

*На правах рукописи*



**Костик Никита Русланович**

**ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ ПОВЫШЕНИЯ  
ЭФФЕКТИВНОСТИ ГИБРИДНЫХ СИСТЕМ  
ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ  
НА ОСНОВЕ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ  
ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ СОЛНЕЧНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ**

Специальность 2.2.6 – Оптические и оптико-электронные приборы и комплексы

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2024

Работа выполнена на кафедре фотоники в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)»

Научный руководитель: доктор технических наук, доцент  
**Тарасов Сергей Анатольевич**

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор,  
**Чижма Сергей Николаевич**, профессор образовательно-научного кластера «Институт высоких технологий», Высшая школа нанотехнологий и инженерии, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта», г. Калининград

кандидат физико-математических наук,  
**Садчиков Николай Анатольевич**, старший научный сотрудник лаборатории фотоэлектрических преобразователей, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физико-технический институт имени А.Ф. Иоффе Российской академии наук, г. Санкт-Петербург.

Ведущая организация: Общество с ограниченной ответственностью «НТЦ тонкопленочных технологий в энергетике», г. Санкт-Петербург.

Защита состоится «**23**» января 2024 года в 14.00 на заседании Диссертационного совета по защите докторских и кандидатских диссертаций 24.2.387.04 на базе ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)», 197022, Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, д. 5Ф.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)» и на сайте университета [www.etu.ru](http://www.etu.ru) в разделе «Подготовки кадров высшей квалификации» - «Объявление о защитах».

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью, просим направлять по адресу: 197022, Санкт-Петербург, улица Профессора Попова, д. 5.

Автореферат разослан «22» ноября 2023 г.

Ученый секретарь  
Диссертационного совета, канд. техн. наук  
доцент



Гук К. К.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** В современном мире энергетика неразрывно связана с экономикой и качеством жизни, поэтому вопросы устойчивости энергосистем и высокого уровня электрификации страны являются наиболее важными. Ввиду специфики централизованной системы энергоснабжения Российской Федерации и большой площади страны не все удаленные регионы способны получать электроэнергию в достаточном объеме. В настоящий момент изолированные регионы используют децентрализованные источники энергии в виде дизельных генераторных установок. Неравномерность развития инфраструктуры и сложные логистические цепочки приводят к увеличению зависимости систем электроснабжения от ископаемого топлива. В труднодоступных районах проблема может усугубляться вследствие недостаточной регулярности и высокой стоимости топливных поставок. В то же время, многие удаленные регионы обладают благоприятными климатическими условиями для внедрения возобновляемых источников энергии (ВИЭ). Одними из наиболее перспективных типов ВИЭ в настоящее время являются фотоэлектрические преобразователи солнечного излучения (ФЭП). Благодаря своим высоким технико-эксплуатационным характеристикам системы на основе ФЭП могут быть реализованы в любой точке на поверхности Земли при соблюдении условий достаточной освещенности поверхности. Однако большинство возобновляемых источников энергии обладают значительным недостатком – зависимостью от климатических условий. Это означает, что в случае отсутствия благоприятных для выработки электроэнергии погодных условий, например при отсутствии достаточной скорости ветра для генерации электроэнергии при помощи ветровых генераторов или в ночное время суток для фотоэлектрических преобразователей, эффективное производство электроэнергии затруднительно. Одним из решений этой проблемы может быть расширение системы накопления электроэнергии, которая позволяет сохранить избыток электроэнергии, генерирующейся в период высокой активности систем ВИЭ, и обеспечивает использование этой электроэнергии в периоды высокой потребности в ней. Данное решение не всегда является оптимальным, поскольку расширение системы накопления электроэнергии приводит к увеличению начальных капиталовложений и, соответственно, к увеличению стоимости электроэнергии.

Альтернативным вариантом обеспечения стабильного доступа к электроэнергии является сочетание в одной системе как традиционных, так и возобновляемых источников энергии. Применение подобных гибридных систем возобновляемых источников энергии (ГСВИЭ) является одним из наиболее перспективных методов энергообеспечения объектов, удаленных от систем централизованного энергоснабжения, без значительного увеличения стоимости генерируемой электроэнергии и стоимости реализации системы.

Построение ГСВИЭ с высокими показателями эффективности является задачей, решение которой зависит от множества факторов и параметров. Это существенно усложняет решение задачи по нахождению наилучшего варианта конфигурации системы гибридного энергоснабжения. Факторы, влияющие на показатели эффективности ГСВИЭ, могут быть условно

разделены на внешние – факторы, находящиеся вне зоны прямого воздействия со стороны исследователя (климатические, экономические, социально-политические особенности), и внутренние – технические характеристики системы, на которые исследователь способен оказать прямое воздействие, изменяя ее конфигурацию. Таким образом, эффективность ГСВИЭ может быть повышена путем оптимизации компонентов системы, изменения алгоритмов работы компонентов, а также использования дополнительных технологий, повышающих эффективность процесса преобразования фотоэлектрической энергии. Влияние внешних факторов может быть учтено на этапе проектирования системы путем рассмотрения географического положения системы, социально-политических особенностей выбранного региона, климатического режима и других факторов, напрямую или косвенно влияющих на показатели эффективности.

**Степень разработанности.** В настоящее время в литературе основное внимание уделено рассмотрению технических методов повышения эффективности фотопреобразователей солнечного излучения. Также довольно широко представлены исследования влияния климатических параметров на эффективность солнечных фотопреобразователей и энергетических систем на их основе. Тем не менее, ряд факторов, оказывающих существенное воздействие на эффективность фотоэлектрических преобразователей в составе ГСВИЭ, до сих пор рассмотрены недостаточно подробно. В частности, особую важность имеют следующие факторы:

- влияние совокупности нескольких географических, экономических и социально-политических факторов на эффективность реализуемой гибридной системы возобновляемых источников энергии;
- влияние двух и более источников возобновляемой энергии на выходные показатели эффективности системы;
- взаимодополняемость и соотношение разных источников электроэнергии в периоды нехватки отдельных возобновляемых ресурсов для генерации электроэнергии в достаточном объеме;
- объединение источников фотовольтаической генерации энергии с системами генерации тепловой энергии для повышения общего показателя комбинированной выработки тепловой и электрической энергии и их влияния на показатели эффективности генерации энергии.

