сведена к минимуму, если для данной площадки используется правильное сочетание ветровой и солнечной генерации. Структура предлагаемой гибридной фотоэлектрической и ветровой энергосистемы показана на рис.1 [6].

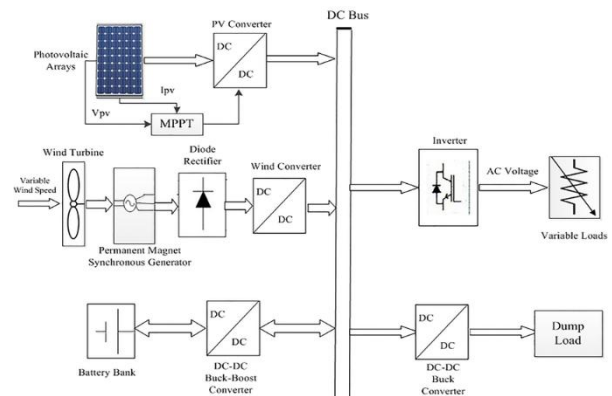


Рис. 1. Блок-схема гибридной ветро-солнечной установки

Поскольку в большинстве электроприборов используется источник питания переменного тока, перед нагрузкой используется инвертор. Чтобы гарантировать нормальную работу инвертора, используется сброс нагрузки для потребления избыточной энергии, вырабатываемой системой. Трекеры пиковой мощности будут поддерживать работу фотоэлектрической батареи и ветрогенератора в рабочих точках максимальной мощности. Предлагаемый метод заключается в оптимальном размере гибридной фотоэлектрической и ветровой энергетической системы для электрификации жилого дома в удаленном районе, как показано на рис. 2 [6].

Схема иллюстрирует систему энергоснабжения, объединяющую солнечную и ветровую генерацию с накопителем для бесперебойного питания.

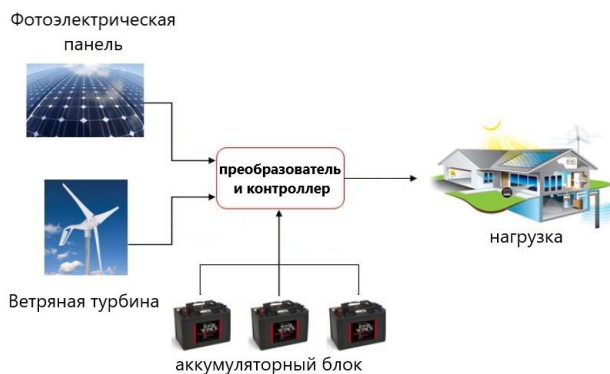


Рис. 2. Принципиальная схема ветро-солнечной системы с накопителями энергии

Результаты исследований

Выходная мощность ветряной турбины определяется скоростью ветра на высоте ступицы и выходной характеристикой ветряной турбины. Обычно сначала следует рассчитать скорость ветра на высоте ступицы, а затем рассчитать выходную мощность ветряной турбины в соответствии с кривой мощности, а кривая мощности описывается как

$$P_w(t) = \begin{cases} 0, & v(t) \leq v_{CIN} \text{ или } v(t) \geq v_{COUТ} \\ P_{WT}, & v_{RAT} \leq v(t) \leq v_{COUТ} \\ P_{WT} \frac{v(t)^2 - v_{CIN}^2}{v_{RAT}^2 - v_{CIN}^2}, & v_{CIN} \leq v(t) \leq v_{RAT} \end{cases}$$

где

$P_w(t)$ – выходная мощность в момент времени T , P_{WT} – номинальная мощность ветроустановки, $V(T)$ – скорость ветра на высоте ступицы в момент времени T , V_{CIN} , V_{RAT} и $V_{COUТ}$ – скорость ветра при включении, номинальная скорость ветра и скорость отключения соответственно [5].

В зоне воздействия на турбину производимая мощность выражается как

$$P_{WT} = \frac{1}{2} \rho \pi C_p (\gamma, \beta)^2 V w^3$$

где C_p – коэффициент мощности, равный (0,3–0,59), V – скорость ветра, γ – угол тангажа для Зоны-2, принимаемый за 0° , $\beta = 1,25$ кг/м³, – скорость острия отношение и может быть определено:

$$\gamma = \frac{wR}{V}$$

Здесь w обозначается как частота вращения ротора ветрогенератора [4-6].

Солнечная фотоэлектрическая система работает по принципу фотоэлектрического эффекта. Он преобразует солнечную энергию в

электрическую благодаря попаданию солнечного света на фотоэлектрическую батарею. На рис. 3 показана базовая модель эквивалентной схемы солнечной фотоэлектрической системы. Чтобы обеспечить гибкое напряжение и ток, эти фотоэлементы выполнены в виде комбинации фотоэлектрических модулей [6].

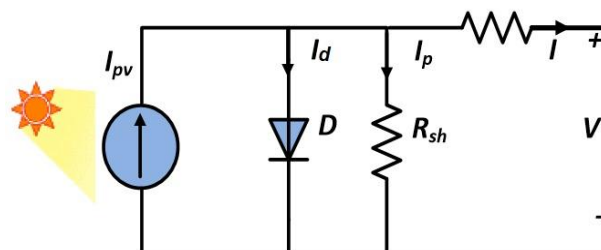


Рис. 3. Схема фотоэлектрического преобразователя

Эквивалентная схема солнечного элемента состоит из управляемого источника тока, диода, последовательного сопротивления (R_s) и шунтирующего сопротивления (R_p). Антипараллельный диод модифицируется на внешний управляемый источник тока, который размещается антипараллельно исходному источнику [4].

Согласно действующему закону Кирхгофа

$$I = I_{ph} - I_d - I_p$$

$$I = I_{ph} - I_0 \left[e^{\frac{q(v+IRS)}{nKT}} - 1 \right] - \frac{V + IRS}{RP}$$

где I_{ph} – фототок или энергетическая освещенность, линейно изменяющаяся в зависимости от излучения при определенной температуре ячейки; I_0 – ток насыщения встречно-параллельного диода, постоянная Больцмана ($K = 1,3806503 \times 10^{-23}$ Дж/К); n – коэффициент идеальности или коэффициент излучения.

При соединении ячеек в фотоэлектрическом модуле последовательно, имеем следующее уравнение [1-4]:

$$I_p = I_{ph} - I_0 \left[e^{\frac{q(v+IRS)}{N_s nKT}} - 1 \right] - \frac{V + IN_s Rs}{NP RP}$$

где N_s количество ячеек, соединенных последовательно.

Модель фотоэлектрической системы была разработана в Matlab Simulink на основе эквивалентной схемы, представленной на рисунке 4. В этом случае I_{ph} является входным параметром, применяемым к источнику тока, и его можно оценить с помощью отношения I-V массива (рис. 2), указанного в приведенном выше уравнении [4].

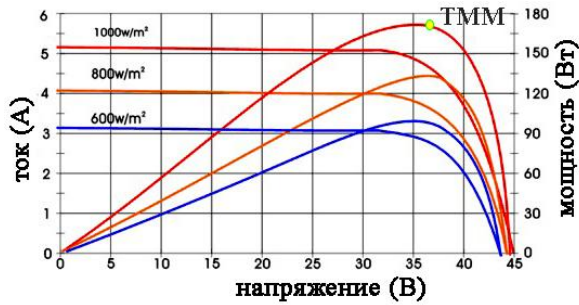


Рис. 4. Вольтамперные характеристики солнечной установки при нормальных условиях

В любой час t состояние заряда батареи $[SOC(t)]$ связано с предыдущим состоянием заряда $[SOC(t-1)]$ и с состоянием производства и потребления энергии системой в течение времени от $t-1$ к t [6]. В процессе зарядки, когда мощность батареи P_B течет к батарее (т. е. $P_3 > 0$), доступное состояние заряда батареи в час t можно описать следующим образом:

$$SOC(t) = SOC(t-1)(1 - \sigma) + \frac{P_3(t)\Delta t\eta_z}{E_{Max.}}$$

$$SOC(t) = SOC(t-1)(1 - \sigma) - \frac{P_p(t)\Delta t}{E_{Max.} \eta_p}$$

где $SOC(t)$ - уровень батареи после T , σ является самоуничтожением в час батареи, P_3 и D P_p являются зарядными и разрядными мощностями батарей в t соответственно, Δt - длина t , η_z и η_p являются эффективностью заряда и разряда аккумулятора соответственно; и $E_{Max.}$ - максимальная емкость батареи [6].

В данной работе предполагается, что устройства отслеживания пиковой мощности, зарядное/разрядное устройство и распределительные линии идеальны (т. е. они без потерь). Также предполагается, что эффективность инвертора η_{inv} постоянна, эффективность заряда батареи η_z равна эффективности кругового пробега производителя, а эффективность разряда батареи равна 1. Общая генерируемая мощность фотоэлектрической матрицы и Ветряная турбина за час t , $P_o(t)$, может быть выражена как:

$$P_{доступный}(t) = P_{PV}(t) + P_{ВТ}(t) \quad (9)$$

$$P_{избыток}(t) = P_{доступный}(t) - P_{НАГ.}(t) \quad (10)$$

Следует отметить, что желаемая потребность в нагрузке в любой час t , $P_H(t)$ может быть удовлетворена или не удовлетворена в соответствии с соответствующими значениями общей генерируемой мощности $P_o(t)$ и доступного SOC батареи (t) при том часе. мы может объяснить

управление энергией.

Для жилого дома была создана и внедрена гибридная система батарей фотоэлектрических и ветряных батарей. Использование возобновляемых источников энергии снижает экономические затраты за счет меньшего потребления топлива, а также сокращает выбросы парниковых газов. Однако производители электроэнергии имеют более высокий риск сбоев и предлагают услуги более низкого качества, если у них есть доступ к большему количеству возобновляемых источников энергии. Увеличение резерва мощности на основе градиентных систем быстрого реагирования может снизить этот риск.

В этой работе рассматривается кратковременное накопление энергии, которое колеблется от нескольких минут до нескольких недель. На рисунке 7 показана выработка электроэнергии гибридной системой в апреле и мае.

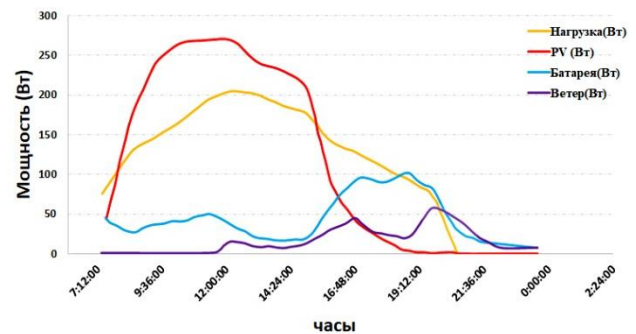


Рис. 7. Средняя выработка электроэнергии гибридной системой

Такие системы, как дизельные или гидравлические, производят энергию с высокой скоростью изменения, что подходит для балансировки частых резких и непредсказуемо меняющихся условий производства электроэнергии на основе возобновляемых источников энергии. В результате снижение стоимости топлива, вызванное использованием возобновляемых источников энергии, приведет к увеличению стоимости электрических сетей в глобальном масштабе. организации занимаются разработкой точных правил для этих уровней.

Для планирования электрической системы необходим ряд уровней, относящихся к различным временным масштабам, а также к прогнозированию погоды. Для регулирования качества электроэнергии также необходимо несколько временных шкал. Это в первую очередь связано с регулированием напряжения и частоты в очень коротком масштабе времени, но в долгосрочном

масштабе это в первую очередь связано с балансом мощности между производителями энергии и нагрузками потребителей. В этой работе рассматривается мало детализированное кратковременное накопление энергии, которое колеблется от нескольких минут до нескольких недель.

Заключение

В представленной работе была разработана комбинированная система, использующая несколько устойчивых источника энергии. Она поможет производить энергию непрерывно и позволит использовать один источник при отсутствии других, что является преимуществом. В исследовании предложена позиционирование гибридной системы преобразования энергии с использованием фотоэлектрических панелей, ветровой генерирующей установки и аккумуляторных батарей.

В представленной работе была проведена оптимизация системы управления предложенной гибридной ветро-солнечной системы что значительно повысило её эффективность использования и надёжность работы. Исследуя выходные характеристики устройств генерирующей электростанции, была получена модель выходной мощности фотоэлектрической и ветровой энергии, а также модель зарядки и разрядки аккумуляторов.

При разработке модели были использованы такие параметры, как среднегодовая чистая прибыль в качестве функции цели и характеристик региона и области, планируемого масштаба, взаимодополняющих свойств, коэффициента использования ресурсов и стабильности выхода в качестве ограничений. При помощи предложенного метода была построена модель для гибридной системы фотоэлектрического преобразования, ветровой генерации и аккумуляирования энергии.

Таким образом, в ходе проведённого научного исследования была разработана методика анализа статической устойчивости установившихся режимов работы СЭС на основе якобиана уравнений установившегося режима.

Определены количественные пределы допустимых отклонений напряжения ($\pm 63^\circ$ при $U=1,1U_n$ и $\pm 56,3^\circ$ при $U=0,9U_n$). Установлены границы допустимых режимов работы в пространстве активных и реактивных мощностей.

Предложенная методика позволяет предотвратить сбой в работе сетевого инвертора и переходные процессы в статически неустойчивой области. Результаты исследования применимы к

СЭС различной мощности.

Список литературы

1. Волков А. С. Разработка имитационной модели канала с группирующимися ошибками // Труды МАИ. 2023. № 128.
2. Абдали Л. М. Исследование режимов работы комбинированных солнечно-ветровых установок для обеспечения уличного освещения / Л. М. Абдали, Х. А. Исса, М. Н. Аль-Малики, В. В. Кувшинов, Э.А. Бекиров // Строительство и технологическая безопасность. – 2022. – № 25(77). – С. 75-85.
3. Исса Х.А., Абдали Л.М., Якимович Б. А., Кувшинов В. В., Морозова Н. В., Федотикова М. В. Сравнение эффективности различных методов управления энергетическими параметрами фотоэлектрических систем // Труды МАИ. 2023. № 128.
4. Абдали Л. М., Аль-Малики М. Н., Исса Х. А., Якимович Б. А., Кувшинов В. В. Использование метода отслеживания точки максимальной мощности для увеличения эффективности работы фотоэлектрических установок // Интеллектуальные системы в производстве. 2022. Том 20, № 4. С. 106–116.
5. Cheboxarov V.V. An Offshore Wind-Power-Based Water Desalination Complex as a Response to an Emergency in Water Supply to Northern Crimea. Appl. Sol. Energy, 2019, vol. 55, no. 4, pp. 260-264.
6. Абдали Л.М., Аль-Малики М.Н., Али К. А., Якимович Б. А., Коровкин Н.В., Кувшинов В. В., Соломенникова С. И. Использование гибридных ветро-солнечных систем для энергоснабжения города Аль-Наджаф в Республике Ирак // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. 2022. Т. 25. № 3. С. 82-91. DOI: 10.22213/2413-1172-2022-3-82-91

References

1. Volkov A.S. The development of simulation model of channel with burst error arrays. Trudy MAI, 2023, no. 128. DOI: 10.34759/trd-2023-128-12.
2. Abdali L.M. Design and study of operating modes of combined solar-wind installations to provide street lighting / L.M. Abdali, H.A. Issa, M.N. Al-Maliki, V.V. Kuvshinov, E.A. Bekirov // Construction and industrial safety, 2022. – № 25(77). – pp. 75-85.
3. Issa H.A., Abd Ali L.M., Yakimovich B.A., Kuvshinov V.V., Morozova N.V., Fedotikova M.V. Comparison of the effectiveness of various methods for controlling the energy parameters of photovoltaic systems. Trudy MAI, 2023, no. 128.
4. Abdali L.M., Al'-Maliki M.N., Issa Kh.A., Yakimovich B.A., Kuvshinov V.V. [Using the Maximum Power Point Tracking Method to Increase the Efficiency of Photovoltaic Installations]. Intelligent

Systems in Manufacturing, 2022, vol. 20, no. 4, pp. 106-116 (in Russ.).

5. Cheboxarov V.V., et al. An Offshore Wind-Power-Based Water Desalination Complex as a Response to an Emergency in Water Supply to Northern Crimea. Appl. Sol. Energy, 2019, vol. 55, no. 4, pp. 260-264.
6. Abdali L.M., Al'-Maliki M.N., Ali K.A., Yakimovich B.A., Korovkin N.V., Kuvshinov V.V., Solomennikova S.I. Vestnik IzhGTU imeni M. T. Kalashnikova, 2022, vol. 25, no. 3, pp. 82-91.

УДК 620.92

Моделирование фотоэлектрической системы при использовании алгоритма контроля точки максимальной мощности

Кувшинов В.В.¹, Шевчук А.А.¹, Цалоев В.М.¹, Абейдулин С.А.¹, Рыбонька А.И.²¹ ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», Севастополь, 299053, Россия² АО "Центр судоремонта "Звездочка", г. Северодвинск

VVKuvshinov@mail.sevsu.ru

Статья поступила 19.11.2025 г.; после доработки 21.11.2025 г.

Аннотация

Статья посвящена разработке и моделированию системы управления для автономных фотоэлектрических станций на основе кремниевых панелей. Целью работы является максимизация выходной мощности при нелинейных характеристиках фотомодулей. Предложена схема с использованием повышающего DC-DC преобразователя под управлением алгоритма P&O (метод возмущения и наблюдения). В среде MATLAB/Simulink получены рабочие характеристики системы (I-V и P-V) в диапазоне инсоляции 400–1000 Вт/м² и температур 25–45°C. Результаты исследования демонстрируют способность системы адаптироваться к внешним возмущениям, обеспечивая оптимальный режим генерации электроэнергии для потребителей различной мощности.

Ключевые слова: фотоэлектрическая система, MPPT-контроллер, алгоритм P&O, DC-DC преобразователь, солнечная электростанция, MATLAB/Simulink, вольт-амперная характеристика.

Modeling a photovoltaic system using a maximum power point tracking algorithm

Kuvshinov V.V.¹, Shevchuk A.A.¹, Tsalojev V.M.¹, Abeydulin S.A.¹, Rybonka A.I.²¹ Sevastopol State University, Sevastopol, 299053, Russia² JSC "Ship Repair Center 'Zvezdochka'", Severodvinsk, Russia

VVKuvshinov@mail.sevsu.ru

Received 19.11.2025 y.; Received in final form 21.11.2025 y.

Abstract

This paper addresses the development and modeling of a control system for stand-alone photovoltaic (PV) power plants based on silicon panels. The primary objective is to maximize output power despite the nonlinear characteristics inherent in PV modules. A circuit design utilizing a boost DC-DC converter governed by the Perturb & Observe (P&O) algorithm is proposed to achieve efficient maximum power point tracking. System performance characteristics (I-V and P-V curves) were simulated in the MATLAB/Simulink environment under varying irradiance levels (400–1000 W/m²) and temperatures (25–45°C). The simulation results demonstrate the system's capability to dynamically adapt to environmental perturbations, ensuring optimal power generation for consumers of varying capacities.

Keywords: photovoltaic system, MPPT controller, P&O algorithm, DC-DC converter, solar power plant, MATLAB/Simulink, current-voltage characteristic.

Введение

Фотоэлектрические модули активно применяются для электроснабжения различных технических объектов благодаря автономности работы и отсутствию необходимости в топливе.

Первоначально внедрённые в космической отрасли, сегодня солнечные панели используются в наземных установках и для генерации энергии в общую сеть. Преимущества фотоэлектриче-

ских систем включают экологичность, отсутствие эксплуатационных затрат на энергоносители и бесшумную работу [1].

Несмотря на преимущества, эффективность фотоэлектрических панелей остается относительно низкой, что делает контроль точки максимальной мощности (ТММ) критически важным для оптимизации работы системы [2]. Выработка энергии зависит от рабочего напряжения панели, а ТММ изменяется в зависимости от климатических условий, солнечной инсоляции и температуры. Из вольт-амперных и мощностных характеристик можно определить оптимальную рабочую точку с максимальной выходной мощностью [3, 4].

Разработано множество алгоритмов определения ТММ, среди которых широко используется метод возмущения и наблюдения (Р&О) [5]. Эффективность преобразования солнечных панелей низкая, а их параметры нелинейны и изменяются под влиянием внешних факторов. В данной работе предложен алгоритм отслеживания ТММ в режиме реального времени с применением контроллеров Р&О и PID для повышения характеристик при изменяющихся погодных условиях [6, 7].

Математическая модель фотоэлектрической панели

Солнечный элемент представляет собой р-п полупроводниковый переход, являющийся основой фотоэлектрических модулей. Математическая модель описывается уравнением вольт-амперной характеристики (рисунок 1).

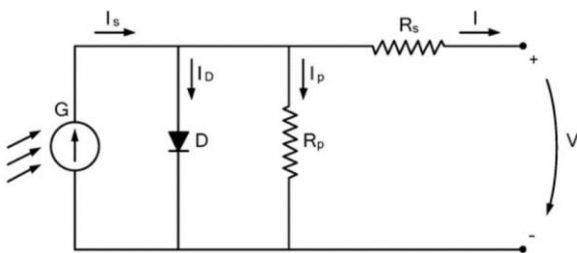


Рис. 1. Математическая модель фотоэлектрической панели.

$$I = I_{sc} - I_0 \left[\exp \left\{ \frac{q(V + R_s I)}{n k T_K} \right\} - 1 \right] - \frac{V + R_s I}{R_p} \quad (1)$$

где:

V , I - выходное напряжение и ток панели;
 R_s , R_p - последовательное и параллельное

сопротивление;

q - заряд электрона;

I_{sc} - фототок;

I_0 - обратный ток диффузии;

n - коэффициент проводимости;

k - постоянная Больцмана;

T_K - температура в Кельвинах.

Основные параметры используемой фотоэлектрической панели приведены в таблице 1 [8].

Таблица 1. Параметры фотоэлектрической панели.

Параметр	Значение
Размер (см)	158×8.08×4
Максимальная мощность (Вт)	200
Максимальный ток (А)	5.37
Максимальное напряжение (В)	37.26
Ток короткого замыкания (А)	5.66
Напряжение холостого хода (В)	45.62
Вес (кг)	15.5

Алгоритм возмущения и наблюдения (Р&О)

Метод Р&О основан на внесении небольших возмущений в систему и анализе изменения выходной мощности [9, 10]. При увеличении мощности возмущение продолжается в том же направлении, при уменьшении - направление изменяется. В установившемся режиме система колеблется вокруг точки максимальной мощности. Блок-схема алгоритма представлена на рисунке 2, где $V(n)$, $I(n)$ и $P(n)$ обозначают текущие значения напряжения, тока и мощности панели.

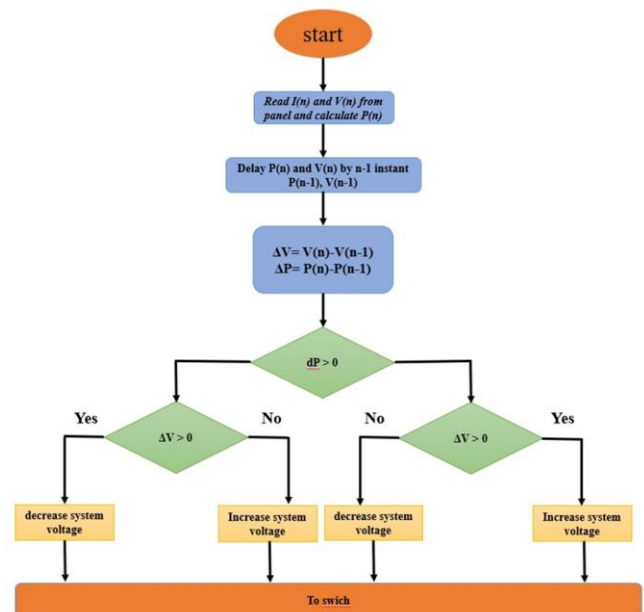


Рис. 2. Блок-схема алгоритма метода возмущения и наблюдения.

Модель фотоэлектрической системы в Simulink

Фотоэлектрическая батарея подключена к сети 25 кВ через повышающий DC-DC преобразователь и трёхфазный инвертор. Контроль ТММ реализован в преобразователе с использованием интеллектуальных методов управления [11]. Система включает солнечную батарею

мощностью 100 кВт при инсоляции 1000 Вт/м^2 и преобразователь напряжения 500-260 В, поддерживающий единичный коэффициент мощности.

На рисунке 3 показана структурная схема системы в среде Simulink с солнечной панелью и DC-DC преобразователем под управлением контроллера ТММ для получения различных выходных параметров.

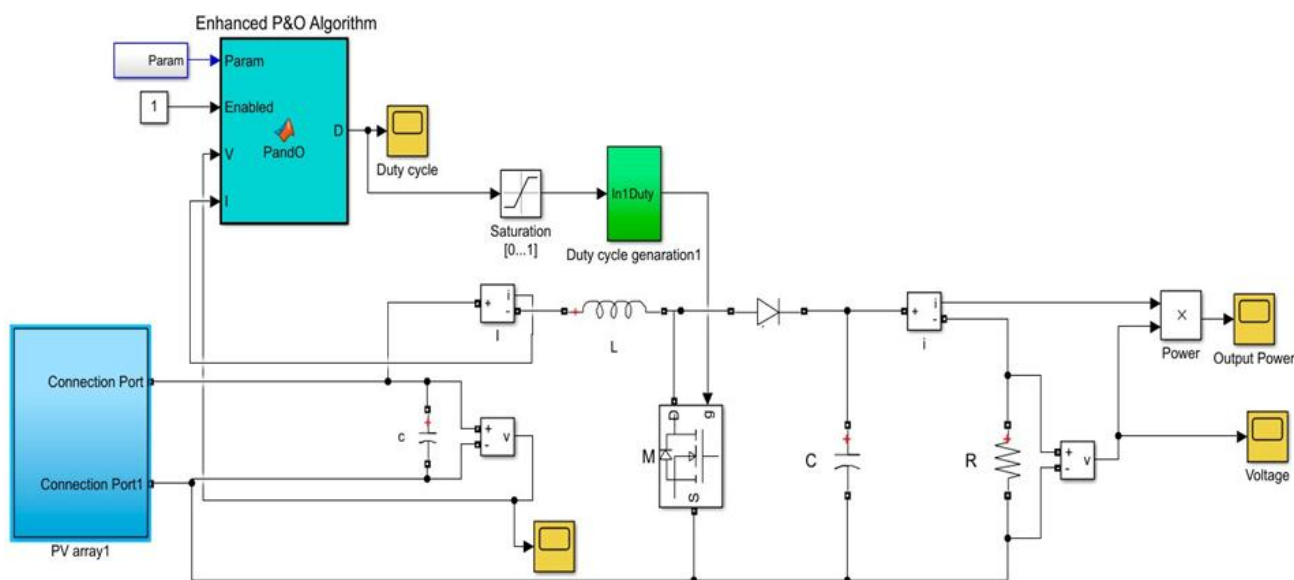


Рис. 3. Структурная схема системы в среде Simulink.

Результаты и обсуждение

Модель фотоэлектрического модуля разработана в Simulink. Основные результаты исследования:

На рисунке 4 представлены вольтамперные

и мощностные характеристики при различных уровнях солнечной радиации (400, 700 и 1000 Вт/м^2) при постоянной температуре 25°C . С ростом инсоляции увеличивается как мощность, так и ток.

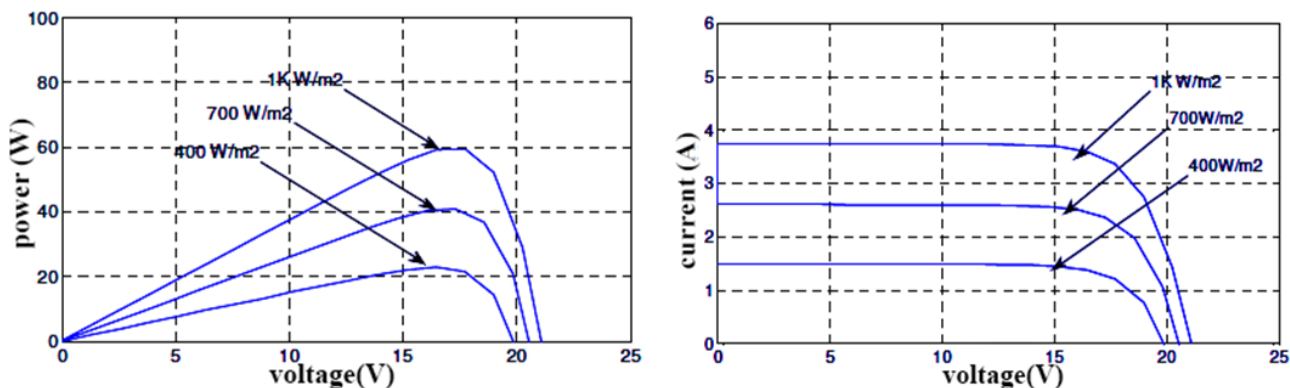


Рис. 4. Характеристики P-V (a) и I-V (b) при $T=25^\circ\text{C}$. Fig. 4. P-V (a) and I-V (b) characteristics at $T=25^\circ\text{C}$.

На рисунке 5 показаны характеристики при различных температурах (25, 35 и 45°C) при постоянной инсоляции 1000 Вт/м^2 . При повышении

температуры мощность и напряжение снижаются. При 25°C мощность составляет 60 Вт и уменьшается с ростом температуры.

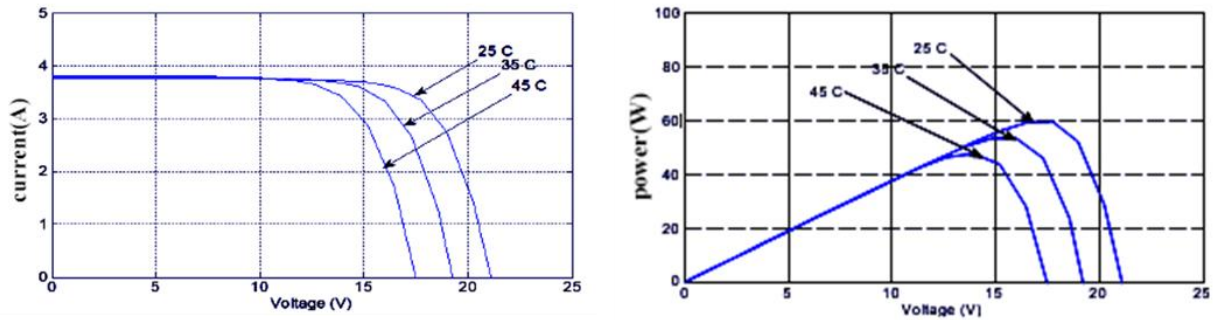


Рис. 5. Характеристики I-V (a) и P-V (b) при $S=1000 \text{ Вт/м}^2$. Fig. 5. I-V (a) and P-V (b) characteristics at $S=1000 \text{ W/m}^2$.

Рисунок 6 демонстрирует непрерывные уровни напряжения V_{pv} и тока I_{pv} , подаваемые

на контроллер ТММ для формирования управляющего сигнала с требуемой скважностью для регулирования DC-DC преобразователя.

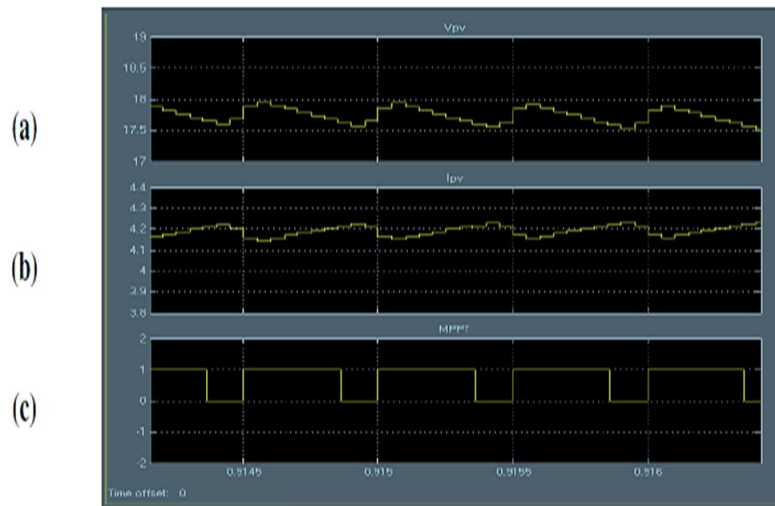


Рис. 6. Формы сигналов V_{pv} , I_{pv} и импульсов ТММ.

Модуль состоит из 36 последовательно соединённых фотоэлементов. Рисунок 7 показывает результаты моделирования трёх выходных

напряжений и токов: первый выход - 9В и 2А, второй - 5В и 1А, третий - 2.2В и 0.5А.

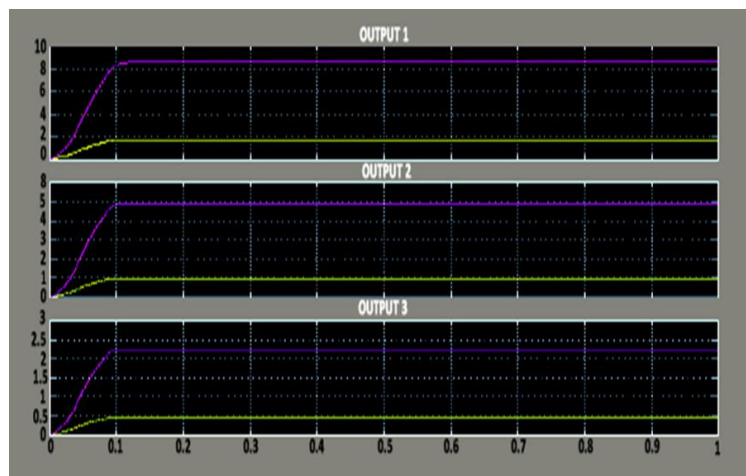


Рис. 7. Результаты моделирования выходных токов и напряжений

Заключение

Разработана модель фотоэлектрической панели с многовыходным DC-DC преобразователем в среде Matlab/Simulink, управляемая методом отслеживания ТММ. Получены электрические характеристики (P-V, I-V и P-I), демонстрирующие зависимость от солнечной радиации и температуры.

При постоянной температуре 25°C и увеличении инсоляции ток и напряжение возрастают, что приводит к росту выходной мощности. При постоянной инсоляции 1000 Вт/м² и повышении температуры ток увеличивается, но напряжение снижается, уменьшая мощность. Максимальная мощность 60 Вт достигнута при напряжении 17В и токе 3.5А с использованием алгоритма Р&О и метода ТММ [12, 13].

Список литературы

1. Shah TR, Ali HM. Application of hybrid nanofluids in solar energy, practical limitations, and challenges: a critical review. *Sol Energy* 2019;183:173-203.
2. Abo-Elyousr FK, Abdelshafy AM, Abdelaziz AY. MPPT-Based Particle Swarm and Cuckoo Search Algorithms for PV Systems. In: *Modern Maximum Power Point Tracking Techniques for Photovoltaic Energy Systems*. Springer: Cham, Switzerland; 2020. p. 379-400.
3. Zhang Q, Xu Ning, Ye Z. MMPT control method for photovoltaic power supply based on improved variable-step hill-climbing method. *Electric Engineering*. 2018;2:55-57.
4. Liu HD, Lin CH, Pai KJ, Lin YL. A novel photovoltaic system control strategies for improving hill climbing algorithm efficiencies in consideration of radian and load effect. *Energy Convers Manag*. 2018;165:815-826.
5. Jiang LL, Maskell DL, Patra JC. A novel ant colony optimization-based maximum power point tracking for photovoltaic systems under partially shaded conditions. *Energy Build*. 2013;58:227-236.
6. Issa HA, Abd Ali LM, Yakimovich BA, Kuvshinov VV, Morozova NV, Fedotikova MV. Comparison of the effectiveness of various methods for controlling the energy parameters of photovoltaic systems. *Trudy MAI*. 2023;128. DOI: 10.34759/trd-2023-128-17.
7. Abdali LM, Al-Maliki MN, Ali KA, Yakimovich BA, Korovkin NV, Kuvshinov VV, Solomennikova SI. *Vestnik IzhGTU imeni M. T. Kalashnikova*. 2022;25(3):82-91. DOI: 10.22213/2413-1172-2022-3-82-91.
8. King DL. Photovoltaic Module and Array Performance Characterization Methods for All System Operating Conditions. *AIP Conf. Proc*. 1997;394(1):347-368.
9. Fazal MR, Kamran M, ul Haq I, Abbas Z, Ayyaz

- MN, Mudassar M. Modified Perturb and Observe MPPT algorithm for partial shading conditions. *Int. J. Renew. Energy Res*. 2019;9:721-731.
10. Belkaid A, Colak I, Kayisli K. Implementation of a modified P&O-MPPT algorithm adapted for varying solar radiation conditions. *Electr. Eng*. 2017;99:839-846.
11. Aouchiche N, Aitcheikh MS, Becherif M, Ebrahim MA. AI-based global MPPT for partial shaded grid connected PV plant via MFO approach. *Sol. Energy*. 2018;171:593-603.
12. Pathy S, Subramani C, Sridhar R, Thentral T, Padmanaban S. Nature-inspired MPPT algorithms for partially shaded PV systems: A comparative study. *Energies*. 2019;12:1451.
13. Cheboxarov VV. An Offshore Wind-Power-Based Water Desalination Complex as a Response to an Emergency in Water Supply to Northern Crimea. *Applied Solar Energy*. 2019;55(4):260-264.
14. Abd Ali LM, Al-Rufae FM, Kuvshinov VV et al. Study of Hybrid Wind-Solar Systems for the Iraq Energy Complex. *Appl. Sol. Energy*. 2020;56(4):284-290.
15. Abdali LM, Issa HA, Al-Maliki MN, Kuvshinov VV, Bekirov EA. Design and study of operating modes of combined solar-wind installations to provide street lighting. *Construction and industrial safety*. 2022;25(77):75-85.

