

На правах рукописи

Орел Евгений Александрович



**ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ АВТОНОМНЫХ
ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ С
ВОЗОБНОВЛЯЕМЫМИ ИСТОЧНИКАМИ ЭНЕРГИИ ПУТЕМ
АДАПТИВНОЙ РЕГУЛИРОВКИ РЕЖИМОВ ИХ РАБОТЫ**

Специальность 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы

**Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Санкт-Петербург – 2025

Диссертация выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II».

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор

Шпенст Вадим Анатольевич

Официальные оппоненты:

Суслов Константин Витальевич

доктор технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ», кафедра гидроэнергетики и возобновляемых источников энергии, профессор;

Мельникова Ольга Сергеевна

кандидат технических наук, доцент, общество с ограниченной ответственностью «Научно-исследовательский институт природных газов и газовых технологий - Газпром ВНИИГАЗ», лаборатория энергетического оборудования и систем, старший научный сотрудник.

Ведущая организация – федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина), г. Санкт-Петербург.

Защита диссертации состоится **17 июля 2025 г. в 12:00** на заседании диссертационного совета ГУ.6 Горного университета по адресу: 199106, г. Санкт-Петербург, 21-я В.О. линия, д.2, **аудитория № 3321.**

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Горного университета и на сайте www.spmi.ru.

Автореферат разослан 16 мая 2025 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ
диссертационного совета



УСТИНОВ
Денис Анатольевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования:

По оценкам Министерства энергетики РФ, на изолированных труднодоступных территориях (ИТТ) насчитывается до 100 тысяч объектов, которые можно обеспечить электроснабжением с применением возобновляемых источников энергии (ВИЭ). В первую очередь, речь идёт об объектах малой мощности (до 100 кВт расчетной мощности нагрузки), таких как вахтовые и рабочие посёлки, метеорологические станции, объекты связи, аппаратура линейных участков трубопроводного транспорта нефти и газа, вертолетные площадки и т.д.

В настоящее время основным источником электроснабжения на ИТТ являются дизель-генераторные установки (ДГУ). Чтобы уменьшить нагрузку на ДГУ, получила распространение практика использования автономных гибридных электротехнических комплексов (ЭТК), совмещающих работу ДГУ с фото- (ФЭУ) и ветро-электрическими (ВЭУ) установками.

Уровень генерации ФЭУ и ВЭУ изменяется в зависимости от погодных условий и времени суток. Из-за колебаний в генерации, характерной особенностью автономных ЭТК с ВИЭ является широкий диапазон варьирования рабочих токов и напряжений в полупроводниковых преобразователях электроэнергии (ППЭ) в процессе эксплуатации. Рабочий ток, уровень входного и выходного напряжения, загрузка определяют режим работы и КПД ППЭ. Каждый преобразователь имеет наилучшие энергетические характеристики в номинальном режиме работы, на который он спроектирован, и отклонение от него приводит к снижению КПД ППЭ. В условиях постоянно изменяющихся значений рабочих токов и напряжений общий уровень потерь электроэнергии в преобразователях увеличивается, следовательно, снижается энергоэффективность всего автономного ЭТК с ВИЭ.

Снижение потерь электроэнергии в режимах работы ППЭ, отличных от номинальных, позволит повысить коэффициент использования установленной мощности (КИУМ) ФЭУ и ВЭУ, сократить срок окупаемости капитальных затрат в автономных ЭТК с ВИЭ.

Таким образом, актуальной задачей является повышение энергоэффективности автономных ЭТК с ВИЭ путем снижения уровня потерь электроэнергии в ППЭ, работающих в условиях изменчивого характера профилей генерации и потребления электроэнергии.

Степень разработанности темы исследования:

Проблему электроснабжения ИТТ при помощи автономных ЭТК с ВИЭ затрагивали в своих работах многие отечественные и зарубежные ученые: В.В. Елистратов, Б.В. Лукутин, В.Г. Николаев, О.С. Попель, С.Г. Обухов, В.В. Бессель, рассматривали, главным образом, вопросы проектирования и целесообразность использования ветровых и солнечных ЭТК по сравнению с энергогенерирующими установками на органическом топливе.

В работах П.П. Безруких, Д.С. Стребкова, В.И. Виссарионова, А.А. Бельского, В.З. Манусова, Е.Н. Соснина, С.В. Соломина предложены методы оптимизации жизненного цикла объектов возобновляемой энергетики, включающие определение оптимальной структуры комплекса, синхронизацию различных типов энергогенерирующих установок и накопителей энергии между собой, обеспечение требуемого качества электроэнергии, оценку надежности работы системы. В работах Б.Н. Абрамовича описывались особенности использования автономных ЭТК с ВИЭ совместно с ДГУ на предприятиях минерально-сырьевого сектора. Ученые К.В. Суслов, С.А. Цырук, М.Г. Тягунов и А.Г. Васьков занимались оптимизацией состава оборудования и изучением режимов работы энергогенерирующих установок в комплексах с ВИЭ. Труды зарубежных авторов J. Dekker, F. Jurado, V. Salas, R. Dufo-Lopez, José L. Bernal-Agustín, G. Rauschenbach касались вопросов выбора алгоритмов работы автономных ЭТК с ВИЭ, включая управление электрической нагрузкой.

Опираясь на данные работы, можно отметить, что в них недостаточно внимания было уделено исследованию режимов работы энергопреобразующей аппаратуры. Не рассмотрены вопросы оценки влияния уровня входного и выходного напряжения ППЭ на энергоэффективность работы автономных ЭТК с ВИЭ.

Объект исследования – автономный электротехнический комплекс с возобновляемыми источниками энергии и расчетной мощностью нагрузки до 100 кВт.

Предмет исследования – структура и параметры автономного ЭТК с ВИЭ, алгоритмы управления ППЭ в его составе.

Цель работы – повышение энергоэффективности автономного ЭТК с ВИЭ путем адаптивной регулировки режимов работы ППЭ в зависимости от уровня генерации ВИЭ и уровня потребления нагрузки.

Идея работы: Повышение энергоэффективности автономного ЭТК с ВИЭ достигается снижением суммарных потерь электроэнергии в ППЭ в составе комплекса за счет применения адаптивного регулирования напряжения шины постоянного тока в зависимости от уровней динамических потерь мощности в каждом ППЭ.

Основные задачи исследования:

1. Провести сравнительный обзор структурных схем построения автономного ЭТК с ВИЭ для электроснабжения нагрузки расчетной мощностью до 100 кВт на ИТТ.

2. Разработать алгоритм и программу для ЭВМ для расчета минимальных установленных мощностей ФЭУ, ВЭУ и емкости АБ, обеспечивающих бесперебойность электроснабжения потребителей, а также для выполнения расчета потерь электроэнергии в ППЭ с учетом доли возобновляемых источников в энергопотреблении.

3. Провести анализ потерь электроэнергии в ППЭ с учетом структурной схемы построения автономного ЭТК с ВИЭ. Установить распределение потерь в ППЭ комплекса, определить средний уровень потерь с учетом доли ВИЭ в энергопотреблении.

4. Разработать алгоритм управления ППЭ, основанный на адаптивном регулировании уровня напряжения согласующей шины постоянного тока, связывающей различные ППЭ в составе автономного ЭТК с ВИЭ, в зависимости от текущей мощности генерации ФЭУ и ВЭУ, мощности потребления нагрузки.

5. Выполнить имитационное компьютерное моделирование работы автономного ЭТК с ВИЭ с учетом разработанного алгоритма управления ППЭ для оценки энергоэффективности, проверить

влияние регулировки уровня напряжения шины на потери электроэнергии в ППЭ на имитационном лабораторном стенде.

6. Провести оценку экономической эффективности внедрения алгоритма адаптивного регулирования и оценку экологического воздействия при его использовании.

Научная новизна работы:

1. Установлены зависимости потерь электроэнергии в ППЭ автономного ЭТК с ВИЭ от емкости аккумулятора и доли возобновляемых источников в энергопотреблении с учетом соотношений номинальных мощностей ВЭУ и ФЭУ, позволяющие обосновать структуру и выбор параметров комплекса, обеспечивающих бесперебойность электроснабжения потребителей.