**Объект исследования** – гибридные системы возобновляемой энергии с использованием фотоэлектрических преобразователей солнечного излучения.

**Предмет исследования** – методы повышения эффективности ГСВИЭ и их оптимизация с учетом многофакторного анализа входных данных, влияющих на показатели генерации гибридной системы возобновляемых источников энергии.

**Цель работы** – исследование методов повышения эффективности гибридных систем возобновляемых источников энергии на основе фотоэлектрических преобразователей солнечного излучения.

Для достижения поставленной цели в работе решались следующие **задачи**:

1. Рассмотреть потенциал возобновляемых энергетических ресурсов в российской и мировой энергетике, с учетом географического распределения ресурсов и их взаимодополняемости.

2. Определить обобщенную структуру гибридной системы возобновляемых источников энергии, описать основные блоки и компоненты, входящие в ее состав.

3. Выявить критерии, влияющие на эффективность функционирования ГСВИЭ, сформировать категории таких критериев и выстроить их иерархию.

4. Отработать алгоритм применения методики многокритериального анализа в сочетании с методом аналитической иерархии разнородных параметров при моделировании параметров и условий эксплуатации ГСВИЭ для заданного географического положения.

5. С использованием выработанных методик оценить параметры ГСВИЭ для различных географических точек на поверхности Земли на примере России (Республики Алтай и Саха (Якутия), Финский залив) и других стран с высоким возобновляемым потенциалом внедрения ГСВИЭ (Узбекистан и Индия).

6. Разработать многосегментный датчик системы слежения за положением Солнца, определить его принцип действия и конфигурацию, рассчитать параметры конструкции датчика.

7. Произвести анализ и расчет конфигурации комбинированной системы генерации электрической и тепловой энергии с улучшенными показателями эффективности.

8. Рассчитать эффективности генерации электрической и тепловой энергии при реализации ГСВИЭ с концентраторной системой преобразования солнечного излучения, оборудованной системой активного водяного охлаждения ФЭП на основе испарителя воздушной теплонасосной установки (ТНУ).

9. Определить увеличение показателей эффективности преобразования энергии в ТНУ с учетом применения систем активного жидкостного охлаждения ФЭП в качестве источника низкопотенциальной тепловой энергии и изменение температурного диапазона его эффективного функционирования.

**Методы исследования.** Для решения поставленных задач использовались основные положения раздела термодинамики и теории основ мультиопераций для формирования методики многокритериального анализа. В качестве инструментария для решения поставленных задач в исследовании применялись специализированные программы пакета HOMER Pro для моделирования условий эксплуатации систем возобновляемой энергетики, технико-экономического анализа, расчета вредных выбросов в атмосферу.

**Достоверность и обоснованность** полученных результатов и выводов диссертационной работы подтверждается сравнением расчетов с параметрами, достигнутыми для развернутых в настоящее время систем возобновляемых источников энергии, и достигнутой высокой точности расчетов, проведенных с использованием разработанной методики.

### **Основные научные положения, выносимые на защиту:**

- Сочетание методики многокритериального анализа с методом аналитической иерархии разнородных параметров при моделировании условий эксплуатации гибридных систем возобновляемой энергетики обеспечивает определение их важнейших технических, конструкционных и тепловых параметров при оптимизации конфигурации системы для заданного географического положения.

- Использование многосегментной конфигурации датчика слежения за положением Солнца обеспечивает повышенную стабильность работы в условиях длительной эксплуатации систем за счет снижения влияния эффектов разбалансировки элементов датчика на точность определения положения источника излучения и снижения коэффициента потерь генерации электроэнергии при расхождении угла положения до значений не более 2%.

- Совмещение гибридной системы возобновляемых источников энергии и воздушного теплового насоса обеспечивает более полное преобразование энергии солнечного излучения за счет использования фотоэлектрических преобразователей в качестве источника низкопотенциальной тепловой энергии, что позволяет увеличить коэффициент эффективности теплового насоса не менее чем до 2 и сместить нижний предел температурного диапазона работы системы до минус 30 °С в зависимости от конфигурации применяемой системы.

### **Научная новизна исследования заключается в следующем:**

Предложена модификация метода многокритериального анализа в сочетании с методом аналитической иерархии для моделирования условий эксплуатации ГСВИЭ, позволяющая принять обоснованное решение о выборе параметров компонентов системы с обеспечением наилучших параметров эффективности гибридной системы возобновляемых источников энергии.

Показано, что влияние эффектов разбалансировки в элементах датчика слежения за положением Солнца, выполненного на основе многосегментной структуры, существенно снижено по сравнению с датчиками, сформированными на основе других конфигураций.

Показано, что применение испарителя воздушного теплового насоса в качестве охлаждающего контура для комбинированной системы теплового/фотовольтаического преобразования энергии обеспечивает более эффективное использование энергии солнечного излучения и расширяет рабочий диапазон температур теплового насоса.

### **Практическая и теоретическая значимость исследования:**

Разработана методика, основанная на сочетании методики многокритериального анализа и метода аналитической иерархии разнородных параметров гибридных систем возобновляемых источников энергии, позволяющая проводить расчет и оптимизацию систем для заданного географического положения на поверхности Земли и обеспечивающая определение важнейших технических, конструкционных и тепловых параметров для достижения наилучшей эффективности систем.

