

На правах рукописи



ПЬЕЙ ЗОН АУНГ

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ГИБРИДНОГО
ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ АВТОНОМНЫХ
ПОТРЕБИТЕЛЕЙ МАЛОЙ МОЩНОСТИ С ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕМ
ЭНЕРГИИ ПЕРЕПАДА ТЕМПЕРАТУР**

Специальность 2.4.2 – Электротехнические комплексы и системы

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Комсомольск-на-Амуре – 2026

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Комсомольский-на-Амуре государственный университет»

Научный руководитель – **Челухин Владимир Алексеевич**,
доктор технических наук, доцент

Официальные оппоненты: **Соломин Евгений Викторович**,
доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Электрические станции, сети и системы электроснабжения» ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)».

Муровский Сергей Петрович,
кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Автоматизированные, телекоммуникационные и электротехнические системы» ФГБОУ ВО «Дальневосточный государственный университет путей сообщения».

Ведущая организация – ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет». Кафедра «Электроэнергетика».

Защита состоится « 30 » июня 2026 г. в 12 час.00 мин на заседании диссертационного совета 99.2.140.02 на базе ФГБОУ ВО «Комсомольский-на-Амуре государственный университет» по адресу; г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, д. 27, корпус 3, аудитория 201. С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «КНАГУ» и на официальном сайте http://sovet.knastu.ru/diss_defense/.

Отзывы по данной работе в двух экземплярах, заверенные печатью, просим направлять по адресу: 681013, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, д. 27, ФГБОУ ВО «КНАГУ», учёному секретарю диссертационного совета 99.2.140.02, e-mail: eparu@knastu.ru.

Автореферат разослан « » _____ 2026 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета 99.2.140.02,
кандидат технических наук, доцент



Гудим Александр Сергеевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Сегодня активно осуществляется процесс интеграции в систему электрогенерации альтернативных источников энергии, среди которых определённое место занимают возобновляемые источники энергии. Диапазон мощностей такой интеграции охватывает от мегаватт (большая генерация) до киловатт (микрогенерация). Системы микрогенерации применяются как автономные источники для удалённых потребителей – сельскохозяйственных объектов, метеостанций, систем видеонаблюдения и пунктов экстренной связи. Для обеспечения автономности применяется гибридный подход с использованием солнечных панелей и ветрогенераторов.

Основным недостатком таких гибридных систем электроснабжения является зависимость стабильности генерации электроэнергии от климатических факторов (ночью отсутствует солнце, при этом может отсутствовать и ветер). Для ослабления негативного влияния данного недостатка предлагается вводить в гибридную установку электроснабжения дополнительный источник электроэнергии, генерация которого не зависит от климатических факторов. На сегодняшний день известна и разрабатывается технология получения энергии за счёт суточного перепада температур. Возможность получения энергии с использованием суточного перепада температур отличается стабильностью, так как перепад температур между днём и ночью существует ежедневно в любой точке земного шара, а также обладает высокой экологической чистотой.

Однако на сегодняшний день гибридный комплекс автономного электроснабжения с системой перепада температур практически не исследован. Отсутствует программное обеспечение для работы систем его управления и контроля работы каждого элемента комплекса, а также нет данных о влиянии изменения перепада температур на его функционирование в течение месяца и года. Не разработано математическое описание процессов в системе комплекса. Поэтому разработка и исследование гибридного комплекса на основе возобновляемых источников энергии и дополненного предлагаемым источником, использующим эффект суточного перепада температур, является актуальной.

Степень разработанности. Среди отечественных исследователей, внёсших значительный вклад в создание и развитие новых знаний в области гибридных источников электрогенерации, можно указать Н.И. Воропай, В.А. Зубакина, Н.Т. Рустамова, С.П. Кундас, Р.А. Амерханова, М.Ф. Носкова, С.П. Муровского и др. Также ведущих учёных в области возобновляемой энергетики М.Г. Тягунова, Е.В. Соломина, автономной малой ветроэнергетики С.В. Грибкова.

Цель диссертационной работы – разработка новых научно обоснованных технических решений и алгоритмов управления альтернативным источником энергии на основе технологии, использующей суточный перепад температуры для гибридного электротехнического комплекса на основе ВИЭ, позволяющих повысить устойчивость его работы.

Для достижения цели были решены следующие задачи:

1) проведён анализ разработок различных систем генерации и накопления энергии, используемых для территориально удалённых маломощных потребителей;

2) разработан высокостабильный электротехнический комплекс системы электроснабжения гибридного типа с шиной постоянного тока на базе возобновляемых источников энергии, с дополнительным преобразователем энергии перепада температур;

3) разработаны новые технические решения по созданию электромеханического преобразователя энергии перепада температур;

4) созданы алгоритмы управления разработанным гибридным комплексом электроснабжения, ориентированные на учёт годовых, месячных и суточных изменений температуры окружающей среды;

5) разработана имитационная модель гибридного комплекса электроснабжения в среде «MATLAB».

Объект исследования – гибридный электротехнический комплекс электроснабжения малой мощности на основе возобновляемых источников энергии, дополненный преобразователем перепада температур с шиной постоянного тока, работающим на основе технологии перепада температур день-ночь.

Предмет исследования: средства, технические решения создания маломощных автономных гибридных электротехнических комплексов электроснабжения с шиной постоянного тока, с преобразователем энергии перепада температур день-ночь, алгоритмы управления режимами его работы.

Научная новизна:

1 Разработан гибридный электротехнический комплекс электроснабжения на основе возобновляемых источников энергии, с преобразователем энергии перепада температур, выходные параметры которого слабо зависят от климатических факторов.

2 Разработаны алгоритмы управления преобразователем энергии перепада температур в составе комплекса гибридной электростанции с учётом суточных и сезонных колебаний температуры в течение года, обеспечивающие повышение эффективности преобразования.

3 Результаты вычислительных исследований на разработанной имитационной модели гибридного электротехнического комплекса электроснабжения подтвердили теоретические исследования.

Теоретическая и практическая значимость работы. Решена научно-техническая задача по повышению стабильности функционирования гибридного источника электрогенерации малой мощности на базе возобновляемых источников энергии.

Разработан высокостабильный электротехнический комплекс системы электроснабжения гибридного типа с шиной постоянного тока на базе возобновляемых источников энергии, с дополнительным преобразователем энергии перепада температур.

Предложены алгоритмы управления разработанным гибридным комплексом электроснабжения, ориентированные на учёт годовых, месячных и суточных изменений температуры окружающей среды.

Методология и методы исследования. При выполнении работы автором применялись методы и методология исследования электротехнических систем, в основе которых лежат законы электротехники, математическая логика,

инструментарий для математического и компьютерного моделирования, программная среда MATLAB/Simulink.

Положения, выносимые на защиту:

1 Разработан гибридный электротехнический комплекс с шиной постоянного тока, дополненный преобразователем энергии перепада температур, обеспечивающий более надёжное электроснабжение потребителей малой мощности.