2. Установлена зависимость потерь электроэнергии в ППЭ автономного ЭТК с ВИЭ с отдельной работой резервного источника электроснабжения (дизель-генераторной установки) с другими электрогенерирующими установками, связанными согласующей шиной постоянного тока, от фиксированного рабочего напряжения шины с учетом вариации профилей генерации возобновляемых источников.

Содержание диссертации соответствует паспорту научной специальности 2.4.2. «Электротехнические комплексы и системы» по пунктам:

п. 1. Развитие общей теории электротехнических комплексов и систем, анализ системных свойств и связей, физическое, математическое, имитационное и компьютерное моделирование компонентов электротехнических комплексов и систем, включая электро-механические, электромагнитные преобразователи энергии и электрические аппараты, системы электропривода, электроснабжения и электрооборудования.

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

Теоретическая и практическая значимость работы:

Разработанный метод снижения потерь электроэнергии в ППЭ в составе автономного электротехнического комплекса внедрен в производственную деятельность АО «НПП «Ленинец» (акт о вне-

дрении результатов от 28.05.2024 г.) для создания наземных постов мониторинга окружающей обстановки.

Алгоритм адаптивного управления ППЭ для задания оптимального режима работы, характеризующегося наименьшими потерями электроэнергии в ППЭ, может быть использован в качестве теоретического руководства или экспериментальной базы при проектировании новых или модернизации существующих автономных ЭТК с ВИЭ малой мощности для ИТТ.

Результаты диссертационной работы по повышению энергоэффективности работы ППЭ в составе автономного ЭТК с ВИЭ подтверждены патентом на изобретение № 2786935 «Способ защиты стабилизатора напряжения постоянного тока от короткого замыкания с малыми тепловыми потерями» от 26.04.2022 г.

Методология и методы исследования

При выполнении исследований использовались методы классификации и обобщения, статистические методы обработки данных, методы математического моделирования из теории электрических цепей. Расчеты выполнялись в программных пакетах *Microsoft Excel*, *MathCad*, *Jupyter Notebook*. Разработка математических моделей, анализ и обработка данных осуществлялась с использованием языка программирования *Python*. Экспериментальные исследования были выполнены в программных средах имитационного компьютерного моделирования *Matlab/Simulink*. Проверка адекватности результатов проведена на разработанном имитационном лабораторном стенде.

На защиту выносятся следующие положения:

1. Снижение уровня потерь электроэнергии в полупроводниковых преобразователях автономного электротехнического комплекса с возобновляемыми источниками энергии достигается раздельной работой резервного источника электроснабжения (дизель-генераторной установки) с другими электрогенерирующими установками в составе комплекса, связанными согласующей шиной постоянного тока, с учетом доли возобновляемых источников в энергопотреблении.

2. Повышение энергоэффективности автономного электротехнического комплекса с возобновляемыми источниками энергии

достигается за счет адаптивной регулировки уровня напряжения шины постоянного тока в зависимости от величины текущей мощности генерации фотоэлектрической и ветроэлектрической установок и мощности потребления нагрузки.

Степень достоверности результатов исследования основана на применении известных теорий и методов из области электротехники, физики, математического анализа. Использовались методики имитационного компьютерного моделирования в лицензированных программных средах. Полученные результаты были подтверждены натурными лабораторными экспериментами.

Апробация результатов. Результаты были продемонстрированы на всероссийских и международных научных конференциях: «2022 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering» (г. Санкт-Петербург, 2022 г.); Международной научно-технической конференции «Научные механизмы решения проблем в исследованиях молодых ученых» (г. Санкт-Петербург, 2022 г.); XII Международной научно-практической конференции «Наука в современном мире: результаты исследований и открытий» (г. Анапа, 2022 г.).

Личный вклад автора заключается в анализе зарубежной и отечественной научной литературы по теме автономных ЭТК с ВИЭ, формулировке цели, задач исследования и защищаемых положений. Проведен сравнительный анализ схем построения автономных ЭТК с ВИЭ для нагрузки расчетной мощностью до 100 кВт на ИТТ, обоснован выбор схемы построения автономного ЭТК с ВИЭ с точки зрения снижения потерь электроэнергии в ППЭ при различных уровнях замещения энергопотребления возобновляемыми источниками. Разработан алгоритм адаптивной регулировки режима работы ППЭ в составе комплекса в зависимости от текущей мощности генерации ВИЭ и мощности потребления нагрузки. Проведены экспериментальные исследования, в результате которых проверена адекватность предложенных технических решений.

Публикации. Результаты диссертационного исследования в достаточной степени освещены в 7 печатных работах, в том числе в 2 статьях – в изданиях из перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты

диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук (далее – Перечень ВАК), в 2 статьях – в изданиях, входящих в международную базу данных Scopus. Получен патент на изобретение.

Структура работы. Диссертация состоит из оглавления, введения, четырех глав с выводами по каждой из них, заключения, списка сокращений, списка литературы, включающего 157 наименований, и 2 приложения. Диссертация изложена на 159 страницах машинописного текста, содержит 97 рисунков и 33 таблицы.

Благодарности. Автор выражает глубокую благодарность и признательность кандидату технических наук, доценту кафедры электроэнергетики и электромеханики Бельскому Алексею Анатольевичу за предложенную идею работы, за неоценимую помощь в методологии исследований и ценные замечания при подготовке статей и диссертации.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении изложены актуальность, цель, задачи работы, научная новизна и защищаемые положения.

В первой главе изложено современное состояние возобновляемой энергетики в России, затронута проблема электроснабжения ИТТ, рассмотрен потенциал использования автономных ЭТК с ВИЭ на ИТТ, проведен анализ современного уровня развития ВИЭ, накопителей электроэнергии, ППЭ. Рассмотрены методы выбора номинальных параметров источников и накопителей электроэнергии в автономных ЭТК с ВИЭ.

Во второй главе проанализированы пять обобщенных структурных схем построения автономных ЭТК с ВИЭ малой мощности (с расчетной мощностью нагрузки до 100 кВт) для ИТТ, разработан алгоритм расчета номинальных параметров автономного ЭТК с ВИЭ, обеспечивающих бесперебойность электроснабжения потребителей, а также расчета потерь электроэнергии в ППЭ, обоснован выбор структуры и параметров автономного ЭТК с ВИЭ для электроснабжения нагрузки расчетной мощностью до 100 кВт.

В третьей главе построена имитационная компьютерная модель автономного ЭТК с ВИЭ, разработана математическая модель оценки потерь электроэнергии в ППЭ, разработан алгоритм адаптивной регулировки режимов работы ППЭ для снижения потерь электроэнергии, проведена оценка повышения энергоэффективности автономного ЭТК с ВИЭ с учетом разработанного алгоритма.

В четвертой главе предложена техническая реализация автономного ЭТК с адаптивным регулированием, проверено влияние регулировки уровня напряжения шины постоянного тока на потери электроэнергии в ППЭ, проведен анализ быстродействия алгоритма с учетом инерционности процессов регулирования. Проведена оценка экономической эффективности внедрения адаптивного регулирования и оценка экологического воздействия при его использовании.

В заключении представлены выводы по результатам исследований в соответствии с целью и решенными задачами.

Основные результаты диссертации отражены в следующих защищаемых положениях:

1. Снижение уровня потерь электроэнергии в полупроводниковых преобразователях автономного электротехнического комплекса с возобновляемыми источниками энергии достигается раздельной работой резервного источника электроснабжения (дизель-генераторной установки) с другими электрогенерирующими установками в составе комплекса, связанными согласующей шиной постоянного тока, с учетом доли возобновляемых источников в энергопотреблении.

Рассматриваемый автономный ЭТК с ВИЭ включает в себя ФЭУ, ВЭУ, аккумуляторную батарею (АБ) и резервный источник электроснабжения (ДГУ). Переток электроэнергии между электроустановками осуществляется через согласующую шину постоянного (DC) или переменного (AC) тока.

Рассмотренные обобщенные структурные схемы автономного ЭТК с ВИЭ представлены на рисунке 1. В ходе исследования было выполнено сравнение схем с точки зрения потерь электроэнергии в ППЭ (AC/DC, DC/DC, DC/AC преобразователи).

