

«Пермский национальный исследовательский политехнический университет»

На правах рукописи

Гаркушин Алексей Алексеевич

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

2.2.6 - Оптические и оптико-электронные приборы и комплексы

диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:

д.ф.-м.н., профессор В.В. Криштоп

Пермь – 2025

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
1. СИСТЕМЫ ПЕРЕДАЧИ ЭНЕРГИИ ПО ОПТИЧЕСКОМУ ВОЛОКНУ. 17	17
1.1. Перспективы применения систем на базе технологии PoF	17
1.1.1. Энергоснабжение систем на пожаро- и взрывоопасном производстве	20
1.1.2. Энергоснабжение телекоммуникационных и IT систем	20
1.1.3. Энергоснабжение прецизионных датчиков и систем на их основе	22
1.2. Современное состояние и мировые тенденции развития технологии Power-over-Fiber	25
1.3. Основные функциональные узлы системы PoF и важные факторы, учитываемые при проектировании систем	26
1.3.1. Структурная схема системы PoF	26
1.3.2. Лазерный диодный модуль	27
1.3.3. Оптоволоконный кабель	31
1.3.4. Модуль фотоэлектрического преобразователя	35
1.3.5. Важные факторы, учитываемые при проектировании систем PoF	38
1.4. Создание прототипа системы передачи энергии для электропитания маломощных датчиков на базе коммерчески доступной платформы	50
1.5. Выводы по главе 1	58
2. КОМПЛЕКСНАЯ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ (ЦИФРОВОЙ ДВОЙНИК) МОДУЛЯ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ 61	61
2.1. Комплексная математическая модель (цифровой двойник).....	61
2.2. Основные варианты конструкций фотоэлектрических преобразователей лазерного излучения	65
2.3. Воздействие света на p–n-переход	68
2.4. Эквивалентная схема ФЭП	73
2.5. Моделирование ФЭП в MATLAB	75
2.6. Исследование основных характеристик модуля ФЭП	77
2.7. Проверка работоспособности цифрового двойника ФЭП	80
2.8. Выводы по 2-ой главе	82
3. ПОИСКОВЫЙ АЛГОРИТМ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОПТИЧЕСКОЙ МОЩНОСТИ ЛАЗЕРНОГО ДИОДА	84

3.1. Влияние оптических компонентов на общую эффективность системы	84
3.2. Алгоритм нахождения оптической мощности.....	88
3.3. Моделирование работы алгоритма нахождения оптической мощности.	92
3.4. Алгоритм нахождения оптической мощности с ШИМ сигналом	97
3.5. Моделирование алгоритма нахождения оптической мощности с ШИМ сигналом.....	99
3.6. Выводы по главе 3	102
4. ПРОЕКТИРОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ МОДУЛЯ ФЭП С УЛУЧШЕННЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ.....	103
4.1. Основные элементы конструкции ФЭП.....	103
4.2. Моделирование гомогенизатора модуля ФЭП	107
4.2.1 Математический аппарат	108
4.2.2. Распространение оптического излучения в среде по закону Гаусса	110
4.2.3. Методика оптимизации с несколькими критериями	112
4.2.4. Построение модели распределения оптического излучения в модуле ФЭП.....	113
4.2.5. Верификация модели для одномодового и многомодового канала распространения оптического излучения.....	115
4.2.6. Проведение многокритериальной оптимизации гомогенизатора модуля ФЭП	119
4.2.7. Подтверждение результатов оптимизации параметров гомогенизатора модуля ФЭП.....	124
4.2.8. Разработка перспективной конструкции модуля ФЭП с оптимизированными параметрами.....	125
4.3. Проектирование узла коррекции апертуры ФЭП на базе линзованного оптического волокна	126
4.3.1 Математический аппарат	127
4.3.2. Численное моделирование линзованных волоконных световодов	130
4.3.3. Обработка результатов численного моделирования линзованных волоконных световодов	131
4.3.4. Экспериментальная проверка результатов численного моделирования линзованных волоконных световодов	132

4.4. Проектирование модуля ФЭП с разъемным узлом для оптического кабеля	136
4.5. Проектирование конструкции ФЭП с улучшенным теплоотводом ..	138
4.6. Выводы по главе 4.....	140
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	142
БЛАГОДАРНОСТИ.....	144
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ	145
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	146
ПРИЛОЖЕНИЯ	160
Приложение 1 – Патент на изобретение №2814799 «МОДУЛЬ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ С РАЗЪЕМНЫМ УЗЛОМ ДЛЯ ОПТИЧЕСКОГО КАБЕЛЯ»	160
Приложение 2 – Патент на полезную модель №232070 «МОДУЛЬ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ»	161

ВВЕДЕНИЕ

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].

Передача энергии через воздушный канал на современном этапе развития науки и техники не очень эффективна из-за большого поглощения излучения в атмосфере и подвержена влиянию погодных условий, например, становится невозможной в дождь или снег. Решением могут стать волоконно-оптические технологии, которые на сегодняшний день являются основным способом передачи информации.

Системы передачи энергии с помощью оптического излучения (света), являются предметом исследований начиная с Архимеда, которому, по легенде, в битве при Сиракузах удалось сжечь римский флот за счет фокусировки излучения солнца большим количеством отполированных бронзовых щитов. Современные

технологии позволяют передавать значительную энергию лазерным излучением, которое имеет существенные преимущества, а именно, низкая расходимость пучка и высокая спектральная плотность излучения. Такие системы могут применяться для военных целей, например, для борьбы с беспилотными летательными аппаратами [4] или для передачи энергии через воздушный канал для последующего преобразования ее из световой в электрическую и питания удаленных потребителей [5]. Передача энергии через воздушный канал имеет низкую эффективность из-за большого поглощения излучения в атмосфере и подвержена влиянию погодных условий, например, становится невозможной в дождь или снег. Решением могут стать волоконно-оптические технологии, которые на сегодняшний день являются одним из основных способов передачи информации, и в то же время в последние годы намечается интерес к использованию оптического волокна для передачи оптической (лазерной) энергии к удаленным потребителям с последующим преобразованием ее в электрическую энергию с помощью фотоприемника [6].

Power-over-Fiber (PoF) – это активно развивающаяся технология передачи мощности для питания электронных устройств с использованием оптоволоконного кабеля. Применение такой технологии позволяет отказаться от металлических проводников и аккумуляторов в тех случаях, когда их использование сопряжено с серьезными трудностями с точки зрения технической реализации, может повлиять на работоспособность оборудования или же представляет угрозу для обслуживающего персонала [7], кроме того, технология PoF позволяет осуществлять электропитание изолированных оптических сетей, а также осуществлять «умное электропитание» [8].

Технология PoF подразумевает, передачу энергии требуемой мощности, необходимую для питания удаленного устройства, по оптоволокну в виде оптического излучения, генерируемого лазерным источником (Рисунок. 1). На стороне питаемого устройства находится полупроводниковый фотоприемник особой конструкции, называемый фотоэлектрическим или фотовольтаическим

преобразователем. 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 [8].

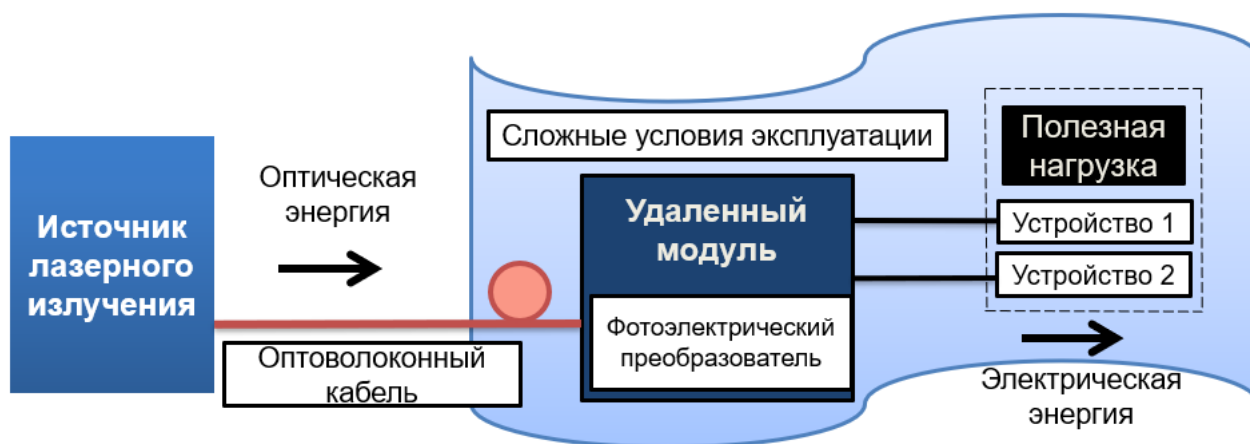


Рисунок 1. Структурная схема системы Power-over-Fiber

У волоконно-оптических технологий есть ряд серьезных преимуществ перед обычными проводными системами [7, 8]:

- полная гальваническая развязка питаемого устройства от источника питания (не имеют непосредственного электрического контакта друг с другом);
- снижение риска возгорания проводки вследствие повреждения изоляции;
- уменьшение габаритов и веса линии питания;
- устойчивость к внешним электромагнитным воздействиям (сложно обнаруживается и обладает высокой защищенностью от несанкционированного проникновения и снятия информации, отсутствие влияния на соседние линии связи).

Исходя из этих особенностей, можно выделить следующие ключевые области применения PoF [5]:

- электрические сети (высоковольтные датчики, камеры для контроля подстанций);
- транспорт (топливные системы, системы мониторинга и диагностики);

- взрывоопасные производства (добыча и переработка нефти и газа, угля, взрывчатых веществ, удобрений, сахара и т.д.);
- телекоммуникационные сети (антенны сотовой связи, удлинители PON (пассивная оптическая сеть));
- медицинская техника (высоковольтные элементы лечебно-диагностического оборудования);
- шахты пусковых установок, аккумуляторные отсеки подводных лодок (при зарядке выделяется водород) и т.д.;
- производство, хранение и заправка ракетного и реактивного топлива;
- автозаправки, заправочные комплексы для самолетов в аэропортах;
- питание беспилотных летательных и подводных аппаратов.

В большинстве из указанных выше приложений используются датчики различного типа с потребляемой электрической мощностью 150–250 мВт. То есть, для питания нескольких датчиков одновременно, необходима мощность до 1 Вт. Для обеспечения энергией других устройств, например, беспилотных аппаратов, требуется энергия уже в несколько ватт. Ориентировочные характеристики систем для различных применений приведены в Таблице 1.

Таблица 1. Основные характеристики систем на базе PoF для различных сфер применения

Характеристика	Датчики, мед. техника	Системы мониторинга, производство	Электросети, Телекоммуникация	БПЛА
Длина кабеля, м	≤ 1	От 1 до 100	100 до 1000	>1000
Рабочая длина волны, нм	850, 980	850, 980	1360, 1550	1550
Мощность на стороне приемника, Вт	≤ 1	От 1 до 10	>10	>100

В настоящий момент существует ряд ограничений, который препятствует широкому внедрению технологии PoF в промышленности:

1. Низкая эффективность систем по технологии PoF (КПД от розетки до приемника 1,5-5%)

2. Технические характеристики: эффективность, массогабаритные параметры, тепловые режимы, технологичность, основного функционального узла

– модуля фотоэлектрического преобразователя (ФЭП) находятся ниже требуемого уровня.

3. Функционирование модуля ФЭП в составе системы PoF не является оптимальным. Требуется предварительная настройка, возможен перегрев компонентов. Низкая надёжность системы в целом.

4. Отсутствие алгоритмов обратной связи внутри системы PoF, обеспечивающих наибольшую эффективность ее функционирования во всех режимах работы.

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 фотоэлектрических преобразователей (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 лазерного излучателя, 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 лазерного диода с помощью широтно-импульсной модуляции для оптимально подобранных сопротивлений нагрузки фотоэлектрического преобразователя (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 лазерного диода при динамически изменяющейся нагрузке, что обеспечивает адаптивную настройку и устойчивость работы при максимальном КПД.

4. Впервые предложена численная модель узла коррекции аперттуры 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 лазерного диода 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 лазерного диода 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 разъёмным 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 фотоэлектрическом преобразователе (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 лазерного диода.

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 лазерного источника, 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 лазерного диода 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 коэффициент полезного действия, 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 коэффициента полезного действия (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 фотоэлектрических преобразователей 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 оптических 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. Модуль фотоэлектрического преобразователя с разъемным узлом для оптического кабеля
2. **Патент на полезную модель.** RU 232070 U1 от 03.12.2024. Модуль фотоэлектрического преобразователя

Ряд научно-технических результатов был получен в рамках выполнения контракта № 337/2021/57 (2021/419) от 11.10.2021 г. на реализацию мероприятий программы деятельности научно-образовательного центра мирового уровня «Рациональное недропользование», и в рамках работы по проекту «Фундаментальные основы рациональной разработки трудноизвлекаемых нефтяных запасов на основе создания цифровых двойников объектов нефтегазового комплекса». Исследования выполнены при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № FSNM-2023-0005), а также договора №225ГССС15-L/78635 (2022/2024) о предоставлении гранта по итогам конкурса в рамках программы «студенческий стартап», проводимом фондом содействия инновациям. Тема проекта «Разработка измерительной системы с энергоснабжением по оптическому волокну для безопасного мониторинга обстановки на взрывоопасных и пожароопасных объектах промышленной инфраструктуры. Работа удостоена награды Агентства стратегических инициатив «Технопрорыв-2022» за проект по передаче энергии по оптическому волокну «Power over Fiber»

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, что подтверждает новизну и практическую значимость разработки.

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.

1. СИСТЕМЫ ПЕРЕДАЧИ ЭНЕРГИИ ПО ОПТИЧЕСКОМУ ВОЛОКНУ

Растет научно-технический интерес к системам передачи оптической энергии по волокну, обусловленный их потенциалом для энергоснабжения удаленных, чувствительных к электромагнитным помехам устройств, таких как датчики в прецизионных измерениях или телекоммуникационное оборудование. В данной главе представлены общие принципы построения подобных систем, проанализированы характеристики их ключевых компонентов и основные прикладные направления. На примере системы, реализованной на базе коммерческой платформы, выявлены ее особенности и ограничения. В результате сформулирован ряд принципов, реализация которых позволяет существенно повысить эффективность систем передачи оптической энергии. Подробное обоснование этих результатов приведено в работе [9].

1.1. Перспективы применения систем на базе технологии PoF

Современной тенденцией конструирования приборов является стремление к интеграции различных функций в одном устройстве, в том числе, передачи данных и проведения измерений физических величин [8]. В такую систему целесообразно добавить еще и функцию электроснабжения для питания полезной нагрузки: датчиков, исполнительных механизмов управляющей электроники и др. На рисунке 1.1 представлены существующие методы передачи электроэнергии от источника к потребителю: прямой, комбинированный и способ, использующий преобразование электричества в другой вид энергии [10-12].

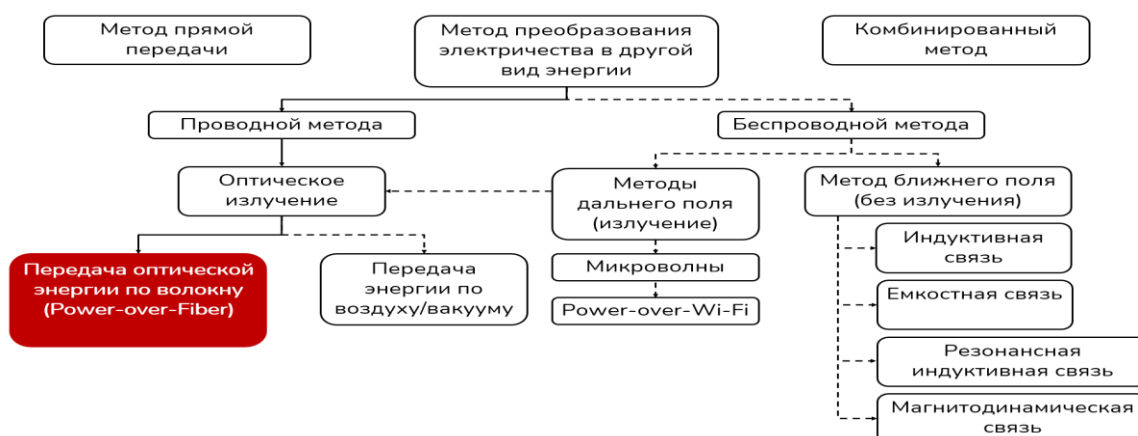


Рисунок 1.1 Способы передачи электроэнергии

Последние достижения в области оптоволоконных и фотонных технологий [13-17] позволяют создавать системы различного функционального назначения с энергоснабжением через оптическое волокно (технология PoF) и вакуум/воздух (технология OWPT) [1]. PoF-системы (Power-over-fiber) работают по принципу двойного преобразования энергии: электрической в оптическую, при вводе в оптическое волокно и обратное из оптической в электрическую на выходе из него. Как и все системы двойного преобразования такая технология имеет свои преимущества и недостатки. Сложность построения схемы двойного преобразования энергии и неизбежное возрастание энергетических потерь, предполагают использование таких систем для энергоснабжения в обоснованных случаях, когда прокладка традиционных линий электропередачи невозможна, затруднена, экономически нецелесообразна или опасна. Основными преимуществами выбранной схемы передачи энергии является её взрыво- и пожаробезопасность, отсутствие металлических проводов, невосприимчивость к электромагнитным полям и отсутствие собственной эмиссии электромагнитного излучения, меньшие габариты и масса «силового» кабеля энергоснабжения.

