

На правах рукописи



ГАРКУШИН АЛЕКСЕЙ АЛЕКСЕЕВИЧ

**ОПТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ПЕРЕДАЧИ ЭНЕРГИИ ДЛЯ
ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ МАЛОМОЩНЫХ ДАТЧИКОВ И
ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ КОМПЛЕКСОВ (СИСТЕМА РОФ)**

2.2.6 - Оптические и оптико-электронные приборы и комплексы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой
степени кандидата технических наук

Пермь – 2025

Работа выполнена в «Пермском национальном исследовательском политехническом университете» на кафедре общей физики факультета прикладной математики и механики

Научный руководитель: **Криштоп Виктор Владимирович**,
д.ф.-м.н., профессор кафедры общей
физики факультета прикладной
математики и механики, ПНИПУ

Официальные оппоненты: **Айрапетян Валерик Сергеевич**,
д.т.н., профессор, заведующий
кафедрой специальных устройств,
инноватики и метрологии Сибирского
государственного университета
геосистем и технологий

Голик Сергей Сергеевич,
к.ф.-м.н., доцент, директор института
накоёмких технологий и передовых
материалов ДВФУ

Ведущая организация: **ФГАОУ ВО «Томский**
государственный университет систем
управления и радиоэлектроники»

Защита состоится «20» января 2026 г. в 15:00 часов на заседании диссертационного совета Пермского национального исследовательского политехнического университета Д ПНИПУ.05.27. по адресу: 614990, Пермский край, г. Пермь, Комсомольский проспект, д. 29. (ауд.423б)

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке и на сайте Пермского национального исследовательского политехнического университета (<http://www.pstu.ru>).

Автореферат разослан «18» декабря 2025 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
Д ПНИПУ.05.27,

к.ф.-м.н., доцент



Максименко В.А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

В последние десятилетия происходит активное развитие технологий, так или иначе связанных с оптикой: волоконная оптика, интегральная оптика, квантовая оптика, оптоэлектроника и т.д. Для всех этих направлений в настоящее время применяется обобщающий термин – «фотоника».

Основной упор в фотонике закономерно делается на разработке и совершенствовании оптических инфокоммуникационных систем, то есть систем передачи и обработки информации, работающих в оптическом частотном диапазоне. Однако имеются не связанные с инфокоммуникационными задачами направления (по крайней, мере, напрямую), в которых могут оказаться востребованы технологии фотоники.

Одним из таких перспективных направлений является развитие технологии передачи энергии в виде оптического излучения на значительные расстояния для энергоснабжения потребителей различных типов (датчики, прецизионные системы исполнительные механизмы и др.) [1]. В рамках такого подхода можно выделить два отдельных направления: передача оптической энергии большой мощности в воздухе/вакууме – технология PoA/V (Power-over-Air/Vacuum) [2] и передача оптической энергии большой мощности по оптическим световодам (волокнам) – технология Power-over-Fiber (PoF) [3].

Технология PoF подразумевает, передачу энергии требуемой мощности, необходимую для питания удаленного устройства, по оптоволокну в виде оптического излучения, генерируемого лазерным диодом (ЛД). На стороне питаемого устройства находится полупроводниковый фотоприемник особой конструкции, называемый фотовольтаическим или фотоэлектрическим преобразователем (ФЭП). Такое устройство преобразует энергию оптического излучения, распространяющегося по оптоволокну, в электрическую энергию. Величина электрической мощности и напряжения на выходе преобразователя зависит от характеристик выбранного преобразователя, а также от величины оптической мощности на его входе.

Целью настоящей диссертационной работы является создание системы передачи энергии по оптическому волокну для электропитания маломощных датчиков и измерительных комплексов.

Для достижения поставленной цели были сформулированы и решены следующие научно-технические **задачи**:

1. Повышение эффективности прототипа системы передачи энергии по оптическому волокну, созданного на базе коммерческой платформы, а также разработка макета на дискретных компонентах для апробации новых технических решений, направленных на увеличение общего коэффициента полезного действия системы.
2. Разработка комплексной математической модели ФЭП для прогнозирования их вольт-амперных характеристик в составе системы передачи энергии на основе паспортных данных, без проведения натурных экспериментов.
3. Синтез и проектирование адаптивного алгоритма поиска точки максимальной мощности для ЛД, обеспечивающего достижение предельно возможного КПД системы в условиях динамически изменяющейся нагрузки. В основе алгоритма лежит метод последовательного дифференцирования оптической мощности.
4. Компьютерное моделирование конструкции модуля ФЭП, направленное на повышение равномерности распределения оптического излучения и минимизацию потерь на поверхности полупроводникового кристалла. Моделирование включает разработку апертурного корректора на основе линзованного волокна, устанавливаемого на входе модуля.
5. Конструкторская проработка модуля ФЭП с улучшенными теплоотводящими свойствами и повышенной надежностью, что позволит оптимизировать его энергетическую эффективность и массогабаритные характеристики.