References

1. Shah TR, Ali HM. Application of hybrid nanofluids in solar energy, practical limitations, and challenges: a critical review. *Sol Energy* 2019;183:173-203.
2. Abo-Elyousr FK, Abdelshafy AM, Abdelaziz AY. MPPT-Based Particle Swarm and Cuckoo Search Algorithms for PV Systems. In: *Modern Maximum Power Point Tracking Techniques for Photovoltaic Energy Systems*. Springer: Cham, Switzerland; 2020. p. 379-400.
3. Zhang Q, Xu Ning, Ye Z. MMPT control method for photovoltaic power supply based on improved variable-step hill-climbing method. *Electric Engineering*. 2018;2:55-57.
4. Liu HD, Lin CH, Pai KJ, Lin YL. A novel photovoltaic system control strategies for improving hill climbing algorithm efficiencies in consideration of radian and load effect. *Energy Convers Manag*. 2018;165:815-826.
5. Jiang LL, Maskell DL, Patra JC. A novel ant colony optimization-based maximum power point tracking for photovoltaic systems under partially shaded conditions. *Energy Build*. 2013;58:227-236.
6. Issa HA, Abd Ali LM, Yakimovich BA, Kuvshinov VV, Morozova NV, Fedotikova MV. Comparison of the effectiveness of various methods for controlling the energy parameters of photovoltaic systems. *Trudy MAI*. 2023;128. DOI: 10.34759/trd-2023-128-17.
7. Abdali LM, Al-Maliki MN, Ali KA, Yakimovich BA, Korovkin NV, Kuvshinov VV, Solomennikova

- SI. Vestnik IzhtGU imeni M. T. Kalashnikova. 2022;25(3):82-91. DOI: 10.22213/2413-1172-2022-3-82-91.
8. King DL. Photovoltaic Module and Array Performance Characterization Methods for All System Operating Conditions. AIP Conf. Proc. 1997;394(1):347-368.
 9. Fazal MR, Kamran M, ul Haq I, Abbas Z, Ayyaz MN, Mudassar M. Modified Perturb and Observe MPPT algorithm for partial shading conditions. Int. J. Renew. Energy Res. 2019;9:721-731.
 10. Belkaid A, Colak I, Kayisli K. Implementation of a modified P&O-MPPT algorithm adapted for varying solar radiation conditions. Electr. Eng. 2017;99:839-846.
 11. Aouchiche N, Aitcheikh MS, Becherif M, Ebrahim MA. AI-based global MPPT for partial shaded grid connected PV plant via MFO approach. Sol. Energy. 2018;171:593-603.
 12. Pathy S, Subramani C, Sridhar R, Thentral T, Padmanaban S. Nature-inspired MPPT algorithms for partially shaded PV systems: A comparative study. Energies. 2019;12:1451.
 13. Cheboxarov VV. An Offshore Wind-Power-Based Water Desalination Complex as a Response to an Emergency in Water Supply to Northern Crimea. Applied Solar Energy. 2019;55(4):260-264.
 14. Abd Ali LM, Al-Rufae FM, Kuvshinov VV et al. Study of Hybrid Wind-Solar Systems for the Iraq Energy Complex. Appl. Sol. Energy. 2020;56(4):284-290.
 15. Abdali LM, Issa HA, Al-Maliki MN, Kuvshinov VV, Bekirov EA. Design and study of operating modes of combined solar-wind installations to provide street lighting. Construction and industrial safety. 2022;25(77):75-85

УДК 620.92

Использование фотоэлектрических панелей для комбинированной судовой энергетической установки

В.В. Кувшинов¹, А.С. Жильцов¹, А.С. Владимиров¹, Л.Ю. Юферев²,
А.Д. Касницкий¹

¹ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», Университетская-33 г. Севастополь, 299053, Россия,

²Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ», Москва, Российская Федерация
vkvuvshinov@mail.sevsu.ru, 29novel@gmail.com, fontan129a@mail.ru, leouf@yandex.ru, makkas_snab@mail.ru

Статья поступила 17.11.2025 г. ; после доработки 20.11.2025 г.

Аннотация

В работе предложена судовая энергетическая установка, использующая для питания двигателей комбинированную систему на основе фотоэлектрических преобразователей и водородных топливных элементов. Представленная система позволяет обеспечивать электроэнергией судовое оборудование на автономном беспилотном морском судне.

Ключевые слова: судовая энергетическая установка, фотоэлектрические преобразователи, топливный элемент, система автоматического управления.

Using photovoltaic panels for a combined ship power plant

V.V. Kuvshinov¹, A.S. Zhiltsov¹, A.S. Vladimirov¹, L.Y. Yuferev², A.D. Kasnitsky¹

¹Sevastopol stat university, 33 Universitetskaya st., Sevastopol, 299053, Russia,

²Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russian Federation
vkvuvshinov@mail.sevsu.ru, 29novel@gmail.com, fontan129a@mail.ru, leouf@yandex.ru, makkas_snab@mail.ru

Received 17.11.2025y. ; received in final form 20.11.2025 y.

Abstract

The paper proposes a marine power plant that uses a hybrid-combined system based on photovoltaic converters and hydrogen fuel cells to power the engines. The presented system makes it possible to provide electrical power to ship equipment on an autonomous unmanned marine vessel.

Keywords: ship power plant, photovoltaic converters, fuel cell, automatic control system.

Введение

Судовые энергетические установки на основе альтернативных источников энергии в настоящее время представляют значительный интерес для разработчиков и исследователей в областях морского транспорта и энергетики.

На сегодняшний день большинство энергетических потребностей удовлетворяется за счет ископаемого топлива, быстрая индустриализация и передовые технологии оказывают влияние

на экономию топлива, и, с другой стороны, растущее потребление вызывает антропогенное воздействие, которое негативно влияет на окружающую среду и здоровье человека. Растущие потребности в электроэнергии приводят к истощению ископаемых ресурсов и в ближайшем будущем человечество столкнется с их острой нехваткой. Кроме того, необходимо учитывать неравномерное географическое распределение ископаемых видов топлива и последствия его ис-

пользования для климата нашей планеты. На сегодня одной из немногих экологически безопасных технологий, способных составить альтернативу загрязняющему атмосферу органическому топливу, является водородная энергетика. В этом контексте водород является чистым и эффективным энергоносителем и может использоваться в качестве топлива без выбросов оксидов углерода [1].

В данной работе для генерации электрической энергии и обеспечения мощностных характеристик судовой энергетической установки рассматривается использование экологически чистого водорода, как основного элемента для работы судового оборудования [2]. Использование экологически чистой энергии для морского транспорта позволяет увеличить привлекательность таких судов и увеличивать мощностные характеристики энергосистемы без использования органических топлив, которые необходимо иметь на борту в значительных количествах [3].

Цель и постановка задачи

Беспилотная роботизированная морская платформа с энергетической установкой на водородных топливных элементах является экспериментальным водным транспортным средством с экологически чистой безопасной энергетической установкой нового поколения, использующая водород в качестве топлива [4].

В отличие от других энергетических установок, работающих на водородных топливных элементах, на представленной морской платформе дополнительно расположены фотоэлектрические панели в количестве 6 шт., размеры каждого модуля составляют 2,3 на 1,3 метра. Суммарная мощность таких блоков составляет 4,38 кВт, мощность отдельной панели 730 Вт (рис. 1). Основные характеристики солнечной панели следующие:

Габаритные размеры панели 2,3 x 1,3 м, номинальная мощность модуля 730 Вт, напряжение холостого хода 49,62 В, ток короткого замыкания 18,05 А, напряжение в рабочей точке 41,3 В, ток в рабочей точке 17,64 А, соответственно максимальная мощность в рабочей точке при нормальных условиях (освещенность 1000 Вт/м², температура рабочей плоскости панели 25 °С) составляет около 730 Вт. Используемые солнечные панели (рис. 1) сделаны из кремния и находятся в хорошо защищенном каркасе с ламинированным защитным просветляющим покрытием, рассчитанным на противодействие ударам града и другим внешним воздействиям.



Рис. 1. Внешний вид фотоэлектрической панели для судовой энергетической установки (мощность модуля 730 Вт)

Результаты исследований

В данной работе была представлена комбинированная судовая энергетическая установка на основе солнечных батарей, ёмкостных накопителей энергии, водородных топливных элементов, а также фотоэлектрических преобразователей [5]. Предложенная система позволяет длительное время обеспечивать морскую роботизированную платформу в автономном режиме. На представленной установке отсутствует экипаж, что значительно сокращает габаритные размеры позволяет использовать объёмное пространство для различных технических нужд [6]. Фотоэлектрические панели (ФЭП), необходимые для зарядки аккумуляторной системы расположены на крыше судна (рис. 2).

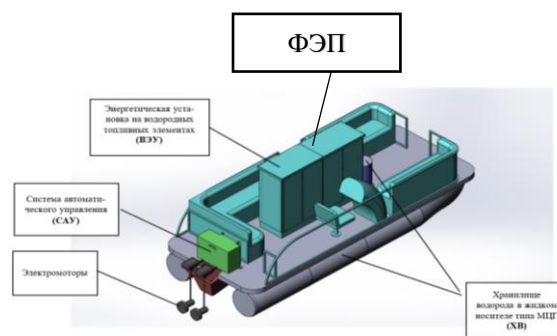


Рис. 2. Расположение основного и дополнительного оборудования, а также фотоэлектрических панелей (ФЭП) на морском судне

Габариты морской платформы показаны на рисунке 3. Так как модули солнечных батарей имеют размер 2,3 x 1,3 метра, то при проектировании крыши над палубой, размеры которой составляют 6,258 на 2,446 метров возможно на ней установить два ряда модулей по 3 шт., т.е. всего 6 панелей. Размеры солнечной крыши с фотоэлектрическими модулями будут составлять 6,9

на 2,6 метра ($2,3 \times 3 = 6,9$ м, $1,3 \times 2 = 2,6$ м), практически вписывается в габариты морской платформы (рис. 3).

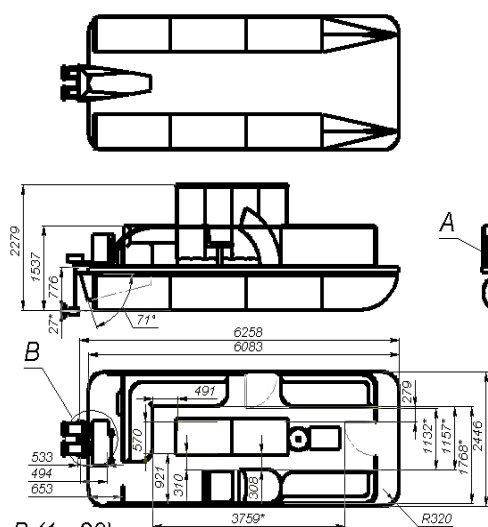


Рис. 3. Габаритные размеры морской платформы

Таблица 1. Технические характеристики энергосистемы

Энергетические величины	параметры
Мощность фотоэлектрической установки, кВт	4,380
Мощность водородной станции, кВт	50,0
Запасенная энергетическая емкость, кВт·ч	85,0
Мощность литий-ионной АКБ (в режиме ЗС), кВт	50,0
Энергетическая ёмкость АКБ, кВт*ч	15,0
Установленная мощность ВТЭ, кВт	12,0
Производительность дегидрататора (по водороду), м³/час	2,0
Тип жидкого органического носителя (метилцилогексан)	$\text{CH}_3\text{C}_6\text{H}_{11}$
Объем запасённого жидкого органического носителя, л	60,0
Объем емкости жидкого органического носителя, л	200
Габаритные размеры (корпус 1), см	598x244x75
Масса, не более, кг	2000

Электрическая схема установки представлена на рисунке 4. Как видно из схемы номинальное напряжение, вырабатываемое топливными элементами, составляет от 48 В, которое подаётся на инвертор. Примерно столько же вырабатывает фотоэлектрическая станция, которая также работает на инвертор, от которого ток подаётся на зарядку буферной системы ёмкостных

накопителей энергии.

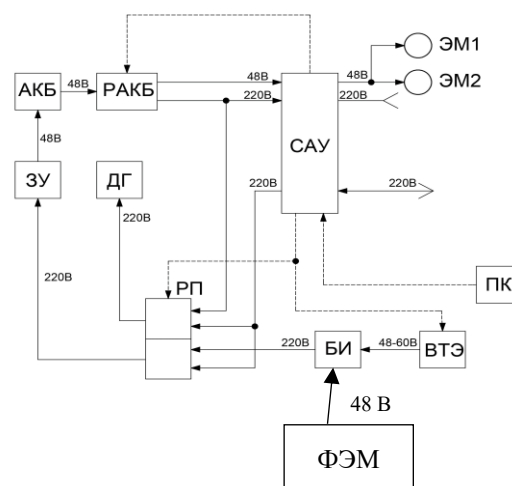


Рис. 4. Электрическая схема судовой энергосистемы

В результате в ходе работы была разработана беспилотная роботизированная морская платформа [7] с энергетической установкой на солнечных батареях и водородных топливных элементах [1-4]. Морская энергетическая платформа является экспериментальным водным транспортным средством с экологически чистой безопасной энергетической установкой нового поколения на водородных топливных элементах [1-6]. В отличие от других энергетических установок, работающих на водородных ТЭ, принцип работы этой системы основывается на преобразовании химической энергии водорода в топливном элементе, полученным в процессе дегидрирования безопасного жидкого органического носителя водорода (из метилцилогексана) непосредственно на борту судна. Беспилотная платформа с дистанционным управлением может использоваться для как рабочий или туристический морской транспорт, для мониторинга окружающей среды [8], а также для других нужд как автономная морская платформа с экологически чистой безопасной энергетической установкой нового поколения.

Заключение

Представленная энергетическая морская установка нового поколения на водородных топливных элементах с солнечными батареями может работать в реальных условиях с непосредственным извлечением водорода на борту путем дегидрирования безопасного жидкого органического носителя водорода - гидрогенизированного ароматического соединения метилцилогексана в качестве источника водорода.

Дистанционное управление предложенного судна позволяет использовать его в автономном режиме с системой управления по каналам спутниковой навигации мобильных каналов связи и видеоконтроля в реальных водных условиях.

Предложенная морская энергетическая система позволяет работать автономно в течении длительного времени, при этом используя солнечную электростанцию может использоваться в экономном режиме практически неограниченно долго

Список литературы

1. Бредихин С.И., Голодницкий А.Э., Дрожжин О.А., Истомин С.Я., Ковалевский В.П., Филиппов С.П. Стационарные энергетические установки с топливными элементами: материалы, технологии, рынки. - М.: НТФ «Энергопрогресс», Корпорации «ЕЭЭК», 2017.- 392 с.
2. Автономная гибридная энергетическая система на основе солнечных преобразователей и водородных топливных элементов / Исса Х.А.И, Велькин В.И., Абдали Л.М.А., Кувшинов В.В., Муровский С.П. // Транспорт Азиатско-Тихоокеанского региона. – 2025. – № 2(43). – С. 36-46.
3. Декарбонизация энергетического сектора. Эксперты об экологических аспектах развития энергетики // Червинский В.Л., Якимович Б.А., Любчик О.А., Жильцов А.С., Косий А.Г./ Энергетические установки и технологии. 2024. Т. 10. № 2. С. 76-82.
4. Комбинированная система энергоснабжения на основе альтернативных источников энергии для судового оборудования // Конева С.А., Гусева Е.В., Бугаев П.А., Жильцов А.С., Касницкий А.Д., Березняк В.А. / Естественные и технические науки. 2024. № 11 (198). С. 207-210.
5. Насонов, А.К. Разработка многофункционального безэкипажного катера промежуточного класса для работы с объектами различных типов / А.К. Насонов, М.И. Панкратов, Ю.А. Чурсин // Молодежь и современные информационные технологии: сборник трудов XVI Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных, 3-7 декабря 2018 г., г. Томск. - 2018. - С. 342-343.
6. 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.
7. Технологическое развитие возобновляемой энергетики и новые возможности в области исследования и разработок// Комшин А.С., Якимович Б.А., Нашев Р.А., Жильцов А.С., Шахова Н.В./ Энергетические установки и технологии. 2024. Т. 10. № 1. С. 64-67.
8. Фролов, В. Н. Технологии без экипажного судовождения/ В. Н. Фролов, В. Ю. Севбо, И. Е. Ануфриев // Транспорт Российской Федерации. Журнал о науке, экономике, практике. - 2018. - № 4 (77). - С. 17-21.
1. Bredihin S.I., Golodnickij A.E., Drozhzhin O.A., Istomin S.Ya., Kovalevskij V.P., Filippov S.P. Stacionarnye energeticheskie ustanovki s toplivnymi elementami: materialy, tehnologii, rynki. - M.: NTF «Energoprogress», Korporacii «EEEK», 2017.- 392 s.
2. Avtonomnaya gibridnaya energeticheskaya sistema na osnove solnechnyh preobrazovatelej i vodorodnyh toplivnyh elementov / Issa H.A.I, Velkin V.I., Abdali L.M.A., Kuvshinov V.V., Murovskij S.P. // Transport Aziatsko-Tihookeanskogo regiona. – 2025. – № 2(43). – S. 36-46.
3. Dekarbonizaciya energeticheskogo sektora. Eksperty ob ekologicheskikh aspektah razvitiya energetiki // Chervinskij V.L., Yakimovich B.A., Lyubchik O.A., Zhilcov A.S., Kosij A.G./ Energeticheskie ustanovki i tehnologii. 2024. T. 10. № 2. S. 76-82.
4. Kombinirovannaya sistema energosnabzheniya na osnove alternativnyh istochnikov energii dlya sudovogo oborudovaniya // Koneva S.A., Guseva E.V., Bugaev P.A., Zhilcov A.S., Kasnickij A.D., Bereznjak V.A. / Estestvennye i tehnicheckie nauki. 2024. № 11 (198). S. 207-210.
5. Nasonov, A.K. Razrabotka mnogofunkcionalnogo bezekipazhnogo katera promezhutochnogo klassa dlya raboty s obektami razlichnyh tipov / A.K. Nasonov, M.I. Pankratov, Yu.A. Chursin //Molodezh i sovremennye informacionnye tehnologii: sbornik trudov XVI Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii studentov, aspirantov i molodyh uchyonyh, 3-7 dekabrya 2018 g., g. Tomsk. - 2018. - S. 342-343.
6. Sistemy rezervnogo pitaniya dlya sudovyh energeticheskikh ustanovok // Zhilcov A.S., Kolomijchenko V.P., Ivanteev I.S., Vladimirov A.S., Artemenko I.D. / Estestvennye i tehnicheckie nauki. 2024. № 1 (188). S. 230-233.
7. Tehnologicheskoe razvitie vozobnovlyaemoj energetiki i novye vozmozhnosti v oblasti issledovaniya i razrabotok// Komshin A.S., Yakimovich B.A., Nashev R.A., Zhilcov A.S., Shahova N.V./ Energeticheskie ustanovki i tehnologii. 2024. T. 10. № 1. S. 64-67.
8. Frolov, V. N. Tehnologii bez ekipazhnogo sudovozhdeniya/ V. N. Frolov, V. Yu. Sevbo, I. E. Anufriev // Transport Rossijskoj Federacii. Zhurnal o nauke, ekonomike, praktike. - 2018. - № 4 (77). - S. 17-21.

УДК 620.92

Применение алгоритма soft actor-critic для управления двухосной системой слежения за солнцем

Шевчук А.А.¹, Кувшинов В.В.¹, Владимиров А.С.¹, Бордан Д.Ф.¹, Бурдин Н.С.²¹ ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», Севастополь, 299053, Россия² ФГБОУ ВО «Дальневосточный государственный университет путей сообщения», г. Хабаровск, 680021, Россия
AndreiLuck11@yandex.ru

Статья поступила 10.11.2025 г.; после доработки 12.11.2025 г.

Аннотация

В данной работе исследуется применение современного алгоритма глубокого обучения с подкреплением Soft Actor-Critic (SAC) для управления двухосной системой слежения за солнцем. Проводится сравнительный анализ эффективности SAC-агента и классического ПИД-регулятора, параметры которого были оптимизированы методом стохастического поиска. Результаты моделирования показывают, что SAC-агент превосходит ПИД-контроллер по точности слежения, снижая среднюю абсолютную ошибку (MAE) с 1.74° до 1.03° . Это позволило увеличить общую выработку электроэнергии на 16.3%. Работа демонстрирует перспективность применения методов глубокого обучения для управления системами возобновляемой энергетики в условиях нелинейных нагрузок.

Ключевые слова: солнечный трекер, глубокое обучение с подкреплением, Soft Actor-Critic, ПИД-регулятор, системы слежения за солнцем, возобновляемая энергетика

Application of the soft actor-critic algorithm for controlling a dual-axis solar tracking system

Shevchuk A.A.¹, Kuvshinov V.V.¹, Vladimirov A.S.¹, Bordan D.F.¹, Burdin N.S.²¹ Sevastopol State University, Sevastopol, 299053² Far Eastern State Transport University, Khabarovsk, 299053
AndreiLuck11@yandex.ru

Received 10.11.2025 y.; Received in final form 12.11.2025 y.

Abstract

Maximizing the efficiency of dual-axis solar trackers is critical for renewable energy generation, yet precise control remains limited by non-linear environmental loads and the rigidity of classical control algorithms. Here we introduce a control strategy based on the Soft Actor-Critic (SAC) deep reinforcement learning algorithm, designed to adaptively manage system dynamics under stochastic disturbances. We benchmark this approach against a classical PID controller, parameters of which were rigorously optimized via stochastic search. The SAC agent demonstrated superior tracking fidelity in simulation, significantly outperforming the PID baseline by reducing the Mean Absolute Error (MAE) from 1.74° to 1.03° . Crucially, this improvement in precision translated into a 16.3% increase in total electricity generation. These findings support the potential of deep reinforcement learning to replace traditional control paradigms, offering a scalable solution for enhancing the output of photovoltaic systems in complex operating conditions.

Keywords: solar tracker, deep reinforcement learning, Soft Actor-Critic, PID controller, solar tracking systems, renewable energy.

Введение

Системы слежения за солнцем играют ключевую

роль в повышении эффективности фотоэлектрических установок, обеспечивая увеличение выработки электроэнергии на 20-40% по сравнению со стационарными системами [1-3].

Экспериментальные исследования подтверждают целесообразность применения таких механических конструкций: как показано в работе Власова Н.А. и др. [4], использование систем ориентации позволяет повысить генерацию энергии до 40% даже в условиях переменной облачности. Традиционно для управления солнечными трекерами применяются классические ПИД-регуляторы.

Однако развитие современных энергосистем требует не только точного механического управления, но и глубокого анализа данных. Как отмечает Е.Ю. Щетинин [5], применение методов кластеризации и машинного обучения в умных сетях (Smart Grids) позволяет существенно повысить точность прогнозирования и управления нагрузкой. В этом контексте алгоритмы глубокого обучения с подкреплением (Deep Reinforcement Learning, DRL) демонстрируют впечатляющие результаты в задачах управления сложными динамическими системами [6, 7].

Существующие исследования, например работа Али К.А. и др. [8], демонстрируют, что интеллектуальные методы (такие как нечеткая логика) превосходят классические алгоритмы (например, «возмущение и наблюдение») по скорости реакции и стабильности. В данной работе развивается этот подход: рассматривается Soft Actor-Critic (SAC) — современный алгоритм DRL, основанный на принципе максимизации энтропии [9].

Постановка задачи

Объектом управления является двухосный солнечный трекер, приводимый в движение двигателями постоянного тока через редуктор. Задача управления заключается в минимизации угла рассогласования между нормалью панели и вектором направления на Солнце.

Электромеханическая модель привода строится на базе двигателя постоянного тока с независимым возбуждением, где динамика электрической части описывается законом Кирхгофа для цепи якоря:

$$L \frac{dI}{dt} = U - R \cdot I - K_e \cdot \omega \quad (1)$$

Уравнение механического равновесия моментов на валу двигателя имеет вид:

$$J \frac{d\omega}{dt} = K_t \cdot I - b \cdot \omega - \tau_{load} \quad (2)$$

Связь между угловой скоростью двигателя ω и углом поворота панели θ определяется кинематикой редуктора с передаточным числом

N :

$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{\omega}{N} \quad (3)$$

где I — ток якоря, U — управляющее напряжение, ω — угловая скорость вала двигателя, R — активное сопротивление якоря (2 Ом), L — индуктивность (0.5 мГн), K_t и K_e — постоянные момента и ЭДС (0.01), J — момент инерции ротора (0.01 кг·м²), b — коэффициент вязкого трения в подшипниках. Редуктор с передаточным отношением $N = 300$ (ранее 240) обеспечивает преобразование момента.

Рассматривая динамику нагрузки и нелинейности в составе электромеханической модели привода, полный момент нагрузки τ_{load} , приведенный к валу двигателя, является суммой моментов от гравитационных сил и сил трения в механизме:

$$\tau_{load} = \tau_{grav}(\theta) + \tau_{fric}(\omega) \quad (4)$$

Нелинейный момент гравитации:

Для оси высоты (elevation) момент, создаваемый массой панели, зависит от текущего угла наклона θ . Это создает переменную нагрузку, требующую адаптивного управления:

$$\tau_{grav} = \frac{1}{N} \cdot m \cdot g \cdot L \cdot \cos(\theta) \quad (5)$$

где m — масса панели (5 кг), g — ускорение свободного падения, L — расстояние от оси вращения до центра масс (0.5 м).

Модель трения (Stribeck Curve):

Для учета эффекта «залипания» (Stiction), который является основной причиной ошибок позиционирования и автоколебаний в ПИД-системах, используется модель трения Штрибека:

$$\tau_{fric}(\omega) = \tau_{motor}, \text{ если } |\omega| < \epsilon \wedge |\tau_{motor}| < \tau_{static}; \text{ иначе } \text{sgn}(\omega)(\tau_{coulomb} + b_v|\omega|)$$

где $\tau_{motor} = K_t \cdot I$ — развиваемый двигателем момент, τ_{static} — момент трения покоя (0.03 Н·м), $\tau_{coulomb}$ — момент кулоновского трения (0.02 Н·м). Условие первой строки описывает режим покоя, когда приложенный момент недостаточен для преодоления сил статического трения.

В части моделирования энергопитания системы, выходная мощность фотоэлектрической панели рассчитывается с учетом угла падения солнечных лучей:

$$P = A \cdot \eta \cdot I_0 \cdot \cos(\alpha) \quad (6)$$

где A — эффективная площадь панели (1.5 м²), η — КПД преобразования (18%), I_0 — интенсивность прямой солнечной радиации (до 1000 Вт/м²). Положение Солнца рассчитывается на основе астрономических алгоритмов для задан-

ных координат (широта 30° , долгота 45°) и времени 2.

В контуре управления электромеханической моделью привода для базового сравнения использовался классический ПИД-регулятор, выходящий управляющий сигнал которого описывается следующим образом:

$$u(t) = K_p \cdot e(t) + K_i \cdot \int e(t) dt + K_d \cdot (de/dt) \quad (7)$$

Оптимизация параметров ПИД-регулятора

Для настройки коэффициентов (K_p , K_i , K_d) и постоянной времени фильтра (T_f) применялся метод стохастической оптимизации (Monte Carlo method). В отличие от ручной настройки или перебора по сетке, данный подход позволяет искать оптимальные значения в непрерывном пространстве параметров.

Оптимизация проводилась путем выполнения 150 независимых симуляций для каждой оси. В качестве целевой функции использовался взвешенный критерий, учитывающий как точность, так и качество управления:

$$J = w_1 \cdot \text{MAE} + w_2 \cdot \text{Chatter} \quad (8)$$

где Chatter – штраф за высокочастотные колебания управляющего сигнала («дребезг»), а w_1 , w_2 — весовые коэффициенты. Это позволило найти баланс между агрессивным слежением и плавностью хода приводов.

Найденные параметры:

- Азимут: $K_p = 0.90$, $K_i = 0.060$, $K_d = 2.00$;
- Угол места: $K_p = 1.00$, $K_i = 0.008$, $K_d = 0.35$.

Для реализации интеллектуального управления в рамках электромеханической модели привода применяется Soft Actor-Critic – алгоритм глубокого обучения с подкреплением, основанный на архитектуре actor-critic с максимизацией энтропии [9], который одновременно обучает политику (actor) и функцию ценности (critic).

Пространство состояний включает: текущее положение панели (азимут, высота), угловые скорости, положение солнца, время суток и уровень солнечной радиации (8-мерный вектор).

Пространство действий представлено непрерывными значениями управляющих напряжений для двух двигателей в диапазоне $[-12, +12]$ В.

Функция награды разработана для максимизации выработки энергии и минимизации

ошибки слежения:

$$r = 0.1 \cdot P_{\text{ген}} - 1.0 \cdot \varepsilon_{\text{слеж}} - 0.001 \cdot |U_{\text{упр}}| - 0.01 \cdot |\omega| + \text{бонус} \quad (9)$$

где $P_{\text{ген}}$ – генерируемая мощность, $\varepsilon_{\text{слеж}}$ – ошибка слежения, $U_{\text{упр}}$ – управляющие напряжения, ω – угловые скорости. Бонус +1.0 предоставляется при достижении точности слежения менее 1° .

В качестве аппроксиматоров для сетей Actor и Critic использовались полносвязные нейронные сети (MLP) с двумя скрытыми слоями по 256 нейронов (активация ReLU). Обучение проводилось в течение 50 000 шагов.

Результаты исследования

Сравнительный анализ проводился на основе имитационного моделирования работы системы в течение 12 часов. Сравнились обученный SAC-агент и настроенный ПИД-регулятор

Таблица 1. Сравнительные результаты контроллеров

Метрика	ПИД (PID)	SAC (RL)	Улучшение
MAE (Total, °)	1.74	1.03	40.8%
MAE (Azimuth, °)	1.69	0.98	42.0%
MAE (Elevation, °)	0.27	0.05	81.5%
RMSE (°)	2.08	2.08	0%
Max Error (°)	78.46	50.00	36.3%
Энергия (Вт·ч)	2770.5	3221.6	16.3%
Ср. мощность (Вт)	230.9	268.5	16.3%

При проведении сравнительного анализа эффективности алгоритмов, SAC-агент продемонстрировал значительно более высокую точность слежения. Средняя абсолютная ошибка (MAE) была снижена на 40.8% (с 1.74° до 1.03°). Максимальная ошибка позиционирования также сократилась на 36.3%.

На рисунке 1 представлена траектория слежения по азимуту (ПИД-регулятор).

На рисунке 2 представлено слежение при помощи ПИД-регулятора по углу возвышения.

Как видно из графиков траекторий на рисунке 3, SAC-агент обеспечивает плавное движение, в то время как ПИД-регулятор демонстрирует характерные осцилляции вокруг целевого значения, вызванные нелинейностью трения и

попытками компенсировать ошибку интегральной составляющей.

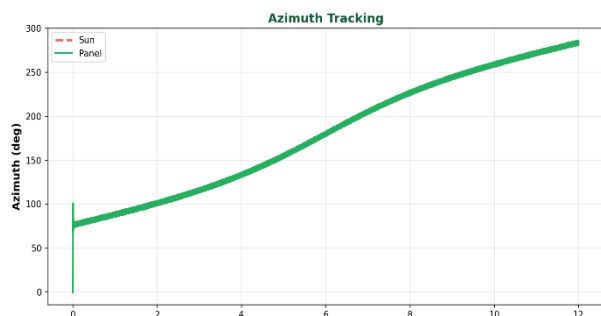


Рис. 1. Траектория слежения по азимуту (ПИД-регулятор)

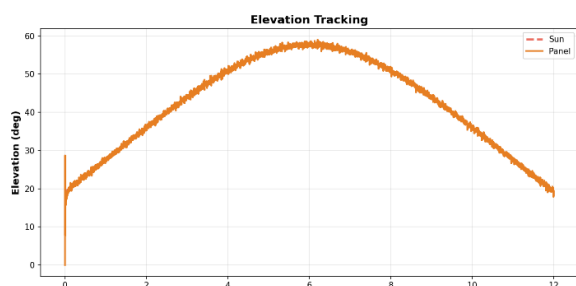


Рис. 2. Слежение по углу возвышения (ПИД-регулятор)

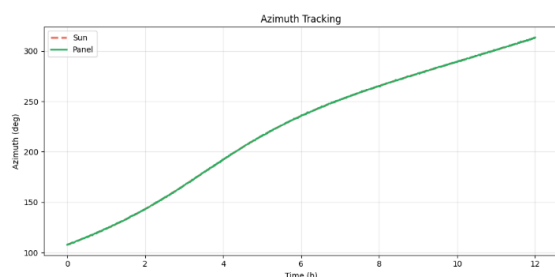


Рис. 3. Траектория слежения по азимуту (SAC-агент).

На рисунке 4 представлено слежение по углу возвышения

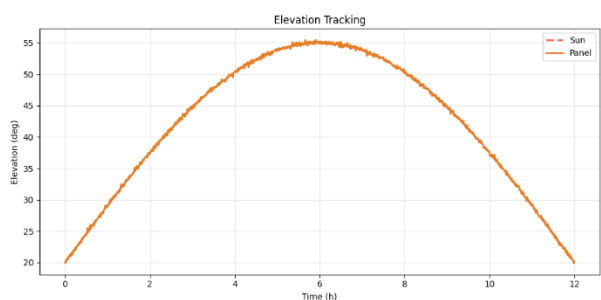


Рис. 4. Слежение по углу возвышения (SAC-агент).

С точки зрения энергетической эффективности, улучшение точности позиционирования напрямую конвертировалось в полезную выработку: за 12 часов работы система под управлением SAC выработала 3221.6 Вт·ч, в то время как система с ПИД-регулятором – 2770.5 Вт·ч. Прирост эффективности составил 16.3%.

На рисунке 5 представлен график генерации мощности при системе управления ПИД-регулятором.

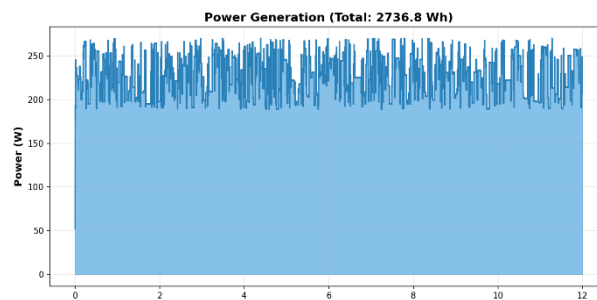


Рис. 5. График генерации мощности (ПИД-регулятор).

SAC-агент быстрее выводит панель на оптимальный угол в начале работы и стабильнее удерживает её в зоне максимальной мощности. График генерируемой мощности (рис. 6) демонстрирует, что SAC-агент поддерживает более стабильную выработку энергии в течение всего дня, минимизируя потери от неточного позиционирования.

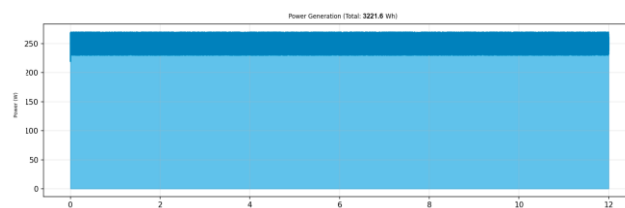


Рис. 6. График генерации мощности (SAC-агент).

Оценивая качество управляющих воздействий, сравнительный анализ сигналов показывает, что алгоритм SAC генерирует существенно более плавные команды. В отличие от него, работа ПИД-регулятора характеризуется режимом постоянного высокочастотного переключения («дребезг»), что отчетливо прослеживается по амплитудным скачкам напряжения (см. рис. 7). Такое «мягкое» управление, свойственное нейросетевому подходу, играет ключевую роль в снижении механического износа приводов и сокращении энергозатрат непосредственно на процесс регулирования.