Потенциальными областями применения подобных систем (см. рисунок 1.2) являются в первую очередь пожароопасные и взрывоопасные производства, на которых применение обычных схем электропитания с использованием электрических кабелей может привести к аварийным ситуациям [6,18]. Кроме того, подобные системы могут найти широкое применение в системах контроля, находящихся в труднодоступных местах, в которых прокладка и эксплуатация электрических кабелей нецелесообразна [7]. Наиболее эффективно использование указанных систем при работе с современными миниатюрными датчиками и исполнительными механизмами с незначительным (единицы-десятки ватт) потреблением энергии. На рисунке 1.3 показана полезная нагрузка, которая может быть запитана по технологии PoF

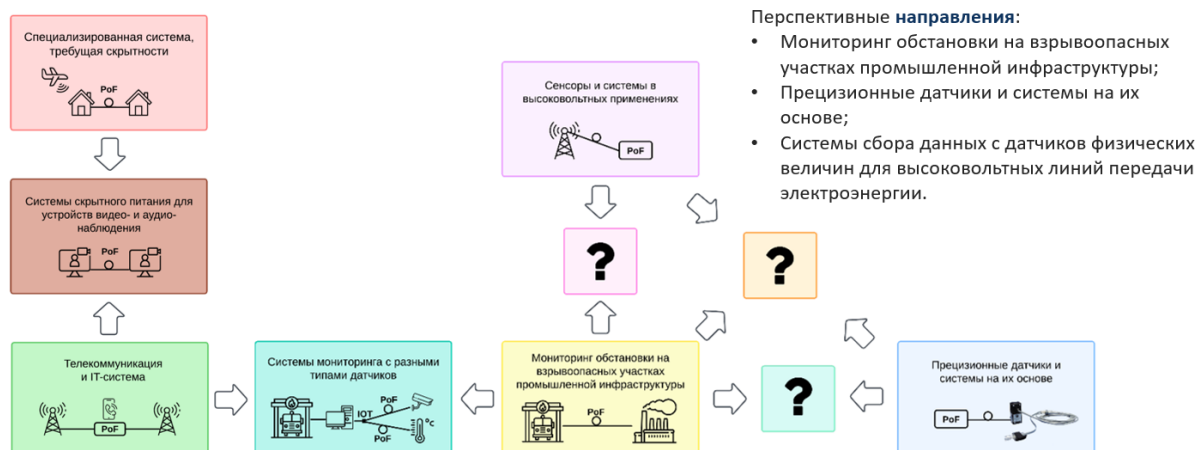


Рисунок 1.2 Потенциальные области применения систем на базе технологии PoF

Дополнительным преимуществом технологии передачи энергии по оптическим волокнам является возможность обеспечивать двухсторонний обмен информацией между центральным процессором и удаленными терминалами по оптическому волокну, проложенному в составе того же оптического кабеля [19,20]. или даже по одному оптическому волокну электроснабжения и обмена информацией.

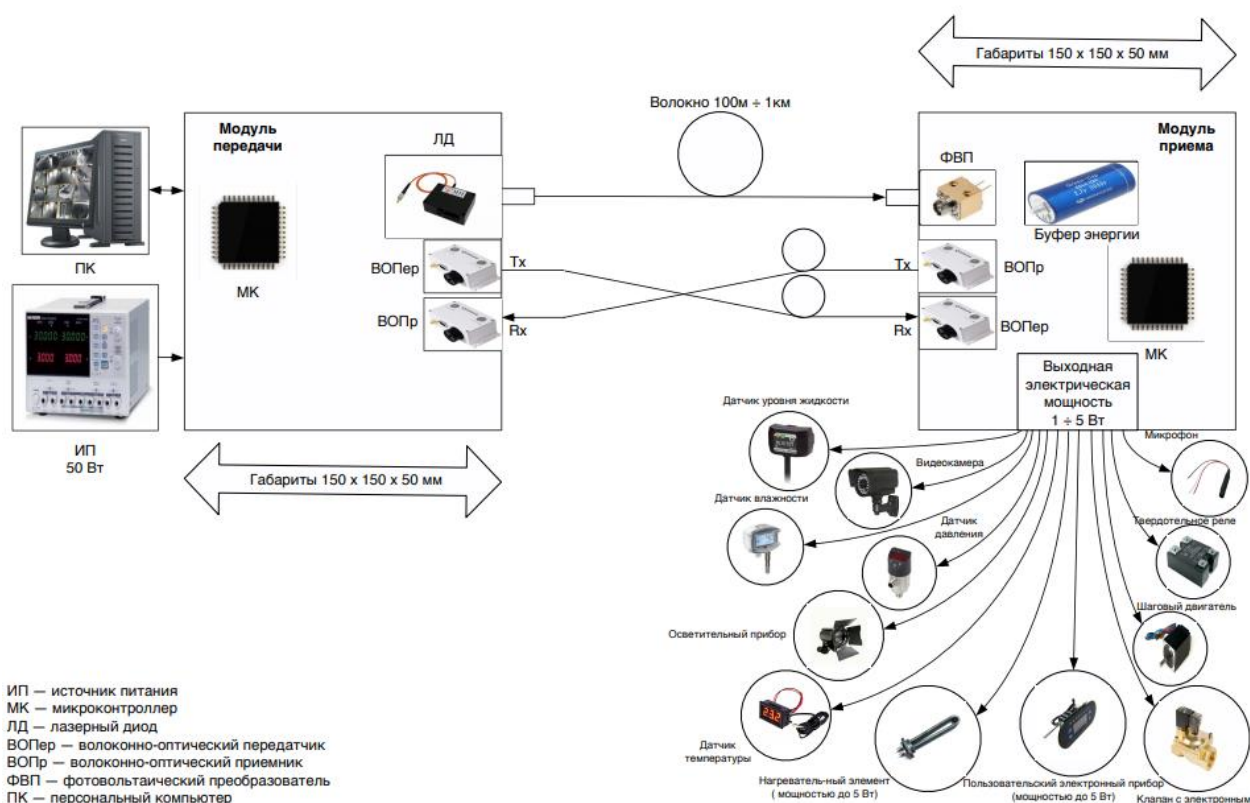


Рисунок 1.3 Полезная нагрузка, подключаемая к системе на базе технологии PoF

1.1.1. Энергоснабжение систем на пожаро- и взрывоопасном производстве

Технология PoF может быть успешно применена для питания сенсоров, средств мониторинга и контроля доступа во взрывоопасном и пожароопасном производстве. К взрывоопасному производству традиционно относят следующие промышленные направления: горнодобывающая промышленность, нефтегазовый сектор, опасные производства военного назначения и другие аналогичные промышленные объекты.

Системы, разработанные с применением технологии PoF, могут успешно применяться для контроля предельно допустимой концентрации взрывоопасных, легковоспламеняющихся и вредных веществ в воздухе, мониторинга параметров окружающей среды, таких как температура, влажность, освещенность, а также для контроля доступа с целью предотвращения проникновения посторонних лиц на критически важные объекты инфраструктуры промышленных предприятий [6,14].

На сегодняшний день широко распространены традиционные технологии энергоснабжения сенсорных сетей, телеметрических систем и других аналогичных приборов, основанные на питании устройств от проводной электрической сети. Такие технологии хорошо развиты и широко используются в непрерывном процессе добычи полезных ископаемых, нефти и газа, а также в производственных процессах, связанных с высоким риском возгорания или взрыва.

Однако, стоит отметить, что оптическая система является более современным, эффективным и безопасным методом передачи энергии для энергоснабжения подобных потребителей.

1.1.2. Энергоснабжение телекоммуникационных и IT систем

На сегодняшний день оптические линии связи успешно конкурируют с традиционными медными линиями и беспроводными технологиями. Основой систем передачи оптического излучения является оптическое волокно. Именно оптическое волокно позволяет многократно увеличить объемы и скорость передаваемой информации по сравнению с традиционной электрической кабельной связью. Технология PoF становится все более востребованной в сегменте передачи данных стандарта 5G.

Для внедрения технологии 5G нового поколения необходимо решить большой перечень сложных задач. Среди них особо стоит выделить следующие: высокая скорость передачи данных, низкая задержка и малое потребление энергии. Совершенствование сетей широкополосного доступа направлено на повышение их рентабельности и предусматривает интеграцию технологии передачи оптической мощности, а также пакетов данных в одном и том же канале одномодового волокна (SMF). Централизованные сети радиодоступа (C-RAN) на основе «аналоговой передачи радиочастотных сигналов по оптическому волокну» (Analog Radio over Fiber /ARoF) могут справиться с задачами, указанными выше.

Технология ARoF с архитектурой для сетей 5G обладает рядом важных преимуществ, таких как низкие потери при передаче и конструктивная простота, требуемая для реализации технологии удаленных антенных блоков, а также соответствие закладываемым требованиям по пропускной способности, необходимой для сетей 5G нового поколения. Благодаря этому направление развития технологии передачи данных имеет большие перспективы для воплощения в сфере мобильного волоконного соединения, где будет использовано мультиплексирование с пространственным разделением каналов (SDM) [21].

Развитие технологии 5G идет в направлении уменьшения размера ячеек удаленных антенных блоков, что позволяет обеспечить требуемые полосы пропускания радиочастотных сигналов. Однако, такой подход приводит к многократному увеличению необходимого количества используемых удаленных антенных блоков. При этом существует потенциальная возможность упростить конструкцию удаленных антенных блоков и снизить их энергопотребление до типовых значений порядка 100 мВт. Для оптического питания удаленных антенных блоков можно использовать решения на базе PoF [3, 22]. В данном случае, применение технологии PoF позволит существенно улучшить показатели энергоэффективности инфраструктуры сетей передачи данных нового поколения. Для энергоснабжения удаленных объектов по технологии PoF необходимо использовать оптоволоконные световоды. В настоящий момент в существующих сетях доступа повсеместно используют именно оптическое волокна для

организации инфраструктуры передачи данных. Таким образом, оптическое волокно проложено именно в тех местах, где оно требуется для организации сетей доступа «малых сот», а кроме того, оно максимально доступно для потенциальных клиентов. Также стоит отметить, что высоких показателей энергоэффективности можно добиться за счет использования специальных алгоритмов оптимизации энергопотребления в случае организации динамического энергоснабжения удаленных антенных блоков оптической энергией по оптоволоконному кабелю.

Трафик данных стандартов квадратурной амплитудной модуляции - 64QAM, 16QAM 256QAM и квадратурной фазовой модуляции - QPSK, с полосой пропускания 100 МГц возможно передавать одновременно с передачей оптической энергии большой мощности по технологии PoF. На сегодняшний день передача радиочастотных сигналов по оптическим световодам (технология RoF) через одномодовое волокно с одновременным введением сигнала PoF осуществима для оптических линий длиной от 100 м до 10 км и мощностью от 0,5 до 2 Вт. При этом величина вектора ошибки соответствует стандарту 5G NR и связана обратной зависимостью с величиной мощности передаваемой энергии. Величина вектора ошибки 4,3% может быть достигнута с помощью радиочастотного сигнала с частотой 20 ГГц при использовании квадратурной фазовой модуляции при одновременной передаче 870 мВт оптической мощности на фотоэлектрический элемент, установленный на конце одномодового волокна линии протяженностью 10 км [3].

1.1.3. Энергоснабжение прецизионных датчиков и систем на их основе

Прецизионные измерения требуют особо тщательной стыковки всех компонентов системы между собой с целью минимизации паразитных эффектов, таких как шумы (температурный, дробовый и др.) электрические и магнитные поля, возникающие как снаружи системы, так и порождаемые ее внутренними компонентами. Другими важными аспектами являются затухание полезного сигнала и его целостность при передаче между функциональными узлами. С этой точки зрения технология PoF может внести существенный положительный вклад

для достижения новой ступени в прецизионных измерениях. Примеры реализации прецизионных измерительных систем с применением технологии PoF описаны в источниках в достаточном количестве

Например, технология PoF может быть использована в схеме построения двухспектрального волоконно-оптического пирометра, имеющего две рабочие длины волны, в основу которого входят фотодетекторы на основе InGaAs и малошумящие трансимпедансные усилители с высоким коэффициентом усиления [23]. В данном случае нововведением, является особенная конструкция затвора. Суть её реализации заключается в использовании оптоволоконного переключателя опорной волны, питание которого осуществляется с применением технологии PoF. По сравнению с традиционным методом питания такой подход позволяет поместить переключатель максимально близко к объекту измерения. Рабочий диапазон температур, в котором проводились испытания пирометра с волоконно-оптическим датчиком, составлял 170-530°C. Целью использования данного пирометра является высокоскоростное прецизионное измерение температуры в процессах обработки материалов или при работе роторного двигателя [24], в тех случаях, когда необходимо определить температуру в конкретной области. Однако, в случае быстровращающегося резака или при наличии сильных электромагнитных помех, создаваемых работой двигателя, использование привычных пирометров, инфракрасных камер и электрических датчиков ограничивается множеством факторов [25, 26]. Такими факторами являются: сложность позиционирования аппаратуры, высокая чувствительность датчиков к электромагнитным помехам, а в случае применения традиционных пирометров накладываются ограничения, связанные с необходимостью компромисса между обеспечением подходящего пространственного разрешения и сбором достаточного количества излучаемого света.

Использование волоконно-оптического пирометра в перечисленных случаях позволяет непосредственно контролировать изменения температуры с высокой скоростью в точно заданных областях, диаметром не более 1 мм.

Также технология PoF имеет перспективные преимущества при проектировании прецизионной волоконно-оптической системы, регистрирующей сейсмическую активность в естественных акваториях [27]. Ключевыми элементами данной системы являются молекулярно-электронные датчики-приёмники упругих волн, волоконно-оптические интеррогаторы (системы сбора данных с датчиков), оптоэлектронные компоненты для организации энергоснабжения чувствительных элементов регистратора сейсмоактивности с помощью технологии PoF, оптоволоконные кабели для телеметрии и передачи оптической энергии большой мощности. Такие системы применяют, когда необходимо провести сейсмические исследования акватории мирового океана, в том числе перед началом разработки нефтегазовых месторождений [28]. При решении задач мониторинга со значительной протяжённостью донных кос и долговременной инсталляцией, возникает проблема с появлением электромагнитных помех, к ней добавляются и потери при передаче сигнала на большие расстояния, а также необходимость организации пожаробезопасных цепей энергоснабжения компонентов устройства. Следовательно, возникает задача по улучшению отношения сигнал/шум и обеспечению необходимой надёжности работы системы. Известные активно используемые традиционные методы позволяют добиться приемлемых результатов, однако при этом сильно усложняют итоговую схему, делая её более громоздкой и финансово затратной, а дополнительно введённые компоненты также подвергаются влиянию электромагнитных помех. Таким образом, энергоснабжение донной регистрирующей системы для морской сейсморазведки, реализованное на основе технологии PoF, наглядно показывает перспективы применения технологии для прецизионных систем

Применение PoF-технологии при построении измерительных систем высокого класса точности позволяет получить следующие преимущества:

- снижается общая сложность схемы, за счет уменьшения числа компонентов.

- обеспечивается высокоскоростное измерение с требуемой точностью определяемых физических величин, без искажений, связанных с наличием сильных электромагнитных помех.
- упрощается синхронизация между компонентами устройства, за счёт уменьшения их общего числа в сравнении с типовыми конструкциями измерительных приборов.
- обеспечивается более высокий класс пожаробезопасности проектируемого прибора за счёт отсутствия возможного электрического замыкания.
- уменьшается конечная стоимость системы за счёт минимизации числа используемых компонентов, по сравнению классическими подходами.

1.2. Современное состояние и мировые тенденции развития технологии Power-over-Fiber

Анализ современных публикаций позволяет выявить ключевые тенденции и достижения в области технологии Power-over-Fiber. Несмотря на то, что многие коммерческие производители не раскрывают полные технические характеристики своих систем, в открытой научной литературе представлены результаты исследований, демонстрирующие прогресс в увеличении передаваемой мощности, дальности и эффективности.

Одним из перспективных направлений является интеграция PoF в системы радиодоступа (C-RAN) для сетей 5G. В работах [3, 22] показана возможность одновременной передачи оптической энергии и широкополосного радиочастотного сигнала по одномодовому волокну. В [3] сообщается о передаче 870 мВт оптической мощности на расстояние 10 км с одновременной передачей сигнала 5G NR, что демонстрирует потенциал технологии для построения энергоэффективной телекоммуникационной инфраструктуры.

Значительные успехи достигнуты в области повышения мощности. В [39] описана система PoF, передающая свыше 100 Вт оптической мощности для

питания удаленных антенных блоков, что указывает на тенденцию к созданию высокомоощных систем. Для таких мощностей критически важным становится решение проблемы оптического повреждения волокна и нелинейных эффектов, которым в литературе уделяется серьезное внимание [40].

В компонентной базе также наблюдается развитие. Эффективность лазерных диодов продолжает увеличиваться, достигая 76% для длины волны 940 нм [30]. Параллельно ведутся исследования в области фотоэлектрических преобразователей, ориентированных на работу в различных спектральных диапазонах. В [48, 49, 63] представлены ФЭП на основе соединений III-V групп с рекордной эффективностью преобразования, превышающей 68% и достигающей 74,7% при криогенном охлаждении. Разрабатываются преобразователи для длин волн 1310 нм и 1550 нм, находящихся в окнах прозрачности кварцевого волокна [55-60], что актуально для увеличения дальности передачи.