2 Разработаны новые технические решения по созданию электромеханического преобразователя энергии перепада температур.

3 Разработаны алгоритмы управления преобразователем энергии перепада температур в составе комплекса гибридной электростанции с учётом суточных и сезонных колебаний температуры в течение года.

4 Разработана имитационная модель гибридного комплекса электроснабжения в среде MATLAB, позволяющая исследовать стабильность электроснабжения при флуктуациях климатических факторов и нагрузки.

Личный вклад автора. Разработал преобразователь энергии перепада температур в составе автономного гибридного комплекса с шиной постоянного тока и создал алгоритмы управления им. Разработал имитационную модель гибридного комплекса электроснабжения в среде MATLAB, выполнил численный эксперимент на созданной модели. Разработал алгоритмы защиты аккумуляторных батарей от разрядки. Создал программу автоматизированного расчёта ежедневных значений перепада температур в течение года.

Соответствие работы паспорту специальности. Диссертационная работа соответствует следующим пунктам паспорта научной специальности 2.4.2 – «Электротехнические комплексы и системы:

п. 2 «Разработка научных основ проектирования, создания и эксплуатации электротехнических комплексов, систем и их компонентов».

п. 3 «Разработка, структурный и параметрический синтез, оптимизация электротехнических комплексов, систем и их компонентов, разработка алгоритмов эффективного управления».

Достоверность полученных результатов. Достоверность полученных автором данных достигается выбором математического аппарата, соответствующего поставленным задачам, корректностью принимаемых допущений, соответствием результатов, получаемых в процессе моделирования.

Апробация результатов исследования. Основные результаты исследований докладывались, обсуждались и получили положительную оценку на следующих конференциях:

- Международная научно-техническая конференция «ЭНЕРГООБЕСПЕЧЕНИЕ АПК», 15-16 декабря 2022 г. на базе Федерального научного Агроинженерного центра ВИМ;

- Научно-техническое творчество аспирантов и студентов: материалы Всероссийской научно-технической конференции студентов и аспирантов (г. Комсомольск-на-Амуре, 08-12 апреля 2019 г., КНАГУ);

- Международная мультидисциплинарная конференция по промышленному инжинирингу и современным технологиям (FarEastCon 2019), г. Владивосток;

- Научно-техническое творчество аспирантов и студентов: материалы Всероссийской научно-технической конференции студентов и аспирантов» (г. Комсомольск-на-Амуре, 08-12 апреля 2020 г., КнАГУ);

- II Международная научно-практическая конференция «Альтернативная и интеллектуальная энергетика» (г. Воронеж, 16-18 сентября 2020 г.).

Публикации. По результатам выполненных исследовательских работ было опубликовано 14 работ, в том числе 6 статей ВАК РФ, 6 статей, включённых в базу цитирования Scopus, получено 2 свидетельства о регистрации программ для ЭВМ.

Структура работы. Диссертационная работа включает в себя введение, 4 главы, заключение. Написана на 189 страницах, содержит 60 рисунков, 2 таблицы, 11 приложений с листингами созданной программы. Список литературы состоит из 67 наименований.

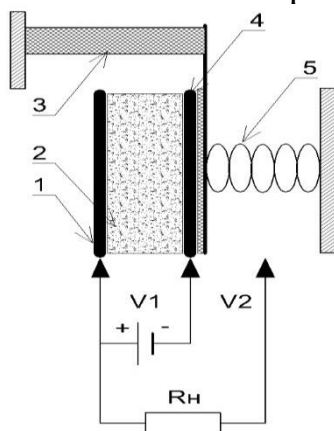
ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, определены цель и задачи, сформулирована научная новизна исследования, отмечены практическая ценность и основные направления реализации диссертационной работы, выделены основные проблемы и пути их решения.

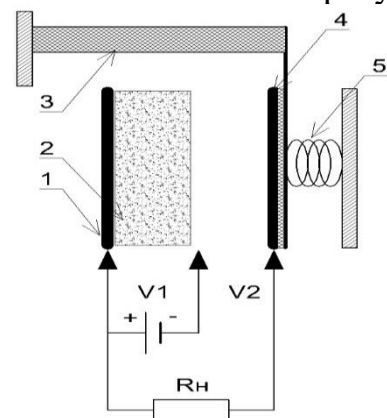
В первой главе проведён анализ технологических и технических решений автономных систем электроснабжения для территориально удалённых потребителей. Дан обзор технологий энергетических систем возобновляемой энергетики, их проблем и недостатков.

Вторая глава посвящена разработке электромеханического преобразователя перепада температур. Это электромеханическое устройство, основу которого составляет накопитель энергии в виде конденсатора с подвижной обкладкой. Между пластинами конденсатора находится диэлектрик с высоким значением относительной диэлектрической проницаемости (ОДП). К подвижной пластине крепится стержень с высоким температурным коэффициентом линейного расширения.

При минимальной температуре, °С



При максимальной температуре, °С



- 1 – неподвижная пластина конденсатора; 2 – диэлектрик с большим значением диэлектрической проницаемости (сегнетоэлектрик); 3 – диэлектрик, максимально изменяющий свой линейный размер при изменении температуры; 4 – подвижная пластина конденсатора; 5 – пружина

Рисунок 1 – Общая схема преобразователя энергии на основе использования технологии перепада температур

Зависимость величины ёмкости от свойств диэлектрика и расстояния между обкладками позволяет получить приращение энергии на конденсаторе, перемещая одну из обкладок конденсатора за счёт изменения физического состояния твёрдых тел, их расширения или сжатия при перепадах температур. Схематически устройство преобразователя показано на рисунке 1. Преобразователь энергии на основе перепада температур представляет собой две пластины конденсатора, одна из которых закреплена неподвижно, а вторая подвижная. Между подвижной и неподвижной пластинами конденсатора помещён диэлектрик 2, который имеет высокую ОДП и выполняет задачу повышения ёмкости конденсатора.

Движение подвижной пластины 4 осуществляется силой, которая возникает при изменении линейных размеров активного стержня 3 под действием изменения температуры окружающей среды.

Здесь имеют место действия двух разнонаправленных сил: притяжения пластин конденсатора F_1 и силы F_2 давления активного стержня, удлиняющегося под действием тепла ΔT . При удалении пластины конденсатора 2 от 1 изменяется энергия системы и совершается работа за счёт силы теплового расширения активного стержня под действием его нагрева от перепада температур

$$A = F \cdot dx,$$

где A – работа; $F = (F_2 - F_1)$ – результирующая сила, под действием которой совершается работа; dx – перемещение подвижной пластины.

$$dx = \alpha \cdot d \cdot \Delta T,$$

где α – коэффициент линейного расширения стержня; d – первоначальная длина стержня; ΔT – значение перепада температур, °С.