Научная новизна результатов исследования состоит в следующем:

1. Впервые разработан метод управления током накачки ЛД с помощью широтно-импульсной модуляции для оптимально подобранных сопротивлений нагрузки ФЭП, что позволяет повысить эффективность системы PoF при работе с быстроменяющейся нагрузкой в диапазоне значений от 10 Ом до 10 кОм.

2. Впервые применена комплексная математическая модель модулей ФЭП, основанная на паспортных данных, для прогнозирования их работы в оптических системах передачи энергии, что позволяет повысить точность моделирования и управления системой.

3. Впервые для систем энергоснабжения по оптическому волокну внедрён поисковый алгоритм последовательного дифференцирования параметров для оптимального регулирования выходной мощности ЛД при динамически изменяющейся нагрузке, что обеспечивает адаптивную настройку и устойчивость работы при максимальном КПД.

4. Впервые предложена численная модель узла коррекции апертуры на основе линзованного волокна на входе модуля ФЭП, а также метод его сопряжения с объемным гомогенизатором, что позволяет повысить эффективность сбора и передачи оптической энергии в модуль и уменьшить его массогабаритные параметры.

Практическая значимость работы:

1. За счет внедрения широтно-импульсной модуляции в процессе управления током накачки ЛД в системах PoF удалось до 6% повысить эффективность передачи оптической энергии с целью энергоснабжения в области малых оптических мощностей для широкого динамического диапазона изменений активной составляющей сопротивления нагрузки и снизить тепловыделение оптических компонентов. Это способствует увеличению энергетической эффективности оптических систем передачи и может быть использовано при проектировании и совершенствовании подобных комплексов различного назначения.

2. На основе предложенной комплексной математической модели модуля ФЭП разработана универсальная расчетная модель, позволяющая прогнозировать характеристики и рабочее поведение различных ФЭП на основе паспортных данных без необходимости проведения натурных экспериментов. Такой подход обеспечивает снижение трудозатрат и ускоряет процессы внедрения новых конструкций ФЭП в системах передачи энергии по оптическому волокну.

3. Внедрённая методика динамического регулирования оптической мощности ЛД с помощью поискового алгоритма последовательного дифференцирования

параметров оптической системы в условиях изменяющейся нагрузки позволила достичь системного КПД 14,4% для всей системы электроснабжения по оптическому волокну. Ее применение в реальных системах позволит оптимизировать энергопередачу и расширит область использования.

4. Разработана и применена численная модель узла коррекции апертуры на базе линзованного волокна для входа модуля ФЭП, что обеспечивает повышение равномерности распределения оптической интенсивности на поверхности кристалла и способствует увеличению его эффективности. Данная модель может быть интегрирована в проектирование новых конструкций модулей ФЭП с различными конфигурациями фотопреобразующих кристаллов и корпуса.

5. Предложена уникальная конструкция модуля ФЭП с разъемным узлом для оптического кабеля, обладающая повышенной технологичностью при эксплуатации в системах передачи энергии по оптическому волокну. Конструкция защищена патентом РФ на изобретение.

6. Предложена оптимизация отвода тепловой энергии от кристалла фотопреобразователя посредством использования тепловых трубок в конструкции модуля ФЭП, что способствует увеличению надежности и долговечности устройства. Введение соответствующих решений оправдывает себя в условиях интенсивного тепловыделения при высоких мощностях в современных волоконно-оптических энергетических установках. Конструкция защищена патентом РФ на полезную модель.

Методология и методы исследования

Методологическую основу диссертационного исследования составил комплексный подход, интегрирующий методы теоретического анализа, численного моделирования и экспериментальной верификации. Такой подход позволил последовательно решить все поставленные задачи на всех стадиях жизненного цикла разработки системы PoF — от теоретического обоснования до создания действующих макетов.

Теоретическая часть исследования базировалась на фундаментальных разделах современной физики и прикладной математики. Методы математического анализа были задействованы для аналитического описания процессов преобразования энергии в ФЭП и получения расчетных зависимостей его

ключевых параметров (таких как ток короткого замыкания и КПД) от интенсивности лазерного облучения. Методы геометрической и волновой оптики, применялась для анализа и синтеза пассивных оптических элементов системы — гомогенизатора пучка и узла коррекции апертуры на основе линзованного волокна, что было необходимо для максимизации уровня собираемой оптической мощности.

Для решения задач анализа данных, синтеза систем управления и идентификации параметров моделей были использованы аппарат теории сигналов и регрессионный анализ. В частности, метод наименьших квадратов использовался для аппроксимации вольт-амперных характеристик (ВАХ) экспериментальных образцов ФЭП с целью точного определения их эквивалентных схем и параметров. Теоретический базис теории сигналов лег в основу разработки алгоритма широтно-импульсной модуляции (ШИМ) тока накачки ЛД.