Создан датчик с многосегментной конфигурацией расположения фоточувствительных устройств, состоящей из 12 сегментов, суммарно покрывающих  $180^\circ$  в области траектории движения Солнца, что позволило реализовать систему слежения на основе использования фотосопротивлений с пониженным числом одновременно опрашиваемых сегментов, увеличенным периодом опроса и способностью функционировать в условиях разбалансировки чувствительности фотодатчиков системы слежения. Достигнутый коэффициент потерь генерации электроэнергии при расхождении угла положения не превысил 2%.

Произведен расчет системы генерации электрической и тепловой энергии на основе совмещения гетероструктурных фотоэлектрических преобразователей и воздушного теплового насоса, позволяющей повысить суммарную эффективность системы и увеличить диапазон рабочих температур теплового насоса.

Разработана гибридная система тепловой и фотовольтаической генерации энергии с увеличенным коэффициентом эффективности теплового насоса до 2 с расширенной нижней границей рабочих температур окружающей среды эффективного использования теплового насоса до минус  $30^\circ\text{C}$  в зависимости от конфигурации применяемой системы.

#### **Реализация результатов работы:**

Результаты исследования и сформированная методика внедрены в учебный процесс кафедры фотоники СПбГЭТУ «ЛЭТИ» при проведении занятий по курсу «Компьютерное моделирование гибридных систем возобновляемой энергетики» и «Computer Simulation of Hybrid Renewable Energy Systems».

**Апробация результатов.** Основные положения и результаты научно-квалификационной работы докладывались и обсуждались на следующих научно-технических конференциях: «Физико-химические проблемы возобновляемой энергетики», 18–20 ноября 2019 г.; «Аморфные и микрокристаллические полупроводники», 5–7 июля 2021 г.; Международная конференция «International Conference on Electrical Engineering and Photonics (EEExPolytech)», 14–15 октября 2021 г.; Международная научно-практическая конференция «Развивая энергетическую повестку будущего», 10–11 декабря 2021 г.; XVII Международный молодежный научно-экологический форум стран Балтийского региона «ЭКОБАЛТИКА», 16–17 июля 2020 г.; XVIII Международный молодежный научно-экологический форум стран Балтийского региона «ЭКОБАЛТИКА», 15–16 декабря 2021 г.; Конференция российских молодых ученых в области электротехники и электронной техники «IEEE Russia North West Section (ElConRus)», 23–27 января 2023 г.

**Публикации.** По теме исследования было опубликовано 16 печатных работ, в том числе 2 работы в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК РФ для опубликования результатов диссертационных исследований, 5 трудов в индексированных в базах WoS и Scopus с индексом Q4. В каждой работе личный вклад автора составляет не менее 50 %.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, списка использованных источников из 100 наименований отечественных и зарубежных ис-

точников информации. Общий объем работы составляет 144 страницы. Содержит 21 таблицу и 46 рисунков.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность диссертационной работы, сформулированы цель и задачи исследования, приведены основные результаты, составляющие предмет научной новизны, практическая значимость работы и личный вклад автора, приведена структура диссертации.

**В первой главе** представлены результаты оценки доступности ВИЭ в мировом и всероссийском масштабах. Анализ основных тенденций использования возобновляемых ресурсов продемонстрировал высокую перспективность солнечной и ветроэнергетики в Российской Федерации и других регионах планеты. Было установлено, что различные виды ВИЭ характеризуются значительной взаимодополняемостью, что дает возможность существенно увеличить эффективность и равномерность генерации электроэнергии. Это позволяет сделать вывод о необходимости гибридизации систем электроснабжения с использованием ВИЭ, что особенно перспективно для удаленных районов России.

**Во второй главе** были выявлены критерии, влияющие на эффективность функционирования ГСВИЭ в зависимости от применяемой конфигурации и географического местоположения. Были выделены основные категории разнородных критериев, которые можно разделить на четыре основные группы: (1) технические, (2) экономические, (3) экологические и (4) социально-политические. Ключевые критерии, выделенные из каждой категории, позволили определить данные, необходимые для расчета и оптимизации параметров ГСВИЭ, располагающихся в заданных географических координатах на поверхности Земли.

Для оценки влияния выделенных критериев на показатели эффективности ГСВИЭ был адаптирован метод на основе многокритериального анализа, применяемый в сочетании с методом аналитической иерархии. Направления оптимизации формируются из весовых коэффициентов, получаемых в ходе заполнения матрицы рассматриваемых критериев. Метод анализа иерархии основан на попарном сравнении в рамках повторной матрицы, в которой количество строк и столбцов определяется количеством критериев. На первом этапе производится заполнение матрицы отношений критериев  $F_1 \dots F_n$  в зависимости от их значимости (таблица 1). Оценка значимости производится исходя из попарного сравнения критериев относительно друг друга. Каждому критерию присваивается оценка от 1 до 9, где наибольший балл соответствует большей значимости (превосходству) одного критерия над другим. Также матрица отношений может быть заполнена экспертами, привлечение которых позволяет получить более компетентную оценку соответствующей категории. Исходя из полученных значений производится расчет вектора приоритетов для установления весов  $\omega$ . Данное значение веса критерия – количественная мера согласованности оценочных суждений между парами критериев.



Таблица 1

### Пример матрицы сравнения попарных критериев

	F1	F2	F3
F1	1	F1F2	F1F3
F2	F2F1	1	F2F3
F3	F3F1	F3F2	1
$\Sigma$	$\Sigma$	$\Sigma$	-

Дальнейший процесс генерирует вспомогательную матрицу – нормализованную матрицу попарного сравнения, в которой значение в каждой ячейке – результат деления каждого оценочного суждения на сумму соответствующего столбца. В итоге определяется среднее значение нормализованных значений строк, которое соответствует вектору приоритета (таблица 2).