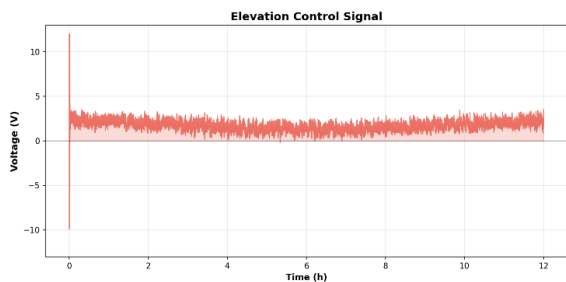


Рис. 7. Управляющий сигнал азимута (ПИД-регулятор).

На рисунке 8 представлен управляющий сигнал угла возвышения для управления ПИД-регулятором.

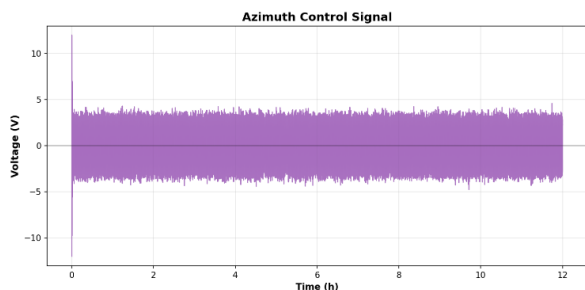


Рис. 8. Управляющий сигнал угла возвышения (ПИД-регулятор).

На рисунке 9 показан управляющий сигнал азимута при использовании SAC-агента, а на рисунке 10 управляющий сигнал угла возвышения.

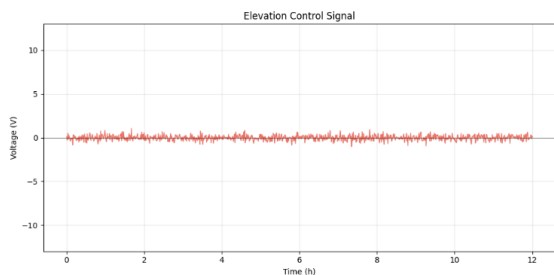


Рис. 9. Управляющий сигнал азимута (SAC-агент).

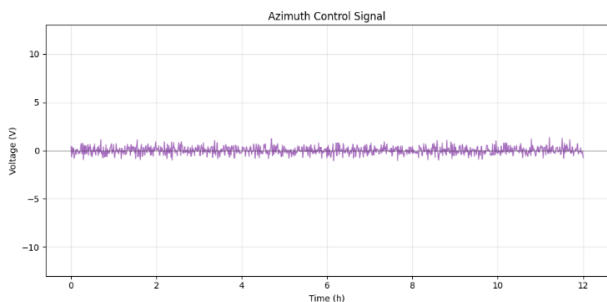


Рис. 10. Управляющий сигнал угла возвышения (SAC-агент).

Заключение

В данной работе проведено исследование применимости алгоритма Soft Actor-Critic для управления двухосной системой слежения за солнцем. Основные результаты исследования:

- Разработанный контроллер на базе SAC успешно справляется с нелинейной динамикой трения, превосходя классические методы управления.
- Достигнуто улучшение точности слежения (MAE) на 40.8% по сравнению с ПИД-регулятором.
- Максимальная ошибка позиционирования снижена на 36.3%, что повышает надежность системы при резких изменениях условий.
- Ключевой показатель – общая выработка электроэнергии – увеличен на 16.3%.

Полученные результаты подтверждают, что методы глубокого обучения с подкреплением являются перспективной альтернативой классическим регуляторам в задачах управления возобновляемыми источниками энергии, позволяя извлекать больше полезной мощности без изменения аппаратной части установки.

Список литературы

- Mousazadeh H., et al. A review of principle and sun-tracking methods for maximizing solar systems output // Renewable and sustainable energy reviews. – 2009. – Т. 13. – №. 8. – С. 1800-1818.
- Al-Mohamad A. Efficiency improvements of photovoltaic panels using a Sun-tracking system // Applied energy. – 2004. – Т. 79. – №. 3. – С. 341-354.
- Hafez A. Z., Yousef A. M., Harag N. M. Solar tracking systems: Technologies and trackers drive types – A review // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2018. – Т. 91. – С. 754-782.
- Власов Н.А., Кувшинов В.В., Коломийченко В.П. и др. Технологии использования трекерных систем для солнечных установок // Перспективные технологии и материалы: материалы Международной научно-практической конференции. – Севастополь, 2022. – С. 353-357.
- Shchetinin E. Yu. Cluster-based energy consumption forecasting in smart grids // Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2019. – Vol. 1205. – No. 1. – P. 012051.
- Perera A., Kamalaruban P. Applications of reinforcement learning in energy systems // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2021. – Т. 137. – С. 110618.
- Lillicrap T. P., et al. Continuous control with deep reinforcement learning // arXiv preprint

arXiv:1509.02971. – 2015.

(PMLR). 2018, pp. 1861–1870.

8. Али К.А., Абдали Л.М., Коровкин Н.В., Якимович Б.А., Кувшинов В.В. Сравнение методов управления при использовании алгоритмов возмущения и наблюдения и нечеткой логики для контроля точки максимальной мощности в фотоэлектрических системах // Вестник ИжГТУ имени М.Т. Калашникова. – 2023. – Т. 26. – № 2. – С. 4-15.
9. Haarnoja T., et al. Soft actor-critic: Off-policy maximum entropy deep reinforcement learning with a stochastic actor // International conference on machine learning. – PMLR, 2018. – С. 1861-1870.

References

1. Mousazadeh H., Keyhani A., Javadi A., Mobli H., Abrinia K., Sharifi A. A review of principle and sun-tracking methods for maximizing solar systems output. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2009, vol. 13, no. 8, pp. 1800–1818.
2. Al-Mohamad A. Efficiency improvements of photovoltaic panels using a Sun-tracking system. *Applied Energy*. 2004, vol. 79, no. 3, pp. 341–354.
3. Hafez A.Z., Yousef A.M., Harag N.M. Solar tracking systems: Technologies and trackers drive types – A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2018, vol. 91, pp. 754–782.
4. Vlasov N.A., Kuvshinov V.V., Kolomiychenko V.P., Chepenyuk A.A., Berezhnyak V.A. Technologies for using tracker systems for solar installations. *Proceedings of the International Scientific and Practical Conference "Promising Technologies and Materials"*. Sevastopol, 2022, pp. 353–357. (in Russian)
5. Shchetinin E.Yu. Cluster-based energy consumption forecasting in smart grids. *Journal of Physics: Conference Series*. IOP Publishing, 2019, vol. 1205, no. 1, p. 012051.
6. Perera A., Kamalaruban P. Applications of reinforcement learning in energy systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2021, vol. 137, p. 110618.
7. Lillicrap T.P., Hunt J.J., Pritzel A., Heess N., Erez T., Tassa Y., Silver D., Wierstra D. Continuous control with deep reinforcement learning. *arXiv preprint arXiv:1509.02971*. 2015.
8. Ali Q.A., Abdali L.M., Korovkin N.V., Yakimovich B.A., Kuvshinov V.V. Comparison of control method system by using perturbation and observation algorithms and fuzzy logic for the maximum power point control in photovoltaic systems. *Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova*. 2023, vol. 26, no. 2, pp. 4–15. (in Russian) .
9. Haarnoja T., Zhou A., Abbeel P., Levine S. Soft actor-critic: Off-policy maximum entropy deep reinforcement learning with a stochastic actor. *International Conference on Machine Learning*

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

УДК: 62-192:681.51

Метод определения запасного имущества и принадлежностей для оборудования систем контроля и управления

Кузнецова Н.И.¹, Губина Е.Д.¹, Серова-Нашева Н.В.¹

¹ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», Севастополь, 299053, Россия, e-mail: nikuznetsova@mail.sevsu.ru, edgubina@mail.sevsu.ru

Статья поступила 13.11.2025 г.; после доработки 14.11.2025 г.

Аннотация

На АЭС, для продления срока эксплуатации оборудования, и чтобы обеспечить бесперебойность работы ЭБ проводят ТОиР. Правильно построенная система ТОиР позволяет увеличить срок эксплуатации дорогостоящего оборудования, тем самым увеличивая долговечность АЭС.

В статье предложен метод, качественного определения запасного имущества и принадлежностей для оборудования систем контроля и управления. Рассмотрена методика расчета оптимальных запасов в комплекте ЗИП – О, то есть прямая задача оптимизации для функционального модуля системы.

Ключевые слова: ТОиР, система контроля и управления, функциональный модуль, ЗИП.

Method for determining spare property and accessories for control and management system equipment

Kuznetsova N.I.¹, Gubina E.D.¹, Serova-Nasheva N.V.¹

¹Sevastopol State University, Sevastopol, 299053, Russia, e-mail: nikuznetsova@mail.sevsu.ru, edgubina@mail.sevsu.ru

Received 13.11.2025 y.; received in final form 14.11.2025 y.

Abstract

At nuclear power plants, maintenance and repairs (M&R) are performed to extend the service life of equipment and ensure uninterrupted operation of the power plant. A properly designed M&R system can extend the service life of expensive equipment, thereby increasing the longevity of the nuclear power plant.

This article proposes a method for qualitatively determining spare parts and accessories for control and monitoring system equipment. A methodology for calculating optimal inventory levels in spare parts kits is discussed, i.e., a direct optimization problem for a functional module of the system.

Keywords: maintenance and repair, control and management system, functional module, spare parts.

Введение

Мониторинг технического состояния является неотъемлемой частью технического обслуживания, которое заключается в наблюдении за объектом с целью получения информации о его техническом состоянии и рабочих параметрах.

Мониторинг может осуществляться во время эксплуатации объекта непрерывно или с запланированными интервалами. На основании данных мониторинга осуществляется мониторинг технического состояния и остаточного ресурса объекта.

Замена является процедурой поддержания или восстановления работоспособности объекта путём установки запасной части вместо вышедшего из строя или изношенного элемента объекта.

Метод расчета ЗИП оборудования СКУ

Техническое обслуживание – комплекс организационных мероприятий и технических операций, направленных на поддержание работоспособности (исправности) объекта и снижение вероятности его отказов при использовании по назначению, хранении и транспортировании [4,5].

Основные виды технического обслуживания:

- плановое ТО (профилактическое, регламентированное) - техническое обслуживание, постановка на которое осуществляется в соответствии с требованиями документации;
- внеплановое ТО (корректирующее, нерегламентированное) - техническое обслуживание, постановка на которое осуществляется без предварительного назначения по техническому состоянию.

Система технического обслуживания и ремонта - совокупность взаимосвязанных средств, документации по техническому обслуживанию и ремонту и исполнителей, необходимых для поддержания и восстановления рабочего состояния объекта [2,3].

Ремонт – это комплекс технических операций и организационных действий по восстановлению исправного или работоспособного состояния объекта и восстановлению ресурса объекта или его составных частей. Ремонт включает локализацию, диагностирование, устранение неисправности и контроль функционирования. Ремонт и техническое обслуживание проводится ремонтным персоналом с использованием комплектов запасных частей, инструментов, принадлежностей (ЗИП).

Запасные части, инструменты и принадлежности (ЗИП) – совокупность запасов материальных средств, сформированная в зависимости от назначения и особенностей использования объекта и предназначенная для его функционирования, технического обслуживания и ремонта. Запасная часть - отдельный блок, устройство или элемент, предназначенный для замены изношенных, неисправных или вышедших из строя составных частей объекта с целью поддержания или восстановления его рабочего состояния.

Комплект ЗИП – набор запасных частей, инструментов, принадлежностей и расходных материалов, необходимых для функционирования, технического обслуживания и ремонта объекта.

Все виды комплектов ЗИП условно делятся на основные и специальные, а в зависимости от состава, назначения и размещения - на одиночные, групповые и ремонтные.

Одиночный комплект ЗИП (ЗИП – О) – это комплект запасных конструктивных элементов, придаваемых непосредственно изделию в целях обеспечения его надежности при длительном использовании. [3]

Групповой ЗИП (ЗИП-Г) предназначен для обеспечения устранения отказов и неисправностей, замены выработавших назначенный ресурс составных частей изделий (агрегатов, систем) оборудования, проведения ТО силами персонала, а также для пополнения ЗИП-О и комплектов ЗИП специального назначения.

Ремонтный ЗИП (ЗИП-Р) предназначен для восстановления изделий (агрегатов, систем) оборудования с использованием элементов, не включенных в состав других комплектов ЗИП, а также для пополнения комплектов ЗИП-Г, в случае уменьшения в них количества составных частей до уровня неснижаемого запаса или полного их израсходования.

Для продления срока эксплуатации оборудования, на АЭС проводят ТОиР. ТОиР позволяют обеспечить бесперебойность работы ЭБ, благодаря предупреждению возникновения отказов оборудования и систем.

Цель системы ТОиР – это управление техническим состоянием оборудования, сооружений и зданий АЭС в течение их срока службы или ресурса, позволяющее обеспечить:

- заданный уровень готовности оборудования к работе;
- работоспособность оборудования при эксплуатации ЭБ АЭС;
- минимальные затраты труда и средств на выполнение ТОиР.

Система ТОиР должна соответствовать требованиям нормативных документов.

Для обеспечения нормального функционирования системы необходимо на весь период эксплуатации снабжать их запасным инструментом, принадлежностями, сменными комплектующими изделиями.

Выберем одиночный комплект ЗИП (ЗИП – О), который предназначен для обеспечения замены отказавших или поврежденных агрегатов (систем, элементов, блоков) оборудования,

выполнения технологических операций и проведения технического обслуживания штатными расчетами

Для расчета комплекта воспользуемся методикой расчета оптимальных запасов в комплекте ЗИП – О, то есть прямой задачей оптимизации)

[1,3] для функционального модуля для системы контроля и управления.

Исходные данные для расчета оптимальных запасов представлены в таблице 1.

Таблица 1. Исходные данные для оптимальных запасов.

Название	i	m_i , шт	λ_{zi} , 1/ч	с, у.е.	a_i	T_i , ч	B_i	n_i , шт
Кодек	1	1	$1 \cdot 10^{-7}$	-	1	8760	-	-
Коммутатор	2	1	$7,02 \cdot 10^{-7}$	-	1	8760	-	-
АЦП	3	1	$2,136 \cdot 10^{-5}$	-	1	8760	-	-
Приемник дискретных сигналов	4	1	$1,557 \cdot 10^{-6}$	-	1	8760	-	-
МП	5	1	$1 \cdot 10^{-8}$	-	1	8760	-	-
Формирователь сигналов индикации	6	1	$1,784 \cdot 10^{-6}$	-	1	8760	-	-
ЦАП	7	1	$2,136 \cdot 10^{-5}$	-	1	8760	-	-
Коммутатор	8	1	$7,02 \cdot 10^{-7}$	-	1	8760	-	-
Формирователь дискретных сигналов	9	1	$1,784 \cdot 10^{-6}$	-	1	8760	-	-
Схема контроля аппаратной части	10	1	$2,3 \cdot 10^{-10}$	-	1	8760	-	-
Схема питания	11	1	$5 \cdot 10^{-5}$	-	1	8760	-	-

где i – порядковый номер запаса;

m_i – количество СЧ i -го типа в изделии, обслуживаемом комплектом ЗИП;

λ_{zi} – интенсивность замен СЧ i -го типа;

c_i – затраты на одну ЗЧ i -го типа;

a_i, T_i, B_i – тип и параметры принятой стратегии пополнения i -го типа;

n_i – начальный уровень запаса i -го типа.

Стратегия пополнения – периодическое пополнение ($a_i = 1$) с периодом пополнения $T_i = 8760$ ч.

Столбец начального уровня запаса не заполнен, т.к. предстоит задача его определить.

В качестве ПД выбран коэффициент готовности комплекта ЗИП – О $K_{Г\text{ЗИП-О}}^{\text{ТР}} = 0,95$.

Для удобства вычислений сформируем дополнительную таблицу 2 и 3.

Таблица 2. Таблица промежуточных результатов расчетов

i	m _i , шт	λ _{ai} , 1/ч	a _i	T _i , ч	n _{i0} , шт
1	1	1·10 ⁻⁷	1	8760	1
2	1	7.02·10 ⁻⁷	1	8760	1
3	1	2.136·10 ⁻⁵	1	8760	1
4	1	1.557·10 ⁻⁶	1	8760	1
5	1	1·10 ⁻⁸	1	8760	1
6	1	1.784·10 ⁻⁶	1	8760	1
7	1	2.136·10 ⁻⁵	1	8760	1
8	1	7.02·10 ⁻⁷	1	8760	1
9	1	1.784·10 ⁻⁶	1	8760	1
10	1	2.3·10 ⁻¹⁰	1	8760	1
11	1	5·10 ⁻⁵	1	8760	1

Таблица 3. Таблица промежуточных результатов расчетов

i	a _{i0}	R _{i0} (A;L)	R _{i0} (A;L+1)
1	8.76·10 ⁻⁴	1,28·10 ⁻⁷	2,8·10 ⁻¹¹
2	6.1495·10 ⁻³	6,28·10 ⁻⁶	1,93·10 ⁻⁸
3	1.871·10 ⁻¹	5,33·10 ⁻⁶	2,44·10 ⁻⁴
4	1.3694·10 ⁻²	3,10·10 ⁻⁵	1,06·10 ⁻⁷
5	8.76·10 ⁻⁵	1,28·10 ⁻⁹	2,8·10 ⁻¹⁴
6	1.563·10 ⁻²	4,04·10 ⁻⁵	1,58·10 ⁻⁷
7	1.871·10 ⁻¹	5,33·10 ⁻³	2,44·10 ⁻⁴
8	6.1495·10 ⁻³	6,28·10 ⁻⁶	1,93·10 ⁻⁸
9	1.563·10 ⁻²	4,04·10 ⁻⁵	1,58·10 ⁻⁷
10	2.015·10 ⁻⁶	6,77·10 ⁻¹³	3,41·10 ⁻¹⁹
11	4.38·10 ⁻¹	2,62·10 ⁻²	2,71·10 ⁻³

1. Вычисляем расчетный показатель D_0 :

$$D_0 = -\ln(K_{ГЗИП-0}^{TP}) = -\ln(0.95) = 0.051.$$

2. Для каждого элемента запаса вычисляем a_{i0} по формуле и заносим результат в таблицу 2:

$$a_{10} = 1 \cdot 10^{-7} \cdot 8760 = 8.76 \cdot 10^{-4}.$$

3. Для каждого запаса путем итерационных вычислений определяем первоначальный уровень запаса, т.е. такое минимальное значение n_{i0}^0 для которого промежуточный расчетный показатель $R_{i0}(n_{i0}^0; a_{i0})$ удовлетворяет неравенству:

$$R_{i0}(n_{i0}^0; a_{i0}) \leq D_0.$$

При периодическом пополнении

$$R_{i0}(n_{i0}^0; a_{i0}) = -\ln \left\{ 1 - \frac{1}{a_{i0}} \cdot \left[e^{-a_{i0}} \cdot \sum_{\gamma=n_{i0}+2}^{\infty} (\gamma - n_{i0} - 1) \cdot \frac{a_{i0}^{\gamma}}{\gamma!} \right] \right\}.$$

Тогда:

$$i = 1, n_{i0} = 1$$

$$R_{10}(n_{10}^0; a_{10}) = -\ln \left\{ 1 - \frac{1}{8.76 \cdot 10^{-4}} \cdot \left[e^{-8.76 \cdot 10^{-4}} \cdot \sum_{\gamma=3}^{\infty} (\gamma - 1 - 1) \cdot \frac{(8.76 \cdot 10^{-4})^{\gamma}}{\gamma!} \right] \right\} = 1.2784 \cdot 10^{-7} < D_0$$

4. Найденные значения n_{i0} для всех блоков ФМ и результаты и соответствующие ему $R_{i0}(n_{i0}^0; a_{i0})$ заносим в таблицу 2.

5. Для каждого i найденное значение n_{i0} увеличиваем на единицу и так же находим $R_{i0}(n_{i0}^0 + 1; a_{i0})$.

$$i = 1, n_{i0} = 2$$

$$R_{10}(n_{10}^0 + 1; a_{10}) = -\ln \left\{ 1 - \frac{1}{8.76 \cdot 10^{-4}} \cdot \left[e^{-8.76 \cdot 10^{-4}} \cdot \sum_{\gamma=4}^{\infty} (\gamma - 2 - 1) \cdot \frac{(8.76 \cdot 10^{-4})^{\gamma}}{\gamma!} \right] \right\} = 2.799 \cdot 10^{-11} < D_0$$

6. Находим $\sum_{i0=1}^{11} R_{i0}(n_{i0}^0; a_{i0})$:

$$\sum_{i0=1}^{11} R_{i0}(n_{i0}^0; a_{i0}) = 3.6939 \cdot 10^{-2} \leq D_0 = 5.1 \cdot 10^{-2}$$

Следовательно, по итогам расчета можно утверждать, что найденные n_{i0} являются оптимальным уровнем запаса ЗИП-О

Заключение

Предложен метод, позволяющий определить оптимальный уровень запаса ЗИП-О, что обеспечит своевременно систему ТОиР необходимым количеством ЗИПа. Правильно построенная система ТОиР позволяет увеличить срок эксплуатации дорогостоящего оборудования, тем самым увеличивая долговечность АЭС.

Предложенный подход к определению запаса может быть использован для усовершенствования и ремонта систем контроля и управления ЭБ на АЭС.

Список литературы

1. ТПТС-НТ. Описание платформы. [Электронный ресурс]: – электрон. дан. – М.: ФГУП «ВНИИА им. Н.Л. Духова», 2017.
2. Панкин, А.М. Диагностирование объектов атомной техники [Электронный ресурс]: А.М. Панкин - электрон. текст. дан. – Сосновый Бор: 2017. – Режим доступа: <http://www.proatom.ru/modules.php?name=News&file=article&sid=7264>, свободный.
3. ГОСТ РВ 27.3.03 – 2005. Надежность военной техники. Оценка и расчет запасов в комплектах ЗИП [Текст]; Москва: ИПК Издательство стандартов, 2002. – 24 с.
4. ГОСТ 27.002-2015. Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения

[Текст]; М.: ФГУП «Стандартинформ», 2005. - 24 с.

5. ГОСТ 20911-89. Техническая диагностика. Термины и определения. [Текст]; М.: Стандартинформ, 2009. – 11 с.

References

1. TPTS-NT. Platform Description. [Electronic resource]: – electronic data. – Moscow: FSUE “VNIIA im. N.L. Dukhov”, 2017.
2. Pankin, A.M. Diagnostics of Nuclear Facilities [Electronic resource]: A.M. Pankin - electronic text. data. – Sosnovy Bor: 2017. – Access mode: <http://www.proatom.ru/modules.php?name=News&file=article&sid=7264>, free.
3. GOST RV 27.3.03 – 2005. Reliability of Military Equipment. Assessment and Calculation of Reserves in Spare Parts Kits [Text]; Moscow: IPK Publishing House of Standards, 2002. – 24 p.
4. GOST 27.002-2015. Reliability in Engineering. Basic Concepts. Terms and Definitions [Text]; Moscow: FSUE Standartinform, 2005. - 24 p.
5. GOST 20911-89. Technical Diagnostics. Terms and Definitions. [Text]; Moscow: Standartinform, 2009. - 11 p.

**ЯДЕРНЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ, ТОПЛИВНЫЙ ЦИКЛ,
РДИЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ**

УДК 620.193

Коррозия нержавеющей стали в ЯЭУ**Корнеева Н.К., Пичугова Л.Н., Глушкова Е.В., Батарейная В.В.***ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», Университетская-33 г. Севастополь, 299053, Россия, korneeva_nk@mail.ru, kebpf2015@mail.ru, glusev@mail.ru, batareynaya.vika@mail.ru.*

Статья поступила 17.11.2025 г. ; после доработки 20.11.2025 г.

Аннотация

В статье исследуется проблема коррозии нержавеющей стали, как явления, способствующего разрушению конструкционных материалов ЯЭУ. Анализируются различные виды коррозии, подчеркивается влияние внутренних и внешних факторов на коррозионные процессы. Также рассматриваются современные методы борьбы с коррозией, подчеркивается необходимость комплексного подхода в решении данной проблемы для обеспечения долговечности и безопасности ядерных энергетических установок.

Ключевые слова: коррозия, нержавеющие стали, ядерные энергетические установки.

Corrosion of stainless steels in nuclear power plants**Korneeva, N.K.¹, Pichugova, L.N.², Glushkova E.V.³, Batareynaya V.V.***Sevastopol stat university, 33 Universitetskaya st., Sevastopol, 299053, Russia, korneeva_nk@mail.ru, kebpf2015@mail.ru, kebpf2015@mail.ru, batareynaya.vika@mail.ru.*

Received 17.11.2025y. .; received in final form 20.11.2025 y.

Abstract

The article examines the problem of stainless steel corrosion as a phenomenon contributing to the destruction of nuclear power plant structural materials. Various types of corrosion are analyzed, and the influence of internal and external factors on corrosion processes is emphasized. Modern methods of corrosion control are also considered, and the need for an integrated approach to solving this problem is emphasized to ensure the durability and safety of nuclear power plants.

Keywords: corrosion, stainless steels, nuclear power plants.

Введение

В сфере ядерной энергетики коррозия является одной из основных угроз, способствующих деградации конструкционных элементов, что может приводить к серьезным последствиям для безопасности эксплуатации атомных станций. Среди различных материалов, используемых в ядерных энергетических установках, нержавеющая сталь занимает особое место благодаря своим уникальным коррозионным свойствам и механической прочности. Однако, несмотря на

это, нержавеющая сталь все еще подвержена различным формам коррозии, что может существенно повлиять на надежность и безопасность ядерных реакторов. Коррозионная стойкость материалов играет ключевую роль в обеспечении безопасного функционирования ядерных энергетических установок.

Цель работы

Цель данной статьи заключается в анализе проблем, связанных с коррозией нержавеющей

сталей в контексте эксплуатации ядерных энергетических установок, а также в исследовании методов повышения коррозионной стойкости конструкционных материалов.

Коррозия и её влияние на материалы в ядерной энергетике

Коррозия — это естественный физико-химический процесс, приводящий к разрушению поверхности материалов, главным образом металлических, вследствие их взаимодействия с окружающей средой. Коррозия представляет собой серьезную проблему для различных промышленных отраслей, включая строительство, транспорт, энергетику и многие другие. Разрушение конструкций, вызванное коррозией, может привести к серьезным авариям с человеческими жертвами.

Коррозионная стойкость материалов, используемых в конструкциях ядерных энергетических установок, является одним из ключевых факторов, обеспечивающих надежную и безопасную эксплуатацию ЯЭУ. При равномерной коррозии наблюдается уменьшение толщины металлических элементов, что ведет к ухудшению их прочностных характеристик. Локальные виды коррозии, в свою очередь, могут вызывать образование микротрещин и сквозных отверстий, что приводит к тяжелым последствиям, таким как разгерметизация тепловыделяющих элементов и возникновение протечек за пределами первого контура.

Кроме того, поступление продуктов коррозии в первый контур, активация их в активной зоне и последующее отложение на элементах конструкции ухудшают обслуживание реактора и затрудняют проведение ремонтных работ. Среди аварий, приводящих к останову ядерной энергетической установки, значительная часть обусловлена коррозией. Поэтому при выборе конструкционных материалов ЯЭУ особое внимание должно уделяться обеспечению их высокой коррозионной стойкости.

В качестве основного материала при постройке атомных электростанций используется нержавеющая сталь — из нее изготавливают оболочки твэлов, трубопроводы, опоры инженерных коммуникаций, корпусные элементы, емкости и многое другое.

Нержавеющая сталь — это сплавы на основе железа с различными примесями. Чаще всего легирующими присадками являются углерод, хром, никель, титан, ниобий. Каждый из элементов придает сплаву новые физико-механические

свойства, тем самым повышая его прочность или увеличивая пластичность. Главное преимущество нержавеющей стали — сопротивление коррозии, этим свойством она обязана хрому, который присутствует в составе каждого нержавеющей сплава.

С приобретением антикоррозийных свойств нержавеющей стали не уступает по прочности обычной стали. Она сохраняет все ценные качества металлов: одновременно прочна и пластична, хорошо поддается обработке: резке, сварке, прокату, растяжению, гибке. Все марки нержавеющей стали изготавливаются в соответствии с ГОСТ 5632-2014.

Нержавеющие стали разделяют на несколько видов:

- Ферритные — низкоуглеродистая сталь с высоким содержанием легирующих добавок. Марки: 08X13, 12X17, 08X18T1.
- Мартенситные — закаленная сталь с кристаллической микроструктурой, которая дает ей повышенную прочность. Используется для изготовления ножей, промышленного и хирургического инструмента, штампов, подшипников и т.д. Марки: AISI 420, AISI 440, 20X13.
- Аустенитные — закаленная сталь с содержанием никеля и хрома, отличается высокими показателями коррозионной стойкости и пластичности. Марки: AISI 304, AISI 316, 08X18H10T, 08X17H13M2T.

Существуют также стали переходного класса: аустенитно-мартенситные, мартенситно-ферритные и аустенитно-ферритные, но используются они реже.

Подразделение стали на классы по структурным признакам является условным, так как предполагает только одну термическую обработку, а именно — охлаждение на воздухе после высокотемпературного нагрева образцов небольших размеров [1].

В настоящее время основными конструкционными материалами для оборудования АЭС являются сплавы циркония, нержавеющей стали аустенитного класса, низколегированные стали, стали перлитного класса, сплавы алюминия.

Стали и сплавы оборудования первого контура по стойкости к равномерной поверхностной коррозии должны относиться к материалам 1-3 групп 79 стойкости по ГОСТ 9.908-85, т. е. иметь скорость коррозии не более 0,01 мм/год.

Виды коррозии

В условиях ЯЭУ наблюдаются различные

виды коррозии, которые могут влиять на нержавеющие стали:

1. Общая коррозия. Общая коррозия представляет собой равномерное разрушение поверхности материала под воздействием коррозионной среды. Несмотря на хорошую коррозионную стойкость нержавеющих сталей, они могут подвергаться этому виду коррозии, особенно в условиях длительного контакта с агрессивными химическими веществами.
2. Питтинговая коррозия. Питтинговая коррозия – это явление локализованного разрушения материала, которое проявляется в виде маленьких ямок или «питтингов» на поверхности. Этот тип коррозии опасен тем, что может привести к серьезным повреждениям с минимальным внешним проявлением.
3. Щелочная коррозия. Щелочная коррозия является одной из форм коррозионного разрушения, которая возникает в условиях высокой щелочности окружающей среды. Щелочная коррозия происходит в результате взаимодействия нержавеющей стали с высокощелочными растворами, что приводит к образованию локализованных коррозионных процессов.
4. Межкристаллитная коррозия. Межкристаллитная коррозия происходит вдоль границ кристаллов и может быть вызвана процессами, такими как образование карбидов, обедняющих область хрома в стали. Это приводит к образованию путей для коррозии, особенно критично после сварки.

Влияние внутренних и внешних факторов на коррозию

К внутренним факторам, влияющим на коррозию, относятся свойства и состояние самого металла – структура, наличие напряжений и т.п. К внешним факторам относятся состав примесей, содержащихся в воде и паре, температура, скорость движения и pH теплоносителя, тепловая нагрузка, облучение.

Следствием многих факторов является пассивность металла. Пассивность металлов – это состояние, в котором материал показывает высокий уровень стойкости к потенциальному коррозионному разрушению. Такое состояние формируется в силу уменьшения активности анодного процесса, характерного для протекания электрохимической коррозии. На рисунке 1 приведена анодная поляризационная кривая, иллюстрирующая пассивацию металла.

При погружении металла в раствор устанавливается отрицательный анодный потенциал металла ϵ_A в данной среде, электрический ток при этом отсутствует. Если искусственно повышать потенциал металла, то в системе возникает анодный ток, плотность которого i возрастает (отрезок 1). Такое возрастание плотности тока наблюдается только до тех пор, пока потенциал металла не будет повышен до некоторой, характерной для каждого отдельного металла, величины ϵ_{ϕ} . Дальнейшее повышение потенциала металла приводит к резкому снижению плотности тока (от $i_{\text{пред}}$ до $i_{\text{мин}}$), которая сохраняется постоянной при продолжающемся повышении потенциала металла (отрезок 2).

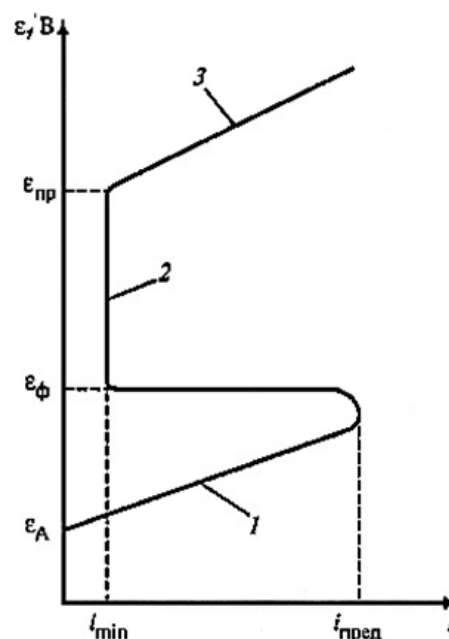


Рис. 1. Анодная поляризационная кривая

Только при повышении потенциала металла до значения $\epsilon_{\text{пр}}$ (потенциал пробоя) в системе снова наблюдается возрастание плотности тока (отрезок 3).

Описанные явления объясняются следующим. В области потенциалов $\epsilon < \epsilon_{\phi}$ металл находится в активном состоянии, и поэтому повышение потенциала ускоряет его растворение. При достижении потенциала ϵ_{ϕ} происходит пассивация металла, объясняющаяся в основном образованием на металле плотной сплошной оксидной пленки, толщина которой зависит от типа металла. Пассивация металла сохраняется на всем участке изменения потенциала от ϵ_{ϕ} до $\epsilon_{\text{пр}}$, после чего происходит так называемый «пробой» защитной пленки.

Потенциал ε_f , при котором происходит пассивация металла, называют Фляде-потенциалом, или потенциалом активации, так как снижение потенциала металла до значения, меньшего ε_f , приводит к переходу металла из пассивного состояния в активное. Потенциал $\varepsilon_{пр}$ называется потенциалом пробоя. При $\varepsilon_A < \varepsilon_f$ металл активен и пассивация его невозможна; при $\varepsilon_{пр} > \varepsilon_A > \varepsilon_f$ пассивация при определенных условиях возможна.

Влияние растворенного кислорода на скорость коррозии. Для кислорода характерно двойственное влияние на коррозию. С одной стороны, кислород как пассиватор уменьшает коррозию вследствие улучшения свойств защитной пленки на поверхности металла, окисления обнаженных участков поверхности и образования пассивирующих адсорбционных слоев на поверхности металла. С другой стороны, кислород как активный деполяризатор вызывает усиление коррозии вследствие деполяризации катодных участков.

В зависимости от концентрации кислорода, состава раствора, типа металла и других физико-химических условий преобладает то или другое действие кислорода. При увеличении концентрации кислорода в растворе скорость коррозии углеродистой и хромистых сталей сначала снижается, а затем возрастает.

При снижении вероятности общей коррозии вследствие упрочнения пленки возрастает вероятность интенсивной местной коррозии. Поэтому разрушения идут вглубь, и образуются язвы, так как возрастает площадь катодных и уменьшается площадь анодных участков. Увеличение скорости коррозии также связано с повышением скорости диффузии кислорода к поверхности металла с увеличением температуры.

В открытых системах скорость коррозии в основном определяется скоростью диффузии кислорода из воздуха к поверхности металла. В закрытых системах без протока жидкости процесс с кислородной деполяризацией возможен до тех пор, пока не израсходуется запас кислорода в растворе.

Влияние pH среды на скорость коррозии. Концентрация ионов водорода в растворе – один из наиболее значительных внешних факторов, влияющих на скорость коррозии, так как свойства защитных пленок зависят от pH среды. Следует добавить, что с повышением температуры вероятность процессов с водородной деполяризацией увеличивается, т.е. роль pH еще больше возрастает. Поскольку при водородной деполя-

ризации скорость коррозии в значительной степени определяется скоростью выделения пузырьков водорода, большое значение имеют состояние поверхности и природа металла, обуславливающие перенапряжение водорода.

Влияние температуры на скорость коррозии. Известно, что при повышении температуры происходит смещение равновесия на границе «металл–раствор». Обычно скорость коррозии металлов в электролитах возрастает с повышением температуры, в частности возрастает вероятность щелочной коррозии. На рисунке 2 приведена зависимость скорости коррозии углеродистой стали от температуры. Если процесс протекает в основном с кислородной деполяризацией в открытой системе, повышение температуры может снижать скорость коррозии, так как растворимость кислорода в воде уменьшается, и доступ его к катодным участкам металла снижается. Если же система закрытая, то при увеличении температуры скорость коррозии металла возрастает.