В целом преобразователь представляет собой открытую термодинамическую систему, где под действием перепада температур стержень будет удлиняться и потреблять энергию, определяемую как

$$W = c \cdot m \cdot \Delta T,$$

где c – теплоёмкость материала стержня; m – масса стержня; ΔT – изменение (перепад) температуры.

Данная энергия состоит из двух составляющих

$$W = U + A,$$

где U – внутренняя энергия стержня (в том числе определяющая изменение линейного размера стержня); A – работа на преодоление сил электрического поля при перемещении обкладок конденсатора за счёт изменений линейного размера стержня.

Изменение линейного размера стержня определится как

$$l = l_0(1 + \alpha(T_2 - T_1)),$$

где l_0 – начальная длина стержня при T_1 ; α – температурный коэффициент линейного расширения материала стержня; T_2 – конечная температура.

Принципиально после появления воздушного зазора между диэлектриком и подвижной пластиной конденсатор трансформируется из обычного в конденсатор

с двумя диэлектриками между обкладками. Величина ёмкости первого конденсатора определится следующим образом:

$$C_1 = \frac{\varepsilon_1 \cdot \varepsilon_0 \cdot S}{d_1},$$

где ε_1 – диэлектрическая проницаемость диэлектрика между обкладками; ε_0 – диэлектрическая постоянная; S – площадь пластин; d_1 – расстояние между пластинами конденсатора при низкой температуре.

Энергию, запасённую в конденсаторе, определим из соотношения

$$W_1 = \frac{C_1 \cdot U_1^2}{2} = \frac{Q^2}{2 \cdot C_1},$$

Второй конденсатор представляет собой структуру с двумя различными диэлектриками. Ёмкость такого конденсатора можно определить по формуле

$$C_2 = \frac{\varepsilon_0 \cdot S}{\frac{d_1}{\varepsilon_1} + \frac{d_2}{\varepsilon_2}} = \frac{\varepsilon_0 \cdot \varepsilon_1 \cdot \varepsilon_2 \cdot S}{\varepsilon_2 \cdot d_1 + \varepsilon_1 \cdot d_2}.$$

Перемещение пластины конденсатора под воздействием перепада температур привело к изменению его ёмкости, а следовательно, и напряжению на обкладках при постоянстве заряда. Таким образом, энергия, запасённая конденсатором, определится как

$$W_2 = \frac{C_2 \cdot U_2^2}{2} = \frac{Q^2}{2 \cdot C_2}.$$

Приращение энергии за счёт перемещения пластины конденсатора составит

$$W_3 = W_2 - W_1 = \frac{Q^2}{2 \cdot C_2} - \frac{Q^2}{2 \cdot C_1} = \frac{Q^2}{2} \cdot \left(\frac{1}{C_2} - \frac{1}{C_1} \right).$$

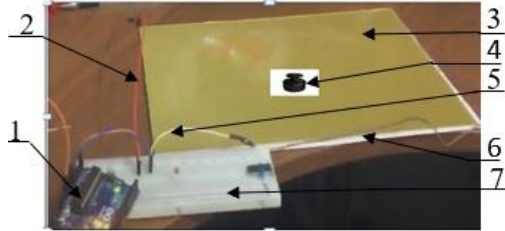
Относительное приращение энергии составит

$$W_4^* = \frac{W_2 - W_1}{W_1} = \frac{W_2}{W_1} - 1 = \frac{C_1}{C_2} - 1 = \frac{\frac{\varepsilon_1 \cdot \varepsilon_0 \cdot S}{d_1}}{\frac{\varepsilon_1 \cdot \varepsilon_2 \cdot \varepsilon_0 \cdot S}{\varepsilon_2 \cdot d_1 + \varepsilon_1 \cdot d_2}} - 1 = \frac{\varepsilon_1 \cdot d_2}{\varepsilon_2 \cdot d_1}.$$

Таким образом, относительное приращение энергии электромеханического преобразователя зависит от свойств диэлектрика исходного конденсатора и расстояния, на которое сместится обкладка.

Оценочные расчёты показали, что при значении ёмкости конденсатора $C_1 = 1000$ мкФ, рабочем напряжении $U_1 = 1000$ В и диэлектрике с диэлектрической проницаемостью $\varepsilon_1 = 16$ (электротехническое стекло) мощность такого преобразователя составит 0,8 Вт. Используя в одном блоке, например, 10 таких преобразователей, получим суммарную мощность 8 Вт. Количество модулей и их размеры ничем не ограничено, поскольку комплекс располагается на земле.

В работе ставилась задача экспериментально подтвердить преобразование энергии с помощью перепада температур между днём и ночью на примере имитационной модели ёмкости с двумя пластинами. В качестве имитационной модели конденсатора были взяты два листа фольгированного стеклотекстолита, размерами 200×200 мм. Между пластинами в качестве диэлектрика использовался бумажный лист с диэлектрической проницаемостью, равной единице (рисунок 2).



1 – плата АЦП микроконтроллера Arduino;

2, 5 – провода; 3 – листы фольгированного стеклотекстолита;

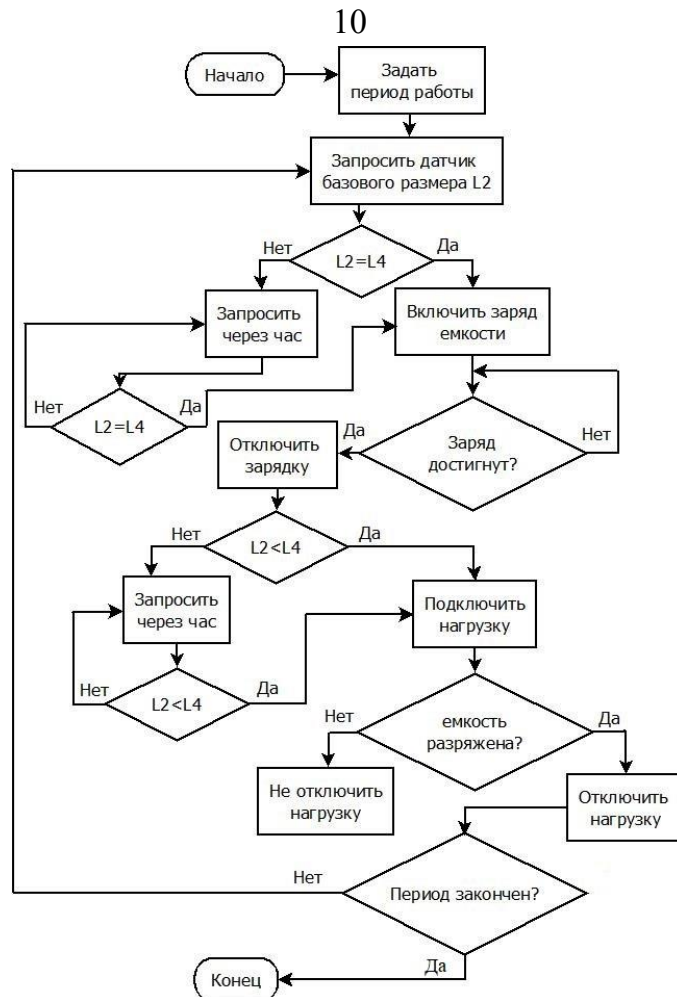
4 – груз для прижима пластин; 5 – бумажный лист; 7 – макетная плата