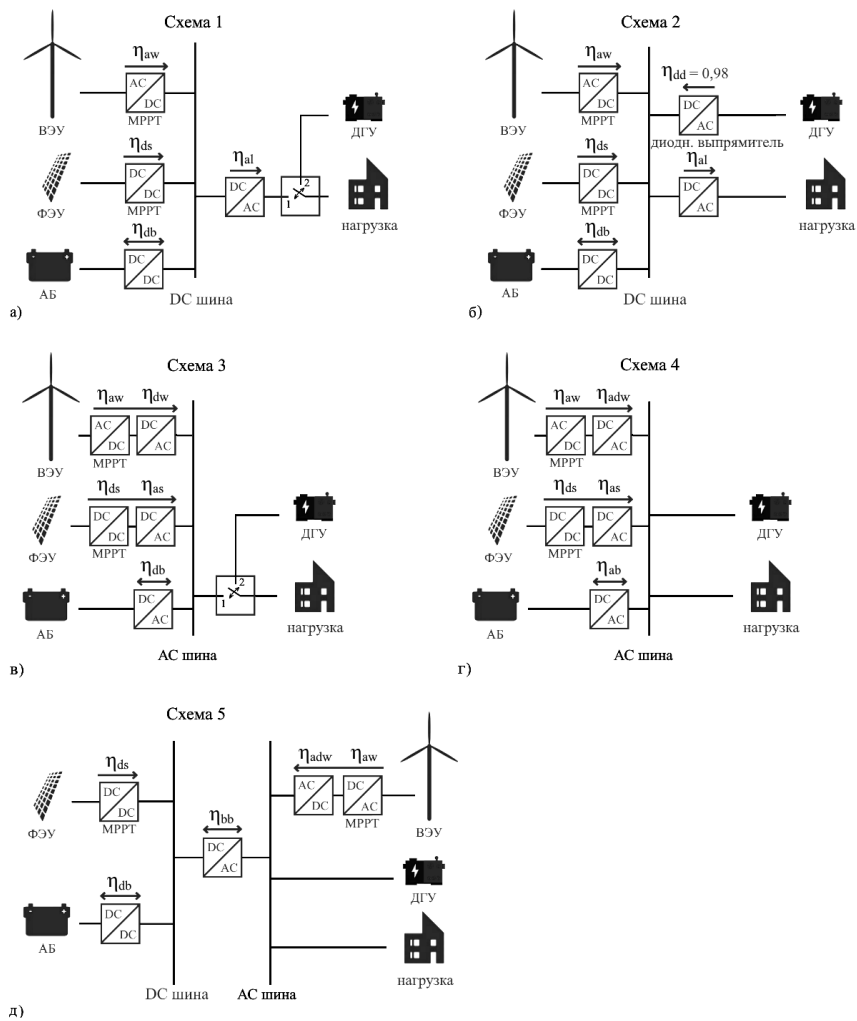


Рисунок 1 – Обобщенные структурные схемы автономного ЭТК с ВИЭ:

- а – DC шина с раздельной работой ДГУ (схема 1),
- б – общая DC шина (схема 2),
- в – AC шина с раздельной работой ДГУ (схема 3),
- г – общая AC шина (схема 4), д – смешанная (схема 5)

Для моделирования были использованы суточные профили: потребления электроэнергии нагрузкой (рисунок 2а), генерации ВЭУ (рисунок 2б), генерации ФЭУ (рисунок 2в) для характерного дня каждого сезона года на примере острова Попова (Приморский край). На профилях генерации и потребления за базис взята величина мощности 100 кВт. Работа каждой схемы построения автономного ЭТК с ВИЭ была промоделирована в течение 7 характерных дней каждого сезона с шагом дискретизации 15 минут.

Для оценки потерь электроэнергии в ППЭ были введены обозначения:

- η_{aw} и η_{dw} – КПД AC/DC и DC/AC преобразователей ВЭУ;
- η_{ds} и η_{as} – КПД DC/DC и DC/AC преобразователей ФЭУ;
- η_{ab} и η_{db} – КПД двунаправленных DC/AC и DC/DC ППЭ АБ;
- η_{dd} – КПД диодного выпрямителя напряжения ДГУ;
- η_{al} – КПД инвертора, питающего нагрузку;
- η_{bb} – КПД DC/AC преобразователя, связывающего шины.

При моделировании для всех преобразователей (за исключением диодного выпрямителя с $\eta_{dd} = 0,98$) в качестве допущения была принята одинаковая типовая характеристика КПД преобразования, заданная аналитически с помощью выражения (1):

$$\eta = \frac{m}{0,12m^2 + 1,002m + 0,02}, \quad (1)$$

где $m = P / P_{ном}$ – нагрузка ППЭ относительно номинального значения мощности нагрузки.

Алгоритм, блок-схема которого представлена на рисунке 3, позволяет определить минимальные установленные мощности ФЭУ, ВЭУ и емкость АБ, обеспечивающие бесперебойность электроснабжения потребителей с учетом заданной доли ВИЭ в энергопотреблении. Кроме того, данный алгоритм позволяет определить потери электроэнергии в ППЭ на основе заданных согласно выражению (1) типовых характеристик КПД ППЭ и заданного КПД АБ. Критерием бесперебойности является нулевое значение вероятности потери нагрузки *LLP* (*Loss of Load Probability*). Коэффициенты, характеризующие установленные мощности ФЭУ (K_{pv}), ВЭУ (K_{wt}) и емкость АБ (K_{bat}) представлены в относительных единицах, за базисное значение принята мощность равная 100 кВт.

При моделировании КПД аккумулятора принят равным 95%. Максимальный ток заряда АБ принят $0,2C$, где C – емкость батареи. ДГУ в качестве резервного источника электроснабжения включается, когда уровень заряда АБ (SOC – *State of Charge*) становится ниже порога в 20% и отключается, когда АБ зарядится до уровня в 50%.

На основе алгоритма (рисунок 3) была разработана программа для ЭВМ на языке *Python*. На рисунке 4 представлены полученные соотношения минимальных установленных мощностей ФЭУ, ВЭУ и емкости АБ в составе автономного ЭТК, обеспечивающие бесперебойность электроснабжения потребителей (в рассматриваемом примере доля ВИЭ в энергопотреблении равна 70%).

Уровень потерь электроэнергии в ППЭ относительно потребленной электроэнергии нагрузкой за рассматриваемый период моделирования представлен на рисунке 5 (доля ВИЭ в энергопотреблении равна 70%).

Обобщение результатов моделирования для рассмотренных структурных схем автономного ЭТК с ВИЭ, представленное в виде распределения уровня потерь электроэнергии в ППЭ с учетом доли ВИЭ в энергопотреблении, приведено на рисунке 6.

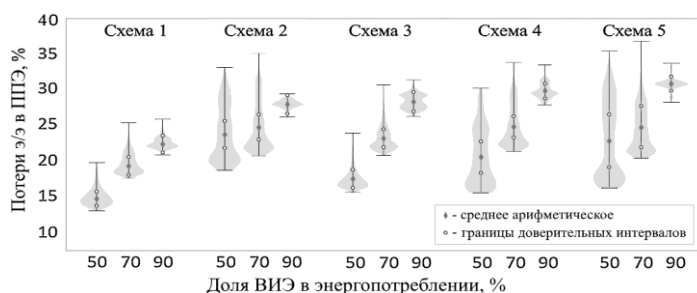


Рисунок 6 – Уровень потерь электроэнергии в ППЭ в составе автономного ЭТК с ВИЭ

Таким образом, снижение среднего уровня потерь электроэнергии в ППЭ (с учетом 95%-ного доверительного интервала) при различных долях ВИЭ в энергопотреблении достигается раздельной работой резервного источника электроснабжения (дизель-генераторной установки) с другими электрогенерирующими установками, связанными согласующей шиной постоянного тока.

2. Повышение энергоэффективности автономного электротехнического комплекса с возобновляемыми источниками энергии достигается за счет адаптивной регулировки уровня напряжения шины постоянного тока в зависимости от величины текущей мощности генерации фотоэлектрической и ветроэлектрической установок и мощности потребления нагрузки.