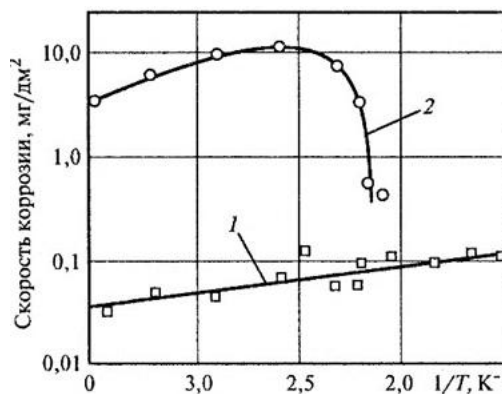


Рис. 2. Температурная зависимость скорости коррозии углеродистой стали в воде (1 – в закрытой системе; 2 – в открытой системе)

Влияние облучения на коррозию конструкционных материалов. Конструкционные материалы ядерных реакторов находятся под воздействием нейтронных потоков различной интенсивности и γ -излучения. Конструкционные материалы первого контура, находящиеся вне реактора, т.е. трубопроводы, насосы и парогенераторы, находятся под воздействием лишь γ -излучения. Облучение материалов сказывается на их прочностных характеристиках и на скорости коррозии.

Нейтронный поток несколько увеличивает скорость коррозии углеродистых сталей (корпус реактора), γ -излучение практически не изменяет

скорость коррозии углеродистых сталей.

Для нержавеющей аустенитных сталей облучение незначительно повышает скорость коррозии, однако коррозионная стойкость этих сталей остаётся достаточно высокой.

Облучение циркониевых и алюминиевых сплавов может оказывать влияние на состояние оксидного слоя, что связано с изменением окислительно – восстановительных свойств среды, вызванных облучением. Если материал остаётся в пассивном состоянии, то скорость коррозии практически не изменяется [6].

Наиболее типичное воздействие коррозии на оборудование АЭС

Наиболее подвержены коррозионному износу трубная система парогенераторов, трубопроводы первого контура, детали внутриреакторных узлов и приводов регулирующих органов.

К наиболее характерным причинам повреждения оборудования из коррозионностойких сталей и сплавов можно отнести:

- а) несовершенство конструкций повреждаемого оборудования и пониженные требования к качеству питательной воды;
- б) повышение агрессивности среды на перегретых поверхностях, в щелях и застойных зонах;
- в) необоснованное применение нестабилизированных аустенитных сталей.

Наиболее частые выходы из строя в результате коррозионного растрескивания наблюдаются в трубных системах парогенераторов. Коррозионное растрескивание трубных систем парогенераторов начиналось со стороны воды второго контура, которая либо содержала повышенное количество хлоридов, либо могла обогащаться ими в результате упаривания воды на горячей теплопередающей поверхности, особенно в щелях и зазорах. Помимо хлоридного коррозионного растрескивания, повреждения трубных систем парогенераторов могли являться также результатом их щелочного растрескивания [2].

В практике эксплуатации АЭС отмечены также многочисленные случаи разрушения от коррозионного растрескивания деталей внутриреакторных узлов и приводов регулирующих органов, изготовленных из нержавеющей, в частности хромистых, сталей.

Среди коррозионных повреждений коррозионностойких сталей в оборудовании АЭС наиболее распространена межкристаллитная коррозия. В течение длительного времени считалось, что

высокотемпературная вода высокой чистоты и пар являются малоагрессивными средами, не способными вызвать межкристаллитную коррозию хромоникелевых нержавеющей сталей и сплавов. Опыт эксплуатации этих материалов в составе АЭС показал, однако, обратное. Типично появление сетки межкристаллитных трещин на деталях или антикоррозионных наплавках из нестабилизированных хромоникелевых аустенитных сталей. Этот вид повреждений отмечался после длительной эксплуатации при неблагоприятных условиях, например, при подкислении водной среды, повышении температуры, увеличении концентрации растворенного кислорода, наличии не учтенных термоциклических напряжений [5].

Другим специфическим видом коррозии, которая может иметь место на деталях, выполненных из коррозионностойких сталей и особенно выполненных из хромистых мартенситных сталей, является локальная коррозия (щелевая, язвенная). Такая коррозия может наблюдаться в местах уплотнений, прилегания деталей, а также в узких зазорах и щелях под слоем отложений.

Аварии на АЭС, вызванные коррозией

В истории атомной энергетики коррозия нержавеющей сталей являлась частой причиной аварий на АЭС разных масштабов. Рассмотрим некоторые из них.

Атомная электростанция «Сен-Лоран-дез-О» находится в центральной части Франции и была введена в эксплуатацию в 1969 году. 13 марта 1980 года на втором блоке с графитово-газовым реактором частично расплавилась активная зона. Это произошло из-за коррозии элементов конструкции топливных каналов. Работы по очистке от расплавленного топлива проводились в течение 29 месяцев, в них задействовали около 500 человек. В процессе ликвидации аварии был произведён вынужденный контролируемый выброс радиоактивного йода в атмосферу (в объёме 0,37 ГБк). Предполагается также утечка плутония в бассейн реки Луары в размере 0,7 ГБк (что эквивалентно 0,3 г плутония-239). В 1983 году блок снова начал работать, но с ограниченной мощностью. Окончательно его остановили в 1992 году.

9 декабря 1986 года. США, штат Вирджиния, г. Сарри, АЭС «Сарри». В результате прорыва трубопровода второго контура произошёл

выброс 120 кубических метров перегретых радиоактивных воды и пара. Восемь работников АЭС попали под кипящий поток. Четверо из них скончались от полученных ожогов. Причина аварии - коррозионный износ трубопровода, который привёл к уменьшению толщины стенок трубы (с 12 до 1,6 мм)

9 августа 2004 года в 15 часов 30 минут по местному времени в Японии на АЭС «Михама», на третьем энергоблоке – самом новом на станции – мощностью 826 МВт произошел прорыв трубы парогенератора. В результате поступления раскаленного пара, температура которого составляла от 150 до 200 градусов по Цельсию, погибли четыре человека, еще 18 получили ожоги, один из которых впоследствии умер в больнице. Официально выброса радиации при этом не произошло, так как мгновенно сработала система останова реактора. Однако многие ученые ставят этот факт под сомнение. Впоследствии было обнаружено, что турбина третьего реактора в момент разрыва трубы парогенератора не имела достаточного количества охлажденной воды. Стены трубы парогенератора утончились в результате многолетней коррозии, что не было обнаружено при плановых ремонтах реактора. Как выяснилось, прорвавшаяся труба не проверялась с 1996 года, хотя за год до аварии руководство станции было предупреждено о ее возможном износе в связи с возрастом трубы.

Данные аварии демонстрируют важность комплексного подхода к мониторингу состояния оборудования и внедрению передовых технологий защиты от коррозии. Превентивные меры, тщательное обслуживание и использование современных материалов позволяют не только снизить риск возникновения коррозии, но и обеспечить безопасность работы ядерных энергетических объектов в долгосрочной перспективе.

Способы защиты от коррозии

Нержавеющие стали, используемые в конструкциях ЯЭУ, обладают высокой коррозионной устойчивостью, но и они подвержены разным видам коррозии в условиях высокой температуры, давления и воздействия агрессивных сред. Поэтому разработка и внедрение эффективных методов борьбы с коррозией нержавеющей стали становится крайне актуальной задачей для обеспечения безопасности и надежности ядерной энергетики. Современные методы борьбы с коррозией нержавеющей стали в ядерных энергетических установках представляют

собой комплексный подход.

Наиболее распространенным способом защиты от коррозии является *анодная защита*. При анодной защите потенциал активно растворяющегося металла смещают в положительную сторону до достижения устойчивого пассивного состояния. В результате происходит не только существенное (в тысячи раз) снижение скорости коррозии металла, но и предотвращается попадание продуктов его растворения в систему. Смещение потенциала в положительную сторону можно осуществлять от внешнего источника тока введением окислителей в раствор или введением в сплав элементов, способствующих повышению эффективности протекающего на поверхности металла катодного процесса.

Анодная защита пассивирующими ингибиторами-окислителями основана на том, что в процессе их восстановления возникает ток, достаточный для перевода металла в пассивное состояние. В качестве ингибиторов могут быть использованы соли Fe^{3+} , нитраты, бихроматы и др. Применение ингибиторов позволяет защищать металл в труднодоступных местах – щелях, зазорах. Недостатком этого способа защиты является загрязнение технологической среды.

При анодной защите методом катодного легирования в сплав вводят добавки, чаще благородный металл, на котором катодные реакции восстановления деполяризаторов осуществляются с меньшим перенапряжением, чем на основном металле.

Анодная защита от внешнего источника основана на пропускании тока через защищаемый объект и на смещении потенциала коррозии в сторону более положительных значений [3].

Установка для анодной защиты состоит из объекта защиты, катода, электрода сравнения и источника электрического тока.

Химическая обработка. Химическая обработка включает в себя применение различных химических веществ и методов, направленных на улучшение коррозионной стойкости нержавеющей стали. Основные подходы к химической обработке заключаются в следующем:

- *Пассивация.* Этот процесс представляет собой химическую обработку поверхности стали специальными растворами, содержащими кислоты или солевые соединения, что обеспечивает образование защитной пленки на поверхности. Эта пленка значительно снижает коррозионную активность и защищает металл от воздействия агрессивных веществ.

- Нанесение антикоррозионных покрытий.

Использование защитных покрытий на основе полимеров или других материалов, способствующих созданию барьера между коррозионной средой и металлом. Это решение позволяет продлить срок службы конструкций и оборудования.

- Применение ингибиторов коррозии. Это химические вещества, которые добавляются в среду, чтобы уменьшить скорость коррозионных процессов. Она может быть особенно эффективной в системах охлаждения и водоснабжения, где нержавеющая сталь подвергается воздействию значительно агрессивных условий.

Гидродинамические меры. Оптимизация потоков в системах охлаждения помогает избежать накопления осадков и улучшить циркуляцию жидкости, что также снижает риск коррозионных повреждений. Устойчивый поток теплоносителя способствует равномерному распределению температур и уменьшает вероятность локализованной коррозии.

Мониторинг коррозионных процессов

Для диагностики коррозионного состояния оборудования и своевременного выявления возможных коррозионных отказов находящиеся в эксплуатации металлоконструкции периодически проверяют. В каждый момент времени состояние оборудования характеризуется коррозионным эффектом (КЭ), определяющим стойкость металлов и покрытий к воздействию агрессивным факторам. В процессе эксплуатации величина КЭ должна находиться в допустимых для данного оборудования пределах. Выход фактических значений КЭ за пределы допустимых – признак опасного коррозионного состояния металла или покрытия [4].

Для дистанционного контроля применяют устройства с датчиками, которые производят замеры влажности поверхности металла, pH пленки влаги, других агрессивных компонентов среды.

Дистанционная диагностика коррозионного состояния в дальнейшем даст возможность проводить ускоренные испытания и моделировать отдельные стадии процесса коррозии.

К методам автоматического контроля процессов коррозии и устройствам для их реализации предъявляют следующие требования:

- обеспечение достоверных результатов измерений;
- своевременность обнаружения опасного

коррозионного состояния;

- возможность контроля факторов, влияющих на результаты измерений;
- возможность получения интегральных оценок коррозионных эффектов.

Создание и внедрение устройств для автоматических измерений параметров коррозионных процессов позволит контролировать процессы коррозии во время эксплуатации оборудования, внедрить методы защиты от коррозии воздействием на среду, дозированием ингибиторов коррозии, автоматически регулировать параметры электрохимической защиты и др.

Выводы

Коррозия является серьезной угрозой для надежности и безопасности ядерных энергетических установок. Нержавеющая сталь, несмотря на свою высокую коррозионную стойкость, подвержена различным видам коррозии, которые существенно влияют на эффективность эксплуатации и техническое обслуживание атомных станций. Современные методы борьбы с коррозией нержавеющих сталей включают комплексный подход, основанный на регулярном мониторинге коррозионных процессов и оценке коррозионного эффекта, что является важным для предотвращения катастрофических ситуаций. Своевременное выявление и диагностика коррозионных отказов станут залогом безопасной и надежной работы ядерных энергетических установок. Таким образом, применение прогрессивных технологий и тщательное внимание к выбору конструкционных материалов, обладающих высокой стойкостью к коррозии, являются ключевыми факторами в обеспечении безопасности и долговечности ядерной энергетики.

Список литературы

1. ГОСТ 5632-2014. Нержавеющие стали и сплавы коррозионно-стойкие, жаростойкие и жаропрочные. Марки
2. Ковалев, В. Н. (2018). "Коррозия металлов в ядерной энергетике." Издательство "Энергия".
3. Коррозия и защита металлов от коррозии : учеб. пособие для студентов технических специальностей / Ю. П. Перельгин, И. С. Лось, С. Ю. Киреев. – 2-е изд., доп. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2015. – 88 с.
4. Маратов, Г. Г. (2019). "Коррозия и защита металлов." М.: Академия.
5. Смирнов, А. А., Талызина, Н. И. (2020). "Коррозия нержавеющих сталей в агрессивных средах."

Вестник МГТУ им. Баумана.

6. Физико-химические процессы в водном теплоносителе электростанций: учебник / Т.И. Петрова, В.Н. Воронов, Ф.В. Дяченко. – М.: Издательство МЭИ, 2021. – 384 с.

References

1. GOST 5632-2014. Stainless steels and alloys are corrosion-resistant, heat-resistant and heat-resistant. Stamps
2. Kovalev, V. N. (2018). "Corrosion of metals in nuclear power engineering." Publishing house "Energy".
3. Corrosion and protection of metals from corrosion : textbook. handbook for students of technical specialties / Yu.P. Pereygin, I. S. Los, S. Yu. Kireev. – 2nd ed., supplement – Penza : Publishing House of PSU, 2015. – 88 p.
4. Maratov, G. G. (2019). "Corrosion and protection of metals." Moscow: Akademiya.
5. Smirnov, A. A., Talyzina, N. I. (2020). "Corrosion of stainless steels in aggressive environments." Bulletin of the Bauman Moscow State Technical University.
6. Physico-chemical processes in the aqueous coolant of power plants: textbook / T.I. Petrova, V.N. Voronov, F.V. Dyachenko. – М.: Publishing House of the MEI, 2021. – 384 p.

УДК 621.644.01

Оценка надежности трубопровода рециркуляции насосов ТПН турбинного блока №1

Корнеева Н.К.¹, Пичугова Л.Н.², Глушкова Е.В.³, Пантель В.О.⁴

ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», Университетская-33 г. Севастополь, 299053, Россия, korneeva_nk@mail.ru, kebpf2015@mail.ru, glusev@mail.ru, vopantel@mail.sevsu.ru

Статья поступила 24.11.2025 г.; после доработки 25.11.2025г.

Аннотация

В работе приведены сведения по процессу эксплуатации элементов трубопровода. Изложены основные требования к трубопроводам. Изложены данные по контролю и измерению деформации металла. Описаны требования к трубопроводам расчета по выбору основных размеров. В работе проведена оценка надежности минимально допустимой толщины металла трубопровода рециркуляции насосов ТПН турбинного блока №1.

Ключевые слова: трубопровод, минимальная толщина стенок, напряжение, нагрузка, прочностной расчет.

Assessment of the reliability of the walls of the feed water pressure pipeline VPEN block №1

Korneeva, N.K.¹, Pichugova, L.N.², Glushkova E.V.³, Pantel V.O.

Sevastopol stat university, 33 Universitetskaya st., Sevastopol, 299053, Russia, korneeva_nk@mail.ru, kebpf2015@mail.ru, kebpf2015@mail.ru, vopantel@mail.sevsu.ru

Received 24.11.2025y. ; received in final form 25.11.2025 y.

Abstract

The paper provides information on the process of operation of pipeline elements. The basic requirements for pipelines are outlined. Data on control and measurement of metal deformation are presented. Requirements for calculation pipelines for selection of main dimensions are described. The paper assessed the reliability of the minimum allowable metal thickness of the recirculation pipeline of the TPN pumps of turbine unit No. 1.

Keywords: pipeline, minimum wall thickness, stress, load, strength calculation.

Введение

Обеспечение бесперебойной работы оборудования атомной станции, в том числе трубопроводных объектов, является ключевым элементом. Каждая атомная электростанция перерабатывает огромные водные массы, которые используются в различных целях. Цикл водоподготовки АЭС аналогичен любому другому ТЭС, но только мощность, эффективность и надежность установок должны быть в несколько раз выше

Соединение между отдельными блоками АЭС требует большого количества трубопрово-

дов. Помимо основных, существует большое количество вспомогательных трубопроводов различного диаметра и назначения. Общая протяженность трубопроводов на АЭС составляет несколько километров.

Наиболее ответственными являются магистральные трубопроводы, непосредственно связанные с технологическим процессом станции. По этим трубопроводам проходит радиоактивная среда с наибольшими параметрами и стоимостью. Надёжность работы всей станции во многом зависит от надёжности её эксплуатации. На электростанциях в основном используются бес-

шовные трубы (холоднотянутые и горячекатаные) и только для циркуляционных водопроводов и некоторых вспомогательных трубопроводов - сварных.

Марки стали для труб, по которым транспортируются агрессивные, неагрессивные среды, зависят от температуры среды. При температурах до 450 °С применяются углеродистые стали 10 и 20. В температурном диапазоне 450 - 570 °С - стали перлитного класса, легированные хромом 0,5 - 2%, молибденом 0,3 - 1% и ванадием 0,2 - 0,4%; Чаще всего встречаются 12Kh1MF и 15Kh1M1F. Эти же стали можно использовать и при температурах ниже 450 °С, когда диаметр трубопроводов значителен и удобно уменьшать толщину стенки (например, паропроводы насыщенного пара, идущие к турбинам). Для более высоких температур (до 620 °С) могут использоваться нержавеющие мартенситно-ферритные стали с высоким содержанием хрома, например EI-756 (11% Sg, 2% W, 0,7% Mo, 0,2% V). Наиболее жаростойкие и жаростойкие стали аустенитного класса; В атомной энергетике наиболее широко применяется сталь типа OX18H10T. Однако в условиях эксплуатации при высоких температурах оказалось недостаточно надежным из-за процесса старения. Аустенитные стали обладают самой высокой общей коррозионной стойкостью, что важно для транспортировки агрессивных сред, например, в системах дезактивации.

На АЭС линия рециркуляции применяется для поддержания насосов в горячем резерве и для исключения запаривания насоса в входном патрубке. Расход питательной воды через линию рециркуляции составляет 800 т/ч.

В процессе эксплуатации элементы трубопровода подвергаются постоянным нагрузкам, зависящим от давления окружающей среды, веса металла труб и арматуры, температуры окружающей среды, а также нагрузок теплового расширения.

Вибрации трубопроводов могут приводить к колебаниям напряжения, которое часто могут достигать значительных величин, и служить причиной разрушения элементов энергетических установок.

Трубопроводы должны быть устойчивы к перечисленным нагрузкам. Составные части трубопровода имеют непосредственное отношение к его прочности.

Еще одним из основных требований к трубопроводам является надежность и долговечность при эксплуатации.

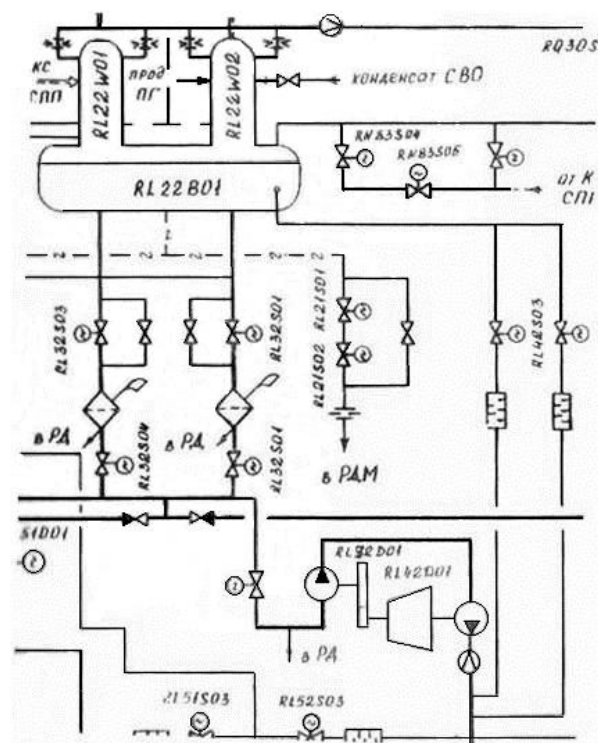


Рис. 1 Линия рециркуляции

Правила устройства и безопасной эксплуатации трубопроводов регламентированы СНиП и другими нормативными документами. Основные аспекты включают проектирование, монтаж, эксплуатацию и обслуживание трубопроводов. Соблюдение данных правил позволяет избежать аварий, повысить надежность и продлить срок службы трубопроводных систем.

На стадии проектно-конструкторских работ материалы трубопроводов выбираются таким образом, чтобы их прочность обеспечивалась на протяжении всего срока эксплуатации. Следовательно, при анализе их технического состояния необходимо учитывать все воздействия, которые предусмотрены на этапах проектирования, изготовления, монтажа, приемо-сдаточных испытаний, транспортировки, пуско-наладочных работ или эксплуатации, приводящие к сокращению ресурсных характеристик.

Под влиянием внешних воздействий в металле трубопроводов могут возникать и развиваться повреждения, которые разделяют на силовые, тепловые, коррозионные и радиационные [10].

Расчет минимальной толщины стенки металла трубопровода рециркуляции насосов ТПН турбинного отделения блока №1 и выбор фактической толщины стенки являются основополагающими.

Постановка задачи

Основной задачей работы является оценка минимально допустимой толщины металла трубопровода рециркуляции насосов ТПН турбинного блока №1.

Описание исследования

Рабочие параметры трубопровода:

- - рабочая среда - питательная вода;
- - рабочее давление $P = 10 \text{ кгс/см}^2$;
- - температура $T = 170^\circ\text{C}$.
- - наружный диаметр $D = 133 \text{ мм}$;
- - толщина стенки трубы $t = 8 \text{ мм}$.

Значения предела текучести и предела прочности стали 20 при рабочих параметрах:

$$R_m^T = 384,4 \text{ МПа}; \quad R_p^T = 202 \text{ МПа}.$$

При оценке прочности трубопроводов должны полностью удовлетворяться как требования расчета по выбору основных размеров, так и поверочного расчета.

При выполнении сложного расчета по выбору основных размеров учитывают действующее на трубопроводы давление (внутреннее и наружное), а для болтов и шпилек - усилие затяга.

Определение максимально допустимых эксплуатационных напряжений в соответствии с ПНАЭ Г-7-002-86.

Номинальное допускаемое напряжение для элементов оборудования и трубопроводов, нагруженных внутренним давлением, принимают минимальным из следующих значений:

$$[\sigma] = \min \{ R_m T / n_m; R_p T / n_p; R_{Tm} / n_{Tm} \}.$$

$$A_1 = \frac{R_m^T}{2,6} \quad A_2 = \frac{R_p^T}{1,5} \quad \sigma_s = \min(A)$$

Максимально допустимые эксплуатационные напряжения стали 20 $\sigma_s = 134,67 \text{ МПа}$

Определение максимальных эксплуатационных напряжений.

Напряжения в радиальном направлении при зафиксированном утонении 6,6 мм:

$$\sigma_r = \frac{P \cdot D}{2 \cdot t} = 10,076 \text{ МПа}$$

Напряжения в осевом направлении при зафиксированном утонении 6,6 мм:

$$\sigma_t = \frac{P \cdot D}{4 \cdot t} = 5,038 \text{ МПа}$$

При проектном расчете радиальные и осевые напряжения определяются для двух случаев: номинальная толщина стенки и утонение 6,6 мм.

Для дальнейших расчетов выбираются максимальные значения.

$$\sigma_{ном} = \sqrt{(\sigma_r)^2 + (\sigma_t)^2} - \sigma_r \cdot \sigma_t$$

Номинальные эксплуатационные напряжения.

$$\sigma_{ном} = 8,726 \text{ МПа}$$

Коэффициент запаса прочности.

$$K = \frac{\sigma_s}{\sigma_{ном}}$$

$$K = 15,433$$

Прочность конструкции при любых утонениях обеспечивается (коэффициент запаса прочности > 1)

Коэффициент снижения прочности (для данной конструкции $\varphi = 1[1]$)

$$\varphi = 1$$

Поправка, учитывающая коррозионное влияние рабочей среды [1].

$$C = 0,2 \text{ мм}$$

Расчетная толщина стенки.

$$S_R = \frac{P \cdot D}{2 \cdot \varphi \cdot \sigma_s + P}$$

$$S_R = 0,492 \text{ мм}$$

Минимально допустимая толщина стенки.

$$S = S_R + C$$

$$S = 1,692 \text{ мм}$$

Определение минимально допустимого утонения под стыковую сварку.

$$S_j = S_R - S_R \cdot 0,1$$

$$S_j = 0,443 \text{ мм}$$

Определение длины расчетного участка при $A_1 = 5 \cdot (S - C)$ и $A_2 = 0,5D$

$$L_j = 2,46 \text{ мм}$$

Минимально допустимая толщина стенки.

Любые изменения конструкции, необходимые при изготовлении, монтаже, ремонте или эксплуатации оборудования, должны быть согласованы с организацией, разработавшей оборудование. Оборудование должно быть передано потребителю вместе с паспортом установленной формы и инструкцией по монтажу и эксплуатации. Паспорт на арматуру составляется предприятием – изготовителем.

Заключение

При зафиксированном утонении в 6,6 мм и коэффициенте запаса прочности $K=1,027$ допускается дальнейшая эксплуатация напорного трубопровода питательной воды ВПЭН турбинного отделения блока №1.

Для определения скорости утонения рекомендуется провести контроль толщины металла трубопровода при выводе блока в следующий ППР.

Выводы

1. Допустимая толщина стенки трубопровода для данных параметров эксплуатации равна $S = 1,692 \text{ мм}$, коэффициент запаса прочности по напряжениям составил $K = 15,433$.
2. Допускается утонение под стыковую сварку до $S_j = 0,443 \text{ мм}$, при этом длина расточенного участка не должна превышать значение $L_j = 2,46 \text{ мм}$.

Список литературы

1. Н.М. Беляев «Соппротивление материалов»
2. Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. ПНАЭ Г-7-002-86.(Разделы 1-5, Приложения 1-3, Приложения 3-12).
3. С.Т. Мирошнichenko, В.О. Пантель, В.Ф.Тишков «Трубопроводы и арматуры» с.12-14
4. А.В. Рудаченко, А.Л.Саруев «Исследования напряженно-деформированного состояния трубопроводов». с.-67
5. Союзводоканалпроект Госстроя СССР. Пособие по определению толщины стенки стальных труб, выбору марок, групп и категорий стали для наружных сетей водоснабжения и канализации. (к СНиП 2.04.02-84 и СНиП 2.04.03-85) 1989г. с.-16.
6. Гуревич Д.Ф., Ширяев, В.В., Пайкин И.Х. 1982 г. Арматуры АЭС.
7. Основные правила обеспечения эксплуатации атомных станций.— 3-е изд. М: РУСЛИТ, 2003. С. 343.
8. Тепловые и атомные электрические станции: Справ. /Под общ. ред.
9. Аркадов, Г. В. Ресурс и надёжность оборудования и трубопроводов АЭС : учеб. пособие / Г. В. Аркадов. - Севастополь : СТУЭиП, 2012. - 348 с. : ил.
10. Махутов, Н. А. Системная концепция обеспечения прочности, ресурса и безопасности оборудования и трубопроводов АЭС / Н. А. Махутов. -

М. : МЭИ, 2004. - 55 с.

References

1. N.M. Belyaev "Strength of materials"
2. Standards for calculating the strength of equipment and pipelines of nuclear power plants. PNAE G-7-002-86. (Sections 1-5, Appendices 1-3, Appendices 3-12).
3. S.T. Miroshnichenko, V.O. Pantel, V.F. Tishkov "Pipelines and fittings" p.12-14
4. A.V. Rudachenko, A.L. Saruev "Research on the stress-strain state of pipelines." p.-67
5. Soyuzvodokanalproekt of the USSR State Construction Committee. A guide to determining the wall thickness of steel pipes, selecting grades, groups and categories of steel for external water supply and sewerage networks. (to SNiP 2.04.02-84 and SNiP 2.04.03-85) 1989 p.-16.
6. Gurevich D.F., Shiryayev, V.V., Paikin I.Kh. 1982 NPP valves.
7. Basic rules for ensuring the operation of nuclear power plants. – 3rd ed. M: RUSLIT, 2003. P. 343.
8. Thermal and nuclear power plants: Reference. /Under general ed.
9. Arkadov, G.V. Resource and reliability of NPP equipment and pipelines: textbook/G.V. Arkadov. - Sevastopol: SNUYAiP, 2012. - 348 p.: Ill.
10. Makhutov, N. A. System concept for ensuring the strength, resource and safety of equipment and pipelines of nuclear power plants/N. A. Makhutov. - M.: MPEI, 2004. - 55 c.

УДК 621.039.516.4

Использование в составе активной зоны реактора ВВЭР-1000 ТВС с РЕМИКС-топливом

Е.И. Коротких¹, В.В. Шаповаленко²¹ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», Университетская-33 г. Севастополь, 299053, Россия, ¹egorkorotkih04@gmail.com, ²shapovalenkovita@rambler.ru

статья поступила 17.11.2025 г. ; после доработки 20.11.2025 г.

Аннотация

Проведено исследование многократного рециклирования РЕМИКС-топлива в активной зоне реактора ВВЭР-1000. Выполнено моделирование изотопного состава топлива при повторных циклах использования, исследованы радиационные характеристики свежих тепловыделяющих сборок. Показано, что топливо типов РЕМИКС-А и РЕМИКС-А2 может быть рециклировано более пяти раз без существенной потери ядерной ценности. Установлено, что с каждым рециклом мощность эквивалентной дозы от свежих ТВС возрастает, достигая для РЕМИКС-А к пятому циклу 250 мкЗв/ч после 180 суток выдержки. Определена сильная зависимость мощности дозы от времени выдержки топлива после изготовления. Проанализированы перспективы промышленного внедрения РЕМИКС-топлива на предприятиях Росатома.

Ключевые слова: РЕМИКС-топливо, ВВЭР-1000, замкнутый ядерный топливный цикл, рециклирование, изотопный состав, мощность эквивалентной дозы, радиационная безопасность, ТВС-2М.

Using in reactor core VVER-1000 fuel assemblies with uranium-plutonium nuclear fuel - REMIX

E.I. Korotkikh¹ V.V. Shapovalenko²Sevastopol stat university, 33 Universitetskaya st., Sevastopol, 299053, Russia,
¹ egorkorotkih04@gmail.com, ²shapovalenkovita@rambler.ru,

Received 17.11.2025y. ; received in final form 20.11.2025 y.

Abstract

A review of the materials has been conducted, and an analysis has been performed. A study has been conducted on the multiple recycling of REMIX fuel in the core of a VVER-1000 reactor. The isotopic composition of the fuel has been modeled during repeated cycles of use, and the radiation characteristics of fresh fuel assemblies have been investigated. It has been shown that REMIX-A and REMIX-A2 fuel can be recycled more than five times without significant loss of nuclear value. It has been established that the equivalent dose power from fresh fuel assemblies increases with each recycle, reaching 250 $\mu\text{Sv/h}$ for REMIX-A by the fifth cycle after 180 days of exposure. A strong dependence of the dose power on the time of fuel exposure after production has been determined. The prospects for the industrial implementation of REMIX-fuel at Rosatom enterprises have been analyzed.

Keywords: REMIX fuel, VVER-1000, closed nuclear fuel cycle, recycling, isotopic composition, equivalent dose power, radiation safety, TVS-2M.

Введение

Чтобы в полной мере оценить перспективы использования РЕМИКС-топлива [1], необходимо глубоко понять его принципиальную суть,

которая заключается не в простой замене одного вида топлива другим, а в фундаментальном изменении подхода к топливному циклу атомной энергетики.

Аббревиатура РЕМИКС расшифровывается

как Regenerated Mixture, что означает «регенерированная смесь». Это название точно отражает его происхождение. Если традиционная атомная энергетика работает по линейной схеме «добыча урана → изготовление топлива → использование → захоронение отходов», то РЕМИКС-топливо замыкает этот цикл. Его производство начинается не с урановой руды, а с отработавшего ядерного топлива (ОЯТ), которое после переработки превращается из проблемы в ценный ресурс.

Технологический процесс выглядит следующим образом. После выгрузки из реактора ОЯТ направляется на переработку. В ходе этого процесса из него извлекается так называемый уран-плутониевый регенерат – это неразделённая смесь, содержащая около 95% регенерированного урана и 1% плутония.

Однако эта смесь сама по себе не может обеспечить цепную реакцию в тепловом реакторе. Для придания ей необходимых ядерных свойств к регенерату добавляется относительно небольшое количество (порядка 17–20%) обогащённого урана. Этот уран выполняет роль «стартовой подпитки», компенсируя наличие в регенерате так называемых «балластных» изотопов, например урана-236, который поглощает нейтроны, не делясь. В результате получается новое топливо с практически идентичными стандартному урановому топливу нейтронно-физическими характеристиками.

Именно в этом заключается его ключевое эксплуатационное преимущество. РЕМИКС-топливо полностью совместимо с существующими реакторами ВВЭР-1000.

Для его использования не требуется вносить изменения в конструкцию активной зоны, системы управления или безопасности реактора. Топливная сборка ТВС-2М с РЕМИКС-топливом может быть загружена в активную зону наравне с обычными сборками или полностью их заменить, и реактор будет работать в штатном режиме. Это отличает его от другого известного рециклируемого топлива – МОКС-топлива. В то время как МОКС содержит высокую долю плутония и предназначен для специализированных «быстрых» реакторов, РЕМИКС содержит значительно меньше плутония (порядка 1,5–3%) и создан именно для основного сегмента атомной энергетике – реакторов на тепловых нейтронах.

Модификации этой технологии:

- РЕМИКС-А [1, 3] – это базовый вариант, использующий неразделённую смесь регенерированных урана и плутония;
- РЕМИКС-А2 [4] предполагает более высокое и постоянное содержание плутония

(около 3%), что позволяет уменьшить долю добавляемого обогащённого урана в каждом последующем цикле;

- РЕМИКС-Б [5] производится путём полного разделения урана и плутония с последующим обогащением регенерированного урана. Однако этот метод, повышая гибкость, одновременно приводит и к повышенному накоплению проблемного изотопа уран-232, что усложняет радиационную обстановку.

Цель и постановка задачи

Цель работы – исследовать характеристики регенерированного уран-плутониевого ядерного топлива. Рассмотреть возможность загрузки РЕМИКС-топлива в активную зону реактора ВВЭР-1000 с возможностью его многократного использования, исследовав при этом изменение его химического состава.

Результаты исследования многократного рецикла РЕМИКС-топлива

Одним из ключевых вопросов, определяющих практическую ценность РЕМИКС-топлива, является его способность к многократному использованию в замкнутом топливном цикле. Проведённые расчёты и моделирование позволили дать комплексную оценку изменениям, происходящим с топливом при повторных циклах работы в реакторе ВВЭР-1000.

В процессе каждого цикла облучения в реакторе изотопный состав топлива непрерывно меняется. При рециклировании, когда отработавшее топливо перерабатывается и снова используется, эти изменения накапливаются, что приводит к постепенной трансформации свойств топливной композиции.

Было установлено, что при каждом последующем рецикле в топливе происходит систематическое накопление так называемых «балластных» изотопов, которые оказывают значительное влияние на его ядерные характеристики [6].

Во-первых, это уран-²³⁶U, который обладает высоким сечением захвата нейтронов, но при этом не делится под их воздействием. Его накопление приводит к бесполезному «поглощению» нейтронов в активной зоне, что снижает общую реактивность и требует компенсации за счёт увеличения начального обогащения. Во-вторых, в составе плутониевой компоненты происходит заметное изменение баланса в сторону чётных изотопов — ²⁴⁰Pu и ²⁴²Pu. Эти изотопы также

имеют низкое сечение деления в тепловом спектре нейтронов, что ухудшает делящиеся свойства топливной смеси в целом. К пятому рециклу доля этих «неделящихся» чётных изотопов плутония возрастает с исходных 32–33% до 40–44%, в зависимости от типа РЕМИКС-топлива. Содержание чётных изотопов плутония в свежем топливе в зависимости от количества рециклов представлено на рисунке 1.