Таблица 2

### Пример матрицы вектора приоритета

	F1	F2	F3	Вектор приоритетов
F1	$1/\Sigma F1$	$F1F2/\Sigma F2$	$F1F3/\Sigma F3$	$\omega_1$
F2	$F2F1/\Sigma F1$	$1/\Sigma F2$	$F2F3/\Sigma F3$	$\omega_2$
F3	$F3F1/\Sigma F1$	$F3F2/\Sigma F2$	$1/\Sigma F3$	$\omega_3$
$\Sigma$	$\Sigma$	$\Sigma$	$\Sigma$	-

В зависимости от совокупности итоговых результатов нахождения весовых коэффициентов и исходных требований к проектируемой ГСВИЭ можно сделать вывод о направлениях оптимизации конфигурации системы. Полученные критерии с наибольшими значениями весовых коэффициентов представляют собой значимые показатели, которые должны быть рассмотрены на этапах моделирования и проектирования, которое производилось при помощи разработанного или привлеченного специализированного программного обеспечения (HOMER Pro и др.).

Выработанная методика позволила осуществить расчет конфигурации ГСВИЭ с наиболее эффективными технико-экономическими показателями для заданных географических координат. Сформированные критерии позволили определить ключевые направления оптимизации работы системы, позволяющие добиться значительного сокращения стоимости реализации ГСВИЭ без привнесения критических изменений в процесс эффективного фотоэлектрического преобразования при помощи гибридной системы энергоснабжения. В работе представлено несколько примеров проделанных расчетов.

**В 2.6.1** Рассмотрены результаты расчета ГСВИЭ для населенного пункта Яйлю (Турочакский район, Республика Алтай), где ранее для выработки электроэнергии использовались дизельные генераторные установки (ДГУ). Исходя из задач, которые были поставлены перед

системой, основными выявленными критериями стали максимально широкий диапазон рабочих температур, максимум продолжительности автономной работы, максимальный вклад ВИЭ, максимум сокращения затрат на обслуживание и монтаж, минимум эксплуатации ДГУ, минимум ограничений для ориентации ФЭП на юг, максимум солнечной инсоляции.

Наиболее весомыми критериями были признаны: максимальный вклад ВИЭ, минимум ограничений ориентации ФЭП на юг, максимально широкий диапазон рабочих температур с весами критериев 0,363, 0,187, 0,167 соответственно (таблица 3). В ходе оптимизации на основе выявленных критериев, сократилась мощность ФЭП со 100 до 80 кВт, что привело к снижению избыточной генерации ФЭП на 7 %, а мощность вспомогательного ДГУ – с 40 до 20 кВт, что позволило существенно сократить начальные капиталовложения при полном выполнении поставленного технического задания и обеспечении эффективного энергоснабжения поселка.

Таблица 3

**Матрица весов критериев сравнения**

Эксперт	КС и оценки							Оценки компонентов вектора	Нормированные оценки векторов приоритетов
	КС1	КС2	КС3	КС4	КС5	КС6	КС7		
1	1,0	1,0	0,2	0,1	0,3	0,3	0,3	0,428	0,058
2	1,0	1,0	0,2	1,0	0,1	0,3	0,3	0,501	0,068
3	6,0	0,5	1,0	6,0	0,9	2,0	2,0	1,632	0,223
4	1,0	0,5	1,0	1,0	0,1	0,3	0,3	0,586	0,080
5	7,0	0,5	0,5	0,5	1,0	2,3	2,3	1,107	0,151
6	3,0	1,0	0,5	3,0	1,0	1,0	1,0	1,240	0,169
7	3,0	0,5	0,5	5,0	0,5	1,0	1,0	1,094	0,149
Сумма рангов, A	22,0	5,0	3,8	16,6	11,3	7,3	7,3		
Произведение сумм по столбцам	1,29	0,34	0,85	1,33	1,71	1,24	1,094	Сумма max	7,85
<b>Вектор глобальных приоритетов</b>	<b>0,025</b>	<b>0,034</b>	<b>0,363</b>	<b>0,047</b>	<b>0,167</b>	<b>0,187</b>	<b>0,163</b>		

**В 2.6.2** описаны исследование и реализация ГСВИЭ в регионе Финского залива. Исследование продемонстрировало значительные показатели скорости ветра в течение года и высокий потенциал для внедрения гибридных систем, сочетающих ветровые генераторы и ФЭП. Совокупность внешних факторов позволила сформировать направления оптимизации ГСВИЭ за счет комбинированного подхода к генерации электроэнергии и произвести с применением разработанного метода расчет системы, включающей ветрогенератор, солнечные преобразователи и резервные мощности на основе ДГУ. Рассчитанная конфигурация солнечно-

ветровой ГСВИЭ продемонстрировала высокие показатели автономности и обеспечила значительное снижение нагрузки на традиционные источники энергии. Было показано, что основная часть электроэнергии активно генерируется ФЭП в весенне-летний период, в то время как ветрогенератор активен в зимний период, что позволяет компенсировать нехватку солнечной активности.

**В 2.6.3** рассматривается аналогичный гибридный подход к генерации электроэнергии при помощи солнечно-ветровых систем в регионе Бенгальского залива, характеризуемого особым распределением ветровых потоков и солнечной инсоляции. Применяв метод многокритериального анализа и учитывая климатические особенности рассматриваемого региона, были сформированы конфигурации для 20 географических точек, учитывающие локальное расположение предполагаемой ГСВИЭ. Оптимизация технико-экономических параметров ГСВИЭ с учетом применяемой методики привела к увеличению эффективности использования ГСВИЭ и сокращению периода окупаемости в среднем на 15 %. Гибридизация системы с ветрогенератором позволила задействовать повышенные средние значения скорости ветра в сезоны дождей и компенсировать нехватку солнечной активности.