Окончательный выбор установленной мощности ФЭУ, ВЭУ и емкости АБ в выбранной схеме с отдельной работой резервного источника электроснабжения (ДГУ) с другими электрогенерирующими установками, связанными согласующей шиной постоянного тока, осуществляется на основе экономического критерия – минимума себестоимости электроэнергии (*LCOE – Levelized cost of electricity*). В качестве нагрузки выбран объект с расчетной мощностью 10 кВт (метеостанция), географически расположенный на острове Попова (Приморский край).

Таким образом, в окончательном составе автономного ЭТК с ВИЭ установленные мощности (с учетом доли ВИЭ в 50% от энергопотребления) составили: ВЭУ – 25 кВт; ФЭУ – 14,4 кВт (использованы односторонние фотоэлектрические панели (ФЭП)); ДГУ – 12 кВт (с учетом запаса по мощности в 20%), емкость АБ – 60 кВт·ч. При математическом моделировании автономного ЭТК учитывалась работа ВЭУ, ФЭУ, АБ и ППЭ, при этом работа ДГУ не рассматривалась, так как она не влияет на уровень потерь электроэнергии при отдельной работе ДГУ с другими электрогенерирующими установками. Энергетическая характеристика ВЭУ описывается выражением (2):

$$P_{\text{ВЭУ}} = \begin{cases} 0 & , \quad v_{\text{в}} < v_{\text{пуск}} \\ P_{\text{ном}} \left(\frac{v_{\text{в}}^3 - v_{\text{пуск}}^3}{v_{\text{ном}}^3 - v_{\text{пуск}}^3} \right) & , \quad v_{\text{пуск}} < v_{\text{в}} < v_{\text{ном}} \\ P_{\text{ном}} & , \quad v_{\text{ном}} \leq v_{\text{в}} \leq v_{\text{макс}} \\ 0 & , \quad v_{\text{в}} > v_{\text{макс}} \end{cases} \quad (2)$$

где $P_{\text{ВЭУ}}$ – генерация ВЭУ, кВт; $P_{\text{ном}}$ – номинальная мощность ВЭУ, кВт; $v_{\text{в}}$ – скорость ветра, м/с; $v_{\text{пуск}}$, $v_{\text{ном}}$, $v_{\text{макс}}$ – пусковая, номинальная и максимальная скорости ветра ВЭУ, соответственно, м/с.

Для построения эквивалентной схемы замещения АБ использовалось уравнение Шеферда (3):

$$U_{AB} = E_0 - \frac{K \cdot C}{\left(C - \int idt\right)} - Ri + A \cdot e^{-B \int idt}, \quad (3)$$

где U_{AB} – напряжение АБ, В; E_0 – напряжение холостого хода, В; C – емкость АБ, А·ч; i – ток заряда, А; $\int idt$ – заряд, полученный аккумулятором за время t , А·ч; R – внутреннее омическое сопротивление, Ом; K – коэффициент поляризации, В; A – амплитуда напряжения экспоненциальной зоны разряда, В; B – заряд батареи в конце экспоненциальной зоны, 1/(А·ч).

Работа ФЭП моделировалась на базе метода Джонса и Андервуда. За основу для моделирования солнечного излучения принята модель Лю и Джордана. Угол наклона ФЭП в 37° выбран в соответствии с существующими рекомендациями для максимальной выработки электроэнергии в течение года. Параметры ФЭП, ВЭУ и АБ для моделирования представлены в таблице 1. Данные об условиях окружающей среды с шагом дискретизации 1 час получены из открытой метеорологической базы NASA в выбранной географической точке. Модель условий окружающей среды включала в себя интенсивность солнечного излучения (рисунок 7а), температуру воздуха (рисунок 7б) и скорость ветра (рисунок 7в). Скорость ветра пересчитывалась с учетом высоты мачты ВЭУ. Профиль нагрузки задан согласно рисунку 2а, за базис взята величина мощности 10 кВт.

Для ППЭ была построена модель оценки потерь мощности согласно выражению (4):

$$P_{tot} = P_{r_ds} + P_f + P_g + P_d + P_{rd} + P_{ed} + P_{fd} + P_{rl} + P_{rc}, \quad (4)$$

где P_{tot} – полные потери мощности в ППЭ, Вт; P_{r_ds} – потери проводимости транзисторов, Вт; P_f – динамические потери на переключение транзисторов, Вт; P_g – затворные потери транзисторов, Вт; P_d – потери на встречно-параллельных диодах транзисторов, Вт; P_{rd} – потери проводимости на динамическом сопротивлении силовых диодов, Вт; P_{ed} – потери проводимости на противо-ЭДС силовых диодов, Вт; P_{fd} – динамические потери на переключение силовых диодов, Вт; P_{rl} – потери в дросселе, Вт; P_{rc} – потери на электролитических конденсаторах, Вт.

На основе модели были получены зависимости потерь от напряжения шины $P_{\text{tot}}(U_{DC})$ с учетом загрузки ППЭ относительно номинальной мощности нагрузки $m = P / P_{\text{ном}}$ для повышающего ППЭ (рисунок 8а), двунаправленного ППЭ АБ (рисунок 8б) и инвертора (рисунок 8в). Модель показала, что для одних ППЭ с ростом U_{DC} потери увеличиваются, для других – уменьшаются. Следовательно, в каждый момент времени в зависимости от загрузки ППЭ существует оптимальное значение напряжения шины U_{DC} .

На основе модели был разработан алгоритм адаптивной регулировки режимов работы ППЭ. Алгоритм основан на том, что на основе измерений рабочего тока и уровня входного и выходного напряжения преобразователей, при помощи математической модели производится оценка потерь электроэнергии в каждом ППЭ и определяется, каким в настоящий момент должно быть напряжение шины U_{DC} , чтобы минимизировать суммарные потери всех ППЭ. Для этого в автономный ЭТК с ВИЭ добавляется вычислительный блок (ВБ), получающий от локальных контроллеров (ЛК) ППЭ значения измеренных параметров (рисунок 9а). После расчета оптимального значения U_{DC} ВБ передает его в ЛК двунаправленного ППЭ АБ, который производит регулировку напряжения шины (рисунок 9б).

Алгоритм работы ВБ в виде блок-схемы приведен на рисунке 10. В памяти ВБ хранится массив допустимых значений U_{DC} с заданным шагом дискретизации. Методом последовательного перебора, подставляя значения U_{DC} из массива в выражение (4) и сравнивая результаты, в ВБ определяется оптимальный уровень U_{DC} .

Имитационная компьютерная модель автономного ЭТК с ВИЭ с возможностью оценки потерь электроэнергии в ППЭ приведена на рисунке 11. Количество ФЭП составило 45 шт., они были разделены на 5 массивов из последовательно соединенных панелей. Стабилизацию напряжения шины U_{DC} осуществляет двунаправленный ППЭ АБ, избыток электроэнергии рассеивается на балластной нагрузке. Двунаправленный ППЭ АБ показан в виде двух DC/DC-блоков (окрашенных зеленым цветом), представляющих два режима работы: заряда и разряда АБ. Разделение модели на две части необходимо для оценки потерь электроэнергии в каждом режиме. Максимальный ток заряда АБ ограничен 0,2С.

В ходе моделирования оценивалась энергоэффективность автономного ЭТК с ВИЭ в зависимости от уровня напряжения шины. На первом этапе оценивались суммарные потери электроэнергии в ППЭ при фиксированном уровне напряжения. На втором этапе рассчитывались суммарные потери электроэнергии в ППЭ при работе адаптивного алгоритма. Работа ЭТК моделировалась на протяжении года, в конце которого рассчитывались суммарные потери ППЭ в зависимости от выбранного уровня U_{DC} .

Осциллограммы, полученные в результате моделирования работы комплекса с 3300 по 3500 ч в году приведены на рисунке 12. Выработка от ВИЭ представлена на рисунке 12а: $P_{PV}(t)$ – мощность генерации ФЭУ, $P_{WT}(t)$ – мощность генерации ВЭУ, $P_L(t)$ – мощность потребления нагрузки. Ток $I(t)$ заряда и разряда АБ, уровень заряда $SOC(t)$ представлены на рисунке 12б. Регулирование напряжения шины $U_{DC}(t)$ адаптивным алгоритмом показано на рисунке 12в. График суммарных потерь мощности во всех ППЭ $P_{total}(t)$ при фиксированных уровнях напряжения шины 360 В и 600 В и при адаптивно регулируемом уровне напряжения приведен на рисунке 12г.