Численное моделирование выступало ключевым инструментом сквозного проектирования системы. Моделирование проводилось в специализированных пакетах прикладных программ, выбор которых был обусловлен спецификой решаемых задач. В среде MATLAB Simulink была разработана и верифицирована комплексная динамическая модель всей системы PoF, включающая модули ЛД, волоконно-оптического тракта, ФЭП и нагрузки. Данная модель позволила провести углубленное исследование энергетических и динамических характеристик системы, а также отработать поисковый алгоритм адаптивного управления в виртуальной среде. Для трехмерного моделирования физических процессов распространения, преобразования и поглощения оптического излучения в компонентах системы, а также сопутствующих тепловых явлений, использовался пакет COMSOL Multiphysics. С его помощью были оптимизированы геометрия гомогенизатора и конструкция узла коррекции апертуры, что обеспечило существенное улучшение энергетической эффективности модуля ФЭП.

Таким образом, примененный комплекс методов является адекватным целям и задачам исследования, что подтверждается соответствием результатов моделирования и натурного эксперимента, расхождение между которыми не превысило 5%.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Разработанный метод управления системой передачи энергии по оптическому волокну на основе широтно-импульсной модуляции тока накачки ЛД обеспечивает повышение коэффициента полезного действия системы в области малых оптических мощностей от 0,75 до 15 Вт на величину до 6% для диапазона изменений активной составляющей сопротивления нагрузки от 10 Ом до 10 кОм.
2. Созданная верифицированная комплексная математическая модель модулей ФЭП, функционирующая на основе паспортных данных, позволяет осуществлять прогнозирование его энергетических характеристик с точностью до 2% в диапазоне оптических мощностей от 0,75 до 45 Вт. Модель демонстрирует способность определять выходную электрическую мощность и КПД, что является основой для проектирования и оптимизации оптико-электронных систем преобразования энергии.
3. Предложенный алгоритм адаптивного управления на основе последовательного дифференцирования параметров оптической системы энергоснабжения обеспечивает достижение максимального КПД (14,4%) при изменении сопротивления нагрузки в диапазоне 10–150 Ом. Применение широтно-импульсной модуляции в области низких оптических мощностей (до 15 Вт) позволило повысить КПД на данном участке на 5–7%. Верификация комплексной математической модели подтвердила адекватность полученных результатов с точностью прогнозирования КПД не менее 97%.
4. Созданная методика сквозного сопряженного проектирования линзованного волокна и гомогенизатора для ФЭП систем энергоснабжения по волокну, основанная на верифицированной численной модели (погрешность менее 5%), обеспечивает значительное улучшение ключевых характеристик модуля: снижение потерь равномерности освещения на 9,3%, снижение оптических потерь на 2,2% и сокращение массогабаритных показателей на 32% по сравнению с традиционными схемами. Данный подход позволяет целенаправленно синтезировать профиль линзованного волокна для формирования заданного пространственного распределения интенсивности и радикального (до 40%) сокращения длины гомогенизатора, что решает ключевую проблему интеграции оптической системы

передачи энергии в ограниченные объемы современной авиационной и робототехники.

Внедрение результатов

В рамках выполнения научных исследований и подготовки диссертационной работы были получены:

1. Патент на изобретение RU 2814799 C1, 04.03.2024. Заявка от 09.08.2023.
2. Патент на полезную модель. RU 232070 U1 от 03.12.2024.

Часть результатов исследования было получено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № FSNM-2023-0006), а также гранта по программе «Студенческий стартап» Фонда содействия инноваций. Разработка измерительной системы с энергоснабжением по оптическому волокну для мониторинга на взрывоопасных объектах отмечена наградой Агентства стратегических инициатив «Технопрорыв-2022».

Обоснование достоверности научных положений, результатов и выводов.

Достоверность полученных результатов подтверждается применением корректных методов математического и компьютерного моделирования (MATLAB Simulink, COMSOL Multiphysics), а также их верификацией с помощью натурных экспериментов на разработанных макетах. Расхождение между результатами моделирования и экспериментальными данными не превышает 3–5% для различных режимов работы, что свидетельствует о высокой адекватности примененных моделей и методов.

Апробация работы. Основные научные результаты диссертации были представлены и получили положительную оценку на 9 российских и международных научных конференциях, в числе которых: Всероссийская конференция по волоконной оптике (Пермь, 2021), I-я международная научно-практическая конференция молодых ученых, аспирантов и студентов «Передовые инженерные школы: материалы, технологии, конструкции» (Пермь, 2023), XII и XIII международные конференции по фотонике и информационной оптике (Москва, 2023, 2024), Asia-Pacific Conference on Fundamental Problems of Opto- and Microelectronics (Владивосток, 2023, 2024), 12th International Conference on

Mathematical Modeling in Physical Sciences (Белград, Сербия, 2023), IEEE Ural-Siberian Conference on Biomedical Engineering, Radioelectronics and Information Technology (Екатеринбург, 2024) и XXII международная конференция «Оптика лазеров» (Санкт-Петербург, 2024).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 14 научных работ, в том числе 3 статьи в ведущих рецензируемых журналах, входящих в перечень ВАК и индексируемых в международных базах данных Scopus и Web of Science. Получены 1 патент на изобретение и 1 патент на полезную модель.