Таким образом, мировой уровень развития технологии PoF характеризуется движением в сторону создания интегрированных систем «данные+энергия», увеличением передаваемой мощности, оптимизацией ключевых компонентов и освоением новых спектральных диапазонов. Проведенные в данной работе исследования, в частности, фокус на работе с динамической нагрузкой и оптимизации КПД в широком диапазоне сопротивлений, дополняют общую картину и решают задачи, которые в открытых источниках освещены недостаточно полно.

1.3. Основные функциональные узлы системы PoF и важные факторы, учитываемые при проектировании систем

1.3.1. Структурная схема системы PoF

Структурная схема системы представлена на рисунке 1.4. Основными элементами системы PoF являются:

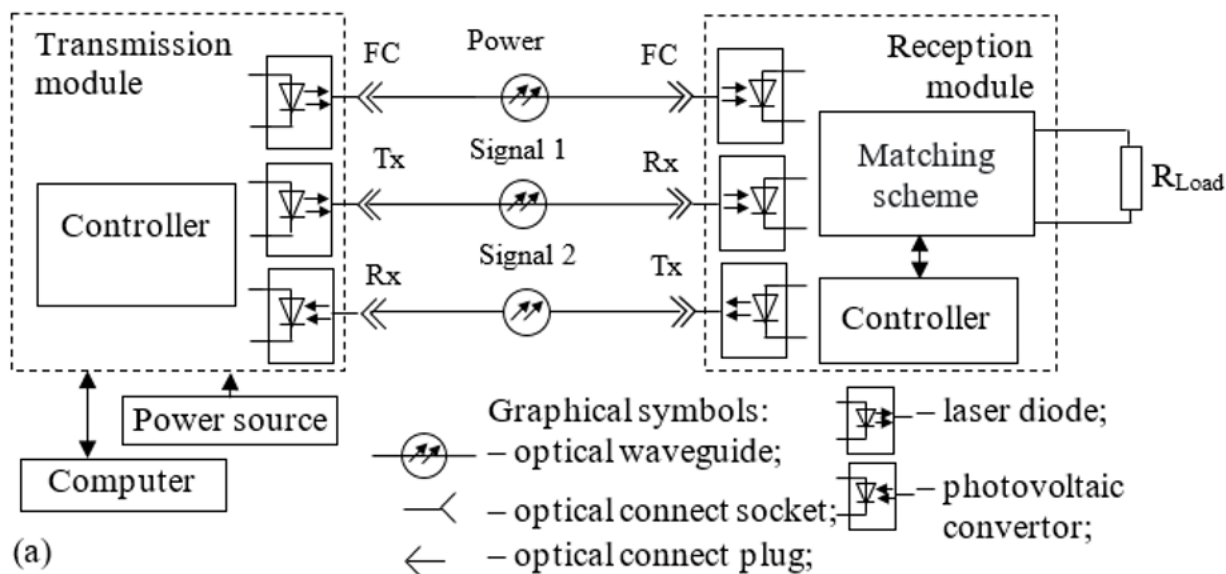


Рисунок 1.4. Структурная схема системы PoF

- источник оптического излучения - лазерный диодный модуль (ЛДМ);
- среда передачи оптического излучения- оптоволоконный кабель;
- преобразователь оптического излучения в электрическую энергию - модуль фотоэлектрического преобразования (ФЭП)
- сервисная электроника – распределенная электроника, находящаяся на стороне ЛДМ и ФЭП, реализующая функцию управления и контроля параметрами системы, а также взаимодействующая с внешним миром и полезной нагрузкой;
- система охлаждения – обеспечивающая требуемые температурные режимы для ЛДМ и ФЭП
 - полезная нагрузка – функциональные узлы и устройства (датчики, исполнительные устройства, системы сбора данных и др.), получающие энергию от ФЭП

1.3.2. Лазерный диодный модуль

Лазерный диодный модуль (ЛДМ) — это полупроводниковый лазер с электрической накачкой. Часть энергии, вырабатываемой при рекомбинации электронов и дырок в активной области, выделяется в виде фотонов. ЛДМ ведет себя подобно зеркалам с переменной отражательной способностью, когда его торцевые грани покрыты или не покрыты, создавая эффективный лазерный

резонатор. Обратная связь и максимальное усиление стимулируемого излучения являются преимуществами ЛДМ. Кроме того, лазерные диодные модули доступны с широким диапазоном длин волн, начиная от ультрафиолетового (УФ) и заканчивая инфракрасным (ИК) излучением. Лазерный диод генерирует поток когерентных и узконаправленных фотонов по сравнению с другими источниками света, такими как светодиоды, которые генерируют некогерентный свет, который обычно имеет большую расходимость.



Рисунок 1.5 Модуль ЛД, K976DA5RN-70.00W BWT Beijing, Китай, с оптоволоконным выходом, установленный в систему охлаждения на тепловых трубках

В системе PoF лазерный диод используется в качестве оптического передатчика мощности, который обычно управляется специальным контроллером и соединяется с оптическим волокном (см. рисунок 1.5). ЛДМ является эффективным источником фотонов высокой мощности при преобразовании электрической энергии в оптическую, обеспечивая эффективность оптического преобразования в диапазоне 30% до 70% [29]. В качестве примера, на рисунке 1.6 представлены зависимость КПД от выходной оптической мощности для двух образцов ЛДМ. На сегодняшний день разработаны лазерные диоды с эффективностью преобразования электрической энергии в оптическую до 76% для рабочей длины волны 940-нм [30]. При этом, ЛДМ позволяют конструировать

системы PoF с рабочим диапазоном длин волн от 780 до 1650 нм для подключения к оптическому волокну. Это является важным преимуществом по сравнению с любыми другими источниками света, например, с такими как светодиоды.

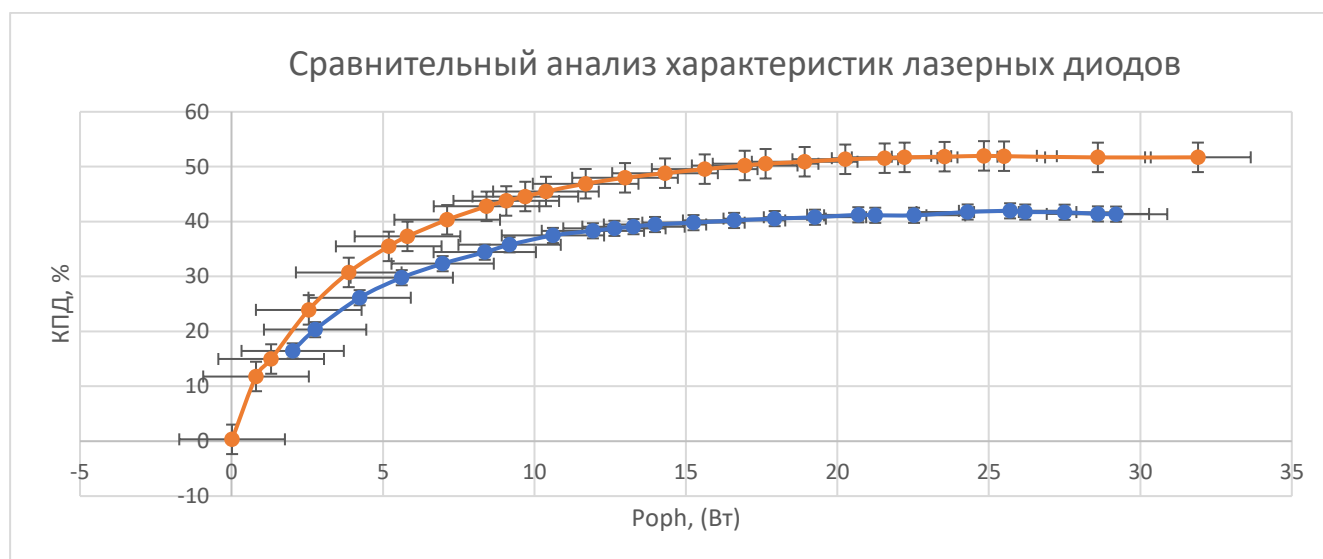


Рисунок 1.6 график зависимости КПД от выходной оптической мощности для лазерных диодов LDM11-975-70-CW (синяя линия) и K976DA5RN-70.00W (красная линия).

Выбор в пользу полупроводниковых лазерных диодов в качестве источника оптического излучения для систем PoF, в отличие от волоконных лазеров, обусловлен рядом принципиальных преимуществ. Волоконные лазеры, хотя и обеспечивают высокое качество пучка, обладают существенно более низким коэффициентом полезного действия преобразования электрической энергии в оптическую. Кроме того, они демонстрируют низкую стабильность выходной мощности и подвержены деградации оболочки при работе в режимах высокой мощности, что делает их применение в системах передачи энергии менее предпочтительным [31]. В то же время, полупроводниковые ЛДМ, как отмечено выше, достигают КПД до 76% [30], имеют широкий диапазон рабочих длин волн и хорошо отработанную технологию теплоотвода, что подтверждается их доминирующим положением на рынке подобных систем. Анализ рыночной ситуации показывает, что большинство производителей коммерческих систем PoF строят свои решения именно на базе лазерных диодов, в то время как предложения на основе волоконных лазеров практически отсутствуют, что также свидетельствует в пользу сделанного выбора.

Мощность ЛДМ зависит от выбранной длины волны лазера [32]. Требуется контролировать рабочую температуру лазера при работе на большой мощности. Для поддержания температуры на заданном уровне применяются специализированные системы охлаждения на элементах Пельтье. С их помощью можно поддерживать постоянную рабочую температуры лазерного диода на уровне 25°C, что является для него наиболее оптимальным режимом работы. Контроль температуры важен для поддержания срока службы ЛДМ, защищая его от термического старения [33]. Кроме того, в систему PoF включается пассивное охлаждение. Благодаря высокой теплопроводности тепловая энергия легко передается от медного радиатора к базовой конструкции системы охлаждения без использования охлаждающей жидкости. Пассивное охлаждение является менее дорогостоящим и сложным процессом, чем системы жидкостного охлаждения. В базовом варианте при проектировании системы целесообразней использовать пассивное охлаждение [34].

Рабочую длину волны ЛДМ определяет полупроводник, используемый в качестве активной среды. Для повышения эффективности систем PoF рабочая длина волны лазерного диода должна быть согласованна с другими компонентами системы [35]. Наиболее распространённая рабочая длина волны для систем PoF от 800 до 840 нм.

Рабочая длина волны прежде всего определяется протяженностью линии передачи системы PoF. Длина волны 800 -840 нм является подходящей для передачи энергии на короткие расстояния до нескольких сотен метров. В этом случае основной вклад в общую эффективность системы вносят параметры эффективности лазерного диода и фотоэлектрического преобразователя. Наибольшие параметры эффективности этих компонентов достигнуты на длине 800-840 нм [36] При этом для волоконно-оптических кабелей с расстоянием больше 1000 метров, где превалирующее влияние на общий КПД системы оказывают потери мощности в оптическом волокне, следует использовать длину волны 1500 нм, что соответствует третьему окну прозрачности и в целом обеспечить более высокую эффективность системы PoF [37].

Таким образом лазерный диодный модуль должен обладать следующими характеристиками:

- иметь высокую эффективность (КПД) преобразование;
- эффективная система охлаждения;
- высокое быстродействие
- согласованный интерфейс подключения к системе (параметры выходного ОК)
- согласованную длину волны для конкретного применения
- иметь высокую надежность и наработку на отказ.

1.3.3. Оптоволоконный кабель

Передача оптической мощности в системе PoF от лазерного диода (ЛД) к фотоэлектрическому преобразователю (ФЭП) осуществляется по оптическому волокну (ОВ). Эффективность этого процесса в первую очередь определяется энергетическими потерями при распространении излучения, основным параметром которых является затухание (поглощение и экстинкция). Хотя существует множество механизмов потерь в волноводе, для систем PoF ключевое значение имеют собственное поглощение материала световода, а также потери на соединениях и сварках.

Наименьшим затуханием обладают кварцевые волокна, используемые в телекоммуникациях. Как видно из рисунка 1.7 [38], спектральная зависимость затухания в кварце ограничена релеевским рассеянием в коротковолновой области и инфракрасным поглощением материала на длинных волнах. Минимальные значения затухания достигаются в области длин волн около 1550 нм, где на данный момент зарегистрированы значения порядка 0,16 дБ/км [38]. Исторически сложилось три так называемых «окна прозрачности» — диапазона с низким затуханием: около 850 нм, 1300–1310 нм и 1550 нм. Их формирование связано с наличием пиков поглощения ОН-групп в области 980, 1250 и 1390 нм.

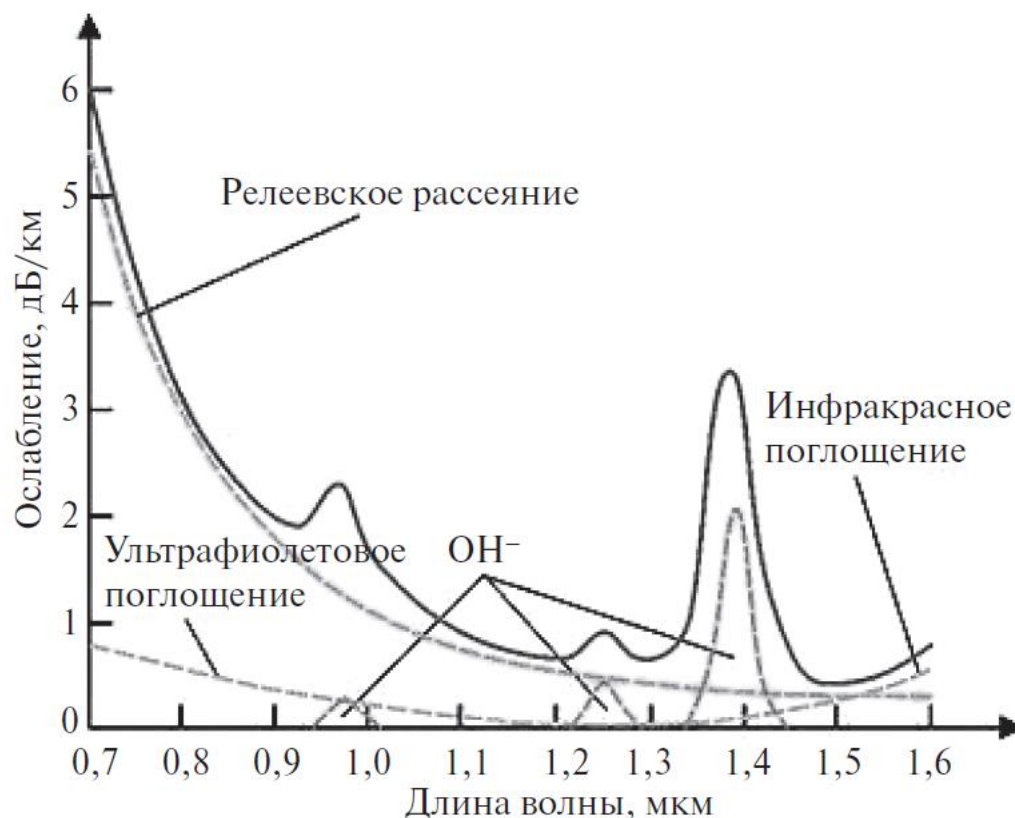


Рисунок 1.7 Поглощение в кварцевых волокнах

Конструкция оптического волокна оказывает решающее влияние на его эксплуатационные характеристики в системах PoF. Стандартные волокна имеют простую структуру из сердцевины и оболочки, однако при передаче высокой мощности их тип определяет возникновение нелинейных эффектов. На рисунке 1.8 представлены поперечные сечения перспективных для технологии PoF типов волокон [39].

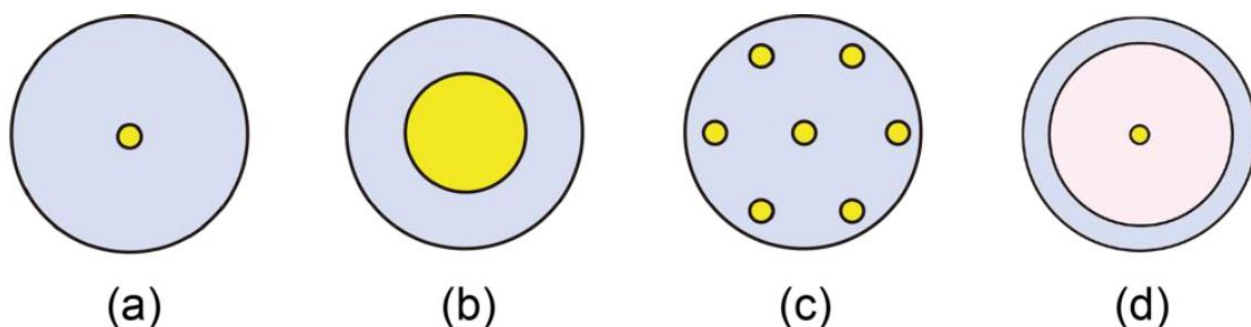


Рисунок 1.8. Поперечные сечения различных типов оптических волокон (а) одномодовое волокно (SMF), (б) многомодовое волокно (MMF), (в) волокно с несколькими сердцевинами (MCF) и (г) волокно с двойной оболочкой (DCF).