Оценка уровня суммарных потерь электроэнергии в ППЭ проводилась путем интегрирования суммарных потерь мощности $P_{total}(t)$. Выборка данных, полученная для 20 различных лет работы комплекса, представлена на рисунке 13. Моделирование показало, что оптимальным фиксированным напряжением шины является 520 В (с учетом 95%-ного доверительного интервала).

Также на разработанном имитационном лабораторном стенде была проведена проверка влияния регулировки уровня напряжения шины U_{DC} на уровень потерь электроэнергии в ППЭ. Малые значения метрик ошибок ($RMSE = 0,408$, $nMBE = 0,51$) свидетельствуют о хорошем соответствии математической модели реальной системе.

Повышение энергоэффективности ЭТК с ВИЭ за год рассчитывается согласно выражению (5):

$$\delta W = \left(\frac{W_{total2}}{W_{total1}} - 1 \right) \cdot 100\% , \quad (5)$$

где W_{total2} – суммарные потери электроэнергии в ППЭ за год при фиксированном напряжении шины; W_{total1} – суммарные потери электроэнергии в ППЭ за год при работе адаптивного алгоритма.

Относительное снижение потерь электроэнергии в ППЭ в результате работы адаптивного алгоритма регулировки режимов работы ППЭ показано на рисунке 14.

Экономический анализ, проведенный методом дисконтированных денежных потоков, с учетом жизненного цикла ЭТК, равного 25 годам, позволил получить график зависимости нормированной себестоимости электроэнергии ($LCOE$) от потерь электроэнергии в ППЭ (рисунок 15). Экологический анализ показал, что при доле ВИЭ в энергопотреблении в 50% относительное уменьшение потерь электроэнергии в ППЭ на 1% приводит к сокращению выбросов оксидов углерода (CO , CO_2) и оксидов азота (NO_x) за жизненный цикл ЭТК на 2,52 тонны на 1 кВт расчетной мощности нагрузки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе предлагается новое решение актуальной научно-технической задачи по повышению энергоэффективности автономных электротехнических комплексов с возобновляемыми источниками энергии, достигаемое снижением суммарных потерь электроэнергии в полупроводниковых преобразователях в составе комплекса за счет применения адаптивного регулирования напряжения шины постоянного тока в зависимости от текущей мощности генерации фотоэлектрической и ветроэлектрической установок, мощности потребления нагрузки.

По результатам работы сделаны следующие выводы:

1. Проведен сравнительный обзор схем построения автономного ЭТК с ВИЭ для электроснабжения нагрузки расчетной мощностью до 100 кВт на ИТТ. Определены пять обобщенных структурных схем, отличающихся использованием согласующей шины постоянного и переменного тока, совместной и отдельной работой ДГУ с другими электрогенерирующими установками.

2. Разработан алгоритм и программа для ЭВМ на языке *Python* для расчета минимальных установленных мощностей ФЭУ, ВЭУ и емкости АБ, обеспечивающих бесперебойность электроснабжения потребителей, а также выполнения расчета потерь электроэнергии в ППЭ с учетом доли возобновляемых источников в энергопотреблении.

3. Проведен анализ потерь электроэнергии в ППЭ с учетом структурной схемы построения автономного ЭТК с ВИЭ. Получено распределения уровня потерь электроэнергии в ППЭ с учетом доли ВИЭ в энергопотреблении. Установлено, что снижение среднего уровня потерь электроэнергии в ППЭ (с учетом 95%-ного доверительного интервала) достигается раздельной работой резервного источника электроснабжения (ДГУ) с другими электрогенерирующими установками, связанными согласующей шиной постоянного тока.

4. Разработан алгоритм управления ППЭ, основанный на адаптивном регулировании напряжения шины постоянного тока, связывающей различные ППЭ друг с другом, в зависимости от текущей мощности генерации ФЭУ и ВЭУ, мощности потребления нагрузки.

5. Выполнено имитационное компьютерное моделирование работы автономного ЭТК с ВИЭ с учетом разработанного алгоритма управления ППЭ для оценки энергоэффективности. Алгоритм обеспечивает относительное снижение потерь электроэнергии в ППЭ до 9%. Проверено влияние регулировки уровня напряжения шины на потери электроэнергии в ППЭ на имитационном лабораторном стенде. Малые значения ошибок ($RMSE = 0,408$, $nMBE = 0,51$) указывают на то, что модель хорошо описывает реальную систему.

6. Выполнено экономическое обоснование внедрения рассматриваемого алгоритма управления в автономный ЭТК с ВИЭ для электроснабжения потребителя с расчетной мощностью нагрузки 10 кВт (метеостанции). Доказана экономическая эффективность (метод дисконтированных денежных потоков) внедрения алгоритма. В ходе экологического анализа дана оценка сокращения выбросов оксидов углерода (CO , CO_2) и оксидов азота (NO_x). При доле ВИЭ в энергопотреблении в 50% относительное уменьшение потерь электроэнергии в ППЭ на 1% приводит к сокращению выбросов оксидов углерода (CO , CO_2) и оксидов азота (NO_x) за жизненный цикл ЭТК на 2,52 тонны на 1 кВт расчетной мощности нагрузки.

Перспективным направлением темы исследований является расширение области применения адаптивного алгоритма регулировки режимов работы ППЭ на более мощные автономные ЭТК с ВИЭ – с расчетной мощностью нагрузки от 100 до 500 кВт.

**СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ,
ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

Публикации в изданиях из Перечня ВАК:

1. Шпенст, В.А. Оценка возможности построения модульных DC/DC источников электропитания по конфигурируемому принципу / В.А. Шпенст, **Е.А. Орел** // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2021. – №. 12. – С. 109-119.

2. Шпенст, В.А. Способы обеспечения устойчивости работы электротехнических комплексов постоянного тока в условиях Арктики / В.А. Шпенст, **Е.А. Орел** // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2021. – Т. 23. – № 4. – С. 166-179.

Публикации в изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования Scopus:

3. Шпенст, В.А. Повышение надежности вторичного источника питания постоянного тока резервированием сигналов обратной связи / В.А. Шпенст, **Е.А. Орел** // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. – 2021. – Т. 64 – № 5. – С. 408-420.

4. Шпенст, В.А. Повышение энергоэффективности автономного электротехнического комплекса с возобновляемыми источниками энергии на основании адаптивной регулировки режимов работы / В.А. Шпенст, А.А. Бельский, **Е.А. Орел** // Записки Горного института. – 2023. – Т. 261. – С. 479-492.

Патент:

5. Патент № 2786935 Российская Федерация, G05F 1/573 (2006.01). Способ защиты линейного стабилизатора напряжения постоянного тока от короткого замыкания с малыми тепловыми потерями : – № 2022111322 : заявл. 26.04.2022: опубл. 26.12.2022 / В.А. Шпенст, **Е.А. Орел**; заявитель ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный университет». – 14 с. : ил.