**В 2.6.4** приведены сравнительные исследование и расчет автономных ГСВИЭ в изолированных регионах Узбекистана и Российской Федерации. Расчет, проведенный с учетом особенностей географических локализаций в этих странах, показал увеличение эффективности использования энергоустановок до 40 % в регионах с высокой солнечной активностью. Предложенные на основе применяемой методики конфигурации ГСВИЭ, объединяющие ДГУ, ФЭП и систему аккумуляторных батарей (АКБ), позволили обеспечить энергоснабжение, используя только ВИЭ и АКБ в дневное время на протяжении большей части года в Узбекистане и южных регионах Российской Федерации. Для регионов с умеренным и резко континентальным климатом ДГУ дополняет ФЭП в периоды низкой солнечной активности, позволяя значительно снизить потребление топлива.

**В главе 3**, с учетом полученных данных о влиянии внешних факторов, исследовалось повышение эффективности систем ФЭП при помощи концентраторных систем, систем слежения за положением Солнца, а также систем активного охлаждения ФЭП.

Применение концентраторных систем на основе линз Френеля, которые благодаря своей простоте и небольшой массе признаны наиболее перспективными, обуславливает необходимость использования устройств слежения за положением Солнца. Для применения в гелиотрекерных системах был разработан многосекторный дискретный датчик. Конфигурация датчика (рисунок 1) была выбрана исходя из соображений сокращения влияния неточности задания координат при использовании систем слежения на основе GPS, упрощения алгоритма работы и снижения влияния строгой привязки к координатам.

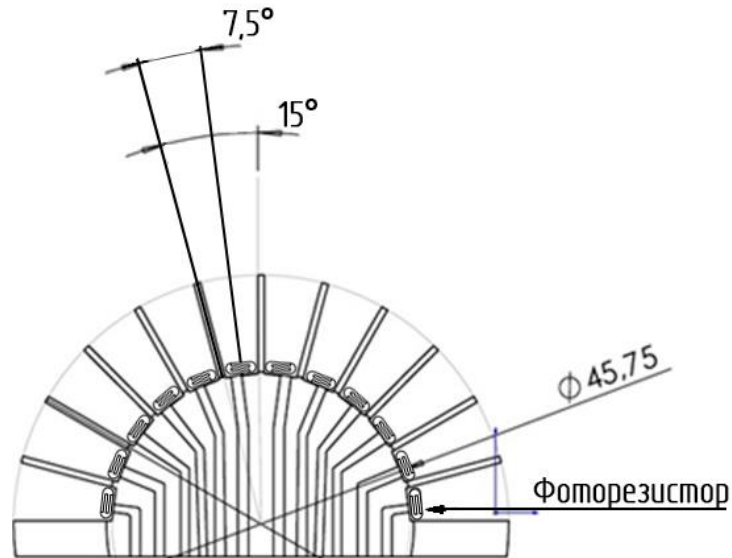


Рисунок 1. Конфигурация многосегментного датчика системы слежения за положением Солнца

Наименьшее сопротивление фоторезистора может быть достигнуто при условии падения солнечных лучей максимально приближенного к нормальному; с изменением положения Солнца и угла падения увеличивается степень затенения датчика. В каждом сегменте, угол раствора которого составляет  $15^\circ$ , установлен фоторезистор, изменяющий свое сопротивление в зависимости от интенсивности излучения, достигающего его поверхности. Конфигурация угла раствора  $15^\circ$  позволяет покрыть все  $180^\circ$  эклиптики двенадцатью фоточувствительными сегментами. При использовании двух датчиков заданной конфигурации возможно добиться покрытия двух координат, что позволяет применять данную конфигурацию как в двусосной, так и в одноосной системах слежения за положением Солнца. Угол между нормалью и стенкой сегмента составляет  $7,5^\circ$ . Полученное значение угла расхождения между нормалью и углом раствора стенок сегментов составляет  $7,5^\circ$ . В таком случае рассчитанное значение потерь на фотоэлектрическом преобразовании с учетом ошибки слежения по азимуту и по углу места с учетом возможных потерь на сопутствующие процессы составит не более 2 %.

Положение Солнца в одном из сегментов датчика определяется площадью тени, покрывающей фоточувствительную область, которая определяется высотой межсегментной перегородки. Оптимальная длина межсегментной перегородки была рассчитана таким образом, чтобы при падении лучей на поверхность фоточувствительного элемента под прямым углом соседний элемент был наполовину затенен межсегментной перегородкой, что дает отношение сигналов, близкое к 2. Благодаря техническим характеристикам многосекторного дискретного датчика и конфигурации с углом раствора одного сегмента не более  $15^\circ$  возможно снизить период опроса датчика до 10 минут, что является оптимальным значением для определения положения Солнца с минимальными потерями. Разработанная конфигурация датчика позволяет проводить автокалибровку фоточувствительных элементов в процессе работы датчика,

за счет сравнения значений фотосопротивления соседних датчиков при критических углах падения лучей на фоточувствительную поверхность. Размер перегородки, площадь элемента и другие конструкционные параметры датчика были рассчитаны с учетом необходимости проведения такой автокалибровки. Это позволяет устранить влияние разбалансировки отдельного элемента датчика при его длительной эксплуатации на точность определения ориентации Солнца.