Личный вклад автора. Автор диссертации являлся ключевым исполнителем проводимых исследований. Лично им получены основные результаты, выносимые на защиту. Во всех работах, выполненных в соавторстве, автор непосредственно осуществлял постановку задач, участвовал в проведении исследований, анализе и интерпретации полученных данных.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, 4 глав и заключения. Общий объем работы составляет 161 страницу текста, включая 72 рисунка, 17 таблиц, список использованных источников состоит из 123 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обоснована актуальность разработки оптических систем передачи энергии для электропитания маломощных датчиков и измерительных комплексов в условиях воздействия сильных электромагнитных помех, во взрыво- и пожароопасных средах, а также при жестких ограничениях на массогабаритные характеристики. Показано, что существующие коммерческие системы на базе технологии PoF обладают низким коэффициентом полезного действия (КПД), особенно при работе на динамически изменяющуюся нагрузку. Сформулированы цель и задачи диссертационной работы, направленные на создание высокоэффективной системы PoF.

В первой главе проведен анализ структурной схемы системы PoF, включающей ЛД, оптоволоконный кабель, ФЭП, сервисную электронику и систему

охлаждения. Выявлены ключевые факторы, ограничивающие эффективность системы, основными из которых являются: низкий КПД преобразования (1,5–5% «от розетки»), работа на рассогласованную нагрузку и неоптимальные тепловые режимы компонентов.

На основе исследования коммерческого прототипа и макета на дискретных компонентах установлено, что одним из критических факторов является резкое изменение оптимального сопротивления нагрузки ФЭП (R_{opt}) в зависимости от входной оптической мощности. Экспериментально получены зависимости R_{opt} (1) и КПД ФЭП (2) от мощности лазерного излучения (Рис. 1), которые показывают, что в области малых мощностей (0,5–2 Вт) R_{opt} изменяется в 6 раз (от 3500 до 600 Ом), а КПД возрастает в 2 раза. В области средних мощностей (4–10 Вт) R_{opt} стабилизируется на уровне 90–100 Ом, а КПД достигает 28%. На мощностях свыше 10 Вт наблюдается снижение КПД до 25% из-за перегрева преобразователя.

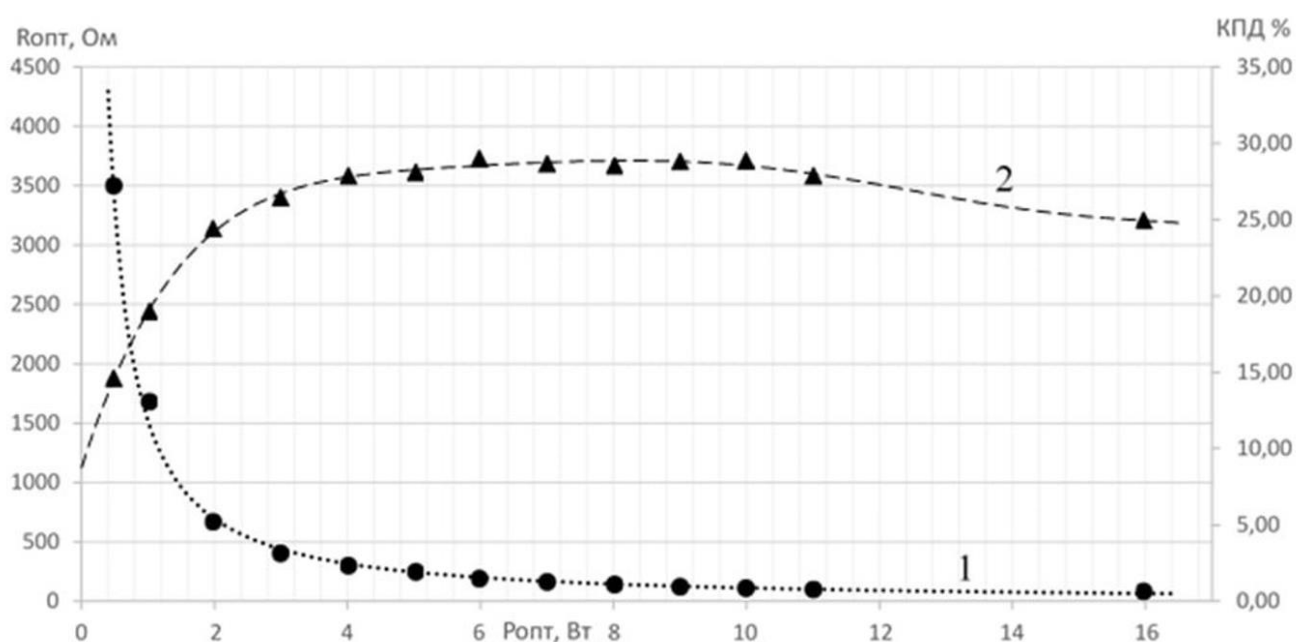


Рис. 1. Зависимость оптимального сопротивления нагрузки и КПД ФЭП от входной оптической мощности

Полученные результаты подтвердили необходимость разработки адаптивной системы управления, точной математической модели ФЭП и оптимизации его конструкции для работы в широком диапазоне изменяющейся нагрузки.