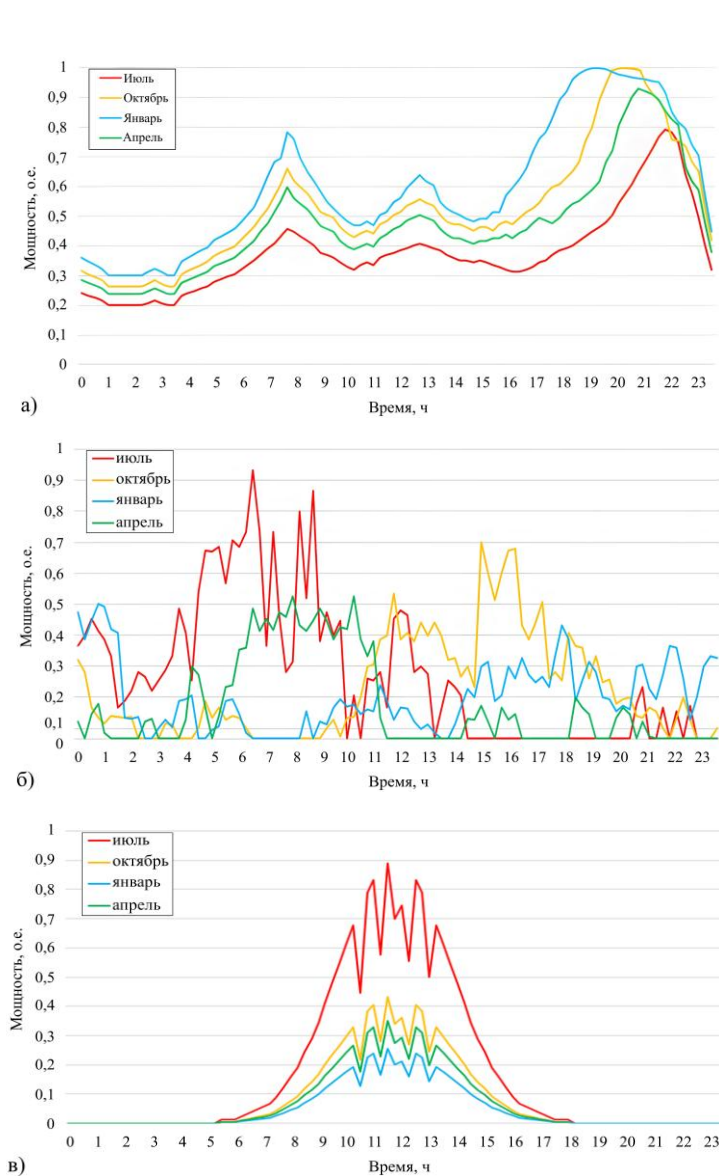


Рисунок 2 – Задание параметров для моделирования автономного ЭТК ВИЭ:
а – профиль потребления электроэнергии нагрузкой;
б – профиль генерации ВЭУ; в – профиль генерации ФЭУ

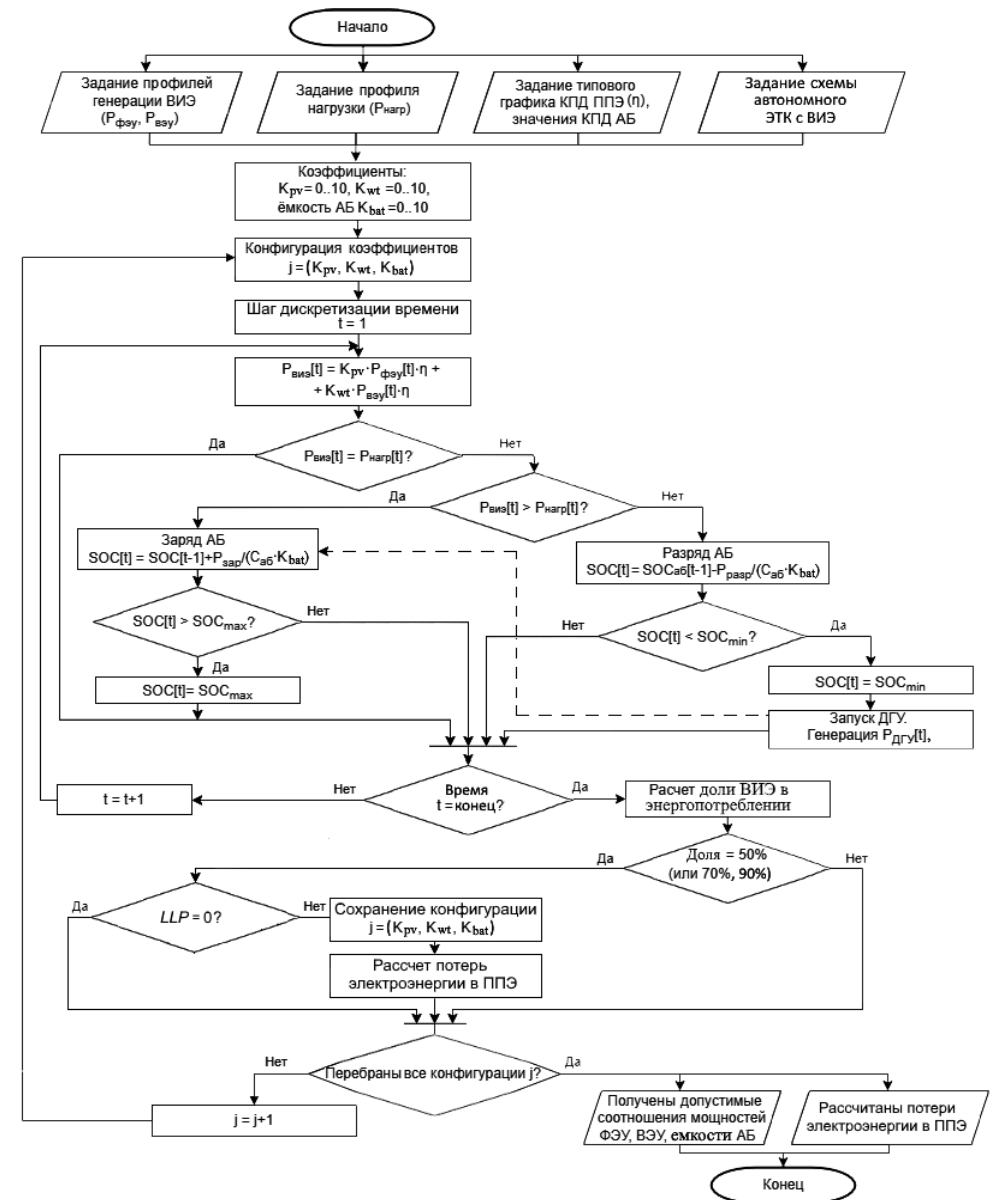


Рисунок 3 – Блок-схема алгоритма определения минимальных установленных мощностей ФЭУ, ВЭУ и емкости АБ, потерь электроэнергии в ППЭ

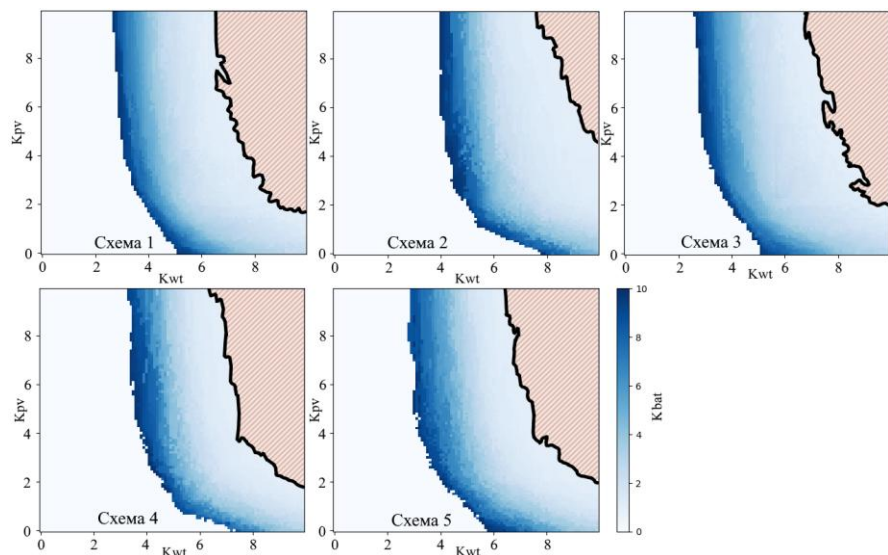


Рисунок 4 – Соотношения минимальных установленных мощностей ФЭУ, ВЭУ и емкости АБ, обеспечивающие бесперебойность электроснабжения потребителей при доле ВИЭ в энергопотреблении 70%