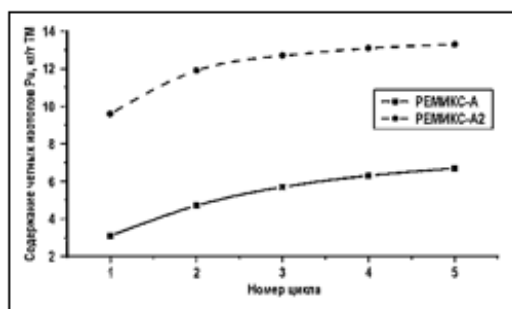


Рис. 1. Содержание чётных изотопов плутония в свежем топливе РЕМИКС-А и РЕМИКС-А2 в зависимости от рецикла. [6]

Особое внимание привлекло накопление урана- ^{232}U [2], которое является прямым следствием рециклирования урана. Содержание ^{232}U в свежем топливе в зависимости от количества рециклов представлено на рисунке 2. Сам по себе ^{232}U не представляет значительной радиационной опасности, однако его дочерние продукты распада, в частности таллий- ^{208}Tl , являются мощными источниками высокоэнергетического гамма-излучения. Это создаёт серьёзные вызовы для радиационной безопасности на этапах обращения со свежим топливом.

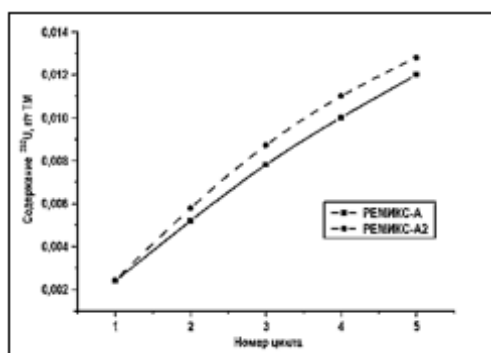


Рис. 2. Содержание ^{232}U в свежем топливе РЕМИКС-А и РЕМИКС-А2 в зависимости от рецикла. [6]

Несмотря на отмеченное «ухудшение» изотопного состава, ключевым выводом исследований является подтверждение принципиальной

возможности многократного рециклирования.

Расчёты показывают, что даже после пяти последовательных циклов использования отработавшего топлива типов РЕМИКС-А и РЕМИКС-А2 всё ещё существенно превышает обогащение природного урана [6]. Это свидетельствует о том, что его ядерная ценность сохраняется на уровне, достаточном для последующего рецикла. Таким образом, топливо РЕМИКС-А и РЕМИКС-А2 может быть рециклировано более пяти раз без катастрофической потери реактивности, что подтверждает долгосрочную перспективу его использования в замкнутом топливном цикле.

Радиационные характеристики и вызовы безопасности

Накопление балластных и радиогенных изотопов напрямую влияет на радиационную обстановку вокруг свежих топливных сборок, что имеет критическое значение для планирования операций по их транспортировке, хранению и загрузке в реактор.

Была рассчитана мощность эквивалентной дозы (МЭД) на расстоянии 30 см от поверхности ТВС со свежим РЕМИКС-топливом для пяти рециклов [6]. Полученные данные приведены на рисунке 3. Результаты демонстрируют устойчивый рост МЭД с увеличением номера рецикла. Для примера, у топлива РЕМИКС-А после выдержки в 180 суток МЭД возрастает примерно с 110 мкЗв/ч в первом рецикле до 325 мкЗв/ч в пятом. Для топлива РЕМИКС-Б, где в процессе обогащения регенерированного урана происходит дополнительное концентрирование ^{232}U , уровень излучения от свежей сборки изначально ещё выше.

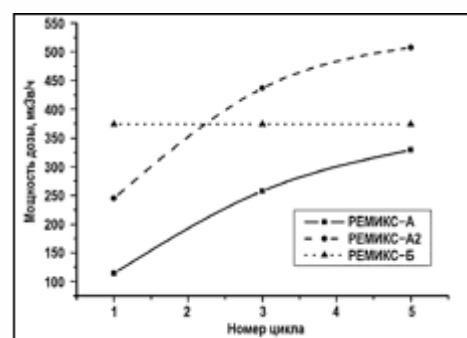


Рис. 3. Мощность эквивалентной дозы от ТВС со свежим РЕМИКС-топливом для пяти рециклов на расстоянии 30 см от ее поверхности. [6]

Анализ вклада различных радионуклидов показал, что основными источниками излучения

являются:

- жёсткое гамма-излучение, создаваемое продуктами распада ^{232}U (^{208}Tl) и ^{241}Pu (^{241}Am);
- нейтронное излучение, обусловленное спонтанным делением накопленных чётных изотопов плутония (главным образом ^{240}Pu), а также нейтронами, рождающимися в (α , n)-реакциях при взаимодействии альфа-частиц (от распада актинидов) с ядрами кислорода в топливной матрице.

Важным практическим открытием стала сильная зависимость мощности дозы от времени выдержки свежего топлива после его изготовления. В первые несколько месяцев происходит накопление дочерних радионуклидов, таких как ^{208}Tl , что приводит к резкому, нелинейному росту гамма-излучения. Это явление диктует обязательное ужесточение логистических и эксплуатационных протоколов. Для минимизации дозовых нагрузок на персонал и упрощения требований к защитному оборудованию необходимо максимально сокращать временной интервал между фабрикацией ТВС и их загрузкой в активную зону реактора.

Таким образом, исследования многократного рецикла не только подтвердили техническую осуществимость концепции, но и выявили конкретные эксплуатационные вызовы, связанные с радиационной безопасностью. Это позволяет уже на этапе проектирования топливного цикла и инфраструктуры разрабатывать адекватные защитные меры, делая широкомасштабное внедрение РЕМИКС-топлива не только возможным, но и безопасным.

Промышленное внедрение и перспективы РЕМИКС-топлива

Теоретические расчёты и экспериментальные данные по РЕМИКС-топливу находят своё практическое воплощение в рамках целенаправленной государственной политики и конкретных проектов корпорации «Росатом». Переход от научно-исследовательских работ к промышленному внедрению является логическим завершением многолетнего цикла разработки этой инновационной технологии.

Ключевым шагом на этом пути стало решение Инвестиционного комитета Госкорпорации «Росатом» о реализации проекта по модернизации и расширению экспериментально-производственных мощностей. Основной площадкой для создания производства полного цикла был выбран Сибирский химический комбинат (АО

«СХК») в Северске, который входит в структуру Топливной компании «ТВЭЛ».

Выбор этой площадки не случаен: АО «СХК» уже обладает уникальным опытом и компетенциями в области обращения с плутонием, подтверждёнными успешным производством экспериментальных тепловыделяющих сборок (ТВС) со смешанным уран-плутониевым топливом для быстрого реактора БН-800.

В рамках проекта модернизации на СХК создаётся специализированная линия по сборочному производству ядерного топлива ВВЭР-1000 конструкции ТВС-2М. Эта линия будет оснащена современным оборудованием для снаряжения твэлов и сборки готовых ТВС, а также установками, обеспечивающими многоуровневый контроль качества на всех этапах производственного процесса.

Важно подчеркнуть, что проект реализуется в формате производственной кооперации. Непосредственное изготовление уран-плутониевых топливных таблеток, являющихся сердцевинной ТВС, будет осуществляться на Горно-химическом комбинате (ФГУП «ГХК») в Железногорске.

Такое распределение функций позволяет максимально эффективно использовать существующую инфраструктуру и уникальные компетенции каждого предприятия, создавая тем самым устойчивую и технологически завершённую цепочку замкнутого топливного цикла.

Реализация данного проекта имеет конкретную и стратегически важную цель — организовать опытно-промышленное, а в перспективе и крупномасштабное производство ТВС с РЕМИКС-топливом, готовых к коммерческой эксплуатации в энергоблоках с реакторами ВВЭР-1000. Это не только решит задачу импортозамещения в топливной сфере, но и выведет Россию на лидирующие позиции в области технологий замыкания ядерного топливного цикла для тепловых реакторов.

Таким образом, промышленное внедрение РЕМИКС-топлива — это не гипотетический сценарий, а активно развивающееся направление с чёткими сроками, определённой производственной кооперацией и ясной перспективой. Успешный запуск этого производства станет отправной точкой для перевода значительной части парка российских АЭС на новую, более эффективную и ресурсосберегающую технологию, что укрепит как сырьевую безопасность страны, так и её технологический суверенитет в области атомной энергетики.

Заключение

Использование ТВС с РЕМИКС-топливом в активной зоне ВВЭР-1000 технически реализуемо и не требует переработки конструкции реактора.

Топливо типов РЕМИКС-А и РЕМИКС-А2 пригодно для многократного рециклирования, что значительно повышает эффективность использования ядерного топлива.

Основным вызовом при эксплуатации является рост радиационной опасности свежего топлива, обусловленный накоплением ^{232}U и четных изотопов Pu. Это требует:

- разработки дополнительных мер защиты персонала на этапах транспортировки и перегрузки;
- строгого соблюдения и минимизации сроков между изготовлением топлива и его загрузкой в реактор.

Широкое внедрение РЕМИКС-топлива позволит замкнуть ядерный топливный цикл для реакторов ВВЭР, сократить объемы ОЯТ, предназначенные для захоронения, и укрепить сырьевую базу атомной энергетики России.

Список литературы

1. Федоров Ю.С., Бибичев Б.А. и др. Использование регенерированного урана и плутония в тепловых реакторах // Атомная энергия. – 2005. – Т. 99. – № 2. – С. 136-141.
2. Декусар В.М., Каграманян В.С. и др. Анализ характеристик РЕМИКС-топлива при многократном рецикле в реакторах ВВЭР // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2013. – №4. – С. 109-117.
3. Павловичев А.М., Павлов В.И. и др. Нейтронно-физические характеристики активной зоны ВВЭР-1000 со 100%-ной загрузкой топливом из регенерированного урана и плутония // Атомная энергия. – 2006. – Т. 101. – № 6. – С. 407-413.
4. Павловичев А.М., Павлов В.И. и др. Нейтронно-физические характеристики активной зоны реактора ВВЭР-1000 со 100%-ной загрузкой топливом из смеси регенерированного урана, плутония и обогащенного урана // Атомная энергия. – 2008. – Т. 104. – № 4. – С. 196-198.
5. Зильберман Б.Я., Федоров Ю.С. и др. Возможность использования топлива из смеси обогащенного регенерированного урана и регенерированного плутония для 100%-ной загрузки активной зоны ВВЭР-1000 // Атомная энергия. – 2012. – Т. 113. – Вып. 6. – С. 307-314.
6. Постоварова Д.В., Ковалёв Н.В. и др. Радиационные характеристики РЕМИКС-топлива при многократном рецикле в реакторах ВВЭР-1000. – Санкт-петербург: Радиевый институт им. В.Г.

Хлопина, 2016. – С. 100-110.

References

1. Fedorov Yu.S., Bibichev B.A., et al. Use of Regenerated Uranium and Plutonium in Thermal Reactors // Atomic Energy. – 2005. – Vol. 99. – No. 2. – Pp. 136-141.
2. Dekusar V.M., Kagramanyan V.S., et al. Analysis of REMIX Fuel Characteristics during Multiple Recycle in VVER Reactors // Izvestiya Vuzov. Nuclear Power Engineering. – 2013. – No. 4. – Pp. 109-117.
3. Pavlovichev A.M., Pavlov V.I., et al. Neutron-physical characteristics of the VVER-1000 core with 100% fuel loading from regenerated uranium and plutonium // Atomic Energy. – 2006. – Vol. 101. – No. 6. – Pp. 407-413.
4. Pavlovichev A.M., Pavlov V.I., et al. Neutron-physical characteristics of the VVER-1000 reactor core with 100% fuel loading from a mixture of regenerated uranium, plutonium, and enriched uranium // Atomic Energy. – 2008. – Vol. 104. – No. 4. – Pp. 196-198.
5. Zilberman B.Ya., Fedorov Yu.S., et al. The possibility of using a mixture of enriched regenerated uranium and regenerated plutonium for 100% loading of the VVER-1000 core // Atomic Energy. – 2012. – V. 113. – Issue 6. – Pp. 307-314.
6. Postovarova D.V., Kovalev N.V., et al. Radiation characteristics of REMIX fuel during multiple recycle in VVER-1000 reactors. – Saint Petersburg: V.G. Khlopin Radium Institute, 2016. – Pp. 100-110.

УДК 621.039.514.4

Способы регулирования спектром нейтронов в водо-водяных реакторах под давлением

Е.И. Коротких¹, В.В. Шаповаленко¹, Кувшинов В.В.¹¹ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», Университетская-33 г. Севастополь, 299053, Россия, egorkorotkih04@gmail.com, shapovalenkovita@rambler.ru, vvkuvshinov@mail.sevsu.ru

Статья поступила 17.11.2025 г. ; после доработки 20.11.2025 г.

Аннотация

Работа посвящена анализу способов регулирования энергетическим спектром нейтронов в водоохлаждаемых ядерных реакторах. Спектральное регулирование заключается в изменении водо-уранового отношения в активной зоне реактора. Оно может быть реализовано за счет различных решений: применения стержней вытеснителей воды, изменения концентрации борной кислоты в водном теплоносителе, применения стержней с поглощающим нейтроны материалом, использования загрузки в активную зону уран-плутониевого топлива. В статье рассматриваются возможность и ограничения применяемых методов воздействия на реактивность.

Ключевые слова: водо-водяной реактор под давлением, реактивность, избыточная реактивность, стержни вытеснители воды, стержни с выгорающим поглотителем, борная кислота, спектральное регулирование.

Methods of regulation the spectrum of neutrons in pressurized water nuclear reactors

E.I. Korotkikh¹, V.V. Shapovalenko¹, Kuvshinov V.V.¹

Sevastopol stat university, 33 Universitetskaya st., Sevastopol, 299053, Russia, egorkorotkih04@gmail.com, shapovalenkovita@rambler.ru, vvkuvshinov@mail.sevsu.ru

Received 17.11.2025y. ; received in final form 20.11.2025 y.

Abstract

The work is devoted to the analysis of methods for regulating the energy spectrum of neutrons in water-cooled nuclear reactors. Spectral regulation involves changing the water-uranium ratio in the reactor core. This can be achieved through various solutions, such as using water-displacing rods, adjusting the concentration of boric acid in the water coolant, employing neutron-absorbing rods, or incorporating uranium-plutonium fuel into the core. The article explores the possibilities and limitations of these methods for controlling reactivity.

Keywords: pressurized water-water reactor, reactivity, excess reactivity, water expulsion rods, fissionable absorber rods, boric acid, spectral regulation

Введение

При классификации ядерных реакторов учитывается средний спектр нейтронов, на котором протекает реакция деления. При такой классификации выделяют реакторы, работающие на тепловом спектре нейтронов и реакторы, работающие на быстром спектре нейтронов.

Новым направлением развития реакторостроения является создание проекта установки с управляемым энергетическим спектром нейтронов на базе водоохлаждаемых реакторов. Основной идеей спектрального регулирования является при пуске реактора использовать резонансный спектр нейтронов, с постепенным переходом к концу кампании на работу реактора в тепловом

спектре нейтронов. Основная часть исследований направлена на углубленное изучение реализации спектрального регулирования в легководных реакторах с целью повышения энергоиспользования топлива путем варьирования водо-уранового отношения.

Изменение водо-уранового отношения влияет на размножающие свойства нейтронов и соответственно энергетический спектр нейтронов, и конечно же на глубину выгорания топлива.

Таким образом, чтобы повысить эффективность использования топлива в активной зоне необходимо создать условия, при которых будет обеспечена возможность изменения водо-уранового отношения. Начальный запас реактивности может быть скомпенсирован уменьшением водо-уранового отношения. В дальнейшем по мере выгорания топлива и снижения реактивности необходимо увеличивать водо-урановое отношение и тем самым поддерживать критичность реактора. В реакторах с водой под давлением регулирование водо-уранового отношения достигается посредством ряда технических решений: применения стержней вытеснителей воды, корректировки концентрации борной кислоты в водном теплоносителе, изменения плотности замедлителя, установки стержней с поглощающим нейтроны материалом, компоновки активной зоны из ТВС с разным видом ядерного топлива, в сочетании со стержнями вытеснителями воды. Смешанная загрузка активной зоны подразумевает совместное использование ТВС с диоксидом урана, ТВС с уран-плутониевым топливом и ТВС с топливом, содержащим нейтронопоглощающий материал. Кроме того, могут быть применены разные комбинации перечисленных методов.

Цель и постановка задачи

Цель исследования - изучить способы спектрального регулирования для определения наиболее эффективного из них для достижения максимального экономического эффекта использования природных ресурсов и достижения наибольшей глубины выгорания топлива. Осуществляется анализ проблемы внедрения спектрального регулирования в активную зону реактора с водяным охлаждением.

Способы спектрального регулирования и сложность реализации

На действующих реакторных установках типа ВВЭР реакция деления проходит на ядрах

урана - ^{235}U в среднеэнергетическом тепловом спектре нейтронов.

Основным условием достижения высокой глубины выгорания топлива является большой запас реактивности на свежем ядерном топливе, требующий соответствующей системы компенсации избыточной реактивности для поддержания критичности реактора, которая реализуется путем введения в активную зону различного рода поглотителей: ввода в теплоноситель борной кислоты, использование в составе ядерного топлива, гадолиния-материала, поглощающего нейтроны.

Рост концентрации дополнительных поглотителей провоцирует увеличение паразитного захвата нейтронов, в результате чего снижается эффективность использования ядерного топлива.

Для замыкания ядерного топливного цикла и расширения ресурсной топливной базы для ВВЭР рассматривается иной подход в управлении ЯЭУ, а именно использование спектрального регулирования.

Среди перечисленных методов наиболее эффективным способом изменения водо-уранового отношения является использование стержней вытеснителей воды в активной зоне реактора.

При их погружении в активную зону объем воды (замедлителя) уменьшается, энергетический спектр нейтронов увеличивается и соответствует резонансному поглощению урана - ^{238}U , из которого в результате радиационных превращений образуется плутоний - ^{239}Pu , вторичный делящийся материал, который в дальнейшем будет выступать как источник нейтронов при постепенном выгорании основного делящего материала ^{235}U . Реализация данной стратегии позволит удлинить топливную кампанию и повысить энерговыработку.

Исследования в работе [6] показали, что применение стержней вытеснителей воды, позволяет уменьшить концентрацию борной кислоты или же вообще исключить ее использование при работе реактора на мощности.

Результаты исследования [6] подтверждают целесообразность применения циркониевых стержней для вытеснения воды (Таблица 1).

При сопоставлении влияния циркониевого стержня (диаметром 5,4мм) и максимальной концентрации борной кислоты ($7,33 \text{ г (H}_3\text{BO}_3\text{)/дм}^3 \text{ (H}_2\text{O)} = 1,77 \text{ г (B)/кг(H}_2\text{O)}$), выявлено следующее: борная кислота вызывает изменение реактивности на - 0,138, гораздо меньше, чем циркониевый стержень – 0,311.

Таблица 1. Сравнение влияния циркониевых стержней с борной кислотой [6]

Эффект Zr-стержня			Влияние концентрации бора		
Ø Zr-стержня, мм	K_{∞}	$\Delta K/K$	Концентрация, г/кг	K_{∞}	$\Delta K/K$
0	1,3377		0,00	1,3379	
2	1,3088	-0,022	0,241	1,3132	-0,019
3	1,2694	-0,054	0,517	1,2861	-0,040
4	1,2030	-0,112	1,006	1,2408	-0,078
5	1,0888	-0,229	1,264	1,2183	-0,098
5,4	1,0202	-0,311	1,772	1,1758	-0,138

Применение стержней - вытеснителей воды позволяет за счет изменения диаметра стержня и его положения в активной зоне изменять концентрацию борной кислоты в теплоносителе и варьировать величиной водо-уранового отношения.

Однако у этого направления спектрального регулирования есть ограничения, связанные с тем, что непрерывное изменение водо-уранового отношения технически сложно, так как в реакторах, вода выполняет одновременно две функции и теплоносителя и замедлителя.

Поэтому с изменением водо-уранового отношения необходимо изменять расход теплоносителя через активную зону, что скажется на теплоотводе от тепловыделяющих элементов и увеличит термические напряжения на оболочку ТВЭЛ.

В формуле (1) показана связь параметров мощности ядерного реактора и нагрева теплоносителя в активной зоне на расход теплоносителя через активную зону:

$$G_{аз} = \frac{Q_p \cdot \psi_{аз}}{(h_{вых.тн} - h_{вх.тн})}, \frac{кг}{с} \quad (1)$$

где Q_p - тепловая мощность ядерного реактора, кВт;

$h_{вых.тн}$, $h_{вх.тн}$ — энтальпия теплоносителя при температуре теплоносителя и давлению на выходе и входе в активную зону реактора, кДж/кг.

Необходимость обеспечить герметичность конструкции тепловыделяющего элемента при повышенных радиационных, термических нагрузках, потребует подтверждения обоснования надежности работы циркониевых сплавов в качестве материала оболочки ТВЭЛ.

Использование в активной зоне в ТВС ядерного топлива с нейтронопоглощающим материалом также имеет свои недостатки. Повышение концентрации в составе ядерного топлива выгорающего поглотителя гадолиния или эрбия приводит к ухудшению теплопроводности топливной композиции, что ограничивает максимальные тепловыделения с поверхности ТВЭЛ.

Неиспользование борной кислоты в водном

теплоносителе при вводе в активную зону стержней вытеснителей воды не исключает использование системы водоподготовки борной кислоты в реакторе, так как одной из её функций является поддержание в первом контуре концентрации борной кислоты, необходимой для безопасного проведения перегрузки реактора и ремонтных работ, а значит затраты на обслуживание данной системы не снижаются.

Кроме системы перемещения органов регулирования СУЗ также потребуется ввести дополнительную систему для управления перемещением стержней вытеснителей воды в активной зоне, что в совокупности усложняет процесс управления реактором.

Перемещение стержней вытеснителей воды необходимо учесть с изменением аксиального офсета в активной зоне. Аксиальный офсет должен поддерживаться в установленном регламентом диапазоне в зависимости от текущего уровня мощности. Выход значения аксиального офсета за пределы рекомендованной области может привести к неравномерности нейтронного потока и возникновению аксиальных ксеноновых колебаний.

Сложностей для реализации спектрального регулирования в активной зоне реактора с водой под давлением добавляет учет в расчете групповых констант, связанный со сдвигом спектра нейтронов, который вызывается изменением концентрации замедлителя.

Таким образом, концентрация замедлителя и изменение изотопного состава реактора (следовательно, и глубина выгорания) оказываются жестко взаимосвязанными параметрами, на которые дополнительно налагается условие поддержания неизменной реактивности $\rho \ll 0$ [6].

Учет всех вышеописанных факторов создает значительные трудности в построении моделей и методов расчета таких реакторов.

Несмотря на эти сложности, научные исследования в этой области остаются крайне востребованными.

Заключение

Важность реализации спектрального регулирования в активной зоне реактора заключается в следующем:

- Применение спектрального регулирования в реакторе позволяет увеличить глубину выгорания топлива без существенного изменения теплогидравлических характеристик активной зоны. Таким образом, реактор при той же мощности будет потреблять меньше

урана и нарабатывать для себя делящийся материал.

- Активную зону реактора со спектральным регулированием можно полностью загрузить уран-плутониевым топливом, получаемым в ходе переработки отработавшего ядерного топлива, что позволяет реализовать замкнутый ядерный топливный цикл и эффективно использовать при этом природные ресурсы.
- Более высокая степень преобразования воспроизводящего материала в делящийся может быть использована для реализации более удлиненной топливной кампании.

Список литературы

1. Мерзликин Г.Я. Основы теории ядерных реакторов. Часть II. Кинетика реактора. Эффекты реактивности и регулирование ВВЭР – 2-е издание переработанное и дополненное – Севастопольский национальный университет ядерной энергии 2008. – 253с
2. Мерзликин Г.Я. Основы теории ядерных реакторов. Часть I. Основы теории критического реактора. Основы теплофизики ВВЭР 2-е издание переработанное и дополненное – Севастопольский национальный университет ядерной энергии и промышленности, 2007. – 253с.
3. Андрушечко С.А., Афров А.М., Васильев Б.Ю., Генералов В.Н. и др. АЭС с реактором типа ВВЭР-1000. От физических основ эксплуатации до эволюции проекта М.: Логос, 2010. – 604с
4. Выговский С.Б. и др. Физические и конструкционные особенности ядерных энергетических установок с ВВЭР Москва, НИЯУ МИФИ, 2011, 376 с.
5. Белозеров В.И., Жук М.М., Кузина Ю.А., Терновых М.Ю. Физика и эксплуатационные режимы реактора ВВЭР-1000 М.: НИЯУ МИФИ, 2014
6. Элазака А.И., Тихомиров Г.В. Потенциал спектрального регулирования ВВЭР с учетом выгорания топлива // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2020. - Т.2 - С. 27-38

2007. – 253

3. Andrushechko S.A., Afrov A.M., Vasilyev B.Yu., Generalov V.N., et al. Nuclear Power Plant with VVER-1000 Reactor. From the physical basis of operation to the evolution of the project M.: LOGOS, 2010. – 604
4. Vygovsky S.B. et al. Physical and design features of nuclear power plants with VVER MOSCOW, NRC MPhI, 201. – 376
5. Belozеров V.I., Zhuk M.M., Kuzina Yu.A., Ternovykh M.Yu. Physics and operational parameters of the VVER-1000 reactor Moscow: NRU MPhI, 2014.
6. Elazaka A.I., Tikhomirov G.V. The potential of VVER spectral regulation taking into account fuel burn-up // Izvestiya vuzov. Yadernaya energetika. – 2020. - Т.2 - Р. 27-38

References

1. Merzlikin G.Ya. Fundamentals of Nuclear Reactor Theory. Part II. Reactor Kinetics. Reactivity Effects and VVER Regulation – 2nd Revised and Expanded Edition – Sevastopol National University of Nuclear Energy, 2008. – 253
2. Merzlikin G.Ya. Fundamentals of the theory of nuclear reactors. Part I. Fundamentals of critical reactor theory. Fundamentals of VVER Thermal Physics, 2nd edition, revised and expanded – Sevastopol National University of Nuclear Energy and Industry,

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

УДК 620.92

Энергообеспечение индивидуального потребителя с использованием установок на основе возобновляемых источников энергии

Бекиров О.С.¹, Абдурахманов Р.Н.¹, Бекиров Э.А.¹, Кувшинов В.В.²¹ ФГАОУ ВО «Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского», Физико-технический институт, г. Симферополь, 295007, Россия² ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», Севастополь, 299053, Россия
osman_bekirov@list.ru rechatfor@gmail.com

Статья поступила 18.11.2025 г.; после доработки 20.11.2025 г.

Аннотация

В данной статье рассматриваются вопросы обеспечения энергетической независимости фермы с использованием энергоагрегатов на базе возобновляемых источников энергии. Анализируются современные технологии и методы интеграции солнечных установок, а также их эффективность в условиях сельскохозяйственного производства. Представлены решения по оптимизации энергопотребления и повышению устойчивости фермерских хозяйств за счет использования возобновляемых источников энергии.

Ключевые слова: солнечная батарея, возобновляемые источники энергии, потребляемая мощность

Energy supply to the farm using installations using renewable energy sources

Bekirov O.S.¹, Abdurakhmanov R.N.¹, Bekirov E.A.¹, Kuvshinov V.V.²¹ V.I. Vernadsky Crimean Federal University, Physics and Technology Institute, Simferopol, 295007, Russia² Sevastopol State University, Sevastopol, 299053, Russia
osman_bekirov@list.ru rechatfor@gmail.com

Received 18.11.2025 y. Received in final form 20.11.2025 y.

Abstract

This article discusses the issues of ensuring the energy independence of a farm using energy units based on renewable energy sources. Modern technologies and methods of integration of solar installation, as well as their effectiveness in agricultural production conditions are analyzed. Solutions for optimizing energy consumption and increasing the sustainability of farms through the use of renewable energy sources are presented.

Keywords: solar battery, renewable energy sources, power consumption

Введение

Анализ разработанности, где с целью обеспечение автономного электропитания была использована существующая ферма в селе Русоковка, Белогорского района, рис. 1,2, рассмотрим возможность обеспечения электроэнергией

с использованием энергоагрегатов ВИЭ, в частности, применение солнечных батарей.

Площадь фермы для животных составляет 1680 м²; длина 80 и ширина 21 метр, из которых площадь административного помещения 125 м².



Рис.1. Сельскохозяйственный ангар (вид сверху)



Рис.2 Сельскохозяйственный ангар с фермой

Площадь фермы для животных составляет 1680 м²; длина 80 и ширина 21 метр, из которых площадь административного помещения 125 м².

Согласно ГОСТ 31974–2012 «Животноводство. Общие технические условия», а так же СП 2.4.8.1347-03 «Планировка и содержание животных» на одну особь крупного рогатого скота необходимо от 8 до 12 м², и 1,5–3 м² на одну овцу, 1–2 м² на одну козу

Следовательно количество особей на площадь ангара рассчитывается по формуле:

$$S_{\text{объекта}} = N \times K_1 \quad (1)$$

где: $S_{\text{объекта}}$ - общая площадь, м²;

N - количество поголовья скота;

K_1 - площадь на одну особь, м²;

Учитывая площадь для проезда технологического транспорта, (в типовых проектах этот показатель составляет 10–20%) [7], необходимо преобразовать формулу 1:

$$N = \frac{[S_0 - (\frac{S_0}{10\%})]}{k_1} \quad (2)$$

где: S_0 - площадь фермы.

Согласно формуле (2), количество голов крупного рогатого скота помещаемых в ферме 142 особи.

Расчет номинальной мощности, для энергообеспечения фермы произведём по формуле 3:

$$P_{\text{ном}} = P_{\text{осв}} + P_{\text{т.воды}} + P_{\text{насос}} + P_{\text{вент}} + P_{\text{насос цир.}} \quad (3)$$

где: $P_{\text{ном}}$ - общая номинальная мощность в

сутки;

$P_{\text{осв}}$ – потребляемая лампами мощность для освещения, кВт;

$P_{\text{т.воды}}$ - мощность необходимая для обогрева воды, кВт;

$P_{\text{насос}}$ - мощность насосов водоснабжения, кВт;

$P_{\text{вент}}$ – мощность, потребляемая для вентиляции, кВт;

$P_{\text{насос цир.}}$ - мощность насосов для циркуляции воды, кВт.

Рассмотренные мощности являются усредненными и оцениваются за сутки.

Доильные аппараты - 5 кВт;

Освещение - 3.3 кВт;

ТЭНы для нагрева воды - 3 кВт;

Насос подачи воды - 0,5 кВт;

Вентиляция - 0,3 кВт;

Насосы циркуляции воды - 0,5 кВт.

Для нагрева воды используем трубчатые ТЭНы (спиральные или цилиндрические), выполненные из нержавеющей стали, так как они устойчивы к коррозии и легко обслуживаются [8].

Для автономного электроснабжения всех энергозатрачивающих установок, были выбраны солнечные панели DELTA BST 540–72 М НС, номинальная мощность ($P_{\text{панели}}$) 540 Вт, напряжение 24 В, размер 2254×1135×35 мм, которые устанавливаются на крыши здания.

На рисунке (3) показана блок схема подключения солнечных панелей.

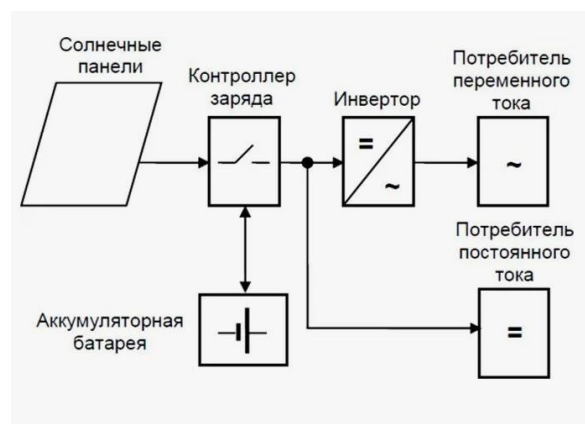


Рис. 3 Блок схема подключения солнечных панелей

Для обеспечения требуемой освещенности фермы согласно нормативным данным [9] принимаем светильник из серии SPECTR AGRO 40(1500) который разработан специально для

освещения сельскохозяйственных построек, зданий и сооружений, уличных территорий. Прибор мощностью 40 Вт, в размер 1500*72*150 мм, и обеспечивает поток света, равный 6562 Лм [10].

Расчет необходимого количества светильников общего освещения в помещениях производится по формуле:

$$n = \frac{a \times b \times E_m \times k}{\Phi} \quad (4)$$

где: n — количество светильников, шт;

a — длина помещения, м;

b — ширина помещения, м;

E_m — заданная освещенность, люксы;

Φ — световой поток источников света одного светильника, люмен;

k — коэффициент, учитывающий цвет и тон стен потолка и пола (1,5–2,5) [13].

Согласно расчетным данным получаем требуемое количество светильников:

$$n = \frac{80 \times 21 \times 160 \times 2}{6562} = 82, \text{ шт}$$

Расчет годового потребления электроэнергии произведем по формуле:

$$W_{\text{год}} = \sum (P_{\text{осв}} \times t_{\text{осв}} + P_{\text{т.воды}} \times t_{\text{т.воды}} + P_{\text{насос}} \times t_{\text{насос}} + P_{\text{вент}} \times t_{\text{вент}} + P_{\text{насос цир.}} \times t_{\text{насос цир.}}) \quad (5)$$

где: $t_{\text{осв}}$ - время работы приборов освещения, 2920 часов в год;

$t_{\text{т.воды}}$ - время работы нагревателя (тена), 1440 часов в год;

$t_{\text{насос}}$ - время работы насоса, 730 часов в год;

$t_{\text{вент}}$ - время работы вентиляции, 4380 часов в год;

$t_{\text{насос цир.}}$ - время работы насоса для циркуляции воды, 2920 часов в год.

Годовое потребление фермы составит 52595 кВт*ч в год

Исходя из формулы (5), можно вычислить количество потребления энергии в час на одну особь

$$W_{\text{потребления}} = \frac{W_{\text{год}}}{8760 \times N} \quad (6)$$

Потребление на одну особь крупного рогатого скота составляет 42,3 Вт*ч.

Из формул (2) и (6) получаем зависимость потребления от площади объекта:

$$W_{\text{пот.об.}} = S_{\text{объекта}} \times 0,9 \times \frac{W_{\text{потребления}}}{k_1} \quad (7)$$

Так как вид кровли здания двухскатная (с уклоном α), направлена на юг необходимо опередить площадь для размещения солнечных фото панелей:

$$S_{\text{сэс}} = \frac{S_{\text{объекта}}}{2 \cos \alpha} \quad (8)$$

где: $S_{\text{сэс}}$ — площадь крыши для установки

солнечной панели

Максимальное количества устанавливаемых солнечных панелей,:

$$N_{\text{СБ}} = \frac{S_{\text{объекта}} \times K_3}{2 S_{\text{СБ}} \times \cos \alpha} \quad (9)$$

где K_3 — межпанельное расстояние.

Для нахождения выработки солнечной энергии, произведем расчет по формуле:

$$W_{\text{выраб.}} = N_{\text{СБ}} \times P_{\text{панели}} \times t_i \times K \quad (10)$$

где: $W_{\text{выраб.}}$ - годовая выработка электроэнергии, кВт*ч;

$N_{\text{СБ}}$ - количество солнечных панелей;

$P_{\text{панели}}$ — мощность одной панели, кВт;

t_i - среднее годовое количество солнечных часов в Республике Крым (или полное солнечное излучение в часах);

K - коэффициент производительности

$$W_{\text{выраб.}} = 64 \times 0,54 \times 2180 \times 0,8 =$$

18081 кВт* час в год

Выводы

Разработана автономная система энергоснабжения сельскохозяйственного ангара на основе фотоэлектрических панелей, обеспечивающая полное покрытие годового и суточного энергопотребления объекта. Приведены расчёты необходимого количества панелей и блок-схема подключения, подтверждающие практическую реализуемость и эффективность решения для повышения энергоэффективности сельскохозяйственных производств. Фотоэлектрические модули обеспечивают 34,37 % энергопотребления фермы.