Рисунок 2 – Макетирование конденсатора с подвижными пластинами

Пластины конденсатора сначала заряжались от источника питания, затем источник питания отключался. После чего конденсатор подключался к входу АЦП микроконтроллера Arduino, программа измеряла напряжение на пластинах. Для более плотного прилегания пластин друг к другу и уменьшения расстояния между пластинами сверху на пластины помещался значительный груз. После измерения напряжения на обкладках груз снимался. Ёмкость при этом уменьшалась за счёт увеличения расстояния между обкладками по причине упругой деформации бумаги. Поскольку ёмкость была отключена от питания, заряд оставался постоянный, то при уменьшении ёмкости напряжение возрастало. Таким образом, с использованием натурального макета доказана работоспособность идеи, лежащей в основе электромеханического преобразователя.

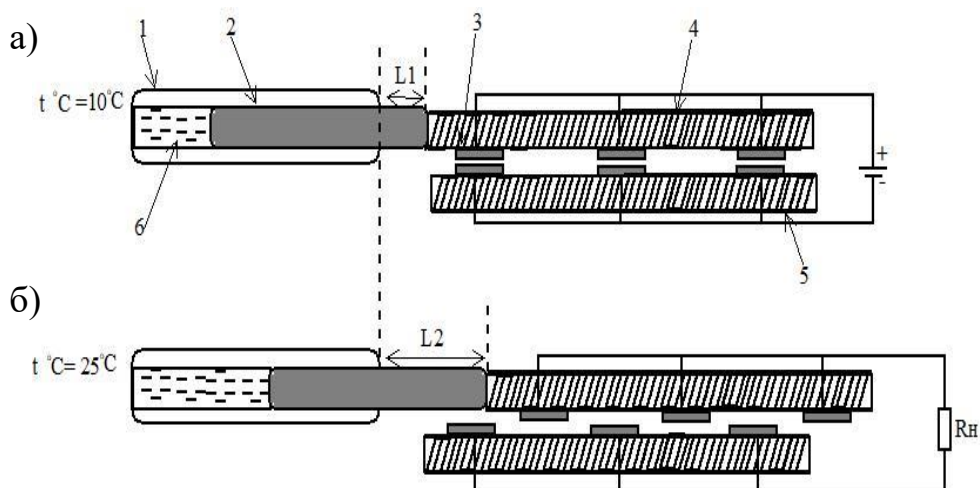
Сложность работы комплекса и преобразователя в составе энергосистемы заключается в том, что значение перепада температур день-ночь меняется в зависимости от времени года, что обуславливает изменение линейных размеров активного стержня. Алгоритм управления должен контролировать этот процесс, заряжая ёмкости при отсутствии воздушного зазора, и разряжать на нагрузку при появлении зазора. Алгоритм этого процесса показан на рисунке 3.

Основной проблемой предлагаемого преобразователя является низкая мощность, обусловленная тем, что изменение линейного размера активного стержня при перепаде температур имеет порядка нескольких миллиметров. Для устранения этого недостатка в работе было предложено увеличение мощности преобразователя с использованием модульного принципа, поскольку есть материалы, в том числе газы и жидкости, которые при таком перепаде температур значительно меняют свой объём. Данный эффект используется в термоцилиндрах для регулирования температуры климата теплиц. При изменении температуры, например днём до 26 °С, шток цилиндра выдвигается на 150 мм. Это устройство было использовано для решения указанных выше проблем. Выдвижной шток такого цилиндра был соединён с набором конденсаторов, которые будут срабатывать несколько раз сутки, так как шток цилиндра выдвигается на большую длину. На рисунке 4 показано техническое решение данной проблемы.



L_2 – размер расстояния между пластинами конденсатора без зазора (базовый размер); L_4 – размер расстояния между пластинами конденсатора с зазором

Рисунок 3 – Блок-схема алгоритма управления преобразователем гибридного комплекса в течение суток



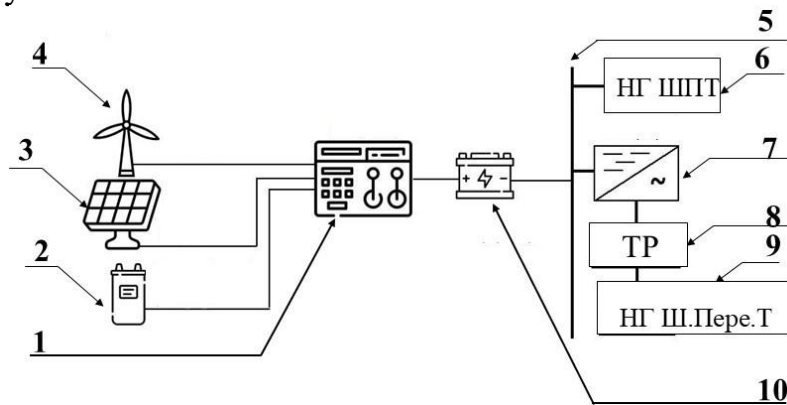
1 – корпус алюминиевого цилиндра; 2 – подвижный шток поршня цилиндра; 3 – конденсаторы C_1, C_2, \dots, C_n ; 4 – диэлектрическое основание крепления подвижных пластин конденсатора; 5 – диэлектрическое основание крепления неподвижных пластин конденсатора; 6 – термочувствительная жидкость

Рисунок 4 – Положение штока цилиндра при низкой температуре (а) и при высокой температуре (б)

Из рисунка 4 видно, что при низкой температуре подвижный шток поршня цилиндра вдвинут в цилиндр и пластины конденсаторов находятся друг над другом. После того, как температура повышается, шток поршня выдвигается и перемещает пластины конденсатора на заданное расстояние. В этом случае ёмкости конденсаторов уменьшаются, напряжение на выходе вырастает на значение изменения ёмкости конденсаторов. Проведённый эксперимент подтвердил такую возможность.

Третья глава посвящена разработке автономного гибридного электротехнического комплекса с преобразователем энергии перепада температур и алгоритмов его управления. Реализация гибридной электростанции для питания малоомощного потребителя на базе только солнечных панелей и ветростанции обладает существенным недостатком – сильной зависимостью от погодных условий. Например, ночью отсутствует солнце, а также может отсутствовать ветер. Поэтому появляется задача ослабления отмеченного недостатка за счёт использования новых альтернативных источников, в частности дополнения таких гибридных комплексов источником энергии на основе использования перепада температур в течение суток, что позволит повысить надёжность электроснабжения.