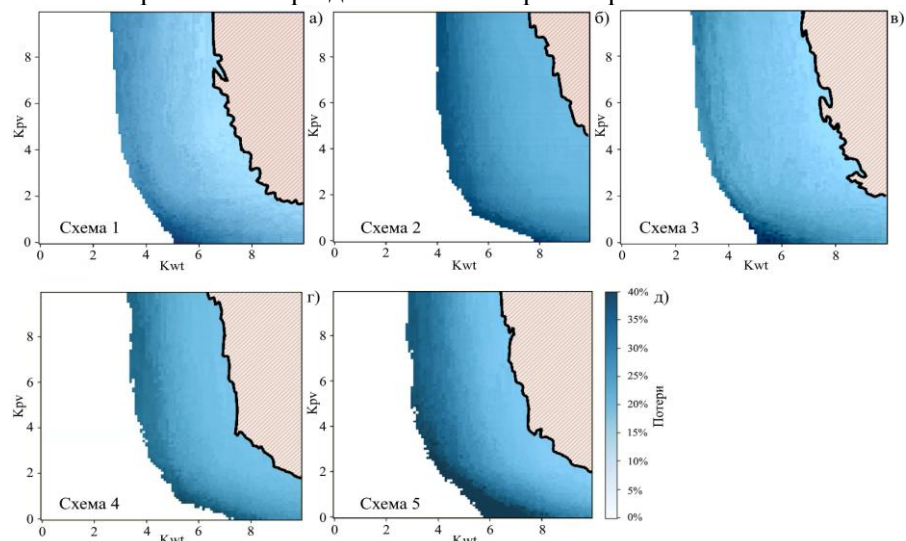


Рисунок 5 – Результаты расчета потерь электроэнергии в ППЭ при доле ВИЭ в энергопотреблении 70%

Таблица 1 – Параметры ФЭП, ВЭУ и АБ

ФЭП		ВЭУ		АБ	
Номинальная мощность, Вт	320	Номинальная мощность, кВт	25	Емкость, кВт·ч	60
Напряжение холостого хода, В	37,98	Напряжение холостого хода, В	240	Напряжение холостого хода, В	96
Ток короткого замыкания, А	9,04	Длина лопасти, м	7	Внутреннее сопротивление, Ом	0,0048
Напряжение в точке максимальной мощности, В	30,63	Высота мачты, м	18	Допустимый уровень заряда, %	20...100
Ток в точке максимальной мощности, А	8,79	Пусковая скорость ветра, м/с	3	Коэффициент поляризации, В	2,13
Температурный коэффициент мощности, %/°C	-0,26	Номинальная скорость ветра, м/с	11	Амплитуда напряжения экспоненциальной зоны разряда (A), В	1,6
Температурный коэффициент напряжения, %/°C	-0,24	Максимальная скорость ветра, м/с	25	Заряд батареи в конце экспоненциальной зоны (B), 1/(A·ч)	1,0
Температурный коэффициент тока, %/°C	0,04				

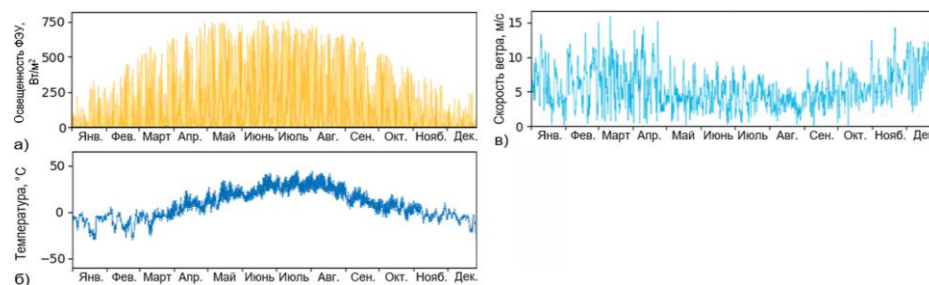


Рисунок 7 – Профили для 1 года работы ЭТК: а) освещенности ФЭУ; б) температуры воздуха; в) скорости ветра

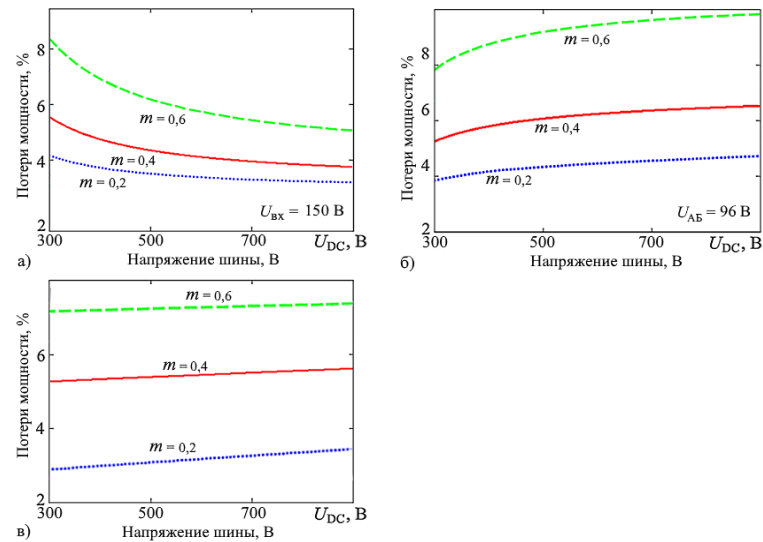


Рисунок 8 – Зависимость потерь мощности ППЭ от напряжения шины постоянного тока с учетом загрузки относительно номинальной мощности нагрузки: а) повышающего ППЭ; б) двунаправленного ППЭ; в) инвертора

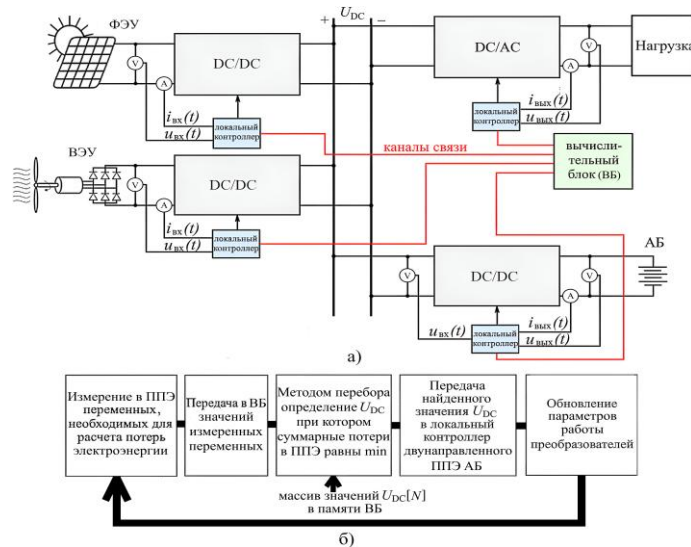


Рисунок 9 – ЭТК с управлением режимами работы ППЭ: а – подключение ВБ к локальным контроллерам; б – порядок действий управления

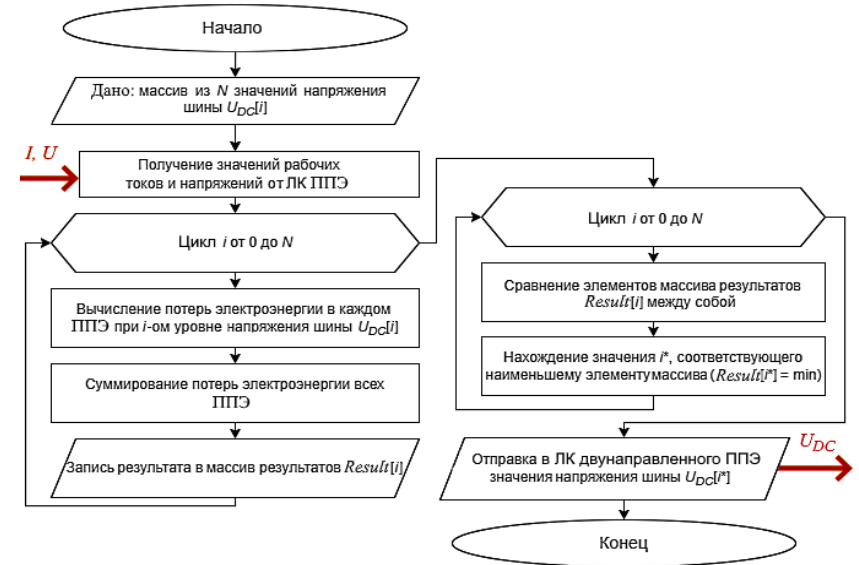


Рисунок 10 – Блок-схема алгоритма работы вычислительного блока

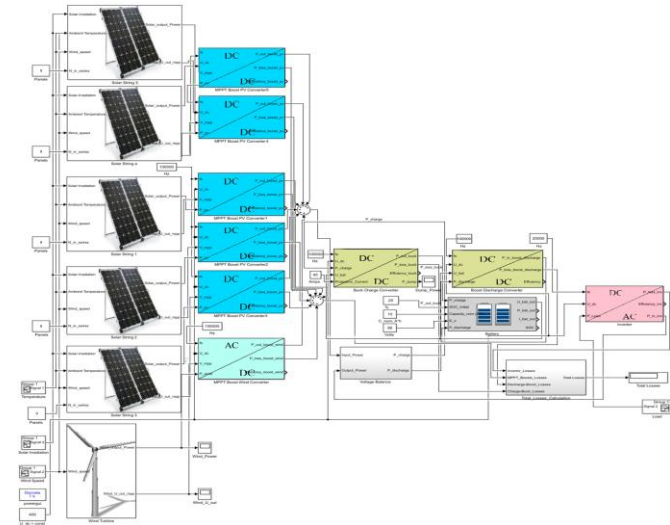


Рисунок 11 – Имитационная компьютерная модель автономного ЭТК с ВИЭ с возможностью оценки потерь электроэнергии в ППЭ