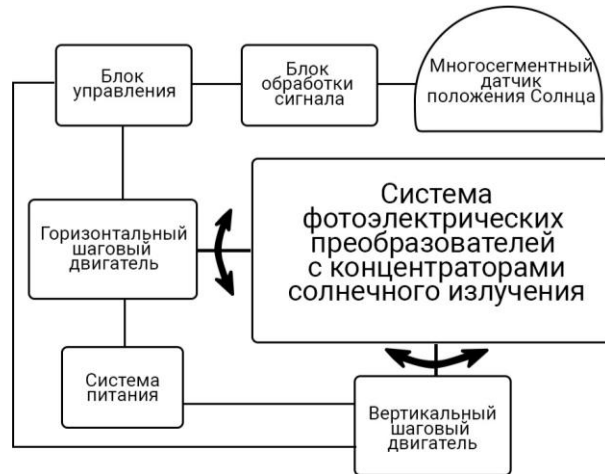


Рисунок 2. Структура трекерной системы слежения за Солнцем

На основании разработанного многосекторного дискретного датчика была сформирована структура трекерной системы слежения за Солнцем (рисунок 2). В ее состав кроме датчика входит блок обработки сигнала датчика и блок управления системы, обеспечивающей позиционирование системы фотоэлектрических преобразователей с концентраторами солнечного излучения для обеспечения нормального падения солнечного излучения на поверхность концентраторов.

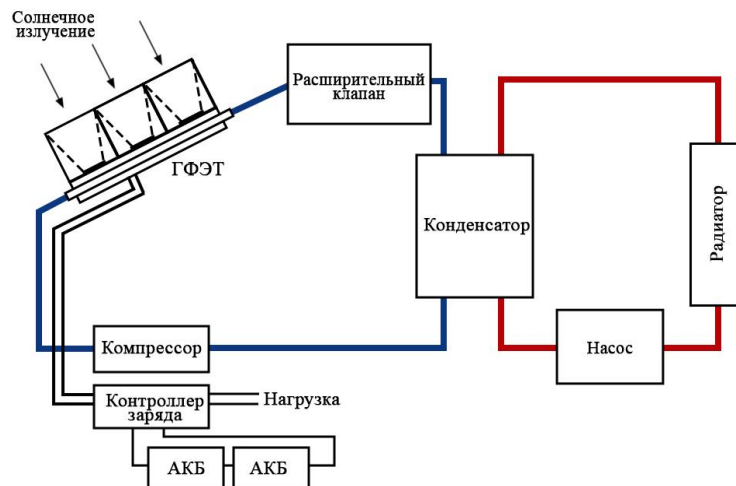


Рисунок 3. Общая схема разработанной гибридной фотоэлектрической/тепловой системы (ГФЭТ)

**Раздел 3.4** рассматривает использование системы, объединяющей внешний испарительный контур ТНУ для отбора тепловой энергии из среды с концентрирующей фотогальванической подсистемой преобразователей солнечного излучения в единый гибридный комплекс комбинированной генерации тепловой и электрической энергии, с целью сокращения роста температуры ФЭП, вызванного увеличением скорости рекомбинационных процессов из-за увеличения плотности излучения.

Разработанная гибридная фотоэлектрическая/тепловая (ГФЭТ) система позволила решить ряд проблем:

1. Использование тепловой энергии, образующейся в процессе эксплуатации системы генерации тепловой и электроэнергии, обеспечивает повышение параметров теплового насоса и увеличивает коэффициент эффективности преобразования за счет повышения температуры теплоносителя во внешнем контуре.

2. Отбор тепла, образующегося в процессе эксплуатации ФЭП, позволяет снизить негативное влияние температуры ФЭП на эффективность фотоэлектрического преобразования. В особенности это актуально при использовании фотогальванических концентраторов. Реализовав систему охлаждения ФЭП, возможно обеспечить сохранение высокой эффективности преобразования солнечного излучения в электроэнергию и даже ее увеличить.

3. За счет передачи дополнительной температуры теплоносителю ТНУ снижает чувствительность системы к температуре окружающей среды, что позволит обеспечить эффективное функционирование ТНУ воздушного типа при отрицательных температурах.

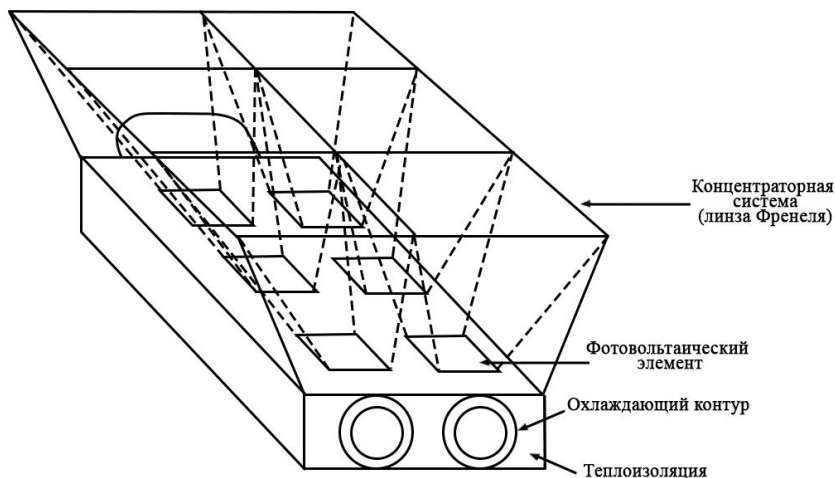


Рисунок 4. Схематическое изображение концентраторной системы в составе разработанной ГФЭТ

Система включает в себя тепловую подсистему для поглощения тепловой энергии от теплоносителя, проходящего по трубке внешнего контура ТНУ. Трубка расположена в тепловом контакте с солнечными элементами, обеспечивая как отвод тепла, так и охлаждение элемента (рисунок 4). Солнечное излучение, падающее на поверхность ФЭП, обеспечивает нагрев элемента и селективного слоя, закрепленного под ячейками, для улучшения теплооб-

мена путем конвекции и теплопроводности между жидкостью и металлическим каналом. Концентрирующая установка использует оптическую систему с линзами Френеля, фокусирующими солнечное излучение на поверхность ФЭП. Для отвода выделяющейся тепловой энергии солнечный элемент расположен на охлаждающем контуре. Благодаря малым размерам рабочей области ФЭП, на радиаторе имеется достаточная поверхность для рассеивания тепловой энергии.