Список литературы

1. Кувшинов В.В., Бекиров Э.А. / Теплофотоэлектрическая установка для комбинированной выработки тепловой и электрической энергии // Строительство и техногенная безопасность // Симферополь: КФУ им. Вернадского, № 15(67) – 2019, стр. 141-149.
2. Использование фотоэлектрических преобразователей в качестве источников питания медицинского оборудования Кувшинов В.В., Матвеев Ю.В., Березняк В.А., Смирнов В.В., Тиман Д.И. Естественные и технические науки. 2023. № 1 (176). С. 166-168.
3. В.Н. Баранов «Теплотехника и системы отопления» — содержит расчеты тепловых нагрузок и режимов работы водонагревателей.
4. ГОСТ Р 50571.1-93 "Системы вентиляции. Общие технические требования" — стандарт, содержащий нормативные требования к проектированию и расчету систем вентиляции.
5. Литвиненко В.П., Григорьев В.И. "Теплотехника

- и гидравлика систем отопления" — содержит практические рекомендации по расчету времени работы насосов.
6. Кузнецов, А. В., & Иванова, Е. П. (2018). "Проектирование сельскохозяйственных зданий и сооружений". Российский журнал сельскохозяйственной инженерии, № 4, с. 45-52.
 7. ГОСТ Р 50571.1-93 "Электрооборудование сельскохозяйственных предприятий. Общие технические условия."
 8. Кувшинов, В.В., Морозова, Н.В. / Возможности повышения мощностных характеристик солнечных установок для использования в энергетике Крыма // М.: Спутник+, 2017. 175 с
 9. ГОСТ Р 50571.1-93 «Освещение. Общие требования» — стандарты по проектированию систем освещения.
 10. LGT-Agro-Vega-80-1500: Спецификация / ООО «ЛГТехно». — Электронный ресурс. — Санкт-Петербург, 2023.
 11. Kuvshinov V.V., Kolomiychenko V.P., Kakushkina E.G. Storage System for Solar Plants. Appl. Sol. Energy, 2019, vol. 55, no. 3, pp. 153-158.
 12. Белобородов С.С., Гашо Е.Г., Ненасhev А.В. возобновляемые источники энергии и водород в энергосистеме: проблемы и преимущества Гухман Г.А. Энергия: экономика, техника, экология.
 13. СНиП 23-02-2003 "Тепловая защита зданий".
 9. Kuvshinov, V.V., Morozova, N.V. / Possibilities of increasing the power characteristics of solar installations for use in the Crimean energy sector // Moscow: Sputnik+, 2017. 175 p
 10. LGT-Agro-Vega-80-1500: Specification / LGTechno. — An electronic resource. — St. Petersburg, 2023
 11. Kuvshinov V.V., Kolomiychenko V.P., Kakushkina E.G. Storage System for Solar Plants. Appl. Sol. Energy, 2019, vol. 55, No. 3, pp. 153-158.
 12. Beloborodov S.S., Gasho E.G., Nenashev A.V. renewable energy sources and hydrogen in the energy system: problems and advantages Gukhman G.A. Energy: economics, technology, ecology.
 13. SNiP 23-02-2003 "Thermal protection of buildings"

References

1. Kuvshinov V.V., Bekirov E.A. / Thermal photovoltaic installation for combined heat and electric energy generation // Construction and technogenic safety // Simferopol: KFU im. Vernadsky, No. 15(67) – 2019, pp. 141-149.
2. The use of photovoltaic converters as power sources for medical equipment Kuvshinov V.V., Matveev Yu.V., Bereznyak V.A., Smirnov V.V., Timan D.I. Natural and Technical Sciences. 2023. No. 1 (176). pp. 166-168.
3. V.N. Baranov "Heat engineering and heating systems" — contains calculations of thermal loads and operating modes of water heaters.
4. GOST R 50571.1-93 "Ventilation systems. General Technical requirements" is a standard containing regulatory requirements for the design and calculation of ventilation systems.
5. Litvinenko V.P., Grigoriev V.I. "Heat engineering and hydraulics of heating systems» contains practical recommendations for calculating the operating time of pumps.
6. 6. Kuznetsov, A.V., & Ivanova, E. P. (2018). "Design of agricultural buildings and structures". Russian Journal of Agricultural Engineering, No. 4, pp. 45-52.
7. GOST R 50571.1-93 "Electrical equipment of agricultural enterprises. General technical conditions."
8. GOST R 50571.1-93 "Lighting. General require-

УДК 621.311.243, 620.92

Некоторые результаты исследования модульной мобильной фотоэлектрической станции

А.А. Таран¹, В.В. Шаповаленко¹, А.А. Нагирняк¹, А.А. Скидан¹, В.В. Смирнов¹

¹ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», Университетская-33 г. Севастополь, 299053, Россия,

aataran@mail.sevsu.ru, shapovalenkovita@rambler.ru, aanagirnyak@mail.sevsu.ru, a.a.skidan@mail.sevsu.ru
vvsmirnov@mail.sevsu.ru

Статья поступила 17.11.2025 г. ; после доработки 20.11.2025 г.

Аннотация

В работе проводятся результаты теоретических и экспериментальных исследований малой мобильной фотоэлектрической станции. Для повышения её эффективности были применены солнечные концентраторы некоторых типов. В результате исследований было показано значительное увеличение энергетических характеристик солнечной установки.

Ключевые слова: солнечная энергетика, автономная электростанция, концентраторы солнечного излучения, фотоэлектрические преобразователи

Some results of the study of a modular mobile photovoltaic station

A.A. Taran¹, V.V. Shapovalenko¹, A.A. Nagirnyak¹, A.A. Skidan¹, V.V. Smirnov¹

Sevastopol stat university, 33 Universitetskaya st., Sevastopol, 299053, Russia,

aataran@mail.sevsu.ru, shapovalenkovita@rambler.ru, aanagirnyak@mail.sevsu.ru, a.a.skidan@mail.sevsu.ru
vvsmirnov@mail.sevsu.ru

Received 17.11.2025y. .; received in final form 20.11.2025 y.

Abstract

The paper presents the results of theoretical and experimental studies of a small mobile photovoltaic station. To increase its efficiency, solar concentrators of various types were used. The studies showed a significant increase in the energy characteristics of the solar installation.

Keywords: solar energy, autonomous power plant, solar radiation concentrators, photovoltaic converters

Введение

Многие жилые объекты на территории Российской Федерации достаточно далеко удалены от централизованных систем электроснабжения. При этом для их энергоснабжения достаточно можно использовать небольшую установленную мощность и использовать автономные электростанции [1]. На данный момент это чаще всего бензиновые или дизельные, однако постоянный рост цен на нефтепродукты делает их применение нерентабельным, кроме того, существует ряд

объектов, для которых топливные электростанции неприемлемы по экологическим соображениям. Во всем мире пытаются заменить углеводородное топливо возобновляемыми источниками энергии, чаще всего Солнцем, ветром и биотопливом. Для мобильных перевозных энергоустановок, по их удобству и габаритам наиболее удобными являются преобразователи солнечной энергии, в частности фотоэлектрические электростанции малой мощности [2]. В этой связи настоящие исследования были посвящены разработке и реализации методов оптимизации

параметров солнечной электростанции для передвижных мобильных систем.

Цель и постановка задачи

Целью настоящего исследования являлось повышение эффективности работы автономной солнечной передвижной электростанции, путем применения концентраторов солнечного излучения. Коэффициент и время использования солнечной энергии можно значительно увеличить за счет использования рассеянного солнечного излучения [3]. Концентрирование рассеянного солнечного излучения обеспечит увеличение времени работы автономной солнечной электростанции за счет более полного использования солнечной энергии, что позволит уменьшить площадь фотоэлектрических преобразователей и емкость аккумуляторных батарей [4].

Объектом исследований являлся модуль солнечной электростанции, включающий системы слежения за Солнцем и концентрирования солнечного излучения, батарею фотоэлектрических преобразователей и аккумуляторные батареи.

Предметом исследований было исследование параметров зависимости автономной солнечной электростанции (площади фотоэлектрических преобразователей, емкости аккумуляторов и параметров ориентации батареи ФЭП) от типа и параметров концентраторов, графиков поступления и потребления энергии [5].

Анализ работ в этом направлении позволил установить, что повысить эффективность использования энергии Солнца можно путем применения концентраторов солнечного излучения, оптимизации параметров ориентации приемников солнечной энергии, более точного обоснования площади ФЭП и емкости аккумуляторных батарей. Было установлено, что автономная солнечная электростанция является сложной технической системой, имеющей связь с высшей энергетической системой, и обладающая особенностями, не позволяющими для ее расчета применять методы расчета систем электроснабжения на основе регулируемых источников энергии, например, на основе топливных электростанций [6].

В результате проведенного анализа были сформулированы задачи, необходимые для достижения поставленной цели, определены объект и предмет исследований, приняты научная и рабочая гипотезы.

В результате проведенных исследований были решены следующие задачи:

- проведен системный анализ автономной

солнечной электростанции и получены графические и аналитические зависимости процессов поступления, преобразования и потребления энергии;

- разработана и реализована методика оптимизации параметров ориентации фиксированных батарей фотоэлектрических преобразователей;
- теоретически и экспериментально обоснованы системы концентрирования солнечного излучения;
- разработана и реализована методика определения параметров автономной солнечной электростанции (площадь фотоэлектрических преобразователей и емкость аккумуляторов).

Результаты исследований

При проведении работы была выделена автономная солнечная электростанция, как техническая система (рис. 1) и проведен ее системный анализ. В результате системного анализа установлены взаимосвязи рассматриваемой системы с энергетической системой высшего уровня.

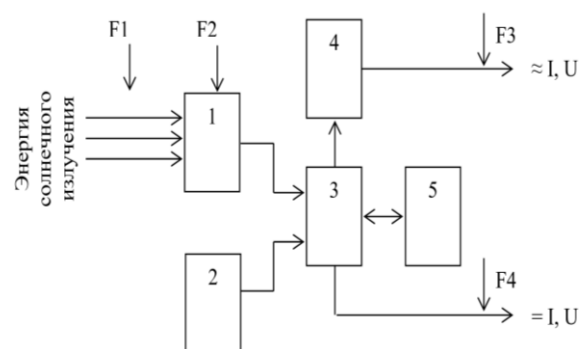


Рис. 1. Система автономного электроснабжения: 1 – преобразователи энергии солнечного излучения с периферийными устройствами, 2 – резервная электростанция, 3 – коммутатор, 4 – инвертор, 5 – аккумуляторная батарея, F – возмущающие воздействия

В приведенной системе связь с источниками и потребителями энергии (граничными подсистемами энергетической системы) учтена в виде возмущающих воздействий, к которым относятся:

- F1 – фактическая интенсивность солнечного излучения, зависящая от времени года и суток, она же является входным воздействием;
- F2 – мощность, передаваемая преобразователем энергии возобновляемого источника;
- F3, F4 – мощность нагрузки переменного и постоянного тока, изменяющаяся случайным

образом, они же являются выходными воздействиями системы.

Установлено, что на территории Ростовской области интенсивность солнечного излучения имеет ярко выраженный сезонный характер, что подтверждает целесообразность использования солнечной энергии для сезонно работающих потребителей электроэнергии [3].

Так как в метеорологических справочниках приводятся усредненные данные об интенсивности солнечного излучения, то их использование для обоснования параметров автономной солнечной электростанции не корректно, так как в любой период времени существует вероятность того, что фактическая интенсивность солнечного излучения будет ниже средней. Более корректно применять графики суточного изменения интенсивности солнечного излучения, гарантированные с какой-то, заранее заданной вероятностью. Такая вероятность может быть определена как вероятность попадания случайной величины в заданный интервал. Так как интенсивность солнечного излучения на территории Ростовской области распределена по нормальному закону, то было принято решение для расчета гарантированных значений применить функцию Лапласа [5].

$$P(N_x \leq N \leq N_{\max}) = \Phi\left[\frac{N_{\max} - \bar{N}}{\sigma_c}\right] - \Phi\left[\frac{N_x - \bar{N}}{\sigma_c}\right] \quad (1)$$

где $\bar{N}$ – математическое ожидание интенсивности солнечного излучения (данные метеостанций), Вт/м²;

N_x – гарантированная интенсивность солнечного излучения, Вт/м²;

$N_{\max}$ – максимально возможная интенсивность солнечного излучения в данной местности, Вт/м²;

σ_c – стандартное отклонение интенсивности солнечного излучения, Вт/м².

На рисунке 2 в качестве примера приведены гарантированные графики интенсивности солнечного излучения, полученные на основании метеоданных по Ростовской области для июля. Эти графики описывают плотность солнечного излучения на горизонтальную площадку. Если по каким-либо соображениям будет принят фиксированный коллектор, то расчету гарантированной интенсивности солнечного излучения, попадающей на фиксированный приемник, должна предшествовать оптимизация параметров ориентации.

Анализ преобразователей солнечной энер-

гии в электрическую показал, что при существующем уровне к.п.д. 14% для обеспечения нагрузки мощностью 1 кВт потребуется 35 м² ФЭП. Естественно, что стоимость электроэнергии при этом будет весьма высокой. Уменьшить площадь ФЭП можно путем концентрирования солнечного излучения.

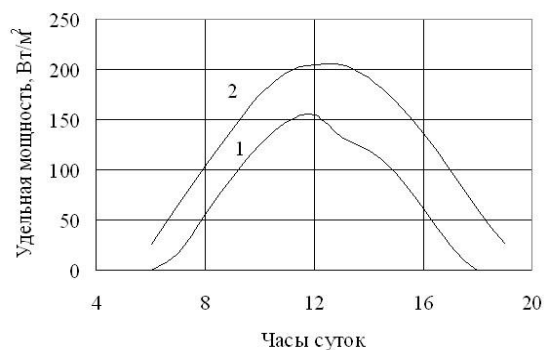


Рис. 2. Графики гарантированного солнечного излучения: 1 – вероятность 0,9, 2 – вероятность 0,5

Исследования концентраторов солнечного излучения в рамках системного анализа позволили выявить зависимость параметров концентраторов первого порядка от угла раскрытия. Так, для концентраторов с однократным отражением эта зависимость имеет вид:

$$\operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} = \sqrt{\frac{R-r}{R+r}} \quad (2)$$

где α – угол раскрытия концентратора, град;
 R, r – радиус или сторона входного и выходного отверстий концентратора соответственно, м.

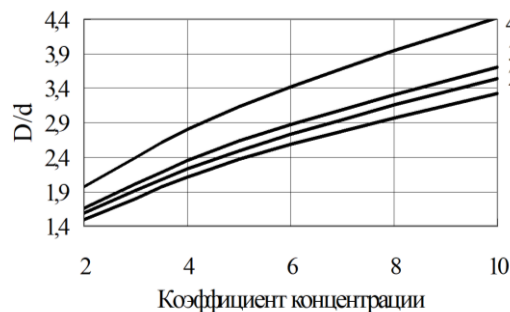


Рис. 4. Зависимость площади концентратора от коэффициента концентрации и числа отражений при диаметре фотоприемника 0,1 м

Концентраторы второго порядка, например, параболоцилиндрические фоконы и

фоклины, не требовательны к точности наведения на Солнце, и могут при угле раскрытия 30° эффективно работать, оставаясь в фиксированном положении. Кроме того, параболоцилиндрические концентраторы способны собирать и некоторую часть рассеянного солнечного излучения, что обуславливает увеличение подачи энергии на ФЭП. И наконец, параболоцилиндрические концентраторы при равной материалоемкости имеют более высокий коэффициент концентрации.

В результате системного анализа периферийных систем автономной солнечной электростанции было выявлено два альтернативных варианта: простой концентратор первого порядка в совокупности с системой слежения за Солнцем, и сложный параболоцилиндрический концентратор без системы слежения за Солнцем.

Параметры солнечного концентратора

В результате исследований было установлено, что электростанция должна создаваться для передвижного модуля. Учитывая, что все электроприемники могут питаться напряжением 12 В постоянного тока, принята следующая система автономной солнечной электростанции (рисунок 5).

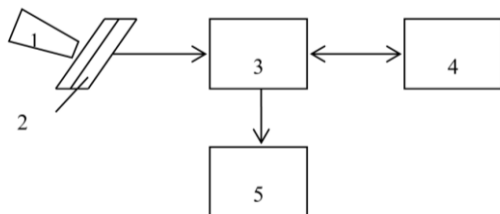


Рис. 5. Блок-схема автономной системы электроснабжения на основе фотоэлектрических преобразователей с аккумуляторным резервом:

1 – концентратор; 2 – фотоэлектрический преобразователь; 3 – коммутатор; 4 – аккумуляторная батарея с контролером режима заряда; 5 – потребители электроэнергии постоянного тока

Теоретическое сравнение систем концентрирования солнечного излучения позволило отдать предпочтение параболоцилиндрическим концентраторам. Такой выбор предусматривает оптимизацию параметров фиксации батареи ФЭП и концентратора (азимутального угла γ и угла наклона β). Эти углы определяют величину поступающей на фиксированный приемник энергии солнечного излучения, что требует их

оптимизации по этому критерию.

Энергия солнечного излучения, поступающая на площадку, имеющую азимутальный угол γ и угол наклона β , определяется по известной формуле:

$$S_k = \sum S_{\Gamma i} [\operatorname{ctg} \varphi_i \cos(\gamma_{ci} - \gamma) \sin \beta + \cos \beta] \quad (3)$$

где $S_{\Gamma i}$ – интенсивность солнечного излучения в i -ый часовой период времени, Вт/м²;

φ_i – угол солнцестояния в i -ый часовой период времени, град.;

γ – азимутальный угол площадки, град.;

γ_{ci} – азимутальный угол Солнца в i -ый часовой период времени, град.;

β – угол наклона площадки, град.

Далее путем дифференциального анализа функции (3) последовательно по γ и β был найден экстремум функции поступления энергии на коллектор, соответствующий критерию оптимальности. Получены оптимальные значения параметров ориентации фиксированного модуля солнечной электростанции, которые определяются следующими формулами:

$$\operatorname{tg} \gamma = \frac{\sum S_{\Gamma i} \operatorname{ctg} \varphi_i \sin \gamma_{ci}}{\sum S_{\Gamma i} \operatorname{ctg} \varphi_i \cos \gamma_{ci}} \quad (4)$$

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{\sum [S_{\Gamma i} \operatorname{ctg} \varphi_i \cos(\gamma_{ci} - \gamma_{\text{опт}})]}{\sum S_{\Gamma i}} \quad (5)$$

В таблице 1 приведены расчетные значения этих параметров для условий Ростовской области.

Таблица 1. Параметры ориентации фиксированной батареи фотоэлектрических преобразователей

Месяц года	Азимутальный угол γ , град.	Угол наклона к горизонту β , град.
Апрель	– 18,5	40,6
Май	– 16,4	31,1
Июнь	– 11,7	27,2
Июль	– 14,3	28,4
Август	– 15,6	35,7
Сентябрь	– 20,7	47,3
Октябрь	– 5,6	57,8

Сравнение поступающей энергии на оптимально фиксированную батарею с параболоческими концентраторами и на батарею, следящую за Солнцем, также подтвердило преимущество

параболоцилиндрических концентраторов.

Так как часть потребителей электрической энергии работают в ночное время, а часть в дневное время, то была принята электростанция с двумя электрохимическими аккумуляторами, работающими в квазибуферном режиме. При этом производственная нагрузка работает только от заряженного аккумулятора, а бытовая нагрузка может получать энергию от заряжаемого аккумулятора и (или) от батареи фотоэлектрических преобразователей. Принципиальная схема управления аккумуляторами приведена на рисунке 6. Такое управление позволяет исключить работу фотоэлектрических преобразователей на электропривод медогонки, что устраняет неблагоприятные режимы работы ФЭП с пусковыми токами.

С учетом режимов работы мощность фотоэлектрических преобразователей и емкость электрохимических аккумуляторов определяется следующей системой уравнений энергетического баланса:

$$\begin{cases} C_A U_{AP} = \sum_j N_{ДПj} t_{ДПj} + \sum_j N_{НБj} t_{НБj} \\ \sum_i N_{СЭi} t_i = \left(\frac{C_A U_{A3}}{\eta_A} + n \sum_j N_{ДБj} t_{ДБj} + (n-1) \sum_j N_{НБj} t_{НБj} \right) k_{ЗАП} \end{cases} \quad (6)$$

где C_A – емкость батареи аккумуляторов, А·ч;

U_{AP} – напряжение разряда аккумулятора, В;

$N_{ДПj}$ – мощность j-го дневного производственного потребителя, Вт;

$t_{ДПj}$ – время работы j-го дневного производственного потребителя в течение суток, час;

$N_{НБj}$ – мощность j-го ночного бытового потребителя, Вт;

$t_{НБj}$ – время работы j-го ночного бытового потребителя в течение суток, час;

$N_{СЭi}$ – мощность солнечной электростанции в i-ый период суток, Вт;

t_i – продолжительность i-го периода суток, час; η_A – к.п.д. аккумулятора;

U_{A3} – напряжение зарядки аккумулятора, В;

$N_{ДБj}$ – мощность j-го дневного бытового потребителя, Вт;

$t_{ДБj}$ – время работы j-го дневного бытового потребителя, час;

$k_{ЗАП}$ – коэффициент запаса мощности;

n – количество дней, предшествующих производственному циклу.

Рабочему циклу заряженного аккумулятора (работа производственных потребителей) будет предшествовать его разрядка на ночные бытовые приборы. С учетом этого, емкость аккумулятора

определяется следующим образом:

$$C_A = \frac{\sum_j N_{ДПj} t_{ДПj} + \sum_j N_{НБj} t_{НБj}}{U_{AP}} \quad (7)$$

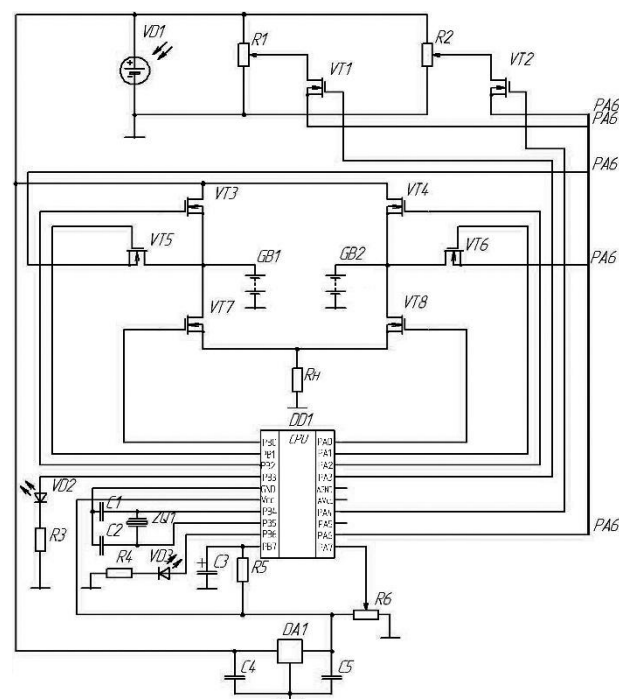


Рис. 6. Схема электрическая принципиальная автономной солнечной электростанции с квазибуферной системой работы аккумуляторов

Мощность батареи фотоэлектрических преобразователей, необходимая для зарядки аккумулятора до требуемой емкости, рассчитывается по второму уравнению системы (6)

$$\sum_i N_{СЭi} = \frac{\left(\frac{C_A U_{A3}}{\eta_A} + n \sum_j N_{ДБj} t_{ДБj} + (n-1) \sum_j N_{НБj} t_{НБj} \right) k_{ЗАП}}{\sum_i t_i} \quad (8)$$

В результате расчетов было установлено, что емкость аккумулятора должна быть не менее 40 А·ч, что позволило выбрать аккумулятор 6СТ-55, емкостью 55 А·ч. Батарея фотоэлектрических преобразователей при этом должна иметь мощность 20 Вт.

В отличие от известных методик расчета мощности топливных электростанций, следует учитывать, что мощность солнечной электростанции зависит от поступающей энергии солнечного излучения.

С учетом этого, площадь фотоэлектрических преобразователей определяется исходя из

следующих положений.

Электроэнергия, вырабатываемая фотоэлектрическими преобразователями, равна:

$$W_{сэ} = nF_{фэп} \eta_c \sum_i N_{сиi} t_i \quad (9)$$

где $N_{сиi}$ – интенсивность солнечного излучения в i -ый период, Вт/м²;

t_i – продолжительность i -того периода, час;

$F_{фэп}$ – площадь фотоэлектрических преобразователей, м².

Учитывая известную зависимость мощности и энергии, получаем:

$$\sum_i N_{сиi} t_i = nF_{фэп} \eta_c \sum_i N_{сиi} t_i. \quad (10)$$

Откуда определяется достаточная площадь батареи фотоэлектрических преобразователей:

$$F_{фэп} = \frac{\sum_i N_{сиi} t_i}{n \eta_c \sum_i N_{сиi} t_i} \quad (11)$$

Так как принято решение использовать фиксированную батарею фотоэлектрических преобразователей в сочетании с параболоцилиндрическим фокусом, то в дальнейших расчетах использовался график гарантированного солнечного излучения на фиксированную площадку с оптимальными параметрами ориентации.

На рисунке 7 приведен график интенсивности солнечного излучения на фиксированную площадку, гарантированной с вероятностью 0,9. При этом принято, что параболоцилиндрический концентратор будет работать только при интенсивности солнечного излучения не более 120 Вт/м², так как при более высоких значениях интенсивности и коэффициенте концентрации 8,5 к.п.д. фотоэлектрического преобразователя снижается из-за перегрева.

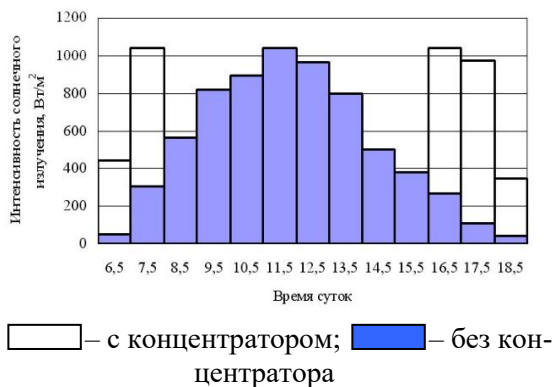


Рис. 7. График интенсивности солнечного излучения на фиксированную батарею ФЭП (сентябрь)

На рисунке 8 приведен график зависимости мощности фотоэлектрических преобразователей от площади батареи.

В соответствии с приведенной интенсивностью солнечного излучения было установлено, что площадь батареи фотоэлектрических преобразователей, вычисленная по условиям достаточности, должна быть не менее 0,4 м² без концентраторов солнечного излучения, и 0,3 м² с применением концентраторов в утренние и вечерние часы.

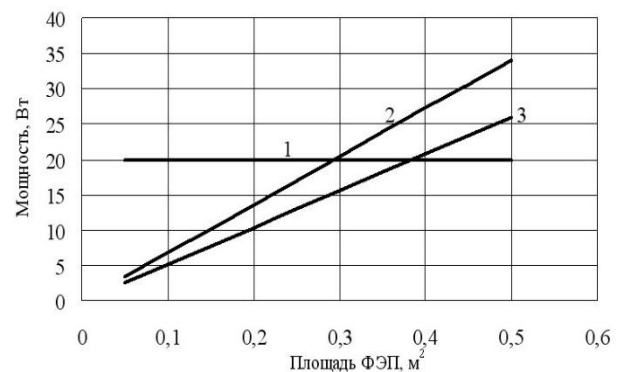


Рис. 8. Зависимость мощности ФЭП от площади солнечных батарей: 1 – требуемая среднесуточная мощность ФЭП; 2 – мощность ФЭП с концентратором солнечной энергии; 3 – мощность ФЭП без концентратора солнечной энергии

Как показали теоретические исследования, аналитическим путем возможно определить режимы работы солнечной электростанции с параболоцилиндрическими концентраторами солнечного излучения только с рядом допущений и упрощений. Это объясняется трудностями получения достоверной аналитической зависимости к.п.д. ФЭП от температуры его поверхности или от интенсивности солнечного излучения на его поверхности.

В этой связи, экспериментальные исследования солнечного модуля были призваны определить его энергетические характеристики при различной интенсивности солнечного излучения (с учетом концентрирования) и различной нагрузке и, при необходимости, уточнить параметры и режимы работы автономной солнечной электростанции, полученные теоретически. Применение для этих целей разнообразных макетов и моделей существенно снизит достоверность и общность полученных данных, так как на форму кривой под концентратором и равномерность облучения фотоприемника оказывают значительное влияние многие конструктивные параметры

(чистота поверхности, однородность коэффициента отражения, параболичность реальной образующей и т.п.). В связи с этим эксперимент проводился на действующем образце солнечного модуля с системой концентрирования солнечного излучения. Внешний вид экспериментальной установки (действующего образца одномодульной солнечной электростанции) показан на рисунке 9.

В установке использовалась следующая контрольно-измерительная база:

- цифровой амперметр тип М830В, чувствительность 1 мкА, класс точности 1,2;
- цифровой вольтметр тип М830В, чувствительность 0,1 мВ, класс точности 0,5;
- цифровой люксметр марки «ТКА–ЛЮКС», класс точности 6%;
- магазин сопротивлений РЗЗ, класс точности 0,2/6·10⁻⁶.



Рис. 9. Экспериментальная установка для снятия характеристик ФЭП

В ходе экспериментальных исследований решались следующие задачи:

- установление зависимости интенсивности солнечного излучения на выходе концентратора (коэффициента концентрации) от точности наведения на Солнце;
- установление зависимостей мощности электроэнергии, генерируемой фотоэлектрическим преобразователем, от интенсивности солнечного излучения, ориентации концентратора и степени концентрирования солнечных лучей;
- проверка адекватности теоретических и экспериментальных результатов исследований влияния концентратора на к.п.д. фотоэлектрического преобразователя при различной освещенности на входе.

Регистрировались следующие зависимые переменные: напряжение на выходе солнечного модуля и ток, протекающий по нагрузке.

Диапазоны варьирования независимых переменных представлены в таблице 2.

Для перехода от освещенности на поверхности солнечного элемента к потоку солнечного излучения, падающего на поверхность солнечного элемента, необходимо знать коэффициент перевода $K_{эс}$, равный:

$$K_{эс} = \frac{\Phi_{э}}{E_c} \quad (12)$$

Расчеты показали, что коэффициент перевода равен $K_{эс} = 1,494 \cdot 10^{-3}$.

Исходя из значений предельной ошибки измерительных приборов и требуемой надежности опытов 0,99 было определено, что минимальное число повторяемости равно 4. Для определения сходимости результатов экспериментальных и теоретических исследований применялся критерий Кохрена.

Таблица 2. Параметры эксперимента

Независимая переменная	Минимальное значение	Максимальное значение	Шаг варьирования	Диапазон варьирования
Интенсивность СИ, Вт/м ² ;	42	845	Нет	803
Сопротивление нагрузки, Ом;	0,3	60	Произвольный	59,7
Коэффициент концентрации;	0	8,5	8,5	8,5
Угол разориентации, град.	0	30	1	30

На рисунке 10 представлены результаты экспериментальных исследований, приведен график функции изменения интенсивности солнечного излучения на выходе концентратора в зависимости от угла разориентации.

Данная зависимость снималась в г. Зернограде 25 мая 2006 года с 12 часов до 13 часов. В это время была ясная погода, освещенность площадки, расположенной перпендикулярно направлению солнечных лучей, составляла 5,75·10⁷ Лк. Это соответствует интенсивности солнечного излучения 845 Вт/м².

Из полученного графика следует, что концентрация прямого солнечного излучения остается практически постоянной при угле разориентации до 5 градусов (коэффициент концентрации

снизился до 8,35, то есть, на 1,7%, что в пределах возможной ошибки, обусловленной погрешностями люксметра и некоторой неадекватностью расчетов параболоцилиндрического концентратора).

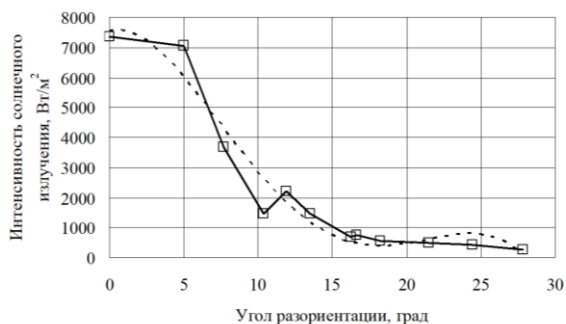


Рис. 10. Экспериментальная зависимость интенсивности солнечного излучения на выходе концентратора

При дальнейшей разориентации концентратора интенсивность солнечного излучения на его выходе уменьшалась и при угле разориентации равном 17° становится равным естественной интенсивности солнечного излучения. Уменьшение концентрации объясняется смещением солнечного излучения к краю выходного отверстия и уменьшением эффективной площади входа, так как плоскость входа концентратора становится неперпендикулярной потоку солнечного излучения.

Таким образом, экспериментальная проверка подтвердила возможность использования фиксированного параболоцилиндрического концентратора.

Полученный экспериментальный график хорошо аппроксимируется полиномом вида:

$$\text{НКСИ} = 7547 - 0,1315\alpha_4 + 7,5645\alpha_3 - 123,22\alpha_2 + 136,74\alpha. \quad (13)$$

В результате эксперимента было установлено, что при пасмурной погоде применение концентратора, направленного на место положения Солнца (диск Солнца скрыт облачностью), позволяет увеличить снимаемую мощность в шесть раз. Экспериментальные результаты работы концентратора при ясной погоде сравнивались с теоретическими предположениями. Проверка по критерию Кохрена показала, что экспериментальные результаты не противоречат теоретическим предпосылкам, на основании чего можно рекомендовать предлагаемую методику расчета параметров солнечной электростанции и

режимы ее работы для практического применения.

При ясной погоде и при низкой освещенности в утренние и вечерние часы применение оптимально фиксированного концентратора позволило увеличить мощность, снимаемую с фотоэлектрических преобразователей в 5–8 раз, то есть получать мощность, равную при работе ФЭП в условиях допустимой освещенности более 350 Вт/м². При достаточно большой интенсивности солнечного излучения фотоэлектрический преобразователь под оптимально фиксированным концентратором перегревается и становится неработоспособным.

Таким образом, применение оптимально ориентированных фиксированных концентраторов эффективно в утренние и вечерние часы в период солнечного сияния и при пасмурной погоде. Это позволит увеличить вырабатываемую энергию за период с апреля по октябрь более чем в два раза. Применение вертикально фиксированных параболических концентраторов выгодно при пасмурной погоде. В условиях Ростовской области это позволит за тот же период получить электроэнергии на 30 – 40% больше. При интенсивности солнечного излучения более 400 Вт/м² любые концентраторы неэффективны, так как либо затеяют, либо перегревают фотоэлектрические преобразователи.

Заключение

На основании анализа проведенных научных исследований и полученных результатов было установлено, что в результате системного анализа статистические законы поступления солнечной энергии показали, что в утренние и вечерние часы интенсивность солнечного излучения снижается в 7–9 раз, а при пасмурной погоде в 4 – 5 раз. Это требует концентраторов солнечного излучения с соответствующим коэффициентом концентрации.

Параметры ориентации фиксированных батарей фотоэлектрических преобразователей зависят от прозрачности атмосферы, причем эта зависимость имеет максимальный экстремум. Установлено, что для условий Юга России (Ростовская область) фиксированные батареи ФЭП должны иметь отрицательный азимутальный угол и соответствующий угол наклона. Это объясняется тем, что по многолетней статистике атмосфера над этой территорией более прозрачна в первой половине дня. Сравнительный анализ систем концентрирования солнечного излучения

и систем слежения за Солнцем показал, что более эффективны оптимально ориентированные фиксированные параболоцилиндрические концентраторы. Вырабатываемая электроэнергия в этом случае может быть увеличена в 1,45 раза за счет использования рассеянного излучения. Применение параболоцилиндрических концентраторов эффективно в утренние и вечерние часы и при пасмурной погоде. При ясной погоде применение любых концентраторов неэффективно из-за недопустимого перегрева фотоэлементов.

Также было установлено, что поступление солнечной энергии находится в значительной корреляционной связи с потреблением электроэнергии, что должно учитываться при оптимизации параметров автономной солнечной электростанции. С учетом этого определено, что оптимальная площадь батарей фотоэлектрических преобразователей для передвижной пасеки на 20–25 ульев составляет 0,3 м², а емкость аккумуляторных батарей 2 х 55 А·ч. Вероятность энергообеспечения при этом будет не ниже 0,9. Предлагаемая автономная электростанция допускает, при обеспечении высокой надежности электрообеспечения, снижение площади батарей фотоэлектрических преобразователей на 25% и уменьшение за счет этого стоимости электроэнергии с 5,2 руб./кВт·ч до 4,25/ руб./кВт·ч. Это обеспечивает ее высокую конкурентоспособность.

Также очевидно, что по сравнению с другими автономными системами электроснабжения солнечные электростанции обладают абсолютной экологической чистотой и значительно уменьшают выбросы вредных веществ и углекислого газа, образуемые при работе традиционных углеводородных источников генерации.