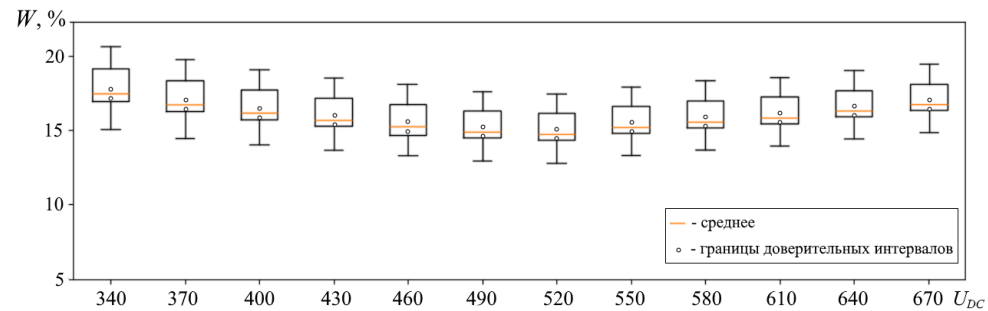
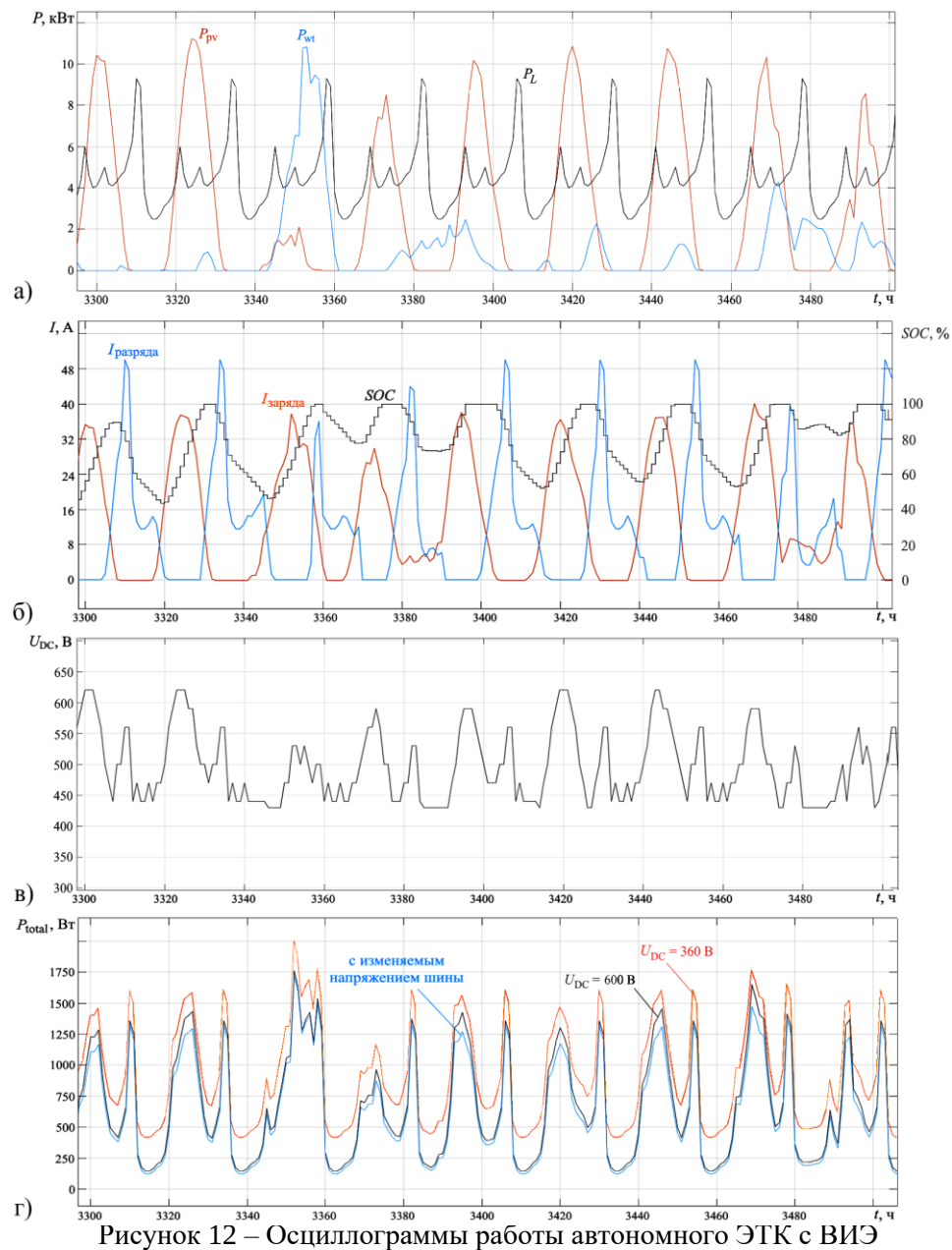


Рисунок 13 – Зависимость потерь электроэнергии в ППЭ от напряжения шины постоянного тока (выборка за 20 лет работы ЭТК)

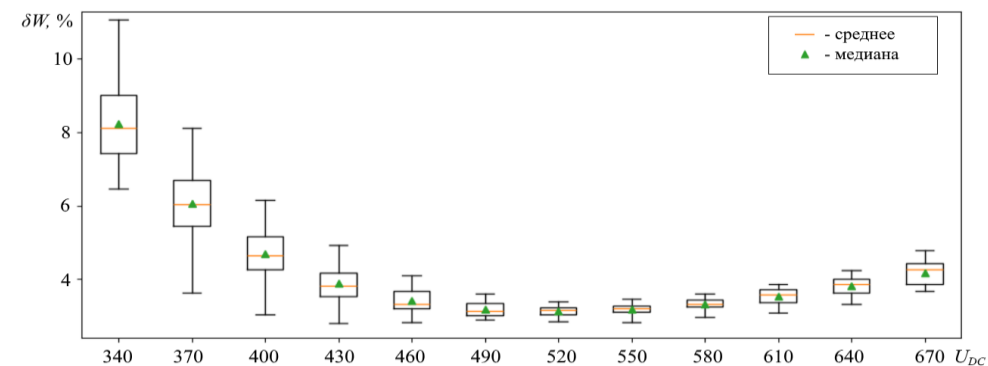


Рисунок 14 – Снижение потерь электроэнергии в ППЭ в результате работы адаптивного алгоритма (выборка за 20 лет работы ЭТК)

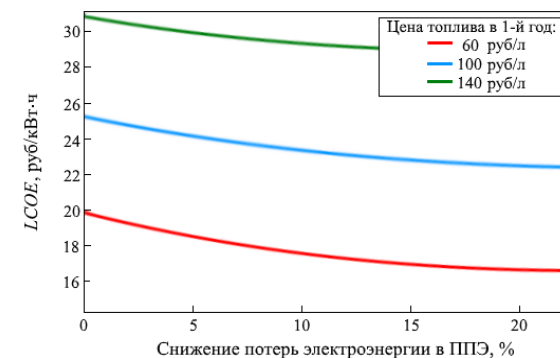


Рисунок 15 – График зависимости нормированной себестоимости электроэнергии ($LCOE$) от снижения потерь электроэнергии в ППЭ