Составляющими гибридного комплекса будут являться: солнечная фотоэлектрическая установка, ветрогенератор малой мощности, источник энергии на базе преобразователя перепада температур и накопителя энергии (аккумуляторных батарей), которые соединены через шину постоянного тока для обеспечения согласования режимов работы. Состав и функциональная схема предлагаемого комплекса показаны на рисунке 5.



- 1 – контроллер; 2 – преобразователь перепада температур;
 3 – солнечная панель; 4 – ветрогенератор; 5 – шина постоянного тока;
 6 – нагрузка шины постоянного тока; 7 – инвертор; 8 – трансформатор;
 9 – нагрузка шины переменного тока; 10 – аккумулятор

Рисунок 5 – Структурная схема гибридного комплекса, дополненного преобразователем энергии перепада температур

Основной задачей комплекса является обеспечение потребителя бесперебойной подачей электроэнергии. В случае недостатка вырабатываемой энергии от одного источника (например, отсутствие инсоляции солнечного излучения) в «подпитку» должен вступить другой, а при кратковременной нехватке электроэнергии необходимо включить в работу аккумуляторный накопитель энергии преобразователя перепада температур.

Для разработки математического описания комплекса необходимо описание распределения нагрузок представленного на рисунке 6 автономного комплекса. Для этого необходимо рассчитать теоретические значения выработки электроэнергии по всем источникам.

Возможная выработка электроэнергии ВЭУ

$$P_{\text{ВЭУ}}(t) = \frac{\rho}{2}(t) \cdot F_{\text{ВЭУ}} \cdot V_{\text{в}}^3(t) \cdot CP,$$

где $\rho(t)$ – плотность воздуха, кг/м³; $V_{\text{в}}(t)$ – скорость ветра на высоте установки ветроколеса, м/с; $F_{\text{ВЭУ}}$ – обметаемая площадь ВЭУ, м²; CP – коэффициент мощности ВЭУ; (t) – текущий момент времени.

Возможная выработка электроэнергии СП

$$P_{\text{СП}}(t) = I_{\text{с}}(t) \cdot S \cdot CP \cdot \eta,$$

где $I_{\text{с}}(t)$ – интенсивность солнечного излучения, Вт/м²; S – площадь фотоэлемента, м²; CP – коэффициент, учитывающий влияние температуры для мощности; η – номинальный КПД солнечного элемента; (t) – текущий момент времени.

Возможная выработка электроэнергии системы перепада температур (ППТ)

$$P_{\text{ППТ}}(t) = I_1 \cdot U_1 \cdot \varepsilon_1,$$

где I_1 – ток нагрузки; U_1 – напряжение возбуждения; ε_1 – относительная диэлектрическая проницаемость материала между пластинами с максимально высоким её значением.

В основе математического описания комплекса лежит баланс потребляемой и производимой энергии. Тогда функция мощности $P_{\Sigma}(t)$ находится как сумма всех мощностей

$$P_{\Sigma}(t) = P_{\text{ВЭУ}}(t) \max + P_{\text{СП}}(t) \max + P_{\text{ППТ}}(t) \max - \Sigma \Delta P(t) - P_{\text{н}}(t),$$

где $P_{\text{н}}(t)$ – нагрузка потребителя, кВт; $\Sigma \Delta P(t)$ – суммарные электрические потери СЭС.

Общая мощность потерь

$$\begin{aligned} \Sigma \Delta P(t) = & \Delta P_{\text{ТР-ВЭУ}}(t) + \Delta P_{\text{ИНВ}}(t) + \Delta P_{\text{П-СП}} + \Delta P_{\text{П-ВЭУ}}(t) + \\ & + \Delta P_{\text{П-ППТ}} + \Delta P_{\text{ТР-общ}}(t) + \Delta P_{\text{АКБ}}(t) + \Delta P_{\text{ИНВ1}}(t), \end{aligned}$$

где $\Delta P_{\text{ТР-ВЭУ}}(t)$, $\Delta P_{\text{ТР-общ}}(t)$ – электрические потери в трансформаторах, кВт; $\Delta P_{\text{П-СП}}$, $\Delta P_{\text{П-ВЭУ}}$ – электрические потери в проводах, кВт; $\Delta P_{\text{АКБ}}(t)$ – электрические потери в аккумуляторных батареях, кВт; $\Delta P_{\text{ИНВ1}}(t)$ – электрические потери в инверторе, кВт.

Функция мощности $P_{\Sigma}(t)$ является знакопеременной функцией. Если $P_{\Sigma}(t)$ имеет положительный знак, то генерируемой мощности от источников, использующих ВИЭ, достаточно для прямого снабжения потребителя и заряда АКБ

$$P_{\Sigma}^{+}(t) = \begin{cases} P_{\Sigma}(t), & (P_{\Sigma}(t) > 0) \cap (Q_{\text{ак.б}}^{\text{Мак}} - Q_{\text{ак.б}}^{\text{ТМ}}) \cdot U \geq \eta_{\text{ак.б}} \cdot P_{\Sigma}(t) \cdot \Delta t \\ \frac{(Q_{\text{ак.б}}^{\text{Мак}} - Q_{\text{ак.б}}^{\text{ТМ}}(t))}{\Delta t} \cdot U, & (P_{\Sigma}(t) > 0) \cap (Q_{\text{ак.б}}^{\text{Мак}} - Q_{\text{ак.б}}^{\text{ТМ}}(t)) \cdot U \geq \eta_{\text{ак.б}} \cdot P_{\Sigma}(t) \cdot \Delta t \\ 0, & P_{\Sigma}(t) < 0 \end{cases}$$

где Q – ёмкость аккумуляторной батареи.

Если $P_{\Sigma}(t)$ имеет отрицательный знак, то генерируемой мощности недостаточно для обеспечения потребителя, и недостающая мощность восполняется за счёт аккумуляторных батарей