Одномодовые волокна (SMF) с диаметром сердцевины 8–10 мкм являются основой современной волоконно-оптической связи. Однородность модового поля обеспечивает широкополосную передачу сигнала, поскольку отсутствует межмодовая дисперсия. Однако для систем PoF малый диаметр сердцевины приводит к чрезвычайно высокой плотности мощности оптического излучения (ОИ). Это не только ограничивает максимальную передаваемую мощность из-за риска оптического повреждения [40], но и интенсифицирует нелинейные эффекты, такие как вынужденное комбинационное (SRS) и вынужденное бриллюэновское (SBS) рассеяния.

Многомодовые волокна (MMF), обладающие большим диаметром сердцевины, позволяют снизить плотность мощности и являются более предпочтительными для передачи высокой мощности. Недостатком MMF является наличие множества мод распространения, что приводит к межмодовой дисперсии и, как следствие, ограничению полосы пропускания.

Волокна с несколькими сердцевинами (MCF) содержат в общей оболочке несколько изолированных сердцевины (Рис. 1.8с). Такая структура позволяет пропорционально увеличить пропускную способность по данным. В контексте PoF MCF предоставляют возможность пространственного разделения каналов: по одним сердцевинам можно передавать информационные оптические сигналы, а по другим — мощное излучение для питания.

Волокна с двойной оболочкой (DCF) нашли широкое применение в волоконных усилителях и лазерах. Их конструкция предполагает наличие центральной сердцевины малого диаметра и окружающей ее внутренней оболочки с большей площадью. В системах PoF такая конфигурация позволяет реализовать схему разделения функций: широкополосные оптические сигналы передаются по центральной сердцевине, а мощное оптическое излучение для питания — по внутренней оболочке. Это обеспечивает одновременную широкополосную передачу данных и доставку высокой оптической мощности к удаленным потребителям.

Перспективным направлением являются **волокна с поллой сердцевиной (HCF)** [41,42], в которых излучение распространяется в воздушной полости. Это обеспечивает ряд преимуществ: увеличение скорости распространения примерно в 1,5 раза по сравнению с кварцевыми волокнами, что критично для систем связи 5G с ультранизкой задержкой; высокая устойчивость к входной мощности; сниженная подверженность хроматической дисперсии и нелинейным эффектам. Сложная микроструктурная оболочка HCF эффективно удерживает свет в поллой сердцевине [41,42]. Однако использование HCF для дальней передачи мощного лазерного излучения сопряжено с рядом нерешенных технологических проблем.

Для средних дистанций передачи (до 100 м) в технологии PoF также могут применяться микроструктурные оптические волокна с большой сердцевиной [43] и пластиковые оптические волокна со ступенчатым профилем показателя преломления [44].

С увеличением передаваемой мощности критическую важность приобретают **оптические соединения**. Высокая плотность мощности в SMF может быстро вывести из строя стандартные разъемы. Практическим решением данной проблемы является использование соединений с расширенным пучком на основе наконечников с волокнами с градиентным показателем преломления (диаметр сердцевины 25 или 50 мкм). Этот подход демонстрирует превосходные характеристики с точки зрения потерь ввода ОИ и уровня обратного отражения [45], позволяя передавать мощность до 16 Вт. Альтернативой является сварное соединение волокон [46], которое обеспечивает как более высокую передаваемую мощность, так и меньшие потери.

Таким образом, выбор оптоволоконного кабеля для системы PoF определяется комплексом требований. Конструкция кабеля должна обеспечивать минимальное затухание на рабочей длине волны и обладать высокой пропускной способностью по оптической мощности, минимизируя нелинейные эффекты. Механические требования включают стойкость к многократным изгибам без нарушения внутренней структуры и низкий погонный вес. Для специальных

применений (скрытые системы наблюдения, диагностика антенн) необходимы кабели в полностью диэлектрическом исполнении, не содержащие металлических элементов. Важным аспектом является эффективный теплоотвод, особенно в участке подключения к выходу ЛД. Для разворачиваемых систем должна быть предусмотрена надежная механизация многократного скручивания/раскручивания кабеля с катушки [47].

1.3.4. Модуль фотоэлектрического преобразователя

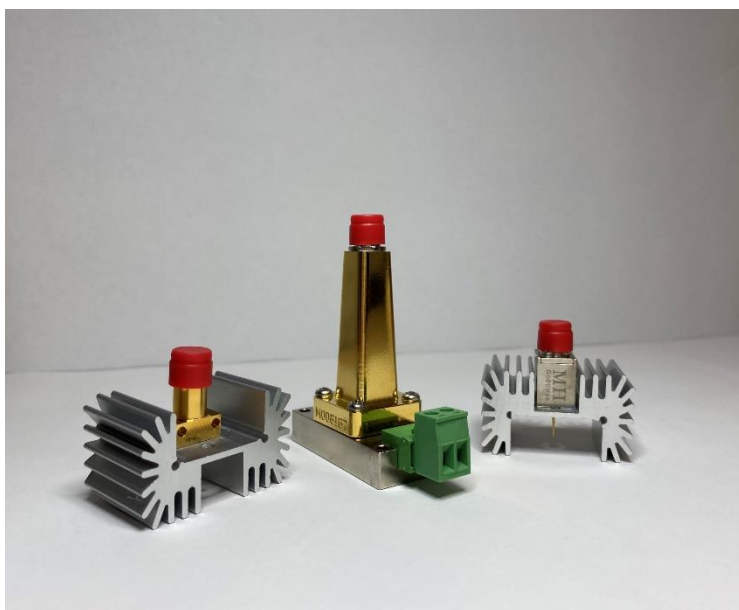


Рисунок 1.9 Фотоэлектрические преобразователи различных моделей: 1) YCH-L200 RoF до 2 Вт, 2) YCH-H6424 RoF до 50 Вт, 3) YCH-L240 RoF до 6 Вт,

Модуль фотоэлектрического преобразования ФЭП является ключевым компонентом технологии RoF. Он преобразовывает входную оптическую мощность в электрическую. Характеристики ФЭП существенно влияют на производительность оптических волоконно-оптических систем передачи энергии. На рисунке 1.9. приведены примеры модулей ФЭП с различной входной оптической мощностью. Для применения в системах RoF модули ФЭП должны иметь компактные размеры, соответствующие диаметру пучка, выходящего с торца оптического волокна. Кроме того, в отличие от традиционных солнечных элементов, модули ФЭП преобразуют концентрированную оптическую энергию от лазерного источника в электрическую; следовательно, они обладают характеристиками преобразования, специфичными для определенных длин волн,

которые в значительной степени зависят от материала. На рисунке 1.10 показан пример внешней квантовой эффективности различных ячеек ФЭП на основе полупроводниковых материалов III-V групп [48]. Полупроводниковые кристаллы для различных диапазонов длин волн могут быть изготовлены путем выбора подходящих материалов.

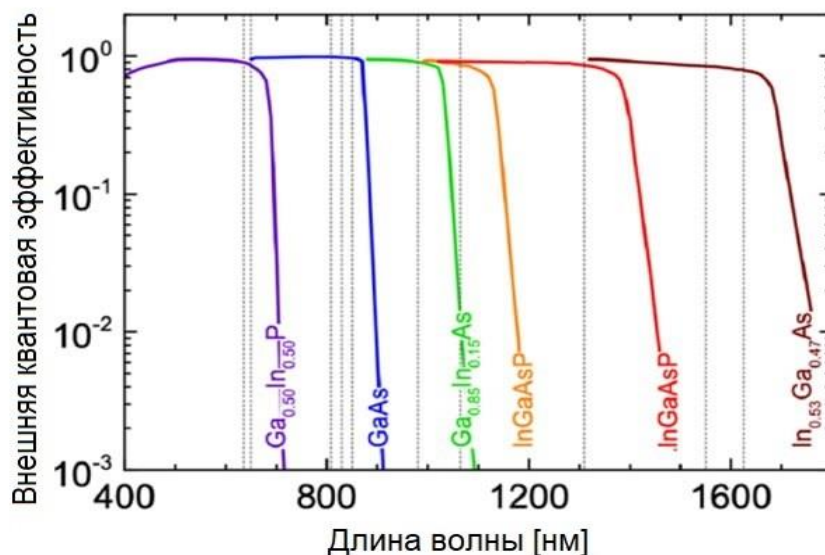


Рисунок 1.10 Примеры внешней квантовой эффективности полупроводниковых материалов из соединений III-V классов [48].

Большинство кристаллов ФЭП разработаны для работы в диапазоне длин волн 800-860 нм. Благодаря обилию высокоэффективных ЛД в этом диапазоне длин волн, он считается одним из наиболее перспективных диапазоном ОИ для технологии RoF. На текущий момент разработан ФЭП с эффективностью преобразования 74,7% при температуре 150°K и длине волны 808 нм, достигающий столь высоких значений эффективности за счет рециркуляции фотонов и оптического резонанса [63]. В диапазоне длин волн 910-980 нм также разработано большое количество ФЭП, поскольку в этом рабочем диапазоне изготовлены высокопроизводительные и недорогостоящие ЛД [50-54]. Совсем недавно были разработаны ФЭП, поддерживающие более длинные волны, такие как 1310 нм [55-58] и 1550 нм [52,59,60]. В частности, диапазон 1550 нм привлекает значительное внимание так как находится в третьем окне прозрачности оптических волокон, а также является более безопасным для глаз.

Помимо КПД ячейки на общую эффективность преобразования оптической энергии в электрическую в модуле ФЭП, оказывает влияние еще целый ряд важных факторов, которые необходимо учитывать при проектировании модулей ФЭП. Среди них наиболее значимыми являются следующие:

- Согласованность выходного профиля ОИ из оптического кабеля и формы ячейки ФЭП. Несогласованность формы приводит к появлению на поверхности кристалла участков с низкой интенсивностью. Это существенно влияет на общую эффективность преобразования кристалла [61].
- Равномерность (гомогенизированность) распределения интенсивности оптического излучения на поверхности полупроводникового кристалла [121].

Экстремальный пример неравномерности ОИ – падение лазерного излучения прямо на кристалл без отражения о боковые стенки корпуса модуля ФЭП. Это один из наиболее худших сценариев в работе кристалла фотоэлектрического преобразователя, при котором кроме максимальной неравномерности отсутствует согласование формы ОИ на выходе из волокна (форма эллипса) с формой кристалла (прямоугольник, квадрат). Нужно отметить, что кроме снижения эффективности преобразования неравномерность в виде гауссового излучения приводит к деградации кристалла, так как на центральную зону поступает удельная плотность мощности, многократно превышающая нормируемое значение в паспорте кристалла, что приводит к локальному перегреву и испарению легированных примесей в области прямого воздействия ОИ. В последствии к обеднению уровню легирования этой зоны и соответственно снижению интенсивности преобразования оптической энергии в электрическую [61]. Более подробно данный параметр будет рассмотрен в 4 главе.

- Затухание в конструкции гомогенизатора связанное с поглощением ОИ при многократном переотражении от боковых стенок корпуса модуля ФЭП. В зависимости от конструктивных параметров фотоэлектрического преобразователя данная величина может составлять 5-15% от мощности, поступающий на вход модуля. Данный параметр, также будет рассмотрен более подробно в 4 главе.

- Нагрев объема кристалла. Повышение температуры внутри кристалла происходит за счет плохого теплосъема и утилизации тепловой энергии, образующейся в результате преобразования оптического излучения в электрическую энергию. Повышение температуры на 10°C приводит к снижению эффективности преобразования около 4,2% от номинального [63]
- Неравномерность КПД на рабочем диапазоне входной оптической мощности. Такая неравномерность влияет на работу системы PoF в динамическом режиме. В этом случае входная оптическая мощность должна принять любое значение в рабочем диапазоне с учетом динамического изменения импеданса полезной нагрузки. Зависимость имеет экспоненциальную форму. Такой режим работы является наиболее частым для различных электронных функциональных узлов и их одновременной комбинации, меняющейся по случайному закону. Об этом более подробно будет сказано ниже.
- Отражение оптического излучения от поверхности ячейки ФЭП. При достижении поверхности кристалла в его объем попадает не вся оптическая энергия, часть лучей отражается от его поверхности и рассеивается на конструктивных деталях корпуса. Для минимизации этого фактора используются просветляющие поверхности, согласованные с рабочей длиной волны ОИ

Кроме перечисленных факторов, которые влияют на КПД модуля ФЭП при проектировании фотоэлектрических преобразователей необходимо учитывать массогабаритные параметры всего изделия. Также при разработке конструкции модуля ФЭП необходимо провести целый ряд исследований и моделирований, которые позволят существенно повысить значение его общей эффективности, надежности и массогабаритных параметров. Разработка такого модуля позволит получить систему PoF, которая будет востребована для внедрения в современные технологии, широко используемые промышленностью в настоящее время.

1.3.5. Важные факторы, учитываемые при проектировании систем PoF

Сервисная (управляющая) электроника – это функциональные узлы построенные из типовых компонентов электроники. Сервисная электроника входит

в состав модулей как на передающей, так и на приемной стороне системы PoF. Сервисная электроника должна поддерживать работу ЛД и ФЭП в рабочем диапазоне мощностей, позволять реализовать быстродействующие алгоритмы, предсказывающие поведение полезной нагрузки, подключенной к системе. При этом электроника должна потреблять минимальное количество энергии, и иметь высокий КПД для силовой части, что наиболее важно при реализации функционала управления мощностью ЛД и питания полезной нагрузки на стороне ФЭП.

Еще одним важным компонентом является система охлаждения. Повышение температуры негативно влияет на эффективность работы ключевых компонентов системы PoF таких как, ЛДМ и ФЭП. Конструкция лазерных диодов на сегодняшний день отработана достаточно хорошо. Конструкция мощных модулей ФЭП в настоящий момент находится на стадии формирования.

В модуле ФЭП, прежде всего, необходимо обеспечить максимальный теплоотвод от всех поверхностей кристалла. На стадии расчетов и моделирования требуется производить анализ теплоотведения энергии из объема кристалла. Анализ логично реализовать в форме диаграммы Сенки, которая позволит понять сколько процентов мощности в классической схеме отводится снизу кристалла, а сколько с его поверхностей: конвекция и излучение). При проведении оптимизации учитывать различные компоновки кристалла в модуле ФЭП и, соответственно, связанные с ними особенности теплообмена: нижняя поверхность кристалла – теплопроводность; верхняя и боковые поверхности - конвекция и теплопроводность, для случая погружения кристалла в светопрозрачный компаунд или диэлектрическую жидкость с высокой теплопроводностью и теплоемкостью (например МД-3Ф, МД-46, ПФДТ). В качестве возможного способа реализации такой концепции можно осуществить заливку кристалла со всех сторон светопрозрачным, для рабочего диапазона длин волн компаундом с теплопроводностью соизмеримой с теплопроводностью кристалла. Если есть возможность, то при выборе материала кристалла, предпочтение следует отдать материалу с наибольшей теплопроводностью. Также при проектировании модуля ФЭП необходимо проводить тепловое моделирование для расчета полной рабочей

площади всех поверхностей, которую должен иметь кристалл чтобы перегрев его объема не превышал заданное значение на $10-20^{\circ}\text{C}$ при подаче максимальной рабочей мощности оптического излучения на его вход. Для мульти кристалльных модулей ФЭП необходимо проводить моделирование с целью поиска оптимального расположения и определения минимального расстояния между кристаллами внутри корпуса ФЭП. Это позволит спроектировать кристалл с максимальной удельной плотностью выходной электрической мощности и максимальной эффективностью преобразования оптической энергии в электрическую.

Полезная нагрузка — это все возможные потребители, которые могут быть подключены на стороне размещения модуля ФЭП. Полезная нагрузка обладает комплексным импедансом, который быстро меняется во временной области в широком диапазоне значений, то есть она имеет динамический характер. Согласование полезной нагрузки с выходом системы RoF можно обеспечить за счет управления ЛД. Скорость изменения эквивалентного сопротивления нагрузки зависит от подключенных потребителей.

Согласование полезной нагрузки в системе RoF происходит в фотоэлектрическом преобразователе. Поэтому для изучения этого параметра было проведено отдельное исследование основных характеристик модуля ФЭП.

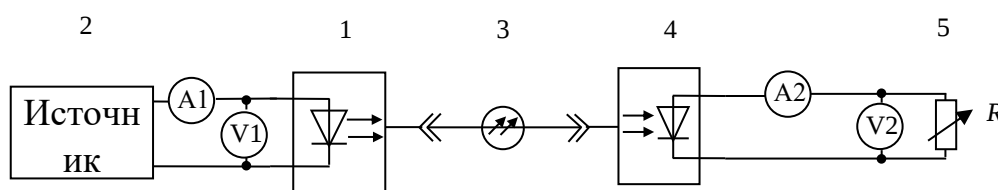


Рисунок 1.11. Блок-схема исследования нагрузочной характеристики фотоэлектрического преобразователя

Была исследована нагрузочная характеристика фотоэлектрического преобразователя YCH-H6424 [62] по схеме, приведённой на рисунке 1.11. Источником лазерного излучения служил регулируемый по мощности от 0,25 до 70 Вт на длине волны 980 нм твердотельный лазерный диод (K976DA5RN-70.00W [24] 1 с блоком питания (GPD 74303S) 2. Многомодовый оптический кабель 3, длиной 2 метра, служил для подачи оптической мощности на вход фотоэлектрического преобразователя (YCH-H6424) 4, нагрузкой которого служил магазин сопротивлений 5. Для контроля мощности на входе первичного и выходе вторичного преобразователей использовались амперметры и вольтметры A1 и V1 и A2 и V2, соответственно (осциллограф-мультиметр АКИП-4125/4А). Эксперимент проводился в лабораторных условиях при температуре окружающей среды 23°C и влажности порядка 50%. Для отведения избыточного тепла фотоэлектронный преобразователь был установлен на специально разработанную систему охлаждения на тепловых трубках как показано на рисунке 1.12.