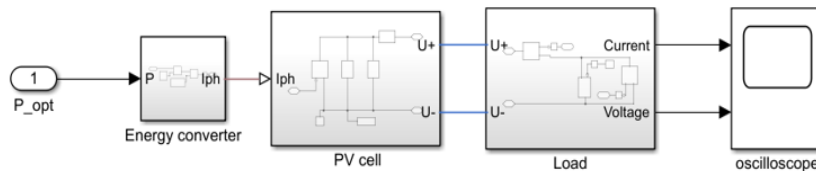
Во второй главе разработана комплексная математическая модель (цифровой двойник) ФЭП, функционирующая на основе паспортных данных.

Основное уравнение, описывающее ток нагрузки I_H в пятиэлементной эквивалентной схеме ФЭП, имеет вид:

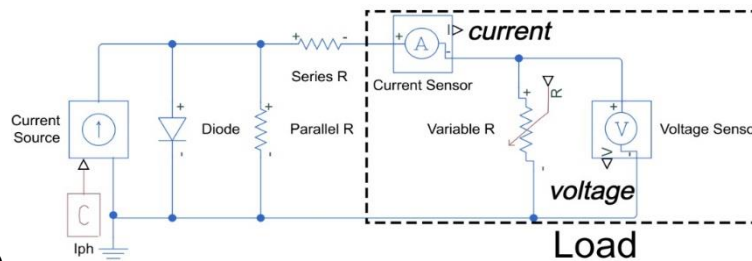
$$I_H = I_{гп} - I_{\phi} + I_{yT} = I_0 \exp \left[\frac{q(U_H + I_H R_{п})}{AkT} - 1 \right] - I_{\phi} + \frac{U_H + I_H R_{п}}{R_{ш}},$$

где I_0 – обратный ток насыщения р–п перехода, I_{ϕ} – фототок, $R_{п}$ и $R_{ш}$ – последовательное и шунтирующее сопротивления, U_H – напряжение на нагрузке, q – заряд электрона, k – постоянная Больцмана, T – температура, A – диодный фактор. Модель реализована в среде MATLAB Simulink (Рис. 2) и позволяет прогнозировать выходное напряжение, ток, электрическую мощность и КПД преобразователя в диапазоне оптических мощностей 0,75–45 Вт.

а)



б)



в)

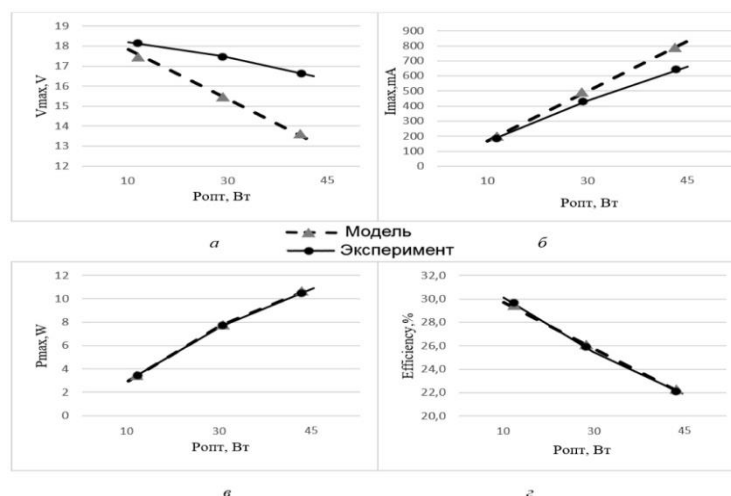


Рис. 2. Цифровой двойник ФЭП: а) имитационная модель в Simulink, б) эквивалентная схема замещения в) сравнение экспериментальных и модельных ВАХ

Верификация модели проведена путем сопоставления результатов моделирования с экспериментальными данными для реальных образцов ФЭП. Установлено, что расхождение между модельными и экспериментальными значениями ключевых параметров (максимальной выходной мощности и КПД) не превышает 2–3%, что подтверждает адекватность модели и позволяет использовать ее для проектирования и оптимизации оптико-электронных систем преобразования энергии без проведения трудоемких натурных экспериментов.

В третьей главе предложен и реализован адаптивный алгоритм управления мощностью ЛД на основе последовательного дифференцирования параметров оптической системы. Алгоритм, реализуемый в регуляторе (Рис. 3а), в реальном времени анализирует знаки производных электрической мощности ЛД ($dP_{элЛД}$) и общего КПД системы ($dKПД$) и на основе правил (Рис. 3б) определяет направление изменения мощности для выхода в точку максимальной эффективности.