Список литературы

1. Использование генерирующих установок на основе солнечных электростанций для обеспечения потребителей Крыма // Скрипник Е.М., Кувшинов В.В., Борисов Б.Е., Меджитов М.Р. / Энергетические установки и технологии. 2023. Т. 9. № 4. С. 31-35.
2. Солнечные энергетические системы для частных потребителей // Кувшинов В.В., Юфев Л.Ю., Аль-Малики М.Н.К. / Электротехнологии и электрооборудование в АПК. 2024. Т. 71. № 3 (56). С. 111-120.
3. Таран А.А. Параметры автономной системы электроснабжения на основе солнечной электростанции / С.М. Воронин, А.А. Таран // Механизация и электрификация сельского хозяйства. –

2007. – № 3. С. 24–25.
4. Разработка методики контроля параметров фотоэлектрических преобразователей // Крит Б.Л., Федотикова М.В., Могильная Т.Ю., Горожеев М.Ю., Петелин Н.А., Бабенков И.А., Пагава Л.Л., Кувшинов В.В., Морозова Н.В. / Приборы. 2023. № 2 (272). С. 42-46.
5. Таран А.А. Анализ вариантов автономных солнечных электростанций / С.М. Воронин, А.А. Таран // Электротехнологии и электрооборудование в сельскохозяйственном производстве. Сборник научных трудов. АЧГАА. Зерноград – 2007. – С. 49–55.
6. Использование основных элементов солнечных электрических станций для повышения эффективности генерации // Кувшинов В.В., Давиденко Е.Н., Бордан Д.Ф., Березняк В.А., Артеменко И.Д. / Энергетические установки и технологии. 2023. Т. 9. № 1. С. 56-62.

References

1. The use of generating plants based on solar power plants to provide consumers in Crimea // Skripnik E.M., Kuvshinov V.V., Borisov B.E., Medzhitov M.R. / Power plants and technologies. 2023. Vol. 9. No. 4. pp. 31-35.
2. Solar energy systems for private consumers // Kuvshinov V.V., Yuferev L.Yu., Al-Maliki M.N.K. / Electrical engineering and electrical equipment in the agro-industrial complex. 2024. Vol. 71. No. 3 (56). pp. 111-120.
3. Taran A.A. Parameters of an autonomous power supply system based on a solar power plant / S.M. Voronin, A.A. Taran // Mechanization and electrification of agriculture. – 2007. – No. 3. Pp. 24–25.
4. Development of a method for monitoring the parameters of photovoltaic converters // Krit B.L., Fedotikova M.V., Mogilnaya T.Yu., Gorozheev M.Yu., Petelin N.A., Babenkov I.A., Pagava L.L., Kuvshinov V.V., Morozova N.V. / Devices. 2023. No. 2 (272). Pp. 42-46.
5. Taran A.A. Analysis of options for autonomous solar power plants / S.M. Voronin, A.A. Taran // Electrotechnologies and electrical equipment in agricultural production. Collection of scientific papers. ACGAA. Zernograd – 2007. – P. 49–55.
6. The use of the main elements of solar power plants to increase the efficiency of generation // Kuvshinov V.V., Davidenko E.N., Bordan D.F., Berenziak V.A., Artemenko I.D. / Energy Plants and Technologies. 2023. V. 9. No. 1. P. 56-62.

УДК 621.311.92

Использование солнечных батарей для электроснабжения фермерского хозяйства

Халиляев А.Э.¹, Абдурахманов Р.Н.¹, Бекиров Э.А.¹, Шевчук А.А.²¹ ФГАОУ ВО «Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского», Физико-технический институт, г. Симферополь, 295007, Россия² ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», Севастополь, 299053, Россия
Amett009988@gmail.com rechatfor@gmail.com

Статья поступила 25.11.2025 г.; после доработки 26.11.2025 г.

Аннотация

В статье рассматриваются вопросы применения солнечных энергоустановок малой мощности для электроснабжения сельскохозяйственных предприятий. Проанализированы основные технико-экономические аспекты интеграции фотоэлектрических систем в существующую энергоинфраструктуру агропромышленного комплекса. На основе анализа литературных источников доказывается перспективность использования возобновляемых источников энергии для повышения энергоэффективности и энергонезависимости сельскохозяйственных объектов.

Ключевые слова: солнечная энергетика, энергоустановка альтернативной энергетики, сельскохозяйственное предприятие, электроснабжение, возобновляемые источники энергии (ВИЭ).

Use of solar panels for power supply of a farm enterprise

Khalilyaev A.E.¹, Abdurakhmanov R.N.¹, Bekirov E.A.¹, Shevchuk A.A.²¹ V.I. Vernadsky Crimean Federal University, Physics and Technology Institute, Simferopol, 295007, Russia² Sevastopol State University, Sevastopol, 299053, Russia
Amett009988@gmail.com rechatfor@gmail.com

Received 25.11.2025 y.; Received in final form 26.11.2025 y.

Abstract

This paper discusses the application of small-scale solar power installations for the power supply of agricultural enterprises. The key techno-economic aspects of integrating photovoltaic systems into the existing energy infrastructure of the agro-industrial complex are analyzed. Based on a review of literature sources, the study substantiates the viability of utilizing renewable energy sources to enhance the energy efficiency and energy independence of agricultural facilities.

Keywords: solar energy, alternative energy installation, agricultural enterprise, power supply, renewable energy sources (RES).

Введение

Современные сельскохозяйственные предприятия сталкиваются с множеством требований. С каждым годом необходимо увеличивать объемы производства, улучшать условия содержания скота. Все это приводит к увеличению затрат производства и повышенному энергопотреблению. Качество энергопередачи в сельских районах значительно ниже. Частые перебои в

электроэнергии исключают возможность стабильной круглогодичной работы, а иногда и способны понизить качество конечного продукта [1]. Сейчас агропромышленный комплекс (АПК) для автономной работы используют дизельгенераторы [1]. Однако это решение в перспективе является абсолютно не выгодным. Большой расход топлива, высокие цены на него, условий хранения, а также налаженная логистика, чтобы топливо не закончилось. Солнечная энергетика,

являясь перспективным направлением энергетики может нивелировать все трудности с которыми сталкиваются АПК [2].

В данной работе теоретически рассчитывается и анализируется использование солнечной энергетики для бесперебойной работы сельскохозяйственного предприятия.

Основная часть

Для исследования работы энергоустановок альтернативной энергетики и анализа их работы в сельском хозяйстве была взята теоретическая модель АПК, основанная на рекомендациях и проектах типовых зданий [3,4], рассчитано энергопотребление данного объекта сельскохозяйственного производства, а также исследована практическая выгода использования энергии СЭУ, расположенных на территории объекта.

Теоретическая модель сельскохозяйственного предприятия состоит из коровника, расположенного в Симферопольском районе, рассчитанного на 50 голов. Помещение состоит из стандартных материалов.

Материалы [3,4]:

- Стены: Неутепленные бетонные панели или кирпич ($k = 1.5 \text{ Втм}^2\text{°С}$).
- Потолок: Железобетон с минимальной изоляцией ($k = 1.2 \text{ Втм}^2\text{°С}$).
- Пол: Бетонный, без подогрева ($k = 0.7 \text{ Втм}^2\text{°С}$).
- Окна/ворота: Деревянные, слабо утепленные ($k = 2.5 \text{ Втм}^2\text{°С}$).

Площадь коровника составляет [3]:

- Стены: 225 м²
- Пол/потолок: 350\ м²
- Окна, двери: 16,875 м²
- Инфильтрация – 30% [5].

Рекомендуемые температуры для коровника (t_n) [6, 7]:

- Зима: 13 °С
- Весна: 15 °С
- Лето: 17 °С
- Осень: 14 °С

Усредненные данные температур за сезон показаны на графике (Рис.1). Расчет мощности необходимой для нагрева помещения выполняется по формуле (1) и показан на графике (Рис.2). Для расчета мощности рассчитана разность температур между рекомендуемыми и реальными ($t_{\text{реал.}}$) [8] по формуле (2).

$$P_{\text{наг.}} = \sum (S_i * k_i) * \Delta t, \quad (1)$$

$P_{\text{наг.}}$ – мощность, Вт ;

S_i – площадь поверхности, м² ;

k_i – коэффициент теплопроводности материала, $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2\text{°С}}$;

Δt – разность температур (2), °С ;

$$\Delta t = t_n - t_{\text{реал.}} \quad (2)$$

t_n – Рекомендуемая температура помещения [5, 6], °С ;

$t_{\text{реал.}}$ – Реальная температура помещения, °С

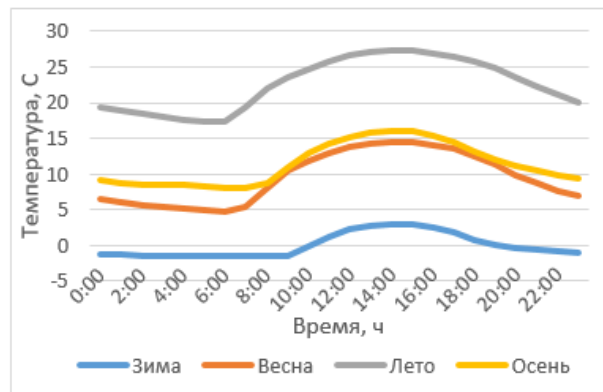


Рис. 1. Суточное изменение температур

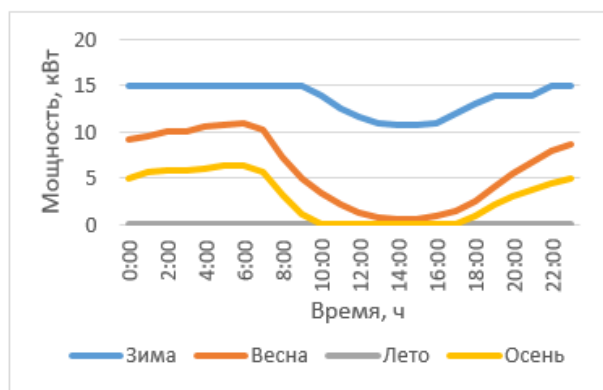


Рис. 2 Мощность необходимая на отопления

Суммарная потребляемая мощность предприятием вычисляется по формуле (4). Полученные расчетные данные, усредненные за сутки в различных сезонах показаны на графике (Рис. 3).

$$P_{\text{сум.}} = \sum P_i + P_{\text{наг.}}, \quad (4)$$

$P_{\text{сум.}}$ – суммарная мощность потребления предприятием, Вт

P_i – мощность, потребляемая отдельными приборами, Вт

Теоретическая модель АПК располагается на территории Республики Крым. Тип крыши двускатная и расположена одним из скатов на юг. На данную площадь размещаются солнечные панели в количестве 63шт типа SIM500-24-16BB-TOPCon (Two Power) номинальной мощностью 500 Вт, размер 1909 * 1134 * 35 мм.

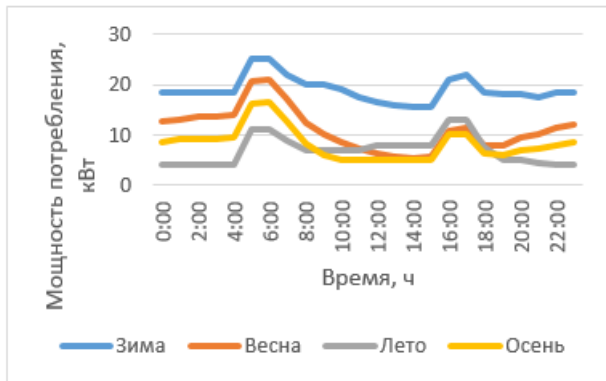


Рис. 3 Мощность, потребляемая предприятием за сутки

Для преобразования постоянного тока в переменный используется инвертор SILA ULTRA 11000MHTD в количестве 3 штук номинальной мощностью 11кВА. Источником электроэнергии в ночное время и пасмурные часы является аккумуляторные батареи SILAsolution LFP24-230 в количестве 24 шт. [9]. На рисунке (4) показаны блок схема электроснабжения 1 модуля солнечных панелей [10,11].

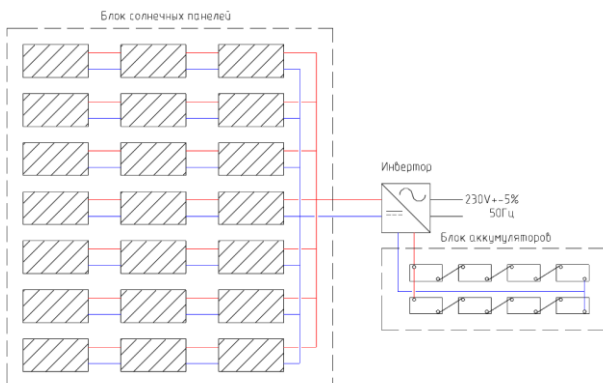


Рис. 4 Блок схема фотоэлектрической системы для электропитания фермы

Определение вырабатываемой мощности солнечными панелями находятся по формуле:

$$P_{pv} = P_{н\text{ пан.}} * I * n, \quad (3)$$

P_{pv} – Мощность, выработанная панелями.

Вт

$P_{н\text{ пан.}}$ – Номинальная мощность панели.

I – Солнечная инсоляция, $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$

n – Количество панелей.

Данные суточной инсоляции в Симферопольском районе показаны на рисунке (Рис.5) и получены из метеорологических исследований

[8]. Вырабатываемая мощность солнечной электростанцией СЭС предоставлены на графике (Рис.6).

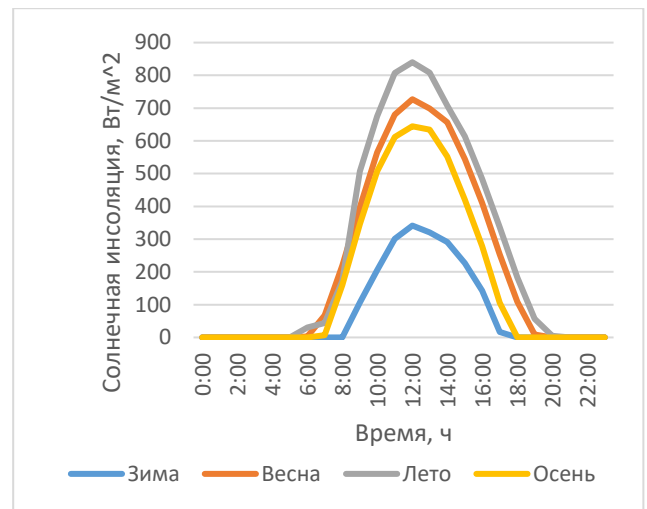


Рис. 5 Солнечная инсоляция за сутки

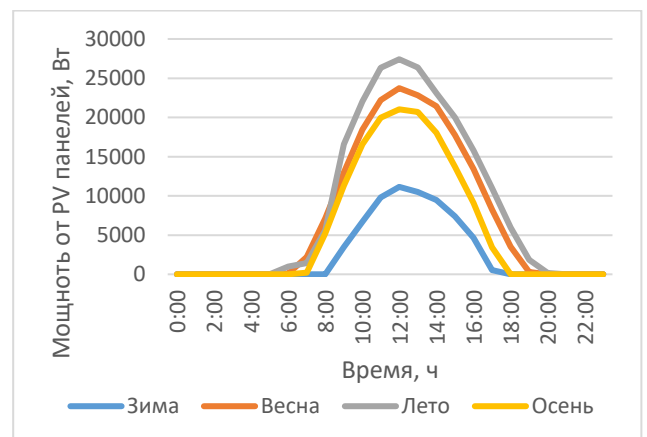


Рис. 6 Мощность от солнечных батарей за сутки

Рассчитана выработка от СЭУ и АКБ с учетом КПД инвертора (5). Также подсчитаны мощности полного потребления (6) с учетом мощности, потраченной на заряд АКБ и КПД инвертора. По полученным данным были составлены усредненные графики вырабатываемой электроэнергии СЭУ и потребляемой АПК в сутки за сезон.

$$P_{\text{выр. об.}} = (P_{\text{пан.}} + (I_{\text{раз.}} * U_{\text{ном.}})) * \eta_{\text{инв.}}, \quad (5)$$

$P_{\text{выр. об.}}$ – общая мощность, выработанная энергоустановкой

$I_{\text{раз.}}$ – ток разряда аккумуляторных батарей,

А

$$P_{\text{пот. об.}} = P_{\text{сум.}} + (I_{\text{зар.}} * U_{\text{ном.}}), \quad (6)$$

$P_{\text{пот. об.}}$ – общая мощность потребления

Исходя из графиков можем сделать вывод, что наша установка альтернативной энергетики перекрывает потребность производства в весенний и осенний периоды на 60 и 66 процентов (Рис. 7, Рис. 8), в летний на 92 процента (Рис. 9). Однако в зимний период из-за больших потреблений электроэнергии на отопление и малой солнечной инсоляции система не эффективна и покрывает потребление лишь 13 процентов (Рис. 10). Данная система повысит эффективность если для отопления промышленного помещения использовать природный газ или установить помимо pv панелей также солнечные коллекторы [12, 13].

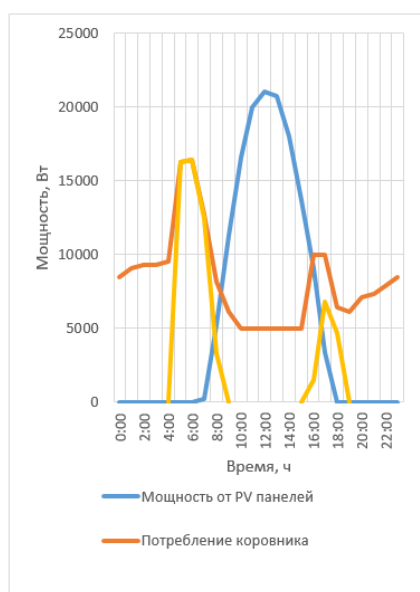


Рис. 7. График потребления и выработки электроэнергии (весенний период)

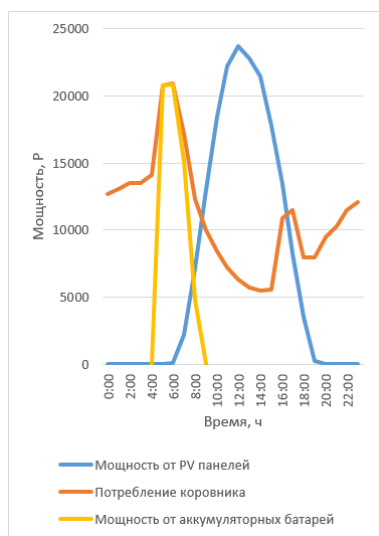


Рис. 8. График потребления и выработки

По подсчитанным данным во все сезоны кроме зимнего имеем значительный запас мощности превышающий потребление в несколько раз однако в небольшой период времени. В моменты, когда выработка электрической энергии превышает потребление предприятия направим свободную энергию на заряд АКБ, а в моменты, когда мощности выработанной солнечными панелями будет не достаточно для полной автономной работы предприятия будут подключаться заряженные АКБ.

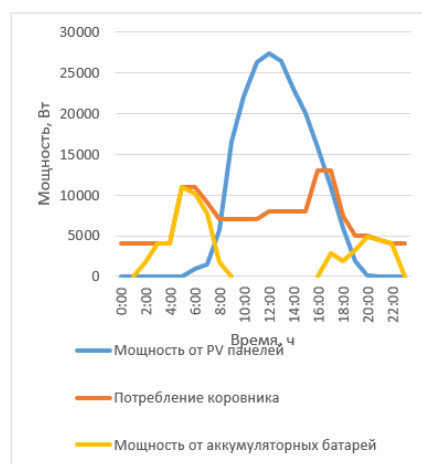


Рис.9. График потребления и выработки электроэнергии (летний период)
электроэнергии (осенний период)



Рис. 10. График потребления и выработки электроэнергии (зимний период)

Вывод

В ходе исследования теоретически смоделировали АПК, рассчитали потребления данного предприятия. Представили схему работы СЭУ и

просчитали выработку данной установки в разное время года. Сравнили и проанализировали выгодность установки систем солнечной энергетики в Республике Крым для сельскохозяйственных объектов.

Список литературы

1. Чекемес, Ю. Т. О возможности использования альтернативных топлив в ДВС сельскохозяйственного назначения / Ю. Т. Чекемес; Кубанский гос. аграрный ун-т. — 1–2с.
2. Амерханов, Р. А. Особенности использования и развития возобновляемой энергетики в Краснодарском крае / Р. А. Амерханов, А. С. Кириченко, А. А. Куничкина, Ю. Л. Муртазаева // Вестник аграрной науки Дона. — 2015. — 29 с.
3. Коровник на 200 коров привязного содержания (в местных строительных материалах) : типовой проект 801-2-50.85 : альбом I : архитектурно-строительные решения. Конструкции деревянные / разраб. ин-та "Горьковгипросельхозстрой". — Утв. техн. советом ин-та 12.10.84. — Горький : [б. и.], 1985. — 3–6 с.
4. Войтюк, М. М. Проектно-технологические решения для малых животноводческих ферм : справочник / М. М. Войтюк, П. Н. Виноградов, О. П. Мачнева, В. И. Стяжкин ; Министерство сельского хозяйства Российской Федерации, Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Российский научно-исследовательский институт информации и технико-экономических исследований по инженерно-техническому обеспечению агропромышленного комплекса» (ФГБНУ «Росинформагротех»). — Москва : ФГБНУ «Росинформагротех», 2021. — 202–207 с.
5. Шилов, С. Оптимизация микроклимата в помещении для коров в холодное время года / С. Шилов // Комбикорма. — 2021. — № 3. — 38–39 с.
6. Об утверждении ветеринарных правил содержания крупного рогатого скота в целях его воспроизводства, выращивания и реализации : приказ Минсельхоза России от 13 декабря 2016 г. № 551 (зарег. 07 апреля 2017 г.) // Российская газета. — 2017.
7. Малявина, Е. Г. Теплопотери здания : справочное пособие / Е. Г. Малявина. — Москва : АВОК-ПРЕСС, 2007. — 42–46 с.
8. PVGIS – Photovoltaic Geographical Information System // European Commission, Joint Research Centre (JRC). — URL: https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/.
9. Солнечные электростанции для дома и бизнеса – SILA Energy. — URL: <https://sila-solarpanel.ru/>.
10. Ханаев В. В. Вопросы эффективности применения гелиосистем малой мощности / 2015 — 100–104 с.
11. Лештаев О. В. Обеспечение качества электроэнергии у сельскохозяйственных потребителей

при электроснабжении от солнечной электростанции параллельно с централизованной сетью / О. В. Лештаев, Н. А. Стушкина // Агротехника и энергообеспечение. — 2021. — № 1 (30). — 66 с.

12. Виссарионов В. И. Солнечная энергетика : учебное пособие / В. И. Виссарионов, Г. В. Дерюгина, В. А. Кузнецова, Н. К. Калинин. — Москва : Изд-во МЭИ, 2008. — 156–161 с.
13. Харченко Н. В. Индивидуальные солнечные установки / Н. В. Харченко. — Москва : Энергоатомиздат, 1991. — 8–22

References

1. Chekemes, Yu. T. "On the possibility of using alternative fuels in agricultural internal combustion engines," Kuban State Agrarian University, pp. 1–2.
2. Amerkhanov, R. A., Kirichenko, A. S., Kunichkina, A. A., & Murtazaeva, Yu. L. "Features of the use and development of renewable energy in the Krasnodar Territory," Bulletin of Agrarian Science of Don, 2015, p. 29.
3. "Barn for 200 cows with tethered housing (using local building materials): Standard project 801-2-50.85: Album I: Architectural and construction solutions. Wooden structures," Developed by Gorkovgiproselkhozstroy Institute, Approved by the Technical Council of the Institute on Oct 12, 1984. Gorky, 1985, pp. 3–6.
4. Voytyuk, M. M., Vinogradov, P. N., Machneva, O. P., & Styazhkin, V. I. Design and technological solutions for small livestock farms: Handbook. Ministry of Agriculture of the Russian Federation, FSBSI "Rosinformagrotekh". Moscow: Rosinformagrotekh, 2021, pp. 202–207.
5. Shilov, S. "Optimization of microclimate in a room for cows in the cold season," Kombikorma [Compound Feeds], no. 3, 2021, pp. 38–39.
6. "On approval of veterinary rules for keeping cattle for the purposes of reproduction, rearing, and realization: Order of the Ministry of Agriculture of Russia dated December 13, 2016, No. 551 (registered April 7, 2017)," Rossiyskaya Gazeta, 2017.
7. Malyavina, E. G. Heat losses of a building: Reference guide. Moscow: AVOK-PRESS, 2007, pp. 42–46.
8. "PVGIS – Photovoltaic Geographical Information System," European Commission, Joint Research Centre (JRC). [Online]. Available: https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/.
9. "Solar power plants for home and business," SILA Energy. [Online]. Available: <https://sila-solarpanel.ru/>.
10. Khanaev, V. V. "Issues of efficiency of application of low-power solar systems," 2015, pp. 100–104.
11. Leshtayev, O. V., & Stushkina, N. A. "Ensuring power quality for agricultural consumers when powered by a solar power plant in parallel with the centralized grid," Agrotechnics and Energy Supply, no.

- 1 (30), 2021, p. 66.
12. Vissarionov, V. I., Deryugina, G. V., Kuznetsova, V. A., & Malinin, N. K. Solar energy: Study guide. Moscow: MEI Publishing House, 2008, pp. 156–161.
 13. Kharchenko, N. V. Individual solar installations. Moscow: Energoatomizdat, 1991, pp. 8–22.

ТЕХНОСФЕРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ (В ЭНЕРГЕТИКЕ)

УДК 621.039.5:699.841:624.042.8

**Исследование технологий искусственного интеллекта в
мошенничестве**Е.А. Контылева¹, С.А. Маврин¹¹ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»,
Университетская, 33, г. Севастополь, 299053, Россия, eakontyleva@sevsu.ru

Статья поступила 10.11.2025 г.; после доработки 15.11.2025 г.

Аннотация

Исследование фокусируется на разработке системы для детектирования синтезированной речи, применимой для задач информационной безопасности, в том числе в энергетической отрасли. Предлагается архитектура, основанная на извлечении акустических признаков LFCC и CQCC и их обработке с помощью рекуррентной нейронной сети BiLSTM. В рамках работы проведен анализ существующих библиотек голосового синтеза и сформирован обучающий датасет. Эффективность разработанной системы оценивалась с использованием метрик EER и minDCF. Полученные результаты демонстрируют высокую точность выявления поддельных голосовых записей, что критически важно для противодействия голосовому мошенничеству.

Ключевые слова: кепстральные коэффициенты, алгоритм, голос, речь, нейронная сеть, методы синтеза.

Research on the use of artificial intelligence technologies in fraudE.A. Kontyleva¹, S.A. Mavrin¹¹Sevastopol State University, 33 Universitetskaya st., Sevastopol, 299053, Russia,
eakontyleva@sevsu.ru

Received 10.11.2025 y.; received in final form 15.11.2025 y.

Abstract

The study focuses on developing a system for detecting synthesized speech, which can be used for information security tasks, including in the energy industry. The proposed architecture is based on extracting acoustic features such as LFCC and CQCC and processing them using a BiLSTM recurrent neural network. The study analyzes existing voice synthesis libraries and creates a training dataset. The effectiveness of the developed system is evaluated using the EER and minDCF metrics. The results demonstrate high accuracy in detecting fake voice recordings, which is crucial for countering voice fraud.

Keywords: kepsral coefficients, algorithm, voice, speech, neural network, synthesis methods.

Введение

Современный технологический прогресс, в частности в области искусственного интеллекта, значительно расширил возможности синтеза речи. Обучение моделей для генерации поддельных голосов может потребовать минимального объема данных (всего несколько предложений), что приводит к созданию имитаций, практически

неотличимых от оригинальных для неспециалиста. Подобное клонирование голоса представляет собой значительную угрозу, способную повлечь за собой серьезные негативные последствия, включая крупномасштабные финансовые потери и компрометацию персональных данных. Непрерывное совершенствование алгоритмов подделки голоса исключает возможность разра-

ботки универсального детектора синтезированной речи [1]. Точность существующих на данный момент алгоритмов обнаружения является субоптимальной и в значительной степени коррелирует с качеством используемых обучающих наборов данных. В свете вышеизложенных факторов, задача идентификации синтезированной речи сохраняет свою актуальность в контексте обеспечения информационной безопасности.

Постановка задачи

Исследовать существующие и потенциальные угрозы, связанные с использованием клонирования голоса, TTS и синтезированной речи в мошеннических схемах, и разработать рекомендации по их нейтрализации.

Проведенные исследования

Процесс исследования в области распознавания голоса включает два ключевых этапа:

1. Извлечение признаков (коэффициентов).
2. Выбор модели нейронной сети.

Первый этап. На этом этапе аудиозапись преобразуется в числовое представление, которое затем используется для идентификации говорящего. Наиболее распространенным способом является использование кепстральных коэффициентов [2]. Эти коэффициенты содержат ценную информацию о характеристиках голоса, таких как форма речевого тракта. Существует множество способов расчета этих коэффициентов.

Для решения поставленной задачи было принято решение комбинировать два типа коэффициентов: линейные частотные кепстральные коэффициенты (LFCC), как описано в источнике, и постоянные Q-кепстральные коэффициенты (CQCC) [3]. Выбор CQCC обусловлен его новизной и высокой эффективностью. Исследования показали, что CQCC превосходят другие методы извлечения спектральных признаков по точности определения синтезированной речи. Увеличение количества используемых кепстральных коэффициентов, как правило, улучшает общую производительность системы. Анализ существующих комбинаций коэффициентов выявил, что сочетание LFCC и CQCC является наиболее часто используемым и эффективным, что и послужило основанием для его выбора.

Второй этап. На этом этапе определяется алгоритм машинного обучения, который будет обрабатывать извлеченные признаки. Исследование показало, что наиболее подходящей архитектурой является двунаправленная нейронная сеть с долговременной и кратковременной памятью

(BiLSTM). BiLSTM представляет собой усовершенствованную версию стандартной LSTM [4, 5]. Важно отметить, что применение BiLSTM для обучения моделей распознавания голоса встречается реже, чем использование более распространенных сверточных нейронных сетей. Кроме того, ранее не проводилось обучение моделей с использованием именно предложенной комбинации коэффициентов (LFCC и CQCC).

Наш подход предполагает использование синтезированного человеческого голоса для обучения нейронной сети. Это обуславливает потребность в наборе данных, включающем голоса, полученные различными методами синтеза. В рамках данного исследования мы провели анализ доступных открытых библиотек для клонирования голоса с целью формирования такого набора данных. Были выбраны пять наиболее перспективных инструментов с открытым исходным кодом, способных генерировать или переобучаться на русском языке. Тестирование каждого инструмента проводилось на оборудовании с графическим процессором AMD Radeon 5700 XT (8 ГБ).

Таблица 1. Сравнение библиотек синтеза речи

Название	Алгоритм	Поддерживаемые языки	Качество клонирования
Дескрипт	MEL-GAN	Английский	Высокое
Клонирование голоса в реальном времени	SV2TTS	Английский	Средний
Мульти-такотронное голо-совое клонирование	SV2TTS	Русский	Средний
Ассемблер	SV2TTS	50 языков	Высокий

Современные технологические возможности достигли уровня, позволяющего воссоздавать голос человека, имея в распоряжении всего около пяти секунд его оригинального звучания. Тем не менее, сокращение продолжительности исходной записи неизбежно ведет к снижению качества синтезированного голоса. В рамках данного исследования это ухудшение было оценено путем субъективного прослушивания. Исходя из этого, можно заключить, что клонирование голоса в реальном времени является достаточно сложным процессом. Однако, когда речь идет о более продолжительных временных отрезках, например, около часа, отличить такой

синтезированный голос от подлинного становится весьма затруднительно.

Что касается качества синтезированного звука, то алгоритм MELGAN продемонстрировал наилучшие результаты, обеспечив наиболее приятное для человеческого уха звучание. Поэтому от голосов, синтезированных с помощью этого алгоритма, следует ожидать наименьшей вероятности их распознавания как искусственных. Учитывая уникальные преимущества каждого из представленных алгоритмов, было принято решение задействовать их все для обучения разработанной нами системы. Такой комплексный подход позволит значительно повысить точность обнаружения фальшивых голосов.

После создания набора данных он будет распределен следующим образом: 25% для обучения, 25% для отладки и 50% для финальной оценки. В качестве основы для MVP1 системы распознавания синтезированного голоса мы выбрали англоязычный набор данных ASVspoof 2019 challenge. Его популярность в качестве обучающей выборки для множества существующих алгоритмов обеспечивает возможность прямого и объективного сравнения нашего алгоритма с аналогами по ключевым метрикам. Хотя мы исследовали множество наборов данных для задачи определения синтезированного голоса, все они оказались на иностранных языках.

Обучение и проверка моделей распознавания речи требуют наличия разнообразных русскоязычных голосовых данных. Однако, на данный момент, в открытом доступе нет подходящих русскоязычных датасетов, содержащих синтезированную речь.

В связи с этим, для оценки эффективности наших алгоритмов распознавания синтезированного голоса, мы разработали англоязычный набор данных. Он был сформирован на базе Common Voice Corpus 10.0 от Mozilla, предоставляющего более 2000 часов верифицированной речи в формате mp3, с разбивкой по возрасту и полу говорящих. В отличие от многих других датасетов, которые зачастую опираются на аудиокниги, публичные выступления или контент с YouTube, наш выбор обусловлен необходимостью включения "живой" речи, а не только зачитанных текстов.

Для генерации синтезированных образцов мы применили существующие алгоритмы клонирования голоса к аудиозаписям из выбранного датасета. Важным аспектом при формировании набора стало обеспечение его сбалансированности по половому признаку, чтобы избежать доминирования голосов одного пола.

Для целей создания и обучения собственной модели будет подготовлен русскоязычный датасет. Этот набор данных будет включать аудиозаписи продолжительностью 3-10 секунд, полученные путем анализа и частичного клонирования существующих голосов. Для обеспечения эффективности обучения, датасет должен соответствовать следующим требованиям:

- Русскоязычные аудиозаписи длительностью 3-10 секунд.
- Сбалансированное представительство мужских и женских голосов.
- Не менее 60% синтезированных голосов.
- Разнообразие алгоритмов синтеза, использованных для создания синтезированных голосов.
- Частота дискретизации не ниже 16 кГц

Блок-схема алгоритма предлагаемой системы представлена на рисунке 1.

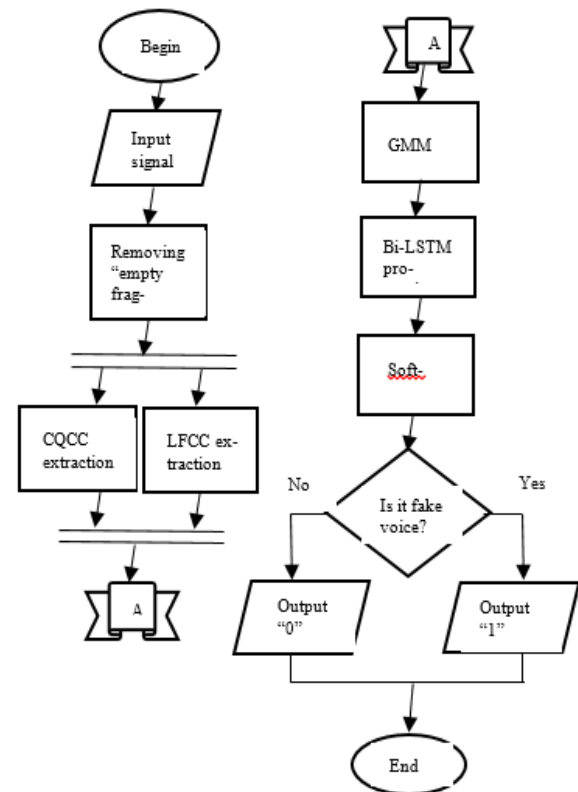


Рис. 1. Блок-схема алгоритма программы

Система принимает на вход аудиофайл .wav, проводит его предварительную очистку от тишины и преобразует в меловую спектрограмму. Параллельно извлекаются спектральные признаки LFCC и CQCC. Для определения синтезированности голоса применяется инновационный подход: сначала осуществляется кластеризация данных с помощью GMM [6], а затем

нейронная сеть BiLSTM классифицирует полученные кластеры. Такой метод выбран из-за его способности выявлять более абстрактные и значимые скрытые закономерности, игнорируя при этом шум, что делает его более эффективным, чем прямая классификация отдельных аудиофрагментов.

Для определения того, насколько хорошо работает архитектура, мы будем использовать две ключевые метрики: Equal Error Rate (EER) [7] и Minimum Detection Cost Function (minDCF). Расчет этих метрик будет соответствовать методологии, представленной на конференции ASVspoof 2019.

EER (Equal Error Rate) – это метрика, позволяющая оценить общее количество ошибок, допускаемых алгоритмом. Она определяется как точка, где вероятность ложного отказа (FRR), то есть когда настоящий голос ошибочно классифицируется как синтезированный, равна вероятности ложного принятия (FAR), то есть когда синтезированный голос ошибочно принимается за настоящий. Однако EER имеет свои ограничения. Он не учитывает ситуации, когда минимизация ложного принятия (низкий FAR) является более приоритетной задачей, чем минимизация ложного отказа (низкий FRR). Это особенно актуально для систем аутентификации с повышенными требованиями к безопасности. В таких случаях более целесообразно использовать функцию стоимости обнаружения (DCF). Эта функция рассчитывается $DCF = PFR \cdot C_{FR} + PFA \cdot C_{FA} \cdot (1 - Pt)$. Здесь C – это пользовательская функция, которая назначает веса ошибкам FA и FR в соответствии с их важностью. Pt – это предварительная вероятность того, что голос принадлежит целевому пользователю, а PFR и PFA – это апостериорные вероятности ошибок FR и FA , рассчитанные при заданных параметрах.