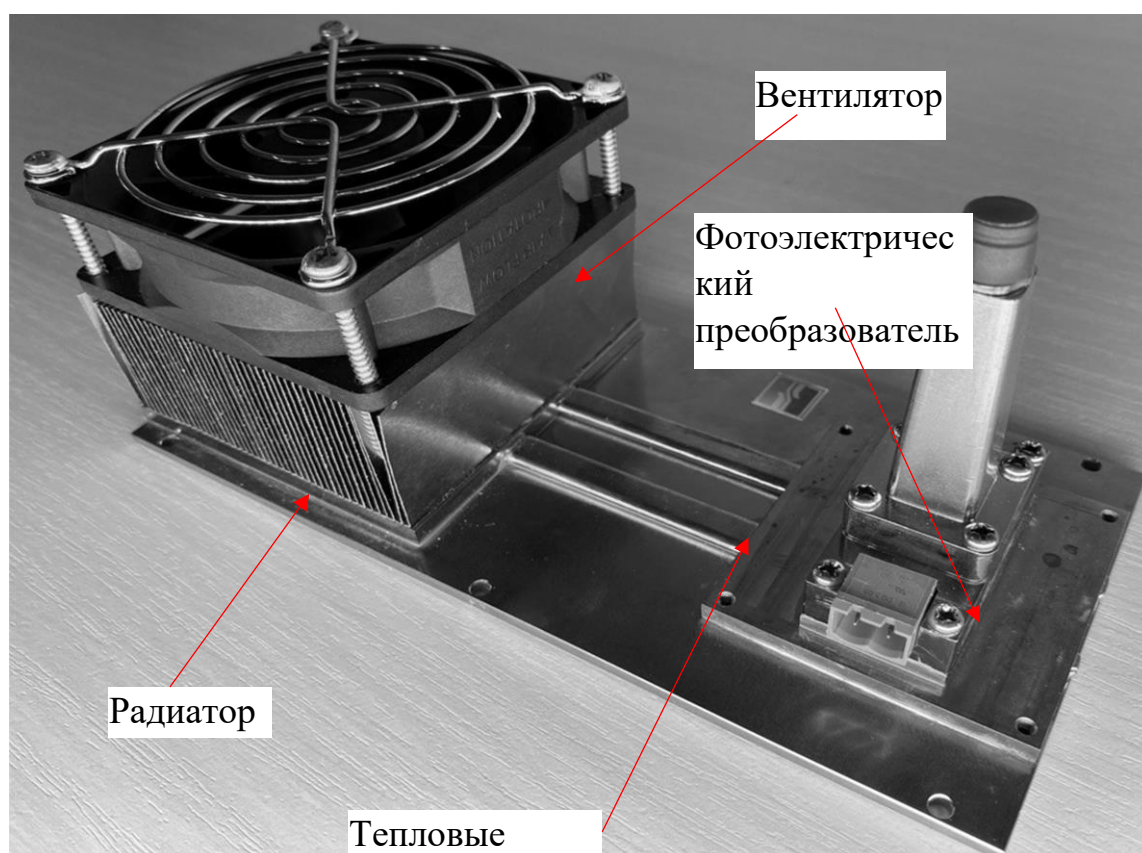


Рисунок 1.12. Фотография фотоэлектрического преобразователя с системой охлаждения

В результате получено двенадцать семейств нагрузочных характеристик – зависимости мощности P , выделяющейся в нагрузку для различных сопротивлений R , определенных при оптических мощностях лазерного излучения от 0,5 до 16 Вт. Пять из них для мощностей 0,5; 2,0; 5,0; 10,0 и 16 Вт приведены на рисунке 1.13. Остальные занимают промежуточные значения. Для удобства анализа графики на рисунке представлены в полулогарифмическом масштабе. Все нагрузочные характеристики имеют максимум электрической мощности, отдаваемой в нагрузку $P_{\max}$, при определенном, для каждой оптической мощности разном, оптимальном сопротивлении нагрузки $R_{\text{опт}}$.

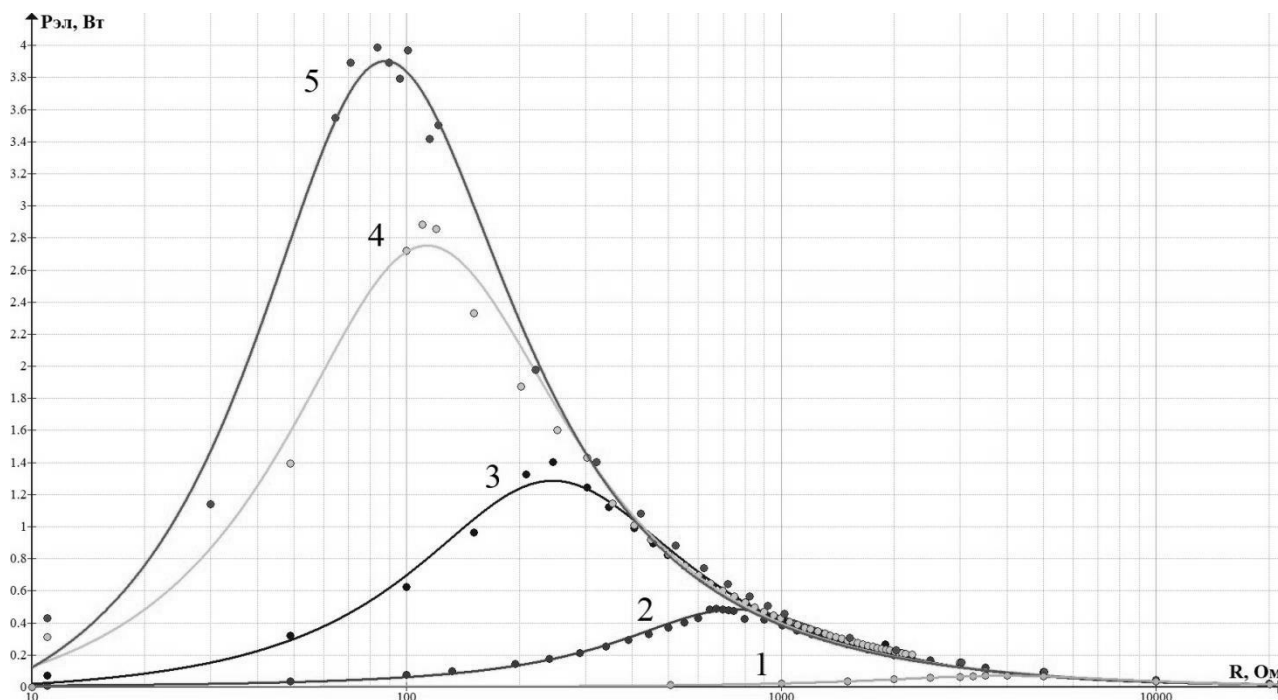


Рисунок 1.13. Семейство нагрузочных характеристик фотоэлектрического преобразователя YCH-N6424 при величине оптической мощности лазерного излучателя: 1 – 0,5 Вт; 2 – 2 Вт; 3 – 5 Вт; 4 – 10 Вт; 5 – 16 Вт

По данным рисунка 1.13 построены зависимости $R_{\text{опт}} = R_{\text{опт}}(P_{\text{max}})$ и коэффициента полезного действия $\eta = \eta(P_{\text{max}})$. Данные зависимости,

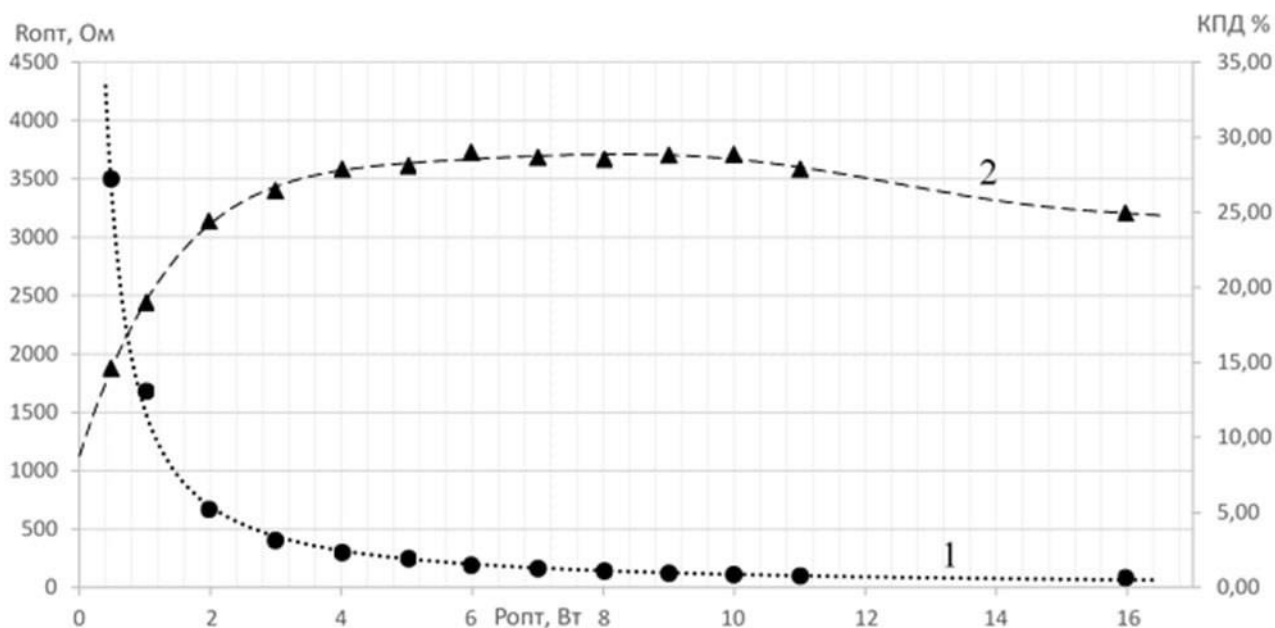


Рис.1.14. Зависимость от электрической мощности в нагрузке: оптимального сопротивления - 1; коэффициента полезного действия - 2.

представленные на рисунок 1.14, являются максимально достижимыми параметрами для исследуемой PoF-системы электроснабжения. Анализ зависимостей показывает, что можно выделить три области электрических мощностей: малых от 0,5 до 2 Вт, средних от 4 до 10 Вт и больших до 50 Вт, в опытах исследовано только ее начало до 16 Вт. В области малых мощностей происходит сильное изменение параметров: оптимального сопротивления нагрузки от 3500 до 600 Ом практически в 6 раз и коэффициента полезного действия в 2 раза. При средних мощностях $R_{\text{опт}}$ изменяется незначительно в пределах 90÷100 Ом, т.е. не более 10% и η остается практически постоянным и составляет примерно 28%. В ходе проведения экспериментов при мощностях оптического излучения 11 и 16 Вт было установлено, что несмотря на использование системы охлаждения, наблюдается разогрев корпуса фотоэлектрического преобразователя, что приводит к снижению коэффициента полезного действия до 25%, т.е. на 3%. Наблюдаемый эффект можно объяснить снижением напряжения холостого хода и внутреннего сопротивления преобразователя при повышении температуры. Дальнейшее увеличение мощности оптического излучения приведет к дальнейшему

повышению температуры фотоэлектрического преобразователя и соответственно уменьшению коэффициента полезного действия, что в целом согласуется с результатами [49,63]. По результатам исследований сделан вывод о необходимости разработки регулятора системы охлаждения, который при удаленном расположении модуля приема также потребует электропитания, что уменьшит общий КПД системы при работе с постоянной нагрузкой. Еще одна цепь регулировки потребуется при работе системы в режиме переменной нагрузки. Наиболее оптимальным выходом является разработка дополнительной системы регулировки мощности оптического излучения лазера, что позволит согласовать генерируемую вторичным преобразователем мощность с мощностью, потребляемой нагрузкой. Параметром оптимизации системы регулирования является поддержание оптической мощности, при которой система будет работать в области пика отдаваемой мощности в нагрузку. При этом будут минимизированы, как тепловые потери фотоэлектрического преобразователя, так и общие энергетические потери системы PoF в целом, даже при динамическом характере нагрузки.

В базовой реализации, большинство представленных на рынке систем PoF обеспечивают только статический режим работы, при котором изменение полезной нагрузки не отслеживается и не компенсируется компонентами системы с помощью обратной связи. Работая на динамическую нагрузку, такая система существенно теряет в своей и без того небольшой эффективности. Чем в более широком диапазоне эквивалентной нагрузки и скорости ее изменения работает такая система, тем ниже ее реальный КПД. Так как, чтобы обеспечить максимальное значение электрической мощности в такой системе, требуется выставлять рабочие параметры оптической мощности с большим запасом. При этом неиспользованная оптическая энергия превращается в тепловую и ухудшает текущие параметры эффективности модуля ФЭП

Руководствуясь графиком, представленным на рисунке 1.14, была собрана установка для исследования силовой части системы мониторинга (рисунок 1.15), в

которой в качестве нагрузки использованы датчик углекислого газа (CO_2) и IP-видеокамера.

Силовая часть системы мониторинга состоит из источника лазерного излучения (K976DA5RN-70.00W) 1 с блоком питания (GPD 74303S) 2, оптического кабеля 3,

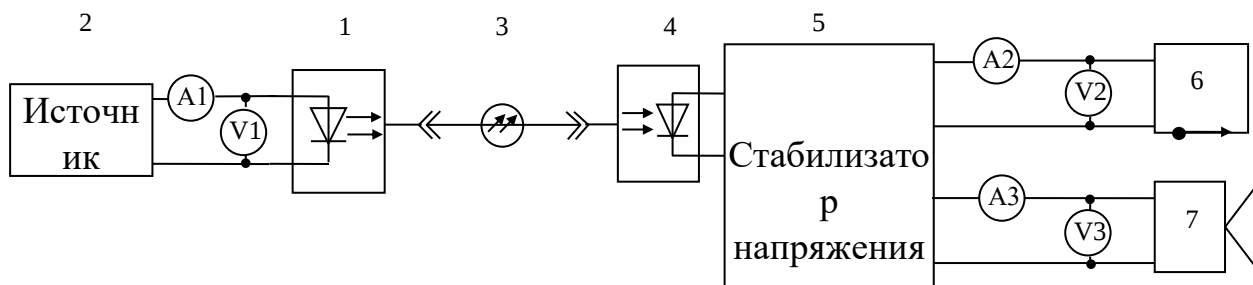


Рисунок 1.15. Блок-схема силовой части системы мониторинга с электроснабжением по оптическому волокну

фотоэлектрического преобразователя (YCH-H6424) 4, стабилизатора напряжения 5 и двух первичных датчиков концентрации углекислого газа (HT-2000) 6 и IP-видеокамеры (из состава лабораторного стенда LA5001) 7. Для управления работой IP-видеокамеры использован компьютер (на схеме не показан). Для мониторинга энергопотребления системой использованы: источника лазерного излучения – амперметр A1 и вольтметр V1 (встроены в источник питания); датчика уровня углекислого газа – амперметр A2 и вольтметр V2 (осциллограф-мультиметр АКИП-4125/4А) и IP-видеокамеры – амперметр A3 и вольтметр V3 (осциллограф-мультиметр АКИП-4125/4А), как показано на схеме.

Результаты мониторинга энергопотребления приведены на рисунке 1.16. По осям графика отложены: горизонтальной – текущее время эксперимента, по левой вертикальной – сила потребляемого электрического тока в амперах, правой – соответствующая ей оптическая мощность лазера в ваттах. Временные зависимости энергетических характеристик изображены цветами: тока источника лазерного излучения A1 – черным; тока датчика углекислого газа A2 – светло-серый; тока видеокамеры – серым; мощности лазерного излучения – темно-серый.

Эксперимент позволил определить, при каких мощностях лазерного излучения может работать каждое из подключённых к стабилизатору вторичного

напряжения выносных устройств: датчик концентрации углекислого газа, IP-видеокамера и оба устройства вместе.