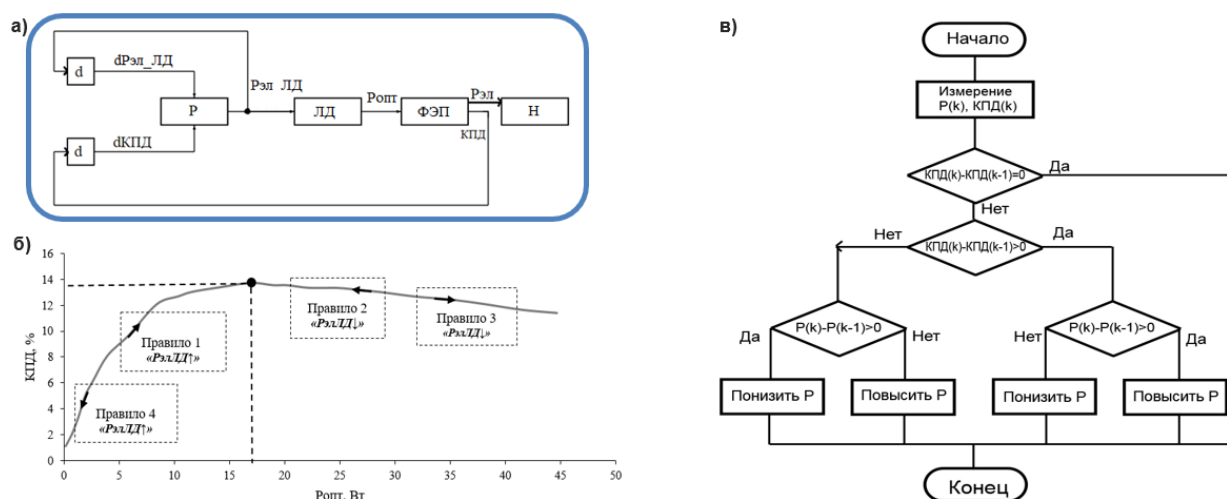


Рис. 3. Система адаптивного управления: а) структурная схема, б) иллюстрация работы правил алгоритма в) блок-схема алгоритма

Для области высоких сопротивлений (>70 Ом) и низких оптических мощностей (до 15 Вт) дополнительно применена ШИМ тока накачки ЛД. Это позволило поддерживать амплитуду оптической мощности на уровне,

соответствующем максимальному КПД ЛД и ФЭП, регулируя выходную мощность за счет скважности импульсов. Для сглаживания пульсаций мощности на нагрузке использована емкость, подобранная из компромисса между временем переходного процесса и стабильностью выходной мощности.

Внедрение алгоритма позволило достичь системного КПД 14,4% для всей системы электроснабжения при изменении сопротивления нагрузки в диапазоне 10–150 Ом. Применение ШИМ в области низких оптических мощностей позволило повысить КПД на данном участке на 5–7% по сравнению с работой в непрерывном режиме (Рис. 4).

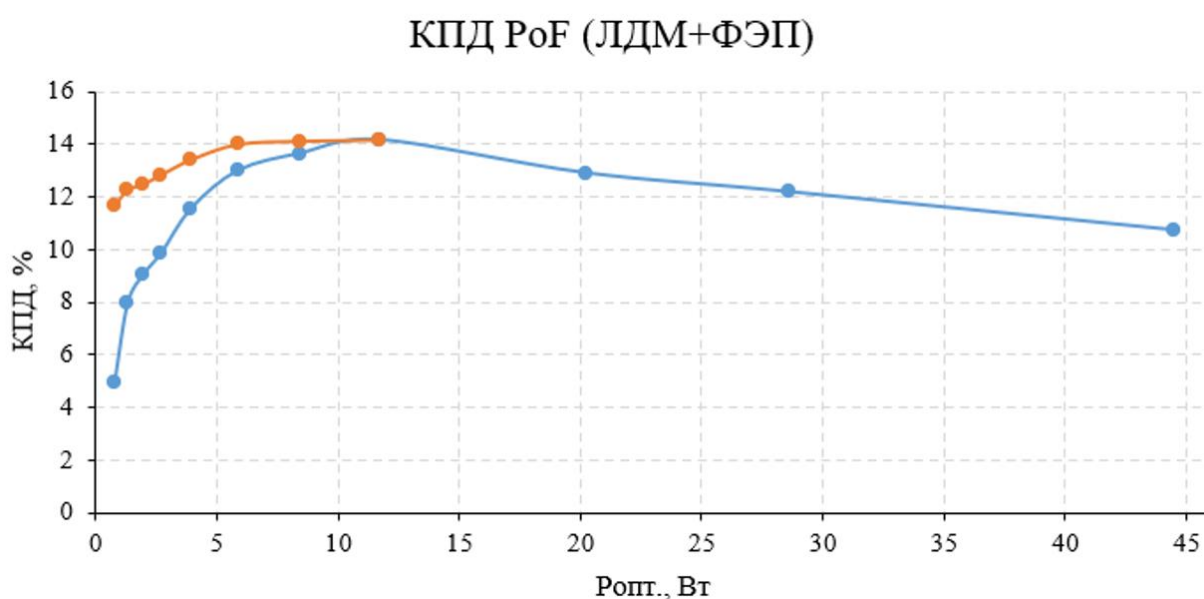


Рис. 4. Зависимость КПД компонентов системы PoF от оптической мощности при работе в режиме генерации: синий график– непрерывном, красный график – импульсном,