За счет использования дополнительного источника низкопотенциальной тепловой энергии в виде системы теплофотовольтаического преобразования солнечного излучения возможно повысить коэффициент преобразования энергии теплонасосной установки, который представляет собой отношение производимой тепловой энергии к потребляемой электроэнергии. Тогда дополнительная тепловая энергия будет определяться температурой солнечного элемента в ГФЭТ.

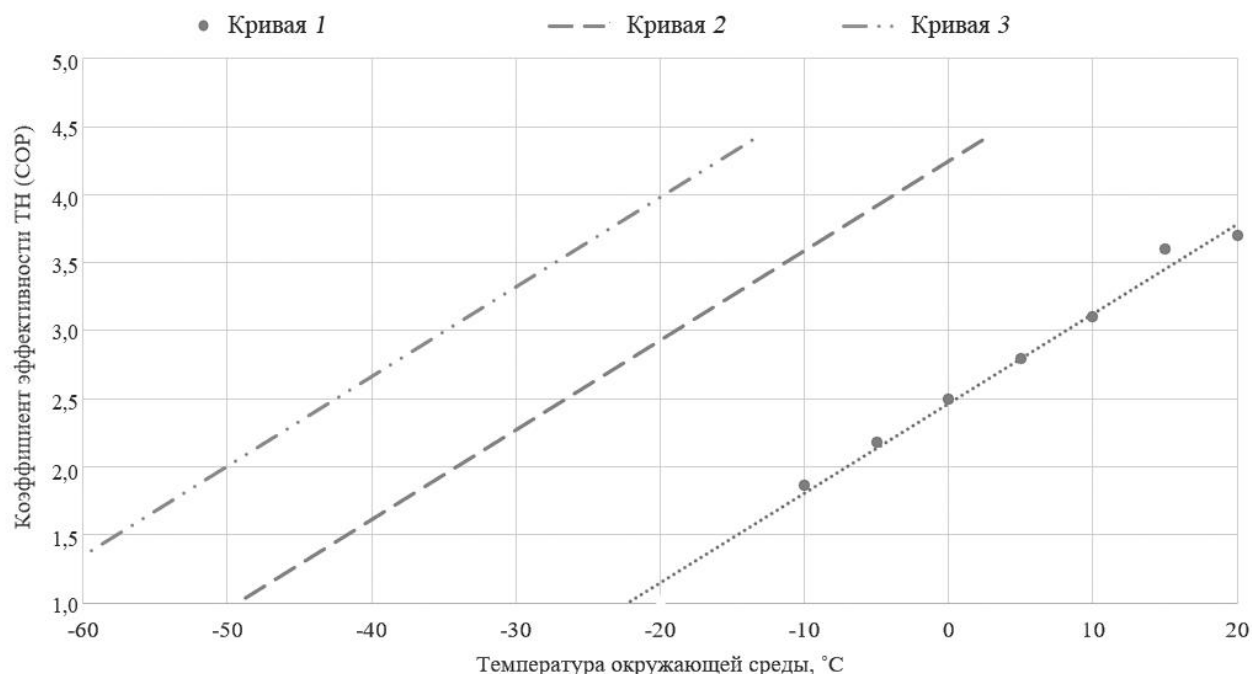


Рисунок 5. Зависимости распределения эффективности ТНУ от температуры окружающей среды

Используя экспериментальные данные о степени нагрева солнечного элемента и функционирования теплонасосной установки воздушного типа, были получены расчетные значения генерируемой тепловой энергии (рисунок 5), которая может быть сообщена охлаждающему контуру без учета потерь на теплопередачу и во внешнюю среду. Тогда тепловая энергия, получаемая ФЭП вследствие воздействия излучения, оказывает основное влияние на увеличение температуры теплоносителя. Кривая 1 на рисунке 5 соответствует изменению коэффициента преобразования тепловой энергии ТНУ воздушного типа без вспомогательных устройств. В этом случае разность температуры с окружающей средой при степени концен-

трации солнечного излучения  $CR = 1$  может достигать  $27\text{ }^{\circ}\text{C}$  (рисунок 5, кривая 2). Дополнительно было исследовано влияние высокой степени концентрации излучения. Добавление концентраторной системы на основе линз Френеля со степенью концентрации  $CR = 700$  может увеличить температуру до значений больше  $40\text{ }^{\circ}\text{C}$  (рисунок 5, кривая 3).

При генерации дополнительной тепловой энергии ГФЭТ стало возможным смещение точки температуры эффективной работы ТНУ. Использование дополнительного комбинированного фотоэлектрического и теплового преобразователя энергии позволяет расширить диапазон эффективной работы теплонасосной установки воздушного типа до минус  $30\text{ }^{\circ}\text{C}$  (рисунок 5, кривая 2) в зависимости от конфигурации применяемой системы.

### **Основные результаты работы**

1. Рассмотрен потенциал использования возобновляемых ресурсов в российской и мировой энергетике, их географического распределения и взаимодополняемости.

2. Определена обобщенная структура гибридной системы возобновляемых источников энергии, описаны основные блоки и компоненты, входящие в ее состав.

3. Выявлены критерии, влияющие на эффективность функционирования ГСВИЭ, сформировать категории таких критериев и выстроить их иерархию.

4. Отработан алгоритм применения методики многокритериального анализа в сочетании с методом аналитической иерархии разнородных параметров при моделировании параметров и условий эксплуатации ГСВИЭ для заданного географического положения.

5. С использованием выработанных методик произведена оценка параметров ГСВИЭ для различных географических точек на поверхности Земли на примере России (Республики Алтай и Саха Якутия, Финский залив) и других стран с высоким возобновляемым потенциалом внедрения ГСВИЭ (Узбекистан и Индия).