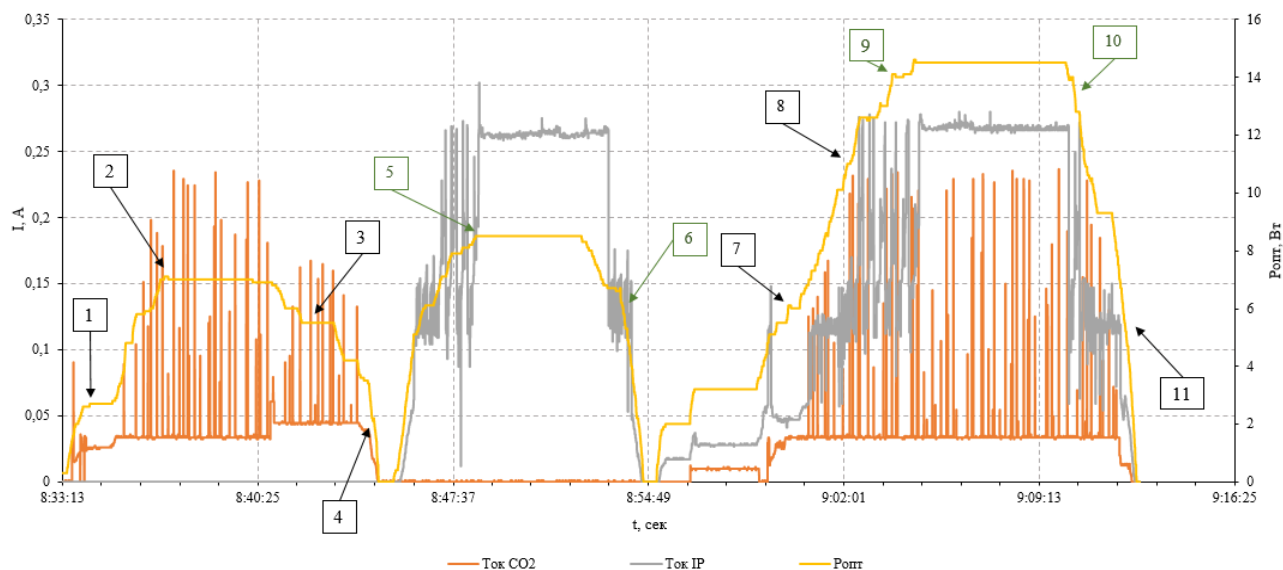


Рисунок 1.16. Работа системы PoF на динамическую нагрузку

Установлено восемь различных режимов энергопотребления системы мониторинга:

1. При оптической мощности, равной 2,7 Вт, устройство включается, но датчик CO₂ и IP-видеокамера не работают, что соответствует режиму «Холодный старт» системы в целом, включая модули передачи и приема;

2. При оптической мощности, равной 7 Вт, включается датчик CO₂ – режим «Горячий старт» модуля приема;

3. Отключение датчика CO₂ происходит при оптической мощности равной 1,6 Вт;

4. При оптической мощности, равной 8,5 Вт включается IP-видеокамера. Датчик CO₂ принудительно отключен;

5. Выключение IP-видеокамеры происходит при оптической мощности, равной 6,7 Вт;

6. Совместно включённые датчик CO₂ и IP-видеокамера требуют большей мощности и режим «Холодный старт» сдвигается до уровня оптической мощности, равной 6 Вт;

7. При оптической мощности равной 11 Вт в режиме «Горячий старт» включается датчик CO₂;

8. Дальнейшее увеличение оптической мощности до 14 Вт приводит к включению IP-камеры.

Следует отметить, что испытания прототипа системы мониторинга с энергоснабжением по оптическому волокну проводились в динамическом (импульсном) режиме изменения сопротивления нагрузки. Так, в датчике концентрации углекислого газа чувствительный элемент NDIR-типа (не диспергирующий инфракрасный анализатор), потребляющий больше всего энергии в целях ее экономии и продления ресурса работы, включался периодически в соответствии со встроенным алгоритмом управления в режиме работы от аккумуляторных батарей. Указанный режим работы приводил к появлению кратковременных пульсаций потребляемого тока: светло-серые и черные всплески в режимах работы – горячий и холодный старт соответственно.

При поступлении на вход вторичного преобразователя прямоугольного импульса оптической мощности лазерного излучения, изменяющегося от нуля до 6.7 Вт, мощность источника вторичного электропитания изменяется не мгновенно, и наблюдаются переходные процессы на графике потребляемого IP-камерой тока. На переднем фронте наблюдались кратковременные пульсации тока, выделенные на рисунке серым цветом. Пульсации обусловлены тем, что при запуске в начальном интервале времени энергии для перехода камеры в рабочий режим не хватало, камера выключалась и, в соответствии с алгоритмом работы, проводила повторный запуск через определённый промежуток времени. При возрастании энергии в цепи вторичного электропитания до нужного уровня IP-видеокамера переходила в рабочий режим и пульсации тока прекращались. При переходе IP-видеокамеры в рабочий режим наблюдается максимальный выброс тока, который свидетельствует о наличии емкостной составляющей нагрузки, а также алгоритмом работы, реализованном в данном устройстве. На заднем фронте импульса

оптической мощности также наблюдались пульсации силы тока при уменьшении оптической мощности источника лазерного излучения.

Таким образом, установлено, что пиковая оптическая мощность, необходимая для электропитания по отдельности: датчика CO₂ равна 7 Вт, а IP-камеры – 8,5 Вт. Для их совместной работы необходима мощность 14 Вт. Следует отметить, что суммарная пиковая потребляемая мощность двумя устройствами больше и составляет 15,5 Вт. Указанный эффект связан с тем, что пиковые мощности, потребляемые приборами, приходятся на различные промежутки времени. В течение всего времени эксперимента превышения совместной потребляемой мощности, равной 14 Вт, зафиксировано не было. Из этого следует, что для экономии энергоресурсов лучше подключить два прибора одновременно к одному источнику лазерного излучения, чем к двум разным. Однако, у такого подключения имеются свои недостатки: большая выделяемая тепловая мощность источника лазерного излучения и фотопреобразователя, что требует их принудительного охлаждения. При увеличении передаваемой оптической мощности приходится увеличивать диаметр сердцевины оптического волокна. При различных рабочих напряжениях датчиков физических величин и IP-видеокамеры требуется дополнительное преобразование выходного напряжения фотоэлектрического преобразователя. При использовании независимых каналов передачи оптической энергии можно подобрать фотоэлектрические преобразователи с необходимыми выходными напряжениями. Таким образом, выбор в качестве оптимальной одноканальной или многоканальной схемы энергоснабжения зависит от количества первичных датчиков и их энергетических характеристик.

По результатам опытов можно сделать вывод, что системы энергоснабжения по технологии PoF требуют введения обратной связи для регулировки мощности оптического излучения лазера в зависимости от уровня энергопотребления нагрузки. Это критически важно в случае комплексного сопротивления нагрузки, динамически изменяющегося с течением времени. Нехватка передаваемой энергии не позволяет вывести потребители энергии в рабочий режим, а при превышении необходимого уровня энергии происходит превращение ее излишков в тепловую

энергию, перегревающую фотоэлектронный преобразователь. Перегрев приводит не только к снижению коэффициента полезного действия всей системы, но и к деградации характеристик фотоэлектрического преобразователя. Создание системы регулировки требует дополнительных исследований для разработки специального алгоритма управления, адаптированного к работе с системами мониторинга удаленных приборов с электропитанием по оптическому волокну.

При передаваемых мощностях порядка десятков ватт систему целесообразно дополнить датчиками температуры корпусов лазерного модуля и фотоэлектронного преобразователя и двумя вентиляторами для их охлаждения. Требуется экспериментально определить допустимое превышение регистрируемых температур относительно температуры окружающей среды с учетом диапазона ее колебаний. Необходимо разработать алгоритм оптимальной работы системы обратной связи. Обеспечить совместимость каналов обмена информацией модулей передачи и приема для удаленного контроля состояния датчиков и регулирования энергетических характеристик системы электропитания по оптическому волокну. Параметром оптимизации системы является работа в области, близкой к оптимальному сопротивлению нагрузки.

Чтобы компенсировать влияние динамической полезной нагрузки на эффективность работы системы PoF, она должна иметь динамическую обратную связь, которая позволит менять значение выходной оптической мощности с ЛД, в соответствии с текущей потребностью нагрузки. Также стоит отметить, что максимальный равномерный КПД во всем рабочем диапазоне входных мощностей достигается за счет использования ШИМ модуляции ОИ на входе в модуль ФЭП. Амплитуда входной мощности должна соответствовать уровню наивысшего КПД для ЛД и ФЭП на графиках экспоненциальной зависимости эффективности от рабочей мощности и задаваться параметрами скважности 0-100% пропорционально требуемой выходной мощности. Рабочую частоту ШИМ требуется подбирать с учетом работы в импульсном режиме ЛД и ФЭП. Рабочий диапазон должен лежать в интервале $100 \div 10000$ Гц. Для реализации такого подхода

необходимо разрабатывать специальные алгоритмы обратной связи, которые смогут управлять компонентами системы в режиме реального времени.

1.4. Создание прототипа системы передачи энергии для электропитания маломощных датчиков на базе коммерчески доступной платформы

Наиболее эффективно использование систем на базе технологии RoF при работе с современными миниатюрными датчиками с незначительным (единицы-десятки ватт) потреблением энергии. Дополнительным преимуществом является возможность обеспечивать двухсторонний обмен информацией между центральным процессором и удаленными терминалами по оптическому волокну, проложенному в составе того же оптического кабеля [19,20], или даже по одному оптическому волокну электроснабжения и обмена информацией. Ниже представлены результаты исследования прототипа подобной системы.

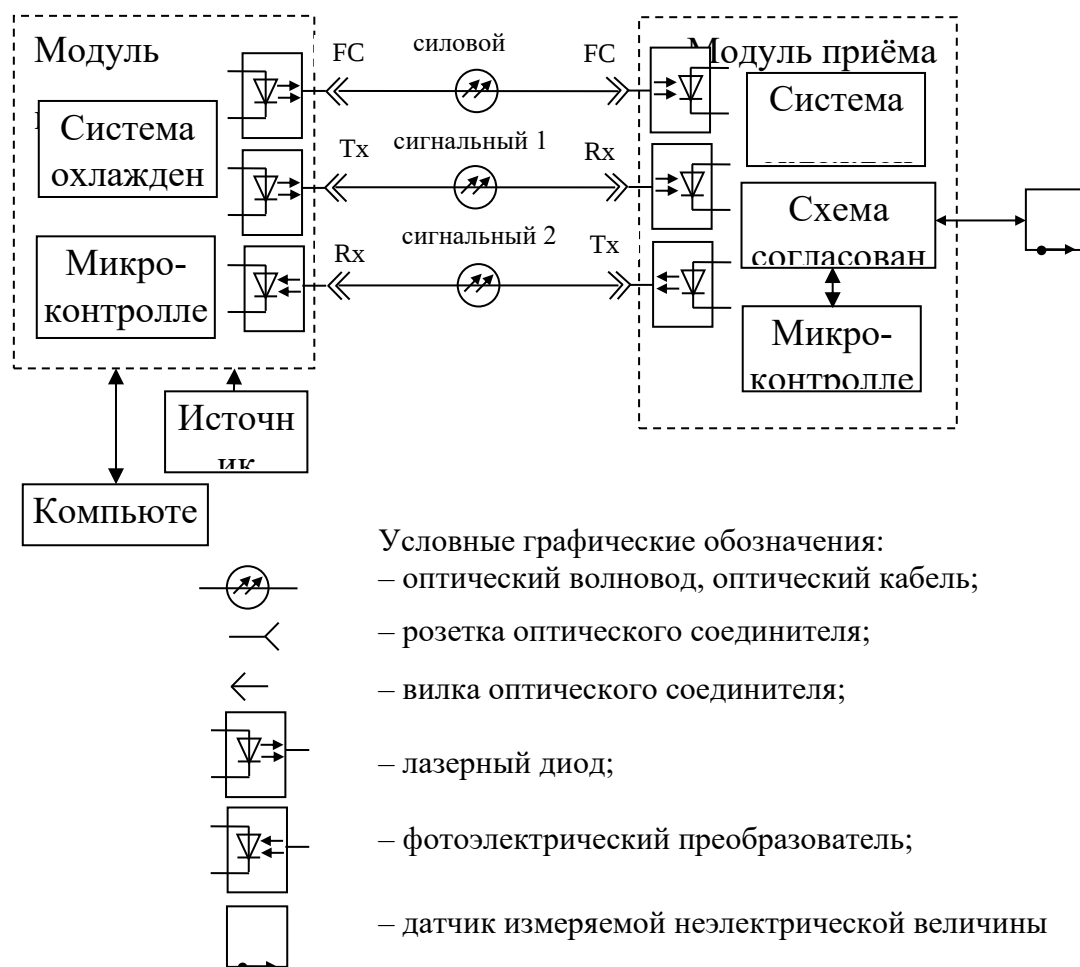


Рисунок 1.17. Блок-схема прототипа системы мониторинга датчика угарного газа малой мощности с электроснабжением по оптическому волокну

При разработке системы, в качестве датчика выбран датчик угарного газа. Критерием его выбора служила небольшая потребляемая мощность (менее 200 мВт). PoF-система для сбора информации (мониторинга) датчика угарного газа с энергоснабжением по оптическому волокну имеет модульную конструкцию, состоящую из четырёх частей: модуля передачи, соединительного оптического кабеля, модуля приёма и датчика угарного газа, как показано на рисунке 1.17.

Модуль передачи выполняет несколько функций: преобразует электрическую энергию источника питания в оптическую, обеспечивает двусторонний обмен информацией с модулем приёма и имеет связь с управляющим компьютером, который контролирует работу всей системы мониторинга и выводит собранную модулем приёма информацию в удобном для оператора виде. Он смонтирован на плате и включает в себя: лазерный диод с системой охлаждения (элемент Пельтье с вентилятором), два оптических трансивера для обмена информацией с приёмным модулем, микроконтроллер МК марки STM32F407, а также электрические и оптические коннекторы. К электрическим коннекторам подключаются: внешний источник питания электрической мощностью до 50 Вт и персональный компьютер контроля состояния системы. К оптическим коннекторам подключаются многомодовые оптические волокна с германо-силикатными сердцевинами диаметром 62,5 мкм: FC – «силовое» оптическое волокно энергоснабжения; ST – два сигнальных оптических волокна, один канал (Tx) – для передачи, другой (Rx) – для приёма информации. Для исключения влияния потерь энергии при передаче длина каждого оптического волокна составляла два метра. В реальных системах длина оптических кабелей может быть увеличена до 20 км, что вносит дополнительные потери 2,5-3 дБ/км [64].

Использование систем охлаждения связано с необходимостью отвода тепла от наиболее горячих элементов системы энергоснабжения – лазерного диода и фотоэлектрического преобразователя для обеспечения рекомендованных производителем температурных режимов и предотвращения деградации основных характеристик. Наиболее энергоёмким является первичный преобразователь энергии – полупроводниковый лазерный диод, система охлаждения которого

представляет собой элемент Пельтье с радиатором и вентилятором. Система охлаждения потребляет дополнительную энергию от сети, что снижает общий КПД системы электропитания. Следует отметить, что это является не критичным вследствие того, что энергия потребляется от первичной силовой сети и не оказывает влияние на КПД системы вторичного электропитания. Отвод тепла от вторичного преобразователя происходит пассивно, путем рассеяния энергии в окружающую среду. Для более эффективного теплоотвода использован радиатор с зачерненной поверхностью большой площади охлаждения.

Энергопотребление модуля передачи зависит от режима его работы. Во всех режимах для управления электроникой (микропроцессором и др.) используется напряжение питания 3,3 В при токе 0,064 А, таким образом потребляемая мощность составляет $P_{\text{упр}}=0,21$ Вт. Для питания лазерного диода применяется напряжение 5 В при токе 1,64 А, что соответствует электрической мощности $P_{\text{лаз.эл}}=8,2$ Вт. При этом мощность оптического излучения составляет $P_{\text{лаз.опт}}=2,5$ Вт. Таким образом коэффициент полезного действия преобразования электрической мощности в оптическую платформы PoFs

$$\eta_{\text{оэ}} = \frac{P_{\text{лаз.опт}}}{P_{\text{лаз.эл}}} \cdot 100\% = 30,5\%. \quad (1)$$

Потребление элемента Пельтье системы охлаждения измерялось в разных режимах работы: установившийся режим работы при достижении температуры стабилизации ЛДМ (далее уст.) и максимальный (далее макс.). Потребление при питании от источника 5 В составляет 0,66 А и 1,26 А, соответственно, что соответствует мощности $P_{\text{пел}}$ 3,3 Вт и 6,3 Вт. Общая потребляемая мощность модуля преобразования от источника питания без учета энергии, необходимой для работы самого источника питания и компьютера управления, составляет

$$P_{\text{перв}} = P_{\text{упр}} + P_{\text{пел}} + P_{\text{лаз.эл}} = 11,7 \div 14,7 \text{ Вт}. \quad (2)$$

В качестве платформы для создания прототипа системы мониторинга датчика угарного газа использовано готовое коммерческое решение фирмы МН GoPower – «платформа PoFs» малой мощности. Фотография изготовленного прототипа

представлена на рисунке 1.18. Основные характеристики платформы PoFs приведены в спецификации [65], из которых существенно влияющие на работу устройства указаны ниже по тексту.

Используемая в экспериментах оптическая мощность лазерного излучения составляла 2,5 Вт на длине волны 980 нм. Перенос энергии по оптическому волокну происходил на гибридной волне TE_{11} (фундаментальная мода) [66].