В четвертой главе проведено сопряженное проектирование пассивных оптических элементов модуля ФЭП, направленное на повышение равномерности распределения оптического излучения и минимизацию потерь. Ключевым инструментом стала многокритериальная оптимизация с использованием метода линейной свертки, формирующей обобщенный критерий F :

$$F = \sum_{i=1}^n \lambda_i f_i \rightarrow \min,$$

где f_i – нормализованные частные критерии (потери равномерности, потери мощности, массогабаритные параметры), λ_i – весовые коэффициенты, отражающие

важность каждого критерия, причем $\sum_{i=1}^n \lambda_i = 1$. Данный подход позволил найти компромиссные решения на множестве Парето и количественно оценить оптимальность конструкции.

Разработана численная модель узла коррекции апертуры на основе линзованного волокна, устанавливаемого на входе модуля. Моделирование процессов распространения и преобразования оптического излучения проводилось в пакете COMSOL Multiphysics (Рис. 5а, б).

На основе верифицированной численной модели (погрешность менее 5%) синтезирован профиль линзованного волокна, обеспечивающий формирование заданного пространственного распределения интенсивности на входе гомогенизатора. Это позволило радикально (до 40%) сократить длину гомогенизатора при сохранении высокой равномерности освещения. Внедрение разработанных решений обеспечило значительное улучшение ключевых характеристик модуля ФЭП: снижение потерь равномерности освещения на 9,3%, снижение оптических потерь в конструкции на 2,2% и сокращение массогабаритных показателей на 32% по сравнению с традиционными схемами.

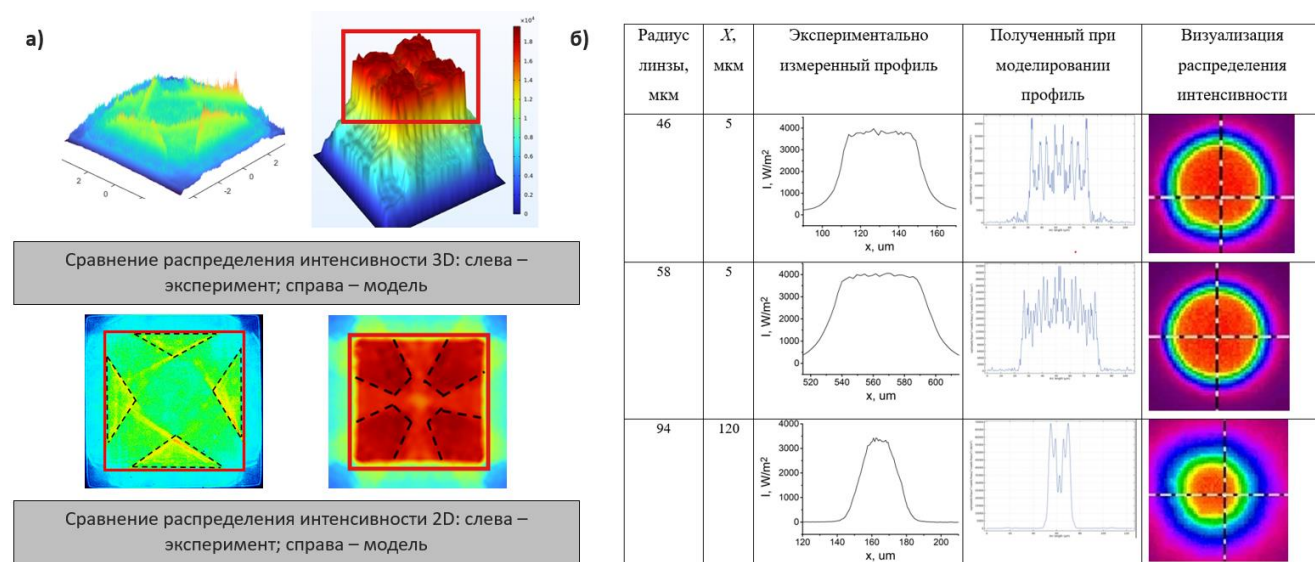


Рис. 5. Результаты моделирования в COMSOL: а) распределение излучения в гомогенизаторе, б) сравнение экспериментального и модельного профиля интенсивности линзованного волокна.

Также предложена и запатентована конструкция модуля ФЭП с разъемным узлом для оптического кабеля (патент на изобретение № 2814799) и улучшенной системой теплоотвода на основе тепловых трубок (патент на полезную модель № 232070), что повысило технологичность, надежность и долговечность устройства.

В заключении сформулированы основные научные и практические результаты диссертационной работы, подтверждающие достижение поставленной цели и решение всех задач.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Проведенные исследования позволили создать комплекс технических решений для систем передачи энергии по оптическому волокну. Разработана и экспериментально подтверждена математическая модель ФЭП, обеспечивающая прогнозирование характеристик с точностью до 2% на основе паспортных данных.