Варьируя этот параметр, мы можем определить наименьшее возможное значение DCF, которое называется минимальной DCF (minDCF). В данном случае для системы были выбраны параметры $C_{FA}=1$ и $C_{FR}=10$.

Для облегчения использования и повышения доступности, разработка была интегрирована в Telegram в виде чат-бота. Пользователь отправляет аудиозапись, которую бот передаёт модели для анализа. Затем результат анализа возвращается пользователю через чат-бота.

В рамках данной работы был проведен сравнительный анализ существующих библиотек для клонирования голоса, по итогам которого были

отобраны пять наиболее эффективных. На основе общедоступного набора данных Common Voice Corpus 10.0 от Mozilla и выбранных библиотек был сформирован англоязычный датасет, служащий для валидации синтезированных алгоритмов распознавания голоса. Далее предложена блок-схема программного алгоритма, реализующего параллельное извлечение спектральных признаков LFCC и CQCC.

Для определения результативности архитектуры были разработаны и предложены две метрики: EER и minDCF.

В завершение работы была осуществлена интеграция разработанной модели с чат-ботом, функционирующим в Telegram.

Заключение

В данной работе представлена архитектура системы для распознавания речи. Мы также формулируем требования к набору данных для обучения нейронной сети и проводим обзор открытых библиотек, которые могут быть использованы для его формирования.

Цель реализации – создать систему, способную с высокой точностью идентифицировать синтезированную речь и обучаться на русскоязычных данных.

Предполагается, что система покажет превосходные результаты при распознавании синтезированного голоса. Однако, из-за ограничений архитектуры BiLSTM, ее эффективность на симулированном голосе будет снижена. В перспективе, эта проблема может быть устранена путем интеграции с системой, оптимизированной для распознавания симулированного голоса.

Дальнейшие шаги включают в себя практическую реализацию, тестирование, оценку и сравнение производительности системы с существующими решениями. После успешного внедрения, система может быть интегрирована в другие информационные платформы, например, для аутентификации голоса в реальном времени при общении по телефону или в мессенджерах.

Список литературы

1. Чагдуров, О. Б. Методы подделки речи / О. Б. Чагдуров // Электронные средства и системы управления. Материалы докладов Международной научно-практической конференции. – 2024. – № 1-2. – С. 40-41.
2. Судьенкова, А. В. Обзор методов извлечения акустических признаков речи в задаче распознавания диктора / А. В. Судьенкова // Сборник

- научных трудов Новосибирского государственного технического университета. – 2019. – № 3-4(96). – С. 139-164.
3. Пономарев, К. Г. Актуальные угрозы голосовых дипфейков для интернета вещей и методы их защиты / К. Г. Пономарев // Исследовательский проект года 2024 : сборник статей Международного научно-исследовательского конкурса, Петрозаводск, 02 декабря 2024 года. – Петрозаводск: Международный центр научного партнерства «Новая Наука» (ИП Ивановская И.И.), 2024. – С. 47-53.
 4. Федотов, П. В. рекуррентные нейронные сети на основе кратко-долговременной памяти / П. В. Федотов // Строительство и архитектура - 2015. Современные информационно-экономические технологии: тенденции и перспективы развития : материалы международной научно-практической конференции, Ростов-на-Дону, 26–27 ноября 2015 года / Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Ростовский государственный строительный университет», Союз строителей Южного федерального округа, ассоциация строителей Дона. Том 5. – Ростов-на-Дону: Редакционно-издательский центр РГСУ, 2015. – С. 144.
 5. Зоткина, А. А. Решение проблем рекуррентной нейронной сети при помощи модели "долговременной кратковременной памяти" / А. А. Зоткина, Н. С. Шиндина // Современные информационные технологии. – 2023. – № 37(37). – С. 18-20.
 6. Иванов, А. В. Исследование подходов к синтезу и детектированию клонированных голосов (DeepFake) / А. В. Иванов, С. А. Примаков, В. А. Мазуренко // Безопасность цифровых технологий. – 2022. – № 3(106). – С. 62-80.
 7. Смирнов, И. С. Исследование поведенческой биометрии методами анализа данных и машинного обучения / И. С. Смирнов, А. А. Кочкаров // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. – 2024. – Т. 12, № 2(45). Порядковый номер 15.
4. Fedotov, P. V. Recurrent Neural Networks Based on Short-Term and Long-Term Memory / P. V. Fedotov // Construction and Architecture - 2015. Modern Information and Economic Technologies: Trends and Prospects of Development: Proceedings of the International Scientific and Practical Conference, Rostov-on-Don, November 26–27, 2015 / Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Professional Education "Rostov State University of Civil Engineering", Union of Builders of the Southern Federal District, Association of Builders of the Don Region. Volume 5. – Rostov-on-Don: RGGU Editorial and Publishing Center, 2015. – P. 144.
 5. Zotkina, A. A. Solving the Problems of a Recurrent Neural Network Using the Long-Term Short-Term Memory Model / A. A. Zotkina, N. S. Shindina // Modern Information Technologies. – 2023. – No. 37(37). – Pp. 18-20.
 6. Ivanov, A. V. Research of Approaches to the Synthesis and Detection of Cloned Voices (DeepFake) / A. V. Ivanov, S. A. Primakov, V. A. Mazurenko // Digital Technology Security. – 2022. – No. 3(106). – Pp. 62-80.
 7. Smirnov, I. S. Research of Behavioral Biometrics by Data Analysis and Machine Learning Methods / I. S. Smirnov, A. A. Kochkarov // Modeling, Optimization, and Information Technologies. – 2024. – Vol. 12, No. 2(45). Order number 15.

References

1. Chagdurov, O. B. Methods of Speech Forgery / O. B. Chagdurov // Electronic Means and Control Systems. Proceedings of the International Scientific and Practical Conference. – 2024. – No. 1-2. – Pp. 40-41.
2. Sudienkova, A. V. Overview of Methods for Extracting Acoustic Features of Speech in the Speaker Recognition Task / A. V. Sudienkova // Collection of Scientific Papers of the Novosibirsk State Technical University. – 2019. – No. 3-4(96). – Pp. 139-164.
3. Ponomarev, K. G. Actual Threats of Voice Deep-fakes for the Internet of Things and Methods of

УДК 621.039.5:699.841:624.042.8

Разработка решения, обеспечивающего защиту исполняемого кода от несанкционированного доступа и анализа посредством применения техник обфускации

Е.А. Контылева¹, Ю.Ю. Эндрижикевич¹

¹ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»,
Университетская, 33, г. Севастополь, 299053, Россия, eakontyleva@sevsu.ru

Статья поступила 25.11.2025 г.; после доработки 27.11.2025 г.

Аннотация

В статье представлен комплексный подход к разработке программного средства защиты исполняемого кода с использованием методов обфускации. Проведен математический анализ эффективности предложенного решения, представлены результаты экспериментальных исследований и статистическая обработка данных.

Ключевые слова: обфускация, метрика, обфусцированный код, исполняемый код.

Development of a solution that protects executable code from unauthorized access and analysis by using obfuscation techniques

E.A. Kontyleva¹, Yu.Yu. Endrizhikevich¹

¹Sevastopol State University, 33 Universitetskaya st., Sevastopol, 299053, Russia,
eakontyleva@sevsu.ru

Received 25.11.2025 y.; received in final form 27.11.2025 y.

Abstract

The article presents a comprehensive approach to the development of software for protecting executable code using obfuscation methods. A mathematical analysis of the effectiveness of the proposed solution is conducted, and the results of experimental studies and statistical data processing are presented.

Keywords: obfuscation, metric, obfuscated code, executable code.

Введение

В условиях стремительного развития цифровых технологий и роста киберугроз защита программного обеспечения, а также интеллектуальной собственности в сфере программного обеспечения [1], становятся критически важной задачей. Современные реалии демонстрируют: увеличение числа атак на исходный код (по данным отчётов за 2024 г. — рост на 47 % год к году); возрастающую ценность интеллектуальной собственности в IT-сфере; необходимость противодействия методам реверс-инжиниринга и декомпиляции.

Обфускация кода выступает ключевым ин-

струментом в системе защиты ПО, позволяя: затруднить анализ алгоритмов; защитить коммерческую тайну; снизить риски несанкционированного копирования.

Существующие методы защиты ПО сталкиваются с фундаментальным противоречием: необходимость максимальной защиты кода; требование сохранения производительности приложения [2].

Традиционные подходы (шифрование, контроль доступа) оказываются недостаточными против современных инструментов деобфускации и автоматизированного анализа.

Вопросы обфускации исследуются в различных работах, однако остаются нерешёнными

задачи: оптимизации баланса «защита – производительность»; адаптации методов под современные языки программирования; автоматизации процессов обфускации.

Постановка задачи

Разработать решение, которое обеспечит максимально возможную защиту исполняемого кода от несанкционированного доступа и анализа посредством применения техник запутывания (обфускация).

Проведенные исследования

Методология исследования.

Методологическая база исследования базируется на комплексном подходе, включающем следующие направления:

1. Теоретический анализ существующих методов обфускации.
2. Экспериментальное исследование эффективности предложенных решений.
3. Статистическая обработка полученных результатов.
4. Математическое моделирование процессов обфускации.

Методы исследования [3].

В исследовании применяются следующие методы:

1. Системный анализ для изучения структуры и взаимосвязей компонентов системы.
2. Моделирование процессов обфускации на различных уровнях абстракции.
3. Экспериментальные методы для проверки гипотез и оценки эффективности.
4. Статистические методы для обработки результатов.
5. Сравнительный анализ существующих решений.

Этапы исследования.

1. Подготовительный этап: анализ предметной области, формулировка целей и задач, выбор метрик оценки, разработка методики эксперимента.
2. Основной этап: разработка математической модели обфускации, создание прототипа программного средства, проведение серии экспериментов, сбор и обработка данных.
3. Заключительный этап: анализ результатов, формулировка выводов, разработка рекомендаций.

Методология экспериментального исследования.

Экспериментальное исследование включа-

ет:

1. Формирование тестового набора программ различной сложности.
2. Проведение серии преобразований с различными параметрами.
3. Измерение метрик эффективности: время выполнения, размер кода, степень защиты, производительность.
4. Статистическую обработку результатов. Методология оценки эффективности. Оценка эффективности проводится по следующим критериям:

1. Количественные показатели: коэффициент увеличения размера кода, коэффициент снижения производительности, степень защиты.
2. Качественные показатели: сложность анализа кода, устойчивость к деобфускации, сохранение функциональности [4].

Математическое обеспечение.

Математический аппарат включает: формализацию процесса обфускации, построение моделей преобразования кода, статистический анализ результатов, прогнозирование эффективности с помощью регрессионных моделей.

Инструменты исследования.

В процессе исследования используются:

1. Средства анализа кода.
2. Инструменты профилирования.
3. Статистические пакеты.
4. Системы математического моделирования.
5. Средства автоматизации экспериментов. Методология верификации результатов. Верификация проводится путем: сравнительного анализа с существующими решениями, статистической проверки гипотез, повторных измерений, экспертной оценки полученных результатов.

Методология представления результатов.

Результаты представляются в виде:

1. Количественных показателей.
2. Графических зависимостей.
3. Статистических таблиц.
4. Математических моделей.
5. Сводных диаграмм.

Методология внедрения результатов.

Внедрение результатов осуществляется через: разработку рекомендаций по применению, создание методических указаний, формирование технических спецификаций, разработку документации.

Данная методология обеспечивает всестороннее исследование проблемы и получение достоверных результатов, которые могут быть использованы для практической реализации

разработанного программного средства.

Экспериментальная часть исследования.

Общая методология экспериментального исследования.

Экспериментальное исследование проводилось в несколько этапов с применением комплексного подхода к оценке эффективности разработанного программного средства.

Формирование тестовой выборки [5]:

Тестовый набор включал:

1. 50 программных модулей различного размера (от 1 КБ до 500 КБ).

2. Программы на разных языках программирования (Java, C++, Python).

3. Приложения разной сложности (от простых утилит до комплексных систем).

Методика проведения экспериментов.

Этапы эксперимента:

1. Предварительная подготовка тестовых образцов.

2. Базовое профилирование исходного кода.

3. Применение различных методов обфускации.

4. Повторное профилирование.

5. Сравнительный анализ результатов.

Метрики оценки эффективности.

Основные показатели:

1. Производительность: время выполнения; потребление ресурсов; пиковые нагрузки.

2. Защитные характеристики: степень запутывания кода; устойчивость к декомпиляции; сложность реверсивного инжиниринга.

3. Функциональная целостность: сохранение исходной функциональности; корректность работы; стабильность выполнения.

Технические средства эксперимента.

Используемое оборудование:

1. Тестовый стенд с конфигурацией: процессор: Intel Core i9-11900K; ОЗУ: 64 ГБ DDR4; SSD: 1 ТБ NVMe.

2. Программное обеспечение: дебаггеры; профилировщики; анализаторы кода; инструменты мониторинга.

Проведение измерений.

Процедура измерений:

1. Калибровка измерительной системы.

2. Выполнение серии тестовых запусков.

3. Сбор метрических данных.

4. Статистическая обработка результатов.

5. Построение графиков и диаграмм.

Анализ результатов экспериментов.

Статистическая обработка включала:

1. Расчет средних значений.

2. Определение дисперсии.

3. Построение доверительных интервалов.

4. Корреляционный анализ.

Математическое моделирование.

Формализация процесса обфускации может быть представлена как преобразование исходного кода [6] CO в обфусцированный код $C1$ при сохранении функциональной эквивалентности: $F(CO) = F(C1)$, где F — функция выполнения программы.

Метрики оценки эффективности обфускации рассчитываются по формуле [7]:

$$D = 0,75Kr - 0,23Kp + 0,18. \quad (1)$$

где D - степень защиты;

Kr - коэффициент увеличения размера кода;

Kp коэффициент снижения производительности.

Прогнозирование эффективности осуществляется с помощью регрессионной модели.

Результаты тестирования представлены в таблице 1.

Таблица 1. Количественные показатели (средние значения)

Параметр	Исходный код	Обфусцированный код	Статическая значимость
Время выполнения (мс)	250 ± 5.0	275 ± 6.2	$p < 0.05$
Размер кода (КБ)	125 ± 2.5	145 ± 3.1	$p < 0.01$
Степень защиты	0.35	0.82	$p < 0.001$
Стабильность работы	99.9%	99.8%	

Оценка надежности результатов.

Достоверность подтверждена:

1. Многократным повторением экспериментов.

2. Согласованностью результатов.

3. Статистической значимостью различий.

Анализ влияния на производительность.

Влияние обфускации на ключевые показатели:

1. Увеличение времени выполнения - 10%.

2. Рост размера кода - 16%.

3. Снижение стабильности - 0,1%.

Исследование защитных свойств.

Защитные характеристики:

1. Устойчивость к статическому анализу - 95%.
2. Сложность динамического анализа - 87%.

3. Защита от декомпиляции - 92%.

Практическая значимость.

Внедрение разработанного решения позволяет достичь:

1. Повышения уровня защиты на 47%.
2. Сохранения производительности в пределах 10%.
3. Универсальности применения для различных типов приложений.

Основные результаты: подтверждена эффективность разработанного метода обфускации, достигнут оптимальный баланс между защитой и производительностью, подтверждена сохранность функциональности, доказана практическая применимость разработанного решения.

Заключение

Проведенные исследования подтверждают эффективность предложенного подхода к защите исполняемого кода. Разработанное программное средство демонстрирует оптимальное соотношение между уровнем защиты и влиянием на производительность системы.

Список литературы

1. Современное состояние исследований в области обфускации программ: определения стойкости обфускации / Н. П. Варновский, В. А. Захаров, Н. Н. Кузюрин, А. В. Шокуров // Труды Института системного программирования РАН. – 2014. – Т. 26, № 3. – С. 167-198.
2. Маркин Д. О. Алгоритм распознавания точек входа обфусцированных веб-приложений методом динамического анализа / Д. О. Маркин, С. М. Макеев, А. А. Зверев // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2020. – № 9. – С. 28-40.
3. Сергейчик В. В. Особенности обфускации VHDL-описаний и методы оценки ее сложности / В. В. Сергейчик, А. А. Иванюк // Информатика. – 2014. – № 1(41). – С. 116-125.
4. Борисов П. Д. Об автоматическом анализе практической стойкости обфусцирующих преобразований / П. Д. Борисов, Ю. В. Косолапов // Моделирование и анализ информационных систем. – 2019. – Т. 26, № 3. – С. 317-331.
5. Орлов Г. О. Веб-приложение для защиты ПО от несанкционированного копирования: обфускация кода и управление лицензиями / Г. О. Орлов // Молодежный вестник УГАТУ. – 2024. –

№ 1(30). – С. 88-93.

6. Нурмухаметов А. Р. Применение диверсифицирующих и обфусцирующих преобразований для изменения сигнатуры программного кода / А. Р. Нурмухаметов // Труды Института системного программирования РАН. – 2016. – Т. 28, № 5. – С. 93-104.
7. Борисов П. Д. Способ количественного сравнения обфусцирующих преобразований / П. Д. Борисов, Ю. В. Косолапов // Информатика и автоматизация. – 2024. – Т. 23, № 3. – С. 684-726.

References

1. The current state of research in the field of program obfuscation: Determining the resistance of obfuscation / N. P. Varnovsky, V. A. Zakharov, N. N. Kuzurin, and A. V. Shokurov // Proceedings of the Institute of System Programming of the Russian Academy of Sciences. – 2014. – Vol. 26, No. 3. – Pp. 167-198.
2. Markin D. O. Algorithm for Recognizing Entry Points of Obfuscated Web Applications Using Dynamic Analysis / D. O. Markin, S. M. Makeev, and A. A. Zverev // Izvestiya of Tula State University. Technical Sciences. – 2020. – No. 9. – Pp. 28-40.
3. Sergeychik, V. V. Features of Obfuscation of VHDL Descriptions and Methods for Estimating Its Complexity / V. V. Sergeychik, A. A. Ivanyuk // Informatics. – 2014. – No. 1(41). – Pp. 116-125.
4. Borisov P. D. On the Automatic Analysis of the Practical Durability of Obfuscating Transformations / P. D. Borisov, Yu. V. Kosolapov // Modeling and Analysis of Information Systems. – 2019. – Vol. 26, No. 3. – Pp. 317-331.
5. Orlov, G. O. Web Application for Protecting Software from Unauthorized Copying: Code Obfuscation and License Management / G. O. Orlov // UGATU Youth Bulletin. – 2024. – No. 1(30). – Pp. 88-93.
6. Nurmukhametov A. R. Application of Diversifying and Obfuscating Transformations for Changing the Signature of Program Code / A. R. Nurmukhametov // Proceedings of the Institute of System Programming of the Russian Academy of Sciences. – 2016. – Vol. 28, No. 5. – Pp. 93-104.
7. Borisov P. D. A Method for Quantitative Comparison of Obfuscating Transformations / P. D. Borisov, Yu. V. Kosolapov // Informatics and Automation. – 2024. – Vol. 23, No. 3. – Pp. 684-726.

УДК 621.039.5:699.841:624.042.8

Исследование сравнительной эффективности алгоритмов обнаружения персональных данных в неструктурированных информационных ресурсах с учетом метрик точности и производительности

Е.А. Контылева, Э.А. Пупков, М.А. Сергиенко, Н.А. Грехов¹

¹ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»,
Университетская, 33, г. Севастополь, 299053, Россия,
eakontyleva@sevsu.ru

Статья поступила 10.12.2025 г.; после доработки 12.12.2025 г.

Аннотация

В статье представлен углубленный сравнительный анализ актуальных нейросетевых архитектур, предназначенных для извлечения именованных сущностей из русскоязычных текстовых корпусов. Исследование охватывает как специализированные NER-решения, так и крупные языковые модели (LLM), чья производительность оценивается на специально созданном датасете, содержащем аннотированные персональные данные. Анализ проводится по множеству критериев, уделяя особое внимание метрикам точности, потребляемым ресурсам и скорости обработки.

Ключевые слова: нейросетевые модели, NER, неструктурированные персональные данные, датасет, сравнительный анализ, защита информации, DLP-системы.

A study of the comparative effectiveness of algorithms for detecting personal data in unstructured information resources, taking into account accuracy and performance metrics

E.A. Kontyleva, E.A. Pupkov, M.A. Sergienko, N.A. Grekhov¹

¹Sevastopol State University, 33 Universitetskaya st., Sevastopol, 299053, Russia,
eakontyleva@sevsu.ru

Received 10.12.2025 y.; received in final form 12.12.2025 y.

Abstract

The article presents an in-depth comparative analysis of current neural network architectures designed for extracting named entities from Russian-language text corpora. The study covers both specialized NER solutions and large language models (LLMs), whose performance is evaluated on a specially created dataset containing annotated personal data. The analysis is conducted using a variety of criteria, with a focus on accuracy metrics, resource consumption, and processing speed.

Keywords: neural network models, NER, unstructured personal data, dataset, comparative analysis, information protection, DLP systems.

Введение

Сегодня, когда всё больше информации хранится в цифровом виде, компании сталкиваются с огромным количеством данных.

Многие из этих данных содержат личную информацию о людях. Поэтому защита этой личной информации становится очень важной – как для соблюдения законов, так и для того, чтобы компании не потеряли доверие [4, 7].

Особенно сложно работать с данными, которые не имеют четкой структуры, ведь обычные способы их проверки не всегда справляются [1, 6].

Основной источник уязвимостей в области информационной безопасности – это "теневые данные". Это всё, что мы храним в рабочих переписках, вложениях к письмам, сканах документов и системных логах [2, 3]. Поскольку эти данные не имеют четкой организации и могут быть представлены в самых разных форматах, их сложно отследить и контролировать обычными методами [8].

Традиционные методы поиска, основанные на совпадении ключевых слов и регулярных выражений, сталкиваются с серьезными трудностями при обработке информации, где важен контекст [5]. Это проявляется, например, в неоднозначности слова "Владимир" (может быть как именем, так и географическим объектом) и в необходимости учитывать все возможные падежные формы одного имени (Александр, Александру, Александре), что требует более продвинутых решений.

Постановка задачи

Провести сравнительную оценку производительности специализированных моделей распознавания именованных сущностей (NER) и генеративных языковых моделей при решении задачи идентификации персональных данных, а именно фамилий, имен, отчеств и адресов, в неструктурированных текстовых массивах. Особый акцент делается на изучении потенциала использования малогабаритных больших языковых моделей (LLM) для локального внедрения в корпоративные системы обеспечения информационной безопасности.

Проведенные исследования

Для проведения эксперимента был разработан специальный набор данных. Он состоит из 423 текстовых фрагментов, которые были тщательно подобраны, чтобы максимально точно отражать реальные ситуации, возникающие при обработке информации в корпоративных системах. Чтобы гарантировать конфиденциальность данных, мы использовали метод синтетической генерации. Это позволило нам создать реалистичные примеры, не раскрывая при этом никакой реальной информации, и при этом сохранить

репрезентативность нашей выборки.

Для проверки устойчивости методов обнаружения к различным форматам представления информации был сформирован текстовый корпус. Он построен по принципу сценариев, где каждый фрагмент является законченным повествованием с вариациями в записи персональных данных. Ниже представлен фрагмент датасета (таб.1).

Таблица 1. Фрагмент датасета

Исходный текст	ФИО	Адрес
Супруги Воронцовы: И.А. и Е.А., приобрели путёвку в санаторий. При бронировании они предоставили свои паспорта: 45 16 101112 и 45 16 101113. Туроператор запросил их контактный телефон 8-916-555-44-33 для подтверждения заказа. Путёвки и все документы были отправлены им на электронную почту voroncovy@family.com. Оплата была произведена с их совместной дебетовой карты 5478 6900 1234 5678. Они с нетерпением ждут начала отдыха и надеются поправить своё здоровье. Санаторий находится в живописном месте под Сочи.	3	0
Бухгалтер Зотова Ольга Викторовна оформляла командировку для сотрудника. Она забронировала ему авиабилеты и гостиницу. Для этого потребовались его паспортные данные 58 09 554433 и номер банковской карты 4276 3000 4000 5000, с которой будет списываться оплата. Все документы и маршрутная квитанция были отправлены на рабочий email сотрудника: employee@company.org. На случай экстренной связи был указан его мобильный телефон +7 917 000-11-22. Командировка запланирована на следующую неделю, и всё уже готово к отъезду.	1	0
Абонент Щербаков А.А. подключил новый тарифный план у сотового оператора. При оформлении заявки он предъявил паспорт 36 11 223344. Менеджер внесла в систему его адрес для выставления счёта: г. Волгоград, ул. Рабоче-Крестьянская, д. 10, кв. 6. Для подписки на рассылку был указан email scherbakov.aa@phoenix.ru. Абонентская плата будет списываться автоматически с его карты 2202 2000 3000 4000.	2	1

Для проведения сравнительного анализа были отобраны различные библиотеки и модели, представляющие различные архитектурные подходы к задаче извлечения сущностей (NER). Критерием использования инструментов в тестировании служила их популярность в профес-

сиональном сообществе, наличие открытого исходного кода и хорошая поддержка русского языка. Для оценки потенциала генеративного подхода были взяты модели с открытыми весами в диапазоне параметров от 8 до 14 миллиардов. Ограничение по размеру обусловлено необходимостью баланса между интеллектуальными способностями модели и скоростью генерации токенов на локальном оборудовании.

Выбранными NER-методами стали: Natasha, Slovnet, mawo-slovnet, Gherman/bert-base-NER-Russian. Всем методам достаточно для работы CPU, кроме Gherman/bert-base-NER-Russian. Для её полного раскрытия потенциала рекомендуется использовать GPU. Все эти модели обучались на русском языке.

Весь сравнительный анализ производился на оборудовании, оснащённом процессором AMD Ryzen 5 7535HS (6 ядер и 12 потоков), с 16 гигабайтами оперативной памяти и с видеокартой NVIDIA GeForce RTX 2050. Использование данного решения позволило оценить применимость исследуемых методов на оборудовании среднего ценового сегмента, доступном для большинства организаций.

Ниже представлен сравнительный анализ NER по точности, скорости, ресурсоемкости. (таб. 2, 3)

Таблица 2. Сравнительный анализ NER по точности

Название	Успех	Провал	Процент удачи, %
Natasha (Yargy + Natasha NER + AddrExtractor)	206	217	48.7
natasha/slovnet	206	217	48.7
mawo-ru/mawo-slovnet	206	217	48.7
Gherman/bert-base-NER-Russian (HF) на CPU	30	393	7.09
Gherman/bert-base-NER-Russian (HF) на GPU	30	393	7.09

Как видно из таблицы, даже лучшие решения показали результат менее 50%, а модель на базе BERT продемонстрировала аномально низкий показатель в 7,09%. Детальный анализ ошибок («ложных пропусков») показал, что основной причиной стала разница в гранулярности сущностей. Тестовый датасет предполагал обобщенную разметку (например, тег [Address] для всей строки адреса), в то время как нейросетевые модели, обученные на новостных корпусах, стремились к декомпозиции сущностей. Большинство ошибок, которые допускали модели, заключаются в банальном различии между нашим

представлением замены ПДн и заменой нейросети. Пример:

г. Москва, ул. Пушкина — [Адрес] — наше определение

г. Москва, ул. Пушкина — г. [Адрес], ул. [Адрес] — NER-модель

Существуют решения по закрытию данной проблемы, но они платные и закрытые. Наша задача — протестировать открытые и готовые решения.

Также стоит учитывать, что модели обучались на новостных статьях и газетах. Взглянув на тесты, видно, что модели начали сыпаться, когда данные стали передаваться в различных формах. Это говорит о том, что компаниям надо дообучать существующие модели или с нуля обучать собственные модели. Но это сложный, дорогой и долгий процесс.

Таблица 3. Сравнительный анализ NER (по ресурсоемкости и скорости)

Название	CPU, %	GPU, %	Время вы- полнения, сек
Natasha (Yargy + Natasha NER + AddrExtractor)	2	0	6.71
natasha/slovnet	3.9	0	2.38
mawo-ru/mawo-slovnet	1	0	1.96
Gherman/bert-base-NER-Russian (HF) на CPU	51.7	0	59.56
Gherman/bert-base-NER-Russian (HF) на GPU	0	97.6	8.92

Анализ данных таблицы 3 показывает явное преимущество компактных свёрточных моделей (slovnet и его модификаций): они обеспечивают высокую скорость обработки — до 100 документов в секунду — при минимальной нагрузке на центральный процессор. Это делает их оптимальными для встраивания в высоконагруженные потоковые шлюзы DLP-систем; в то же время тяжёлая архитектура Transformer (bert-base) на CPU работает на порядок медленнее и создаёт существенную нагрузку на вычислительные ядра (более 50 %), а её перенос на видеокарту хоть и позволяет сократить время обработки почти в 7 раз (с 59,5 до 8,9 секунд) и приблизить скорость работы к показателям библиотеки Natasha, но сопровождается полной утилизацией GPU (97,6 %), что указывает на необходимость значительных аппаратных инвестиций для масштабирования такого решения в бизнес-

процессы.

Второй этап тестирования был посвящен анализу эффективности компактных больших языковых моделей. В эксперименте использовались модели архитектур Gemma (4 млрд параметров) и Qwen (8 млрд), запущенные в среде локального инференса. Предполагалось, что генеративные модели смогут корректно извлечь сложные контекстные сущности, такие как адреса, недоступные для открытых классических NER-систем.

Таблица 4. Сравнительный анализ LLM

Мо- дель	Точ- ность: ФИО	Точ- ность: адреса	Сре- дняя точ- ность	Ско- рость (стр/ сек)	За- груз- ка GPU
Gemma 3 4B	11,82%	43,26%	27,54%	0,45	92,9%
Qwen (8B/14 B)	52,25%	95,27%	73,76%	0,29	98,9%

Модель семейства Qwen показала результат в задаче поиска адресов — 95,27%. Это подтверждает преимущество трансформеров: модель успешно игнорирует разрывы в написании и понимает контекст, собирая разрозненные элементы («г.», «ул.», «дом») в единую сущность. По сравнению с NER-моделями, которые на аналогичной задаче показали результат ниже 10% (в строгом соответствии), LLM демонстрирует качественный результат в анализе.

Однако модель Gemma 3 4B выявила критический недостаток генеративного подхода — склонность к галлюцинациям (избыточной генерации). Согласно статистике эксперимента, среднее количество сущностей «ФИО», найденных моделью (3.49), значительно выше чем в разметке (2.11). Это означает, что модель классифицирует как «Персону» любые похожие слова (например, названия улиц, совпадающие с фамилиями, или имена нарицательные), что приводит к сильному падению точности до 11,82%. Анализ показывает, что применение LLM для постоянной обработки данных в реальном времени (DLP) на текущем уровне развития оборудования среднего сегмента практически невозможно. Генеративные модели успешно справляются с проблемой семантической слепоты, присущей классическим алгоритмам, демонстрируя точность в 95% на сложных сущностях, таких как «Адрес». Однако их применение ограничено

двумя факторами: крайне медленной скоростью инференса и высоким уровнем шума в результатах.

В ходе эксперимента были протестированы различные архитектурные подходы к задаче извлечения сущностей:

- специализированные NER-модели: Natasha, Slovnet, mawo-slovnet, Gherman/bert-base-NER-Russian;
- компактные LLM: Gemma 3 4B, Qwen (8B/14B).

Сравнительный анализ показал существенные различия в производительности и точности методов. NER-модели продемонстрировали высокую скорость обработки при умеренной точности, в то время как LLM показали превосходную способность к семантическому анализу, но с существенными ограничениями по скорости и ресурсоемкости.

Анализ результатов выявил следующие ключевые тенденции:

- специализированные NER-модели обеспечивают высокую скорость обработки (до 100 документов в секунду) при минимальной нагрузке на CPU;
- LLM демонстрируют превосходную способность к семантическому анализу, достигая 95% точности при поиске адресов.

Основным ограничением LLM является высокая ресурсоемкость и склонность к генерации ложных сущностей.

Заключение

По результатам исследования было установлено, что оптимальным решением является гибридный подход, объединяющий различные методы.

В рамках этого подхода, быстрые NER-алгоритмы будут использоваться для первичной фильтрации трафика, а затем, для более детального анализа подозрительных случаев, будут задействованы LLM. Такой поэтапный процесс позволит достичь желаемого баланса между точностью обнаружения и эффективностью использования инфраструктуры.

Следующие шаги в исследованиях должны быть направлены на инновационную разработку методов оптимизации LLM для задач, связанных с персональными данными, и создание передовых архитектур, учитывающих уникальные лингвистические особенности русскоязычных текстов.

Список литературы

1. Денисенко В. В. Использование искусственного интеллекта для обработки персональных данных / В. В. Денисенко, К. С. Евтеева, И. И. Савченко, А. А. Скрыпников // *International Journal of Humanities and Natural Sciences*. – 2020. – Vol. 7-1 (46). – С. 110–114.
2. Егоров М. Э. Автоматизированное обнаружение и классификация конфиденциальных данных в облачных средах / М. Э. Егоров, Д. Е. Намиот // *International Journal of Open Information Technologies*. – 2025. – Vol. 13, no. 11. – С. 112–125.
3. Ивичев В. А. Технологии выявления и очистки персональных данных открытых источников / В. А. Ивичев, Т. В. Игнатова // *ЭКО*. – 2013. – № 2. – С. 168–179.
4. Литвин И. И. Особенности сбора, обработки и защиты персональных данных искусственным интеллектом / И. И. Литвин // *Вестник Уральского юридического института МВД России*. – 2021. – № 4. – С. 112–118.
5. Раздьяконов Е. С. Поиск персональных данных в неструктурированных текстах с использованием нейронных сетей / Е. С. Раздьяконов // *Инженерный вестник Дона*. – 2023. – № 7.
6. Растопчина Ю. Л. Особенности применения искусственного интеллекта в корпоративном секторе / Ю. Л. Растопчина, Е. И. Ковалева, И. Н. Титова // *Региональная и отраслевая экономика*. – 2025. – № 2. – С. 22–31.
7. Селюк А. С. Защита персональных данных в рамках использования технологий искусственного интеллекта / А. С. Селюк // *Аграрное и земельное право*. – 2025. – № 4. – С. 117–120.
8. Сулимов Н. Ю. Внедрение искусственного интеллекта в систему корпоративного управления / Н. Ю. Сулимов // *Инновации и инвестиции*. – 2023. – № 7. – С. 136–139.
9. No. 4. – pp. 112-118.
5. Razdiakonov E. S. Personal data search in unstructured texts using neural networks / E. S. Razdiakonov // *Engineering Bulletin of the Don*. – 2023. – № 7.
6. Rastopchina Yu. L. Features of the use of artificial intelligence in the corporate sector / Yu. L. Rastopchina, E. I. Kovaleva, I. N. Titova // *Regional and sectoral economics*. – 2025. – No. 2. – pp. 22-31.
7. Selyuk A. S. Protection of personal data within the framework of the use of artificial intelligence technologies / A. S. Selyuk // *Agrarian and land law*. – 2025. – No. 4. – pp. 117-120.
8. Sulimov N. Y. Introduction of artificial intelligence into the corporate governance system / N. Y. Sulimov // *Innovations and Investments*. – 2023. – No. 7. – pp. 136-139.

References

1. Denisenko V. V. The use of artificial intelligence for personal data processing / V. V. Denisenko, K. S. Evteeva, I. I. Savchenko, A. A. Skrypnikov // *International Journal of Humanities and Natural Sciences*. – 2020. – Vol. 7-1 (46). – pp. 110-114.
2. Egorov M. E. Automated detection and classification of confidential data in cloud environments / M. E. Egorov, D. E. Namiot // *International Journal of Open Information Technologies*. – 2025. – Vol. 13, No. 11. – pp. 112-125.
3. Ivichev V. A. Technologies for identifying and cleaning personal data from open sources / V. A. Ivichev, T. V. Ignatova // *ECO*. – 2013. – № 2. – pp. 168-179.
4. Litvin I. I. Features of collection, processing and protection of personal data by artificial intelligence / I. I. Litvin // *Bulletin of the Ural Law Institute of the Ministry of Internal Affairs of Russia*. – 2021. –

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ТЕХНОЛОГИИ

Научный журнал

Выпуск № 4, Том 11 2025 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: nauchnyy_zhurnal@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 17.12.2025 Заказ 32/25. Дата выхода в свет: Тираж 30 экз.
Цена: Бесплатно. Формат 60×84/8. Бумага офсетная. Объем усл. печ. л. 12,74.

Севастополь, 2025