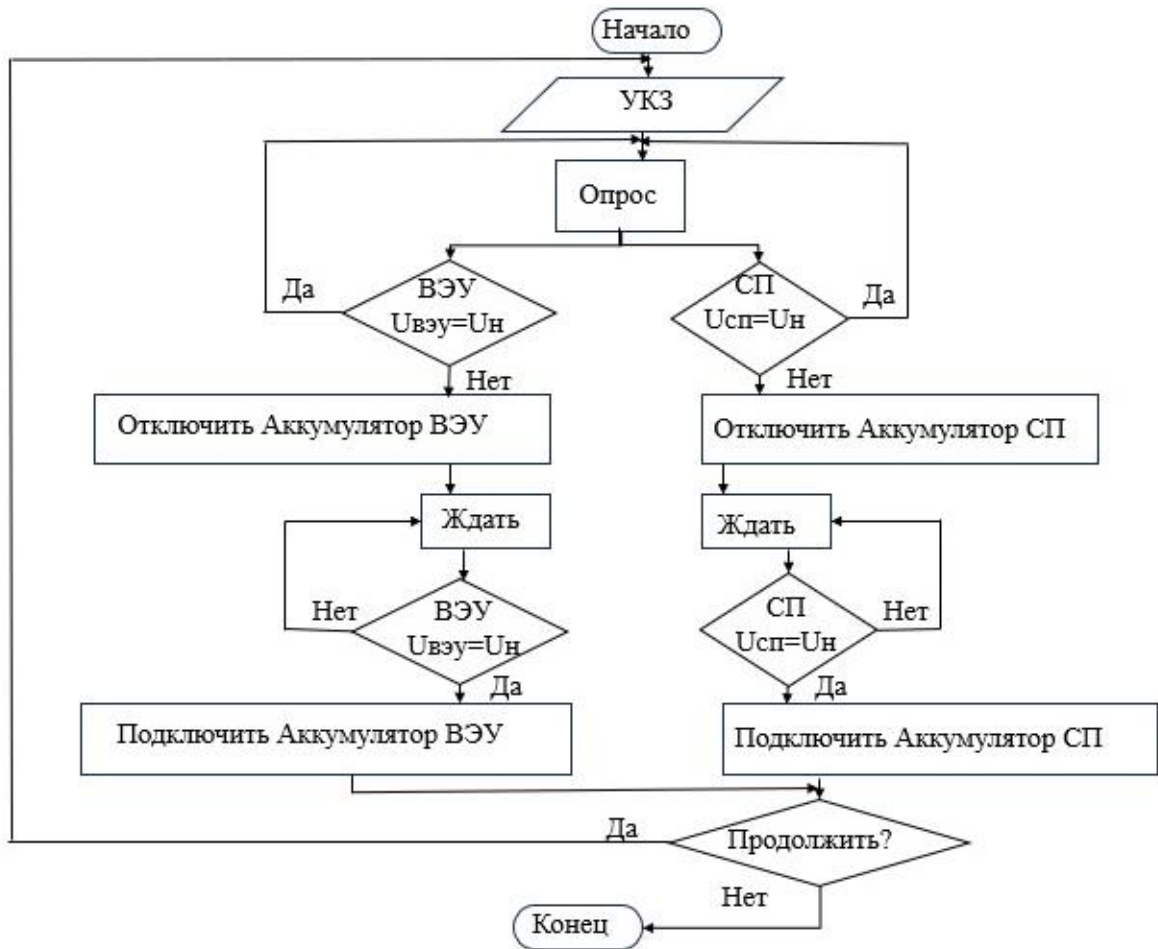
$$P_{\Sigma}^{-}(t) = \begin{cases} P_{\Sigma}(t), & (P_{\Sigma}(t) < 0) \cap (Q_{\text{ак.б}}^{\text{Мин}} - Q_{\text{ак.б}}^{\text{ТМ}}(t)) \cdot U \geq \frac{P_{\Sigma}(t) \cdot \Delta t}{\eta_{\text{ак.б}}} \\ \frac{(Q_{\text{ак.б}}^{\text{Мин}} - Q_{\text{ак.б}}^{\text{ТМ}}(t))}{\Delta t} \eta_{\text{ак.б}} \cdot U, & (P_{\Sigma}(t) < 0) \cap (Q_{\text{ак.б}}^{\text{Мин}} - Q_{\text{ак.б}}^{\text{ТМ}}(t)) \cdot U < \frac{P_{\Sigma}(t) \cdot \Delta t}{\eta_{\text{ак.б}}} \\ 0, & P_{\Sigma}(t) > 0 \end{cases}$$

Полученные зависимости функционирования источников энергии позволяют решить задачу контроля заряда аккумуляторных батарей всей системы.

Контроль уровня разряда аккумуляторных батарей не позволяет доводить их разряд до критического значения. Для этого в состав управления комплексом была введена система контроля заряда батарей (СКЗ). Система контроля заряда работает следующим образом.

Если напряжение любой из аккумуляторных батарей снизится ниже нормы, то СКЗ с помощью контактного контрольного устройства (ККУ) отключает эту батарею от шины постоянного тока и батарея переходит в режим ожидания выработки энергии ветром или солнечным излучением. Как только, например, появится ветер и ветрогенератор начнёт заряжать батарею, и батарея зарядится до нормы, датчики передадут эту информацию на СКЗ, и СКЗ подключит эту батарею к шине постоянного тока. Это позволяет продлевать срок службы аккумуляторных батарей и предотвращает их преждевременный износ. Реализация данного алгоритма показана на рисунке 6.

Четвёртая глава посвящена моделированию гибридного электротехнического комплекса малой мощности. Основной целью моделирования гибридного комплекса является проверка его работоспособности и оценка эффективности функционирования при возникновении различных природно-климатических аномалий, к которым в рассматриваемом случае относятся значительные по времени промежутки безветрия и отсутствия солнечной инсоляции. Функциональная схема разработанной модели гибридного комплекса показана на рисунке 7.



Uвэу – напряжение ветрогенератора; Uсп – напряжение солнечной панели;
 Uн- номинальное напряжение