Созданный алгоритм адаптивного управления с применением ШИМ продемонстрировал возможность достижения системного КПД 14,4% при работе на динамическую нагрузку. Оптимизация конструкции модуля ФЭП с узлом коррекции апертуры позволила сократить массогабаритные показатели на 32% при одновременном снижении оптических потерь.

Полученные патенты на конструкции модулей ФЭП подтверждают практическую значимость разработок. Результаты работы создают основу для создания перспективных систем энергоснабжения для ответственных применений в авиационной и робототехнической технике.

СПИСОК ЦИТИРУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бойчук, Е.С. Передача энергии лазерным излучением в свободном пространстве // Бюллетень научный сообщений: сборник научных трудов. Вып. 25. – 2020. – №. 25. – С. 91–102.
2. Iyer V. et al. Charging a smartphone across a room using lasers // Proceedings of the ACM on Interactive, Mobile, Wearable and Ubiquitous Technologies. – 2018. – Т. 1. – №. 4. – С. 1-21.
3. Fahad, et al. Optically Powered Radio-Over-Fiber Systems in Support of 5G Cellular Networks and IoT // IEEE Journal of lightwave technology, 2021-VOL. 39-№13.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ ПЕРЕЧЕНЬ ПУБЛИКАЦИЙ (ВАК, Scopus, WoS):

1. Гаркушин А.А. и др. Прототип системы мониторинга с энергоснабжением по оптическому волокну // Изв. вузов. Приборостроение. 2024. Т. 67. № 1. С. 80-95. DOI: 10.17586/0021-3454-2024-67-1-80-95 **(ВАК)**
2. Garkushin A.A. et al. Intelligent power supply system with power transmission via optical fiber // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2024. Vol. 88. No. 6. P. 986-990. DOI:10.1134/S1062873824706950 **(Scopus)**
3. Garkushin A.A. et al. Photovoltaic converter with aperture correction for power-over-fiber systems // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2024. Vol. 88. Suppl. 3. P. S361-S369. DOI: 10.1134/S1062873824709838 **(Scopus)**

АВТОРСКИЕ СВИДЕТЕЛЬСТВА, ПАТЕНТЫ:

1. Патент на изобретение RU 2814799 C1. Модуль фотоэлектрического преобразователя с разъемным узлом для оптического кабеля / Гаркушин А.А. и др.; опубл. 04.03.2024.
2. Патент на полезную модель RU 232070 U1. Модуль фотоэлектрического преобразователя / Гаркушин А.А. и др.; опубл. 03.12.2024.

СТАТЬИ, ОПУБЛИКОВАННЫЕ В ДРУГИХ ИЗДАНИЯХ И МАТЕРИАЛАХ КОНФЕРЕНЦИЙ:

1. Garkushin A.A. et al. Digital twin of the photoelectric converter of the power transmission system over optical fiber // J. Phys.: Conf. Ser. 2024. Vol. 2701. P. 012146. DOI: 10.1088/1742-6596/2701/1/012146 **(Scopus)**
2. Гаркушин А.А. и др. Зависимость характеристик системы роf от длины оптического волокна // Фотон-экспресс. 2021. № 6. С. 42-43.
3. Гаркушин А.А. и др. Применение широтно-импульсной модуляции в алгоритме поиска оптимальной оптической мощности в системе power-over-fiber // XIII Международная конференция по фотонике и информационной оптике: сб. науч. тр. М., 2024. С. 445-446.

4. Гаркушин А.А. и др. Разработка системы мониторинга с энергоснабжением по оптическому волокну // Физика для Пермского края: мат-лы регион. науч.-практ. конф. 2022. № 15. С. 112-119.
5. Гаркушин А.А. и др. Разработка модулей системы сбора данных с датчиков физических величин // Физика для Пермского края: мат-лы регион. науч.-практ. конф. 2022. № 15. С. 119-125.
6. Кадочиков И.В. и др. Универсальная метеостанция на основе цифровых компонентов // Физика для Пермского края: мат-лы регион. науч.-практ. конф. 2022. № 15. С. 131-138.
7. Гаркушин А.А. и др. Измерение характеристик прототипа системы передачи энергии через оптоволокно мощностью до 5 Вт // XII Международная конференция по фотонике и информационной оптике: сб. науч. тр. М., 2023. С. 464-465.
8. Гаркушин А.А. и др. Перспективы применения технологии power-over-fiber // Прикл. фотоника. 2023. Т. 10. № 1. С. 46-67.
9. Гаркушин А.А. и др. Зависимость характеристик системы PoF от расстояния передачи энергии // Бюл. науч. сообщ. 2021. № 6. С. 42.
10. Гаркушин А.А. и др. Системы передачи энергии по оптическому волокну // Бюл. науч. сообщ. 2020. № 25. С. 48-53.
11. Бойчук Е.С. и др. Передача энергии лазерным излучением в свободном пространстве // Бюл. науч. сообщ. 2020. № 25. С. 91-102.