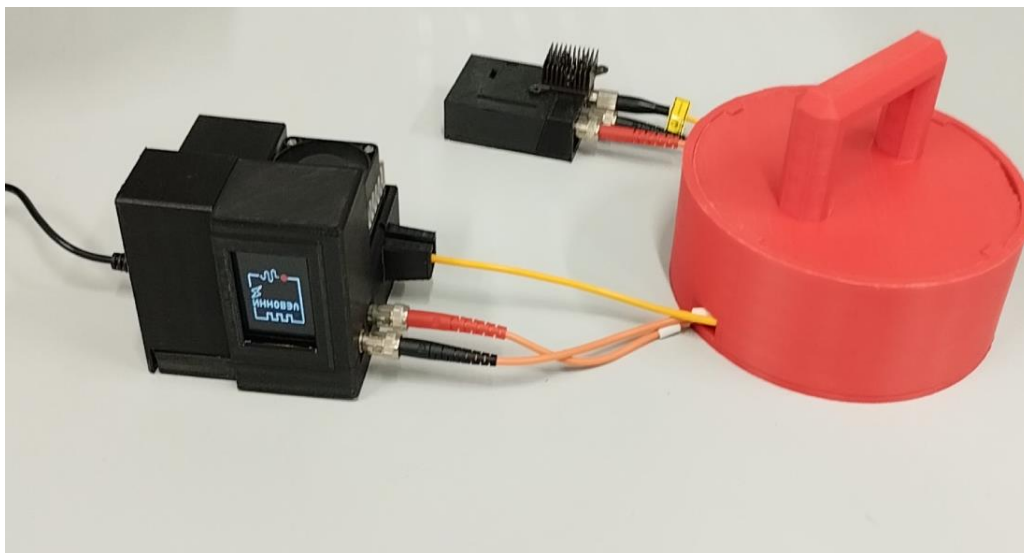


Рисунок 1.18 Внешний вид системы на базе коммерческой платформы

Модуль приёма имеет силовой фотоэлектронный преобразователь марки YCH-L250. В оригинальной конструкции охлаждение происходило путем пассивного рассеяния избыточного тепла в окружающую среду, что при работе в режиме максимальной отдаваемой электрической мощности накладывало ограничения на верхний температурный предел. Для улучшения теплового режима работы преобразователя система охлаждения была дополнена пассивным радиатором. Для обмена информацией с модулем передачи установлены два оптических трансивера, один – приёмный, второй – передающий. Микроконтроллер STM32F407 управляет работой электроники модуля приема, а также системой согласования с датчиком угарного газа. На плате модуля приема также размещены оптические и электрические коннекторы. В ходе проведения эксперимента установлено, что максимальная электрическая мощность вторичного источника электропитания, которым является фотоэлектрический преобразователь $P_{\text{втор}}$, составляет 271 мВт при напряжении 5,9 В и силе тока 46 мА. Из них мощность

$P_{\text{потр}}$ доступная потребителю составляет примерно 200 мВт при напряжении 5 В и токе до 40 мА. Остальная энергия расходуется на поддержание работы входящих в модуль приема схемы согласования и микроконтроллера (рисунок 1.17).

Таким образом КПД источника вторичного электропитания платформы PoFs

$$\eta_{\text{ист}} = \frac{P_{\text{втор}}}{P_{\text{перв}}} \cdot 100\% = 1,8\% (\text{макс.}); 2,3\% (\text{уст.}), (3)$$

а КПД потребителя

$$\eta_{\text{потр}} = \frac{P_{\text{потр}}}{P_{\text{перв}}} \cdot 100\% = 1,4\% (\text{макс.}); 1,7\% (\text{уст.}). (4)$$

Под $P_{\text{перв}}$ подразумевается электрическая энергия, потребляемая лазерным диодом, его системой охлаждения и электронными компонентами системы. Следует отметить, что основные потери энергии происходят в системе охлаждения лазерного диода, и общая потребляемая от первичной силовой сети энергии с учетом работы источника электропитания модуля передачи не превышает 50 Вт, а с учетом работы компьютера не более 100 Вт. Таким образом, общая мощность, потребляемая системой, является приемлемой, а мощности вторичного электропитания оказывается достаточно для обеспечения работы одного удаленного датчика угарного газа.

Выбор датчика угарного газа обусловлен требованиями к его чувствительности, электрическими характеристиками модуля приема и коммерческими предложениями на рынке. В таблице 1 приведены основные характеристики доступных датчиков газов.

Таблица 1 Основные характеристики датчиков угарного газа (взяты из их спецификации)

Наименование параметра	Требования к датчику	MC101	MC115	GM-702B	TGS244-2	GST-4S-CO
Диапазон измерения	-	-	-	5-5000	30-1000	0-2000
Напряжение цепи	-	-	-	≤24DC	5.0 V ± 0.2 V DC	
Рабочее напряжение, В	5	3.0±0.1	3.0±0.1	2.5 ± 0.1AC/DC (выс.темп.)	4.8 ± 0.2 DC	1.3 (MAX)

				$0.5 \pm 0.1 \text{ AC/DC}$ (низ.темп.)		
Потребляемая мощность, мВт	200	330	315	≤ 50	974	1300 (MAX)
Потребляемый ток, мА	40	110 ± 10	105 ± 10	20 (выс. темп.) 100 (низ. темп.)	203	<1000 (MAX)
Цена, руб.	-	460	1370	720	-	-
Газы	Угарный газ	Угарный газ и алканы.	Угарный газ и алканы.	Угарный газ	Угарный газ	Угарный газ

По результатам анализа выбран датчик угарного газа GM-702B удовлетворяющий поставленным требованиям.

Для проверки работоспособности системы был проведен оценочный эксперимент, схема которого представлена на рисунке 1.19. В контейнер с внутренними размерами $270 \times 195 \times 160$ мм, помещалось два датчика концентрации монооксида углерода (угарного газа) GM-702B. Эксплуатация указанного типа датчиков имеет свои особенности: первичной измеряемой физической величиной является концентрация угарного газа, которая изменяет химический баланс

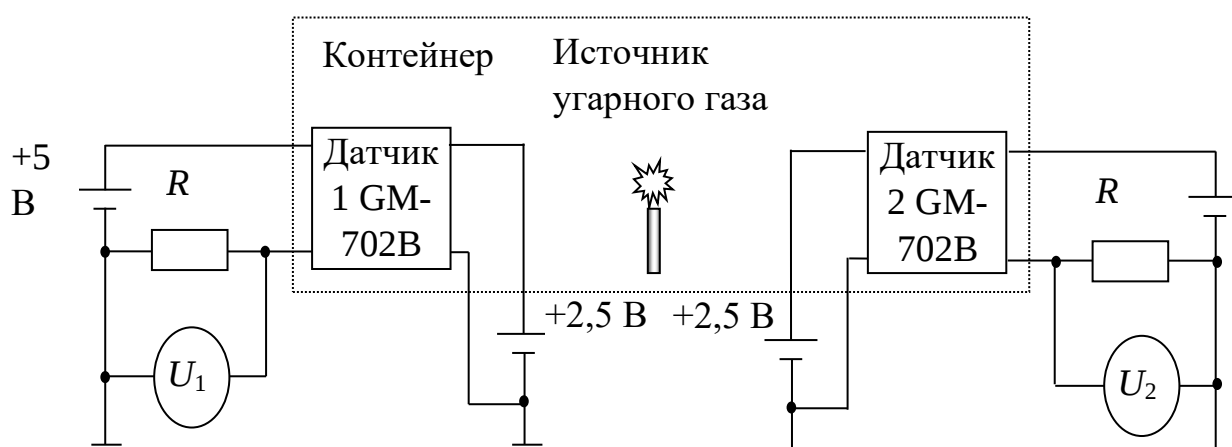


Рисунок 1.19. Схема эксперимента с датчиками угарного газа

чувствительного элемента и, как следствие, его электрическое сопротивление. Для

работы датчика необходимо подать два напряжения питания: низковольтное $2,5 \pm 0,1$ В и высоковольтное $5,0 \pm 0,1$ В. Как показано на рисунок 1.13 Выходной сигнал – напряжение U_1 и U_2 снимается с резистора $R=5$ кОм. Производитель обращает особое внимание на сложную нелинейную зависимость измеряемого напряжения от концентрации угарного газа, которая зависит от многих факторов:

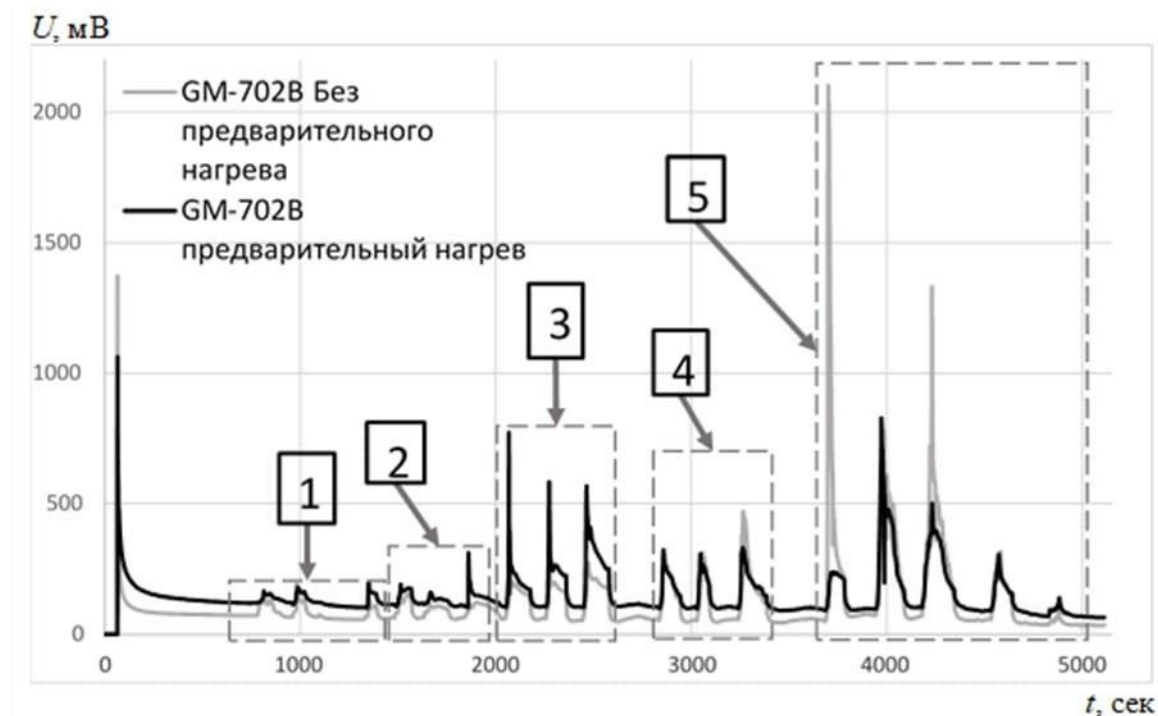


Рисунок 1.20 Результаты эксперимента с датчиками угарного газа. Цифрами обозначены результаты номеров опытов, условия проведения которых приведены в таблице 2

концентрации угарного и других (метана, водорода) газов, температуры, времени хранения без напряжений питания, а также память о предыдущем состоянии и небольшую временную нестабильность [67]. Таким образом измерение абсолютного значения концентрации угарного газа представляет сложную задачу и требует дополнительной калибровки проходной характеристики датчика. Производитель рекомендует перед началом работы выдержать датчик под напряжением в течение не менее 48 часов. В настоящем исследовании использовано два датчика один выдержанный под напряжением (режим «горячего старта»), другой – невыдержанный (режим «холодного старта»). Целью эксперимента было определить работоспособность датчиков и возможную погрешность измерений в режиме «холодного старта».

Результаты опытов представлены на рисунке 1.20. Серой линией показана зависимость напряжения на выходе датчика в режиме «холодного старта», черной – «горячего старта». Для проведения качественного эксперимента модельным источником угарного газа служила горящая хозяйственная спичка. Количество спичек, число зажиганий и наличие внешнего доступа воздуха приведено в табл 2.

Таблица 2. Условия проведения эксперимента

№ опыта	Количество модельных источников угарного газа	Количество повторений (пики на графиках рис. 4)	Внешний доступ воздуха
1	1	3	нет
2	2	3	нет
3	3	3	нет
4	6	3	нет
5	6	4	есть

Из графиков, приведенных на рисунок 1.20 видно, что при отсутствии угарного газа напряжение на выходе датчика в режиме «холодного старта», меньше, чем в режиме «горячего старта».

При выделении угарного газа оба датчика реагируют на увеличение его концентрации практически одновременно. В первых трех опытах наблюдается увеличение выходного напряжения, причем реакция датчика в режиме «горячего старта» более сильная. Изменение выходного напряжения датчика качественно соответствует характеристикам, приведенным в спецификации на датчик [67]. В четвертом опыте количество кислорода в замкнутом объеме контейнера уменьшилось, спички стали догорать не до конца, что привело к уменьшению концентрации угарного газа и, как следствие, к уменьшению выходного сигнала на каждом из датчиков. Опыт был повторно проведен с зазором между контейнером и рабочей поверхностью, что обеспечило приток воздуха через небольшую щель.

В связи с возникшей конвекцией воздушных масс датчики угарного газа оказались в разных условиях: на датчик в режиме «холодного старта» попало больше угарного газа, что привело к первому и третьему выбросам напряжения в пятом эксперименте, постепенный спад показаний датчиков связан с выжиганием кислорода. После окончания опытов показания датчиков в отсутствие угарного газа сблизилась вследствие того, что датчик, начавший работу в режиме «холодного старта», частично восстановил свою чувствительность.

После тестирования датчиков на специальном рабочем месте (рисунок 1.19) была собрана система мониторинга на базе платформы PoFs, по своему функциональному назначению похожая на систему [68] с применением одного из датчиков. Испытания датчика угарного газа в составе системы показали аналогичные результаты, что подтверждает работоспособность прототипа PoF-системы малой мощности для сбора информации с датчика угарного газа. В таблице 3 приведены основные характеристики разработанной системы.

Таблица 3 Характеристики системы на базе коммерческого прототипа

Характеристики	Значения
Длина оптического волокна, м	2
Длина волны, нм	980
Потребляемая мощность, Вт	< 15
Скорость передачи данных, бит/с	115 200
Мощность на стороне потребителя, мВт	Общая: 250 Для нагрузки: 200
Подключение датчиков	Угарный газ (CO ₂) и метан (CH ₄)
Интерфейс	Дисплей, подключение к ПК

1.5. Выводы по главе 1

В главе показаны принципы построения систем энергоснабжения по оптическому волокну. Описаны основные функциональные узлы необходимые для создания подобных систем. Сформулированы основные требования, которые

нужно учитывать при выборе данных компонентов. Проведена оценка ключевых факторов, влияющих на эффективность и основные технические характеристики систем на базе технологии PoF. Продемонстрировано, что представленные на сегодняшний момент системы, созданные на базе технологии PoF обладают низкой эффективностью. Испытания, созданного прототипа системы PoF на базе коммерчески доступной платформы, показало, что за счет уменьшения рабочей температуры лазерного диода и фотоэлектрического преобразователя можно добиться повышения коэффициента полезного действия на 3% и надежность системы в целом. Результаты исследований опубликованы в статьях [1, 13, 16, 9, 47, 69-71]

Разработаны подходы для проведения оптимизации режимов работы с целью повышения коэффициента полезного действия и надежности системы. Минимальных потерь энергии и повышения КПД можно достичь за счет разработки конструкции модуля ФЭП с улучшенными параметрами равномерности излучения на поверхности кристалла, минимизации потерь в гомогенизаторе и оптимизации конструкции с точки зрения отвода тепловой энергии от кристалла. Также необходимо разработать алгоритм обратной связи для управления выходной мощностью оптического излучения с лазерного диода. Данные использованы для практической реализации и подробно описаны и в главах 3 и 4

Проведенный анализ современного состояния технологии Power-over-Fiber показал, что основные мировые усилия направлены на увеличение передаваемой мощности (свыше 100 Вт [39]), интеграцию с системами передачи данных, такими как C-RAN для сетей 5G [3, 22], и повышение эффективности ключевых компонентов, в частности, фотоэлектрических преобразователей, КПД которых в исследовательских образцах превышает 68% [48, 49]. Установлено, что разрабатываемые в рамках данной работы решения, сфокусированные на эффективной работе с динамической нагрузкой и оптимизации КПД в широком диапазоне мощностей, актуальны и дополняют существующие мировые тенденции, детально освещая вопросы, которые в открытых научных публикациях представлены фрагментарно

Реализация указанных подходов при разработке системы энергоснабжения по оптическому волокну позволит получить перспективную систему с улучшенными основными характеристиками, что будет способствовать ее внедрению в промышленный и производственный сектор.

2. КОМПЛЕКСНАЯ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ (ЦИФРОВОЙ ДВОЙНИК) МОДУЛЯ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

В главе рассматриваются теоретические принципы работы фотоэлектрического преобразователя с использованием зонной теории твердых тел. Установлена взаимосвязь между теоретическими параметрами и паспортными данными реальных преобразователей. Предложена комплексная математическая модель (цифровой двойник) модуля фотоэлектрического преобразователя, разработанная на основе пятиэлементной эквивалентной схемы в среде моделирования MATLAB Simulink. Рассчитаны зависимости основных параметров модели ФЭП от оптической мощности на входе преобразователя. Экспериментальные результаты, представленные в главе, опубликованы в работе [89].

2.1. Комплексная математическая модель (цифровой двойник)

Прогресс в развитии фотоники как науки привел к появлению современных полупроводниковых лазеров, оптоволоконных линий связи и фотоэлектрических преобразователей. Интеграция указанных устройств в единую систему позволяет, используя их конкурентные преимущества создавать современные системы энергоснабжения с передачей энергии по оптическому волокну [72,73,9]. При этом достигается полная гальваническая развязка, первичного и вторичного преобразователей энергии, помехозащищенность оптоволоконной линии передачи от внешних электромагнитных воздействий [7], отсутствие искрения [6] даже при разрушении волокна, возможность прокладки в труднодоступных местах и интеграция в композитные материалы. Применение указанных систем энергоснабжения в настоящее время имеет нишевый характер и используется в ситуациях, когда использование традиционных проводных линий энергоснабжения или небезопасно, или затруднено [68]. Наиболее эффективно их использование в системах мониторинга удаленных или труднодоступных местах, а также взрыво- и пожароопасных ситуациях [71,16,74,8]. В обозримом будущем области их применения вероятно будут существенно расширены [20, 75], в связи с чем во всем

мире идет поиск новых технических решений основной проблемы всех систем двойного преобразования энергии – низкого коэффициента полезного действия.