Рисунок 6 – Алгоритм системы контроля заряда аккумуляторных батарей

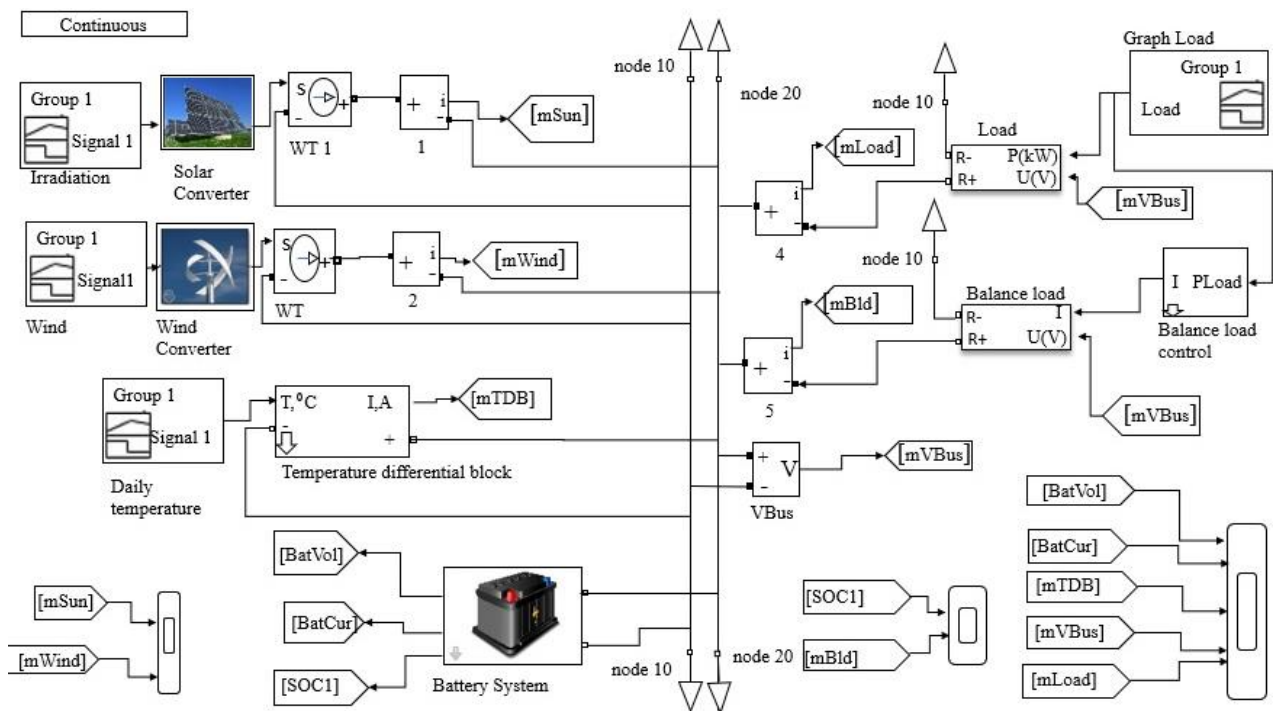


Рисунок 7 – Функциональная схема модели гибридного комплекса

Осциллограммы составляющих нагрузочных токов от солнечной панели, ветрогенератора и преобразователя перепада температур показаны на рисунках 8 – 9.

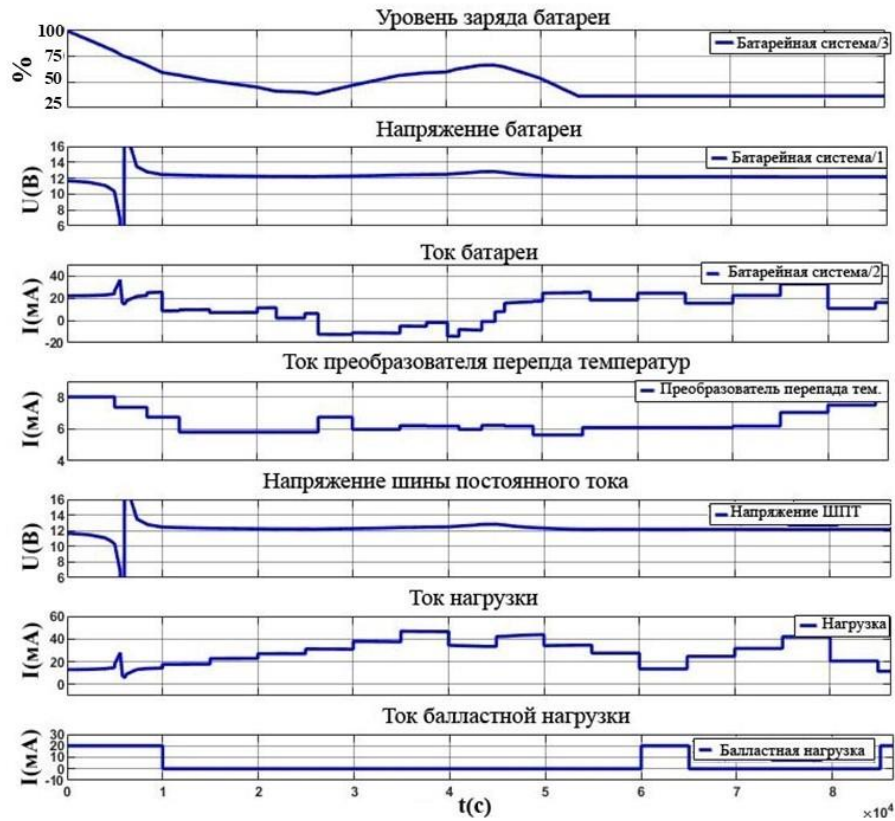


Рисунок 8 – Результаты моделирования гибридного комплекса при производных значениях перепада температур

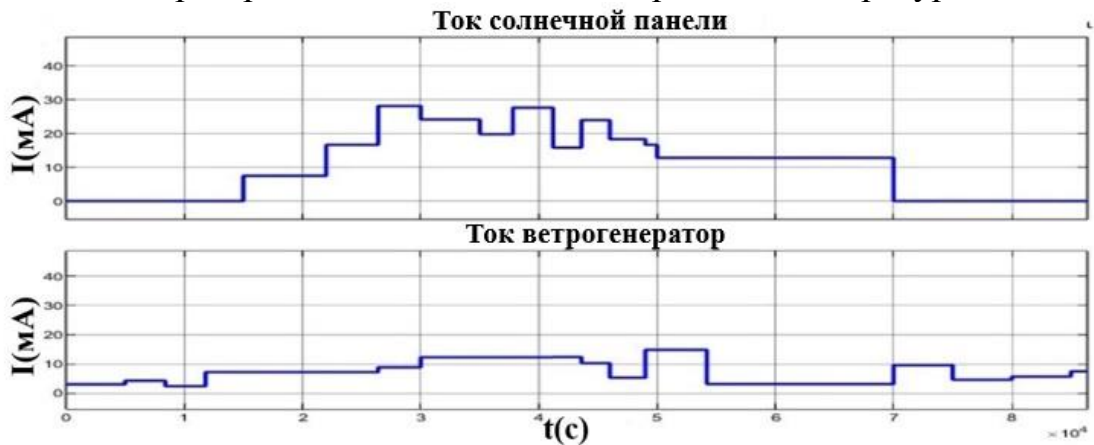


Рисунок 9 – Результаты моделирования солнечной панели и ветрогенератора гибридного комплекса при производных значениях солнечной инсоляции и скорости ветра

Здесь приведены результаты моделирования гибридного комплекса для случая произвольных значений солнечной инсоляции, скорости ветра и суточного перепада температур, а также осциллограммы составляющих токов нагрузки (мА) от солнечной панели и ветрогенератора. Анализ приведённых кривых показывает, что напряжение на шине постоянного тока находится на приемлемом уровне и глубокого разряда аккумуляторной батареи не наблюдается.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведённое диссертационное исследование является научно-квалификационной работой, в которой изложены новые научно обоснованные принципы выработки электроэнергии за счёт суточного перепада температур, имеющие значение для развития гибридных комплексов электроснабжения на основе ВИЭ. Основной целью работы является повышение устойчивости работы гибридного комплекса для автономных потребителей малой мощности.

Отметим следующие наиболее важные результаты, полученные в ходе работы над диссертацией:

1 Предложена идея создания электромеханического преобразователя энергии на базе конденсатора с подвижной обкладкой, обеспечивающая выработку электроэнергии за счёт суточного перепада температур, и доказана её работоспособность.