6. Разработан многосегментный датчик системы слежения за положением Солнца, определен его принцип действия и конфигурация, рассчитаны параметры конструкции датчика.

7. Произведен анализ и расчет конфигурации комбинированной системы генерации электрической и тепловой энергии с улучшенными показателями эффективности.

8. Произведен расчет эффективности генерации электрической и тепловой энергии при реализации ГСВИЭ с концентраторной системой преобразования солнечного излучения, оборудованной системой активного водяного охлаждения ФЭП на основе испарителя воздушной теплонасосной установки (ТНУ).

9. Определено улучшение показателей эффективности преобразования энергии в ТНУ с учетом применения систем активного жидкостного охлаждения ФЭП в качестве источника низкопотенциальной тепловой энергии и изменение температурного диапазона его эффективного функционирования.



## Список опубликованных работ по теме диссертации

### Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК:

1. **Костик Н.Р.**, Тарасов С.А., Айвазян Г.Е. Исследование возобновляемого потенциала Республики Армения при реализации гибридной автономной системы энергоснабжения с использованием фотоэлектрических преобразователей солнечного света. // Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника. – 2023. – Т. 26. N4. – С. 106 – 122.

### Публикации в изданиях, включенных в перечень Scopus, Web of Science:

2. **Kostik N.**, Bobyl A., Terukov E. The application of autonomous systems based on renewable energy sources in rural settlements of different regions of Russian Federation // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. – 2020. – Vol. 578. – P. 012041.

3. **Kostik N.**, Bobyl A., Rud V., Salamov I. The potential of agrivoltaic systems in the conditions of southern regions of Russian Federation // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. – 2020. – Vol. 578. – P. 012047.

4. **Kostik N.**, Bobyl A., Davydov R., Chatterjee S. Modelling Energy Production and Consumption in Relation to Climate Parameters. // 2021 International Conf. on Electrical Engineering and Photonics (EExPolytech). St. Petersburg, Russian Federation. – 2021. – P. 273-277.

5. **Kostik N. R.** et. al. Potential of wind generators as additional source of energy in hybrid renewable energy systems located in Baltic region // IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. – 2022. – Vol. 1096. – P. 012031.

6. **Kostik N. R.** et. al. Investigation of Influence of the Coastal Wind Currents on the Renewable Potential in the Area of Guinea Gulf. // ElConRus 2023. Conf. of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, January 24 – 27, 2023. St. Petersburg, Russia. St. Petersburg Electrotechnical University «LETI».

7. Konstantinov E. V., **Kostik N. R.**, Tarasov S. A. Modeling of an Electric Scooter Charging Station with Photovoltaic Modules. // ElConRus 2023, 2023 Conf. of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, January 24 – 27, 2023. St. Petersburg, Russia. St. Petersburg Electrotechnical University «LETI».

8. Zabelinskiy A. A., **Kostik N. R.**, Tarasov S. A. Technical and Economic Analysis of an Energy Storage System as Part of the Small- Scaled Solar Power Plant. // ElConRus 2023, 2023 Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, January 24 – 27, 2023. St. Petersburg, Russia. St. Petersburg Electrotechnical University «LETI».

### Публикации в других изданиях:

9. **Костик Н. Р.**, Сипатдинов А. М. и др. Оценка потенциала Российской Федерации и Узбекистана для внедрения солнечных систем возобновляемой энергетики // Электротехнологии и электрооборудование в АПК. – 2021. – Т. 68. N3(44). – С. 86 – 103.

10. **Костик Н. Р.**, Бобыль А. В. Потенциал агровольтаических систем в сельском хозяйстве Российской Федерации // *АгроЭкоИнженерия*. – 2021. – Т. 2. N107. – С. 25 – 45.

11. Бобыль А. Б., Забродский А. Г., **Костик Н.Р.** и др. Спектральный подход к анализу всплесков временной последовательности // *Технологии и технические средства механизированного производства продукции растениеводства и животноводства*. – 2018. – № 94. – С. 77-85.

12. **Kostik N. R.** et. al. Simulating of renewable energy sources in rural areas of Russia and capabilities of agrorv systems. // Сб. тр. рос. конф. «Физико-химические проблемы возобновляемой энергетики», 18 – 20 ноября 2019 г., г. Санкт-Петербург. – СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС. – 2019. – С. 184 (год публикации – 2019).

13. Малышкин В. Г., Бобыль А. В., **Костик Н.Р.** и др. Научная активность в задачах техникоэкономического моделирования солнечных станций. Пример нестабильных климатических условий. // Сб. тр. рос. конф. «Физико-химические проблемы возобновляемой энергетики», 18 – 20 ноября 2019 г., г. Санкт-Петербург. – СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС. – 2019. – С. 166 (год публикации – 2019).

14. **Костик Н. Р.**, Бобыль А. В. Оценка климатологического влияния на возобновляемые источники энергии в районе Финского залива // *Развивая энергетическую повестку будущего* : Сб. док. междунар. науч.-практ. конф. для представителей сообщества молодых инженеров ТЭК, Санкт-Петербург, 10 – 11 дек. 2021 г. – СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», – 2021. – С. 105 – 109.

15. **Костик Н. Р.**, Тымшан П. Р., Бобыль А. В. Анализ влияния облачности и температуры солнечных элементов на производительность системы возобновляемой энергетики. // *Аморфные и микрокристаллические полупроводники* : Сб. тр.Междунар. конф., Санкт-Петербург, 05–07 июля 2021 г. – СПб. : ПОЛИТЕХПРЕСС, 2021. – 248 с.

16. **Костик Н. Р.**, Тарасов С. А., Айвазян Г. Е., Худавердян С. Х. Моделирование гибридной солнечной–дизельной системы электропитания базовых станций сотовой связи. // *Изв. НАН РА и НПУА. Сер. ТН*. – 2023. – Т. LXXVI. N1.