2 Дано математическое описание гибридного электротехнического комплекса для потребителей малой мощности на основе ВИЭ, отличающееся тем, что включает дополнительный канал выработки электроэнергии с помощью преобразователя перепада температур.

3 Разработаны алгоритмы управления преобразователем энергии перепада температур окружающей среды при сезонных перепадах температур в течение года с привязкой к месту установки.

4 Разработана имитационная модель гибридного электротехнического комплекса для потребителей малой мощности на основе ВИЭ с преобразователем перепада температур в среде MATLAB, позволяющая проводить исследования комплекса в различных режимах работы при вариации климатических условий.

5 Синтезированы алгоритмы управления комплексом при годовых, месячных и суточных изменениях перепада температур, позволяющие автоматизировать настройки программы управления комплексом по сезонам года.

6 Создано программное обеспечение определения среднесуточного перепада температуры, посезонной, месячной и годовой температуры в соответствии с местом установки гибридного электротехнического комплекса по отдельным регионам Российской Федерации и республике Мьянма, позволяющее автоматизировать процесс настройки системы управления гибридным электротехническим комплексом.

7 Разработана имитационная модель гибридного электротехнического комплекса для потребителей малой мощности на основе ВИЭ с преобразователем перепада температур в среде MATLAB, позволяющая проводить исследования комплекса в различных режимах работы при вариации климатических условий. Результаты моделирования гибридного электротехнического комплекса подтвердили устойчивость его функционирования при изменениях климатических параметров.

8 Результаты диссертации использованы в программно-аппаратных разработках по автономным источникам питания систем информационной безопасности удаленного мониторинга ООО «Дальневосточные системы безопасности».

Дальнейшие исследования могут развиваться в следующих направлениях:

- совершенствование принципов построения и алгоритмов управления преобразователем энергии на основе суточного перепада температур;

- построение преобразователя перепада температур на физическом уровне с использованием новейших достижений в области диэлектриков и полупроводников.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи, включённые в перечень, утверждённый ВАК

1 Разработка гибридного комплекса электроснабжения микроспутников с преобразователем энергии перепада температур / В. А. Челухин, А. В. Васильев, Е. В. Абрамсон, Пьей Зон Аунг // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2023. – № 9. – С. 403-407. DOI 10/24412/207071-6168-2023-9-398-399.

2 Разработка преобразователя энергии перепада температур бидиэлектрического типа для автономного гибридного электротехнического комплекса небольшой мощности / Е. В. Абрамсон, Пьей Зон Аунг, В. А. Челухин, А. В. Васильев // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2023. – № 9. – С. 424–428. (Категория К2).

3 Повышение эффективности работы преобразователя энергии системы перепада температур технологии возобновляемой энергетики / Е. В. Абрамсон, Пьей Зон Аунг, В. А. Челухин., А. В. Васильев // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2024. – № 3. – С. 381–385. (Категория К2). DOI 10/24412/2071-6168-2024-3-281-382.

Статьи, индексируемые в наукометрической базе Scopus

4 Development of an algorithm for the operation of the control system of the temperature difference converter during the day / V. A. Cheluhin; Piei Zon Aung, M. S. Krujaev; E. V. Abramson // 2019 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon) Vladivostok, Russia. 1-4 October 2019. P. 2094. (Scopus, Web of Science). DOI: 10.1109/FarEastCon.2019.8934706. Publisher: IEEE.

5 Mathematical Modeling of Power Generation from Day-Night Temperature Drop Using Neural Networks and Artificial Intelligence / V.A. Cheluhin; Piei Zon Aung, M.S. Krujaev; E.V. Abramson// 2019 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon) Vladivostok, Russia. 1-4 October 2019. P. 2052 (Scopus, Web of Science) INSPEC Accession Number: 19229331. DOI: 10.1109/FarEastCon.2019.8934035. Publisher: IEEE.

6 Development of Software for Collecting Region-Wise Values of Day-Night Temperature Drop for Renewable Energy Source / V. A. Cheluhin; Piei Zon Aung, M. S. Krujaev; E. V. Abramson // 2019 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon) Vladivostok Russia. 1-4 Oct. 2019 / INSPEC Accession Number: 19229166 / Date Added to IEEE Xplore: 19 December 2019 / DOI: 10.1109/FarEastCon.2019.8934706 / Publisher: IEEE Conference Location: Vladivostok, Russia).

7 Graphical Analysis of Day – Night Temperature Difference by Interpolation and Approximation Methods for the Energy Converter of the Environment / Peiei Zone Aung, V. A. Chelukhin // International Conference on Automatics and Energy (ICAE 2021) Vladivostok, Russia. FEFU,2021. DOI: 10.1088/1742-6596/2096/1/012021.

8 Development of a Structural Block Diagram of a Day–Night Temperature Difference Energy Converter / P. Z. Aung, V. A. Chelukhin // SMART Automatics and

Energy. Smart Innovation, Systems and Technologies, vol 272. Springer, Singapore DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-16-8759-4_13. P. 121–126.

9 Experimental Study of Energy Conversion of Daily Temperature Difference / Pyae Zon Aung, V. A. Chelukhin, A. V. Vasiliev // International Conference on Automatics and Energy (ICAE 2021). Vladivostok, Russia. FEFU, 2019. DOI: 10.1088/1742-6596/2096/1/012133.

В других изданиях

10 Преобразователь энергии суточного перепада температур для энергоснабжения удалённых сельскохозяйственных объектов / Пьей Зон Аунг, Е. В. Абрамсон, В. А. Челухин [и др.] // Электротехнологии и электрооборудование АПК. – 2022. – Т. 69. – № 2(47). – С. 54–58.

11 Экспериментальное исследование преобразования энергии суточного перепада температур / Пьей Зон Аунг, В. А. Челухин, А. В. Васильев, Е. В. Абрамсон // Учёные записки КНАГУ. – 2023. – № V(69). Науки о природе и технике. – С. 43–52.

12 Математическое моделирование процесса получения энергии при использовании перепада температур день-ночь на основе нейронных сетей и искусственного интеллекта / Пьей Зон Аунг, Е. В. Абрамсон, В. А. Челухин [и др.] // Учёные записки КНАГУ. – 2020. – № I-1(41). Науки о природе и технике. – С. 18–24.

13 Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2019664637 Российская Федерация. Программа для анализа перепада температур. Правообладатель ; заявл. 25.10.2019 ; опубл. 11.11.2019, Реестр программ для ЭВМ / Пьей Зон Аунг (RU) ; заявитель и правообладатель ФГБОУ ВО «КНАГУ». – 1 с.

14 Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2023612776 Российская Федерация. Программа расчёта электрической прочности системы перепада температур ; заявл. 01.02.2023 ; опубл. 07.02.2023, Реестр программ для ЭВМ / Е. В. Абрамсон (RU), Пьей Зон Аунг (MM), В. С. Бородин (RU), М. К. Шолохов (RU) ; правообладатель: ФГБОУ ВО «КНАГУ». – 1 с.