Анализ энергетических потерь, выполненных в работах [16,74, 21] показал, что при передаче малой до единиц ватт и средней до десятков ватт мощности основными источниками потерь являются первичные электрооптические преобразователи, выполненные на основе твердотельных полупроводниковых лазеров, оптоволоконные линии передачи энергии и вторичные фотоэлектрические преобразователи. Обычно источниками энергии полупроводниковых лазерных диодов являются силовые электрические сети с практически неограниченным (киловатты и более) энергетическим ресурсом, поэтому эффективность (КПД) первичных преобразователей порядка 50% является вполне допустимым. Потери энергии в оптическом волокне ограничивают длину прокладываемой линии до десятков километров, вполне достаточную для большинства применений. Наиболее критическими являются потери энергии во вторичном фотоэлектрическом преобразователе, повышение эффективности (КПД) которого в настоящее время является наиболее актуальной задачей.

В работах [63, 76-78] описано современное состояние разработок различных конструкций ФЭП. Отмечено, что существуют три диапазона длин волн в которых возможно оптимальное согласование параметров полупроводниковых твердотельных лазеров, оптоволоконных линий передачи энергии и фотоэлектрических преобразователей. В настоящее время наиболее часто используется первый с центральной длиной волны 850 нм для которого имеется широкий выбор полупроводниковых источников и приёмников света, используемых в системах передачи энергии по оптическому волокну. Следует отметить, что подобные устройства как правило представляют собой сложные многослойные конструкции на основе гетеропереходов арсенида галлия с трехкомпонентными структурами того, же вещества с добавлением атомов алюминия, индия и т.д. [79]. На рисунке 2.1 показана хронология развития различных технологий изготовления кристаллов ФЭП, а также приведены значения эффективности на разных этапах развития [90].

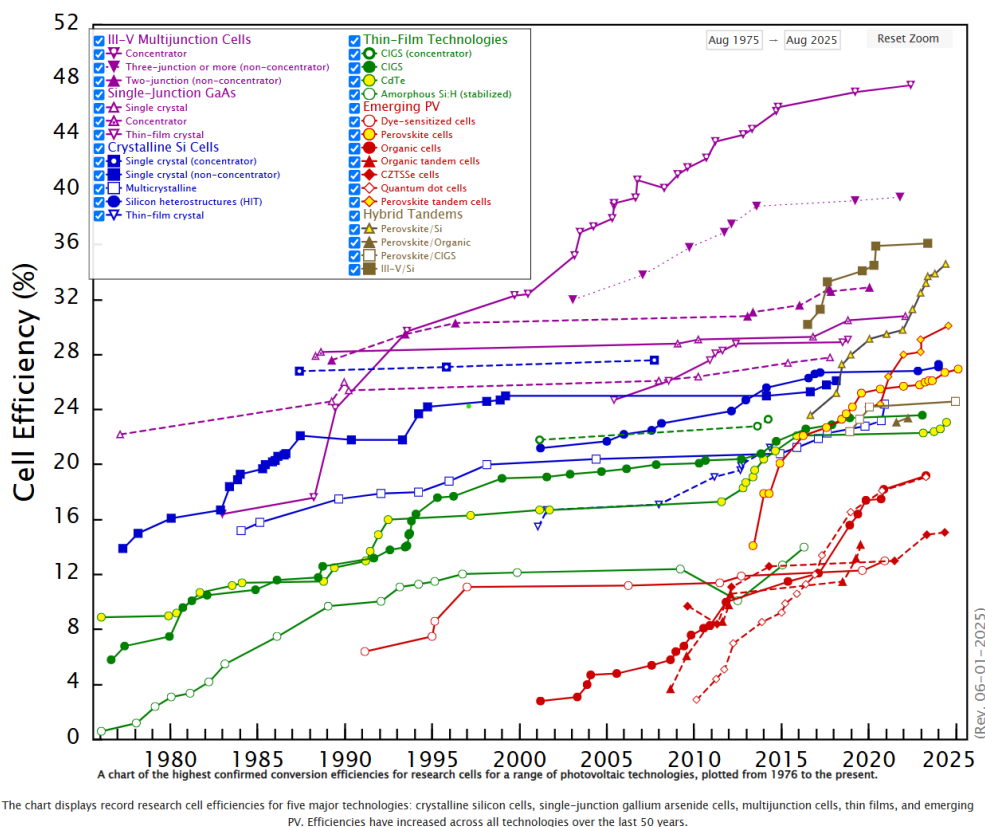


Рисунок 2.1 Хронология развития и эффективность существующих технологий изготовления кристаллов ФЭП [90]

Разработчики систем энергоснабжения, как правило, не могут изменять внутреннюю конструкцию приборов. Для повышения эффективности (КПД) в его распоряжении имеются несколько возможностей: подбор в пределах окна прозрачности рабочих длин волн излучателей и приемников, оптических мощностей, режимов охлаждения и, при наличии системы обратной связи, оптимизации режимов работы при изменении сопротивления нагрузки вторичного преобразователя. Для сокращения сроков разработки системы целесообразно разработать подробную математическую модель, максимально полно описывающую взаимодействие с физическим миром. Такую модель принято называть цифровым двойником [91]. Использование ЦД позволит найти оптимальные параметры работы модуля ФЭП до физического изготовления ее прототипа.

В настоящее время при изготовлении высокотехнологичной продукции наблюдается тенденция перехода от массового промышленного производства изделий, рассчитанного на удовлетворение запросов максимального числа

“усреднённых” потребителей к их индивидуальному изготовлению, учитывающему специфические требования каждого отдельного заказчика. В этом случае рентабельность изготовления и жизненный цикл изделия во многом определяется принципами, положенными в основу его проектирования. Высокая стоимость индивидуальных разработок требует создания систем прогнозирования основных характеристик изделия до его физического изготовления. Это возможно путем предварительного моделирования математического или физического. Современный подход предполагает: после определения основных характеристик изделия и особенностей его эксплуатации (валидации требований) создание цифрового двойника, описывающего сквозные технологии максимально возможного числа преобразований, начиная с исходного сырья, через технологический процесс изготовления ключевых компонентов с наперед заданными оптимальными свойствами, разработку структуры изделия и моделирования его свойств на этапе изготовления, с учетом требований заказчика, эксплуатации и последующей утилизации. Указанный подход, с одной стороны на этапе разработки цифрового двойника, требует проведения научно-исследовательских работ, с другой стороны уже на этапе проектно-конструкторских работ существенно сокращает время и стоимость индивидуального изготовления изделий. Создание систем электроснабжения с передачей энергии по оптическому волокну. относится к классу наукоемких разработок, где применение ЦД является одним из наиболее оптимальных решений. Следует отметить, что решаемая задача является частью создания интеллектуальной системы электроснабжения в экстремально сложных условиях, предъявляющих крайне жесткие требования в зависимости от специфических условий её эксплуатации. Это может быть работа в пожаро- и взрывоопасных средах в химической и нефтяной промышленности, встраивание волоконно-оптической линии передачи в композитные материалы, используемые в аэрокосмической промышленности, а также в ситуациях воздействия нескольких неблагоприятных факторов, например в угольных шахтах, где существует опасность взрыва метана и сложная топология прокладки кабелей, например

внутри вентиляционных систем. Из приведенного перечня видно, что системы электроснабжения в каждом случае будут уникальными и, как было сказано выше, их придется адаптировать под специфические требования заказчиков.

Первым шагом при создании ЦД является разработка универсального цифрового двойника для моделирования работы ФЭП разных номиналов одного производителя, а также разных производителей, включая серийные и экспериментальные образцы в пакете прикладных программ MATLAB. Математическая модель фотоэлектрического преобразователя должна функционировать в режимах работы на активную и реактивную нагрузки, как постоянные, так и динамически изменяющиеся во времени [80].

2.2. Основные варианты конструкций фотоэлектрических преобразователей лазерного излучения

В настоящее время существует большое разнообразие конструкций фотоэлектрических преобразователей. Их можно разделить по нескольким основным признакам:

- Спектр преобразуемой энергии: широкий, например, солнечное излучение и узкий – лазерное излучение;
- Энергетическим характеристикам: плотности потока оптического излучения, выходному напряжению, величине выходных токов, чувствительность к изменению сопротивления нагрузки, КПД преобразования энергии излучения в электрическую энергию;
- Конструктивным особенностям: ввода оптического излучения, материалов преобразователя и конструкции полупроводникового преобразователя.

В рамках данного исследования разработан и описана комплексная математическая модель фотоэлектрического преобразователя лазерного излучения, спроектированного для системы Power-over-Fiber (PoF). Особенностью работы указанных конструкций является узкий спектр лазерного излучения и гауссово распределение энергии в луче, передаваемом по оптическому волокну, а также

экстремально высокая плотность оптической энергии, достигающая значений в 1000 солнц и выше.

Для повышения КПД современные ФЭП изготавливают на основе гетероструктур. В первом окне прозрачности оптического волокна (центральная длина волны 850 нм) наиболее подходящим материалом является арсенид галлия (GaAs) с шириной запрещенной зоны $\Delta W = 1,42$ эВ при температуре 300 К [81]. Добавка алюминия в соединение $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ позволяет, изменяя концентрацию Al до $x = 0,4$ (замещается 40% атомов Ga) линейно увеличивать ширину запрещенной зоны до 1,9 эВ. Для уменьшения ширины запрещенной зоны алюминий заменяется индием, и трехкомпонентная смесь $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ позволяет варьировать ее в широких пределах от 0,354 эВ у арсенида индия до 1,42 у арсенида галлия. Формула расчета ширины запрещенной зоны [82]

$$\Delta W = 0,354 + 0,63x + 0,43x^2 \text{ [эВ]}. (1)$$

Введение элементов II и V групп таблицы Менделеева позволяет создавать слои с проводимостью p - и n -типов соответственно.

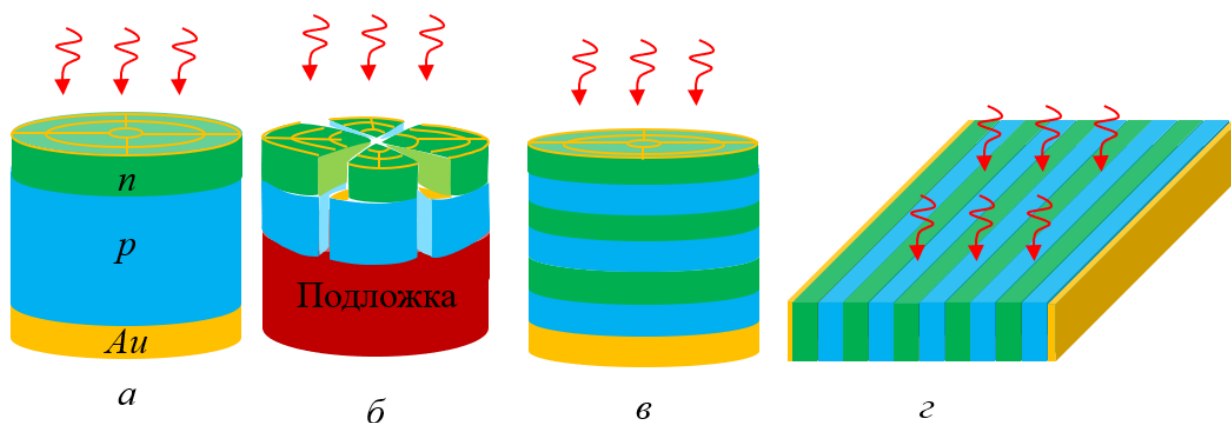


Рисунок 2.2. Варианты конструкций кристаллов фотоэлектрических преобразователей:
 а – отдельный фотоэлектрический преобразователь с вертикальной структурой;
 б – несколько горизонтально соединённых отдельных фотоэлектрических преобразователей;
 в – несколько вертикально соединённых отдельных фотоэлектрических преобразователей;
 г – несколько горизонтально соединённых отдельных фотоэлектрических преобразователей с боковой засветкой

В упрощенном виде основные конструкции ФЭП с торцевой и боковой засветкой представлены на рисунке 2.2, *а-г*. Следует отметить, что в реальных конструкциях слоев больше: сверху на освещаемую поверхность преобразователя наносится слой просветляющего покрытия, позволяющий снизить коэффициент отражения, рассчитываемый по формуле Френеля для нормального падения

$$R = \left(\frac{n_2 - n_1}{n_2 + n_1} \right)^2 \approx 0,36, \quad (2)$$

где $n_1 = 1$ коэффициент преломления воздуха, а $n_2 \approx 4$ – арсенида галлия и его трехкомпонентных соединений. Введение просветляющего покрытия позволяет снизить коэффициент отражения до 1% и меньше для узкой спектральной полосы излучения, которая характерна для лазерного излучения. Также для уменьшения механических напряжений на границе раздела отдельных слоев вводят специальные буферные слои, для согласования постоянных кристаллических решеток (отличие не должно превышать 0,5% и чем оно меньше, тем лучше согласование, меньше дефектов на границе и меньше потери электрической мощности при прохождении тока). Достоинством торцевой засветки является равномерность освещения полупроводника при цилиндрической конструкции как показано на рисунке 2.2, *а-в*. Недостатком являются потери на поглощение света в верхнем электроде, что частично нивелируется его расположением в области спада освещенности на периферии гауссового распределения энергии падающего излучения и использованием полупрозрачных электродов. Согласование засвечиваемой поверхности с площадью светового пятна, как правило, достигается установкой гомогенизатора оптического излучения перед поверхностью кристалла.

Достоинством боковой засветки фотоэлектрического преобразователя является однотипность чередующихся полупроводниковых слоев [76], однако для эффективной работы необходимо их равномерное освещение, что предполагает обязательное использование гомогенизаторов излучения [83].

2.3. Воздействие света на p – n -переход

На рисунке 2.3 представлена схема расположения слоев простейшего фотоэлектрического преобразователя энергии лазерного излучения в энергию постоянного тока. На монокристаллическом полупроводнике p -типа наращивается тонкий полупроводник n -типа. Нижний электрод является сплошным, а верхний – кольцевым. Для уменьшения потерь света на отражение сверху нанесено просветляющее покрытие. Лазерное излучение имеет форму Гауссова пучка и через просветляющее покрытие проникает вглубь фотоэлектрического преобразователя. При первом прохождении часть оптической энергии преобразуется в энергию электрического тока, а часть достигает нижнего электрода и отражаясь от него как от зеркала вторично проходит через полупроводник повышая эффективность фотоэлектрического преобразования.

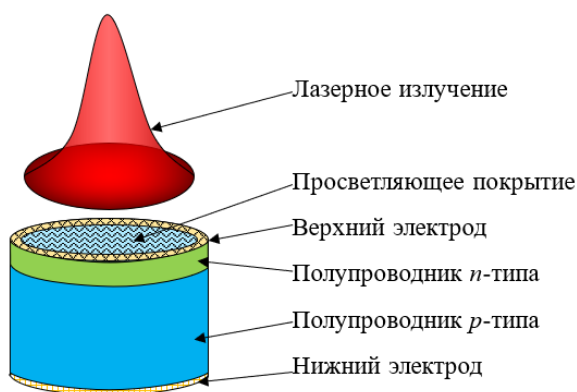


Рисунок 2.3 Схема расположения слоев фотоэлектрического преобразователя

На рисунке 2.4 приведена зонная диаграмма гетероперехода и процессов генерации, рекомбинации и движения основных носителей заряда – электронов. На рисунке справа изображен высоколегированный широкозонный эмиттер n^+ -типа, слева – низколегированная узкозонная база p -типа, между которыми находится p – n -переход (сплошной вертикальной линией обозначена металлургическая граница, а пунктирными – границы перехода со стороны эмиттера и базы). Электрическое поле $\vec{E}$ возникшее в результате образования p – n -перехода находится внутри его границ. В верхней части рисунка находится зона проводимости, нижняя граница которой – дно зоны проводимости обозначено толстой горизонтальной линией. На металлургической границе зона проводимости имеет разрыв типа небольшого

«пичка». Внизу располагается валентная зона, разрыв которой имеет форму «стенки», являющейся барьером для движения дырок. Таким образом, в гетеропереходе проводимость осуществляется за счет движения одного основного типа носителя заряда в нашем случае – электронов. Практически дырки не вносят вклад в проводимость и их движение в дальнейшем рассматривать не будем.

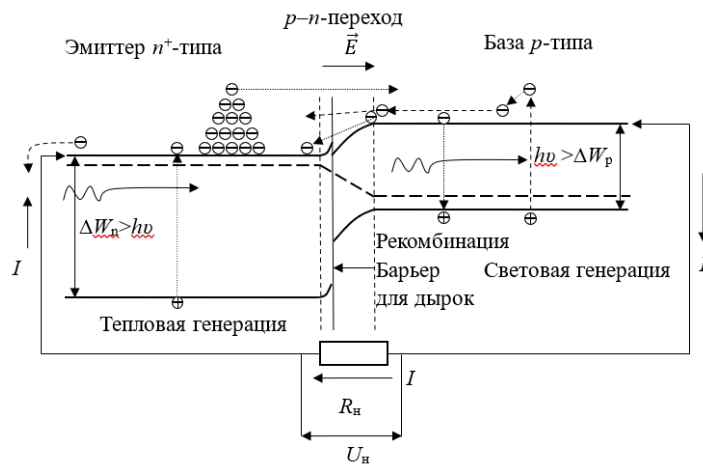


Рисунок 2.4. Зонная диаграмма гетероперехода

Квант света с энергией $h\nu$ падает со стороны эмиттера с шириной запрещенной зоны $\Delta W_n > h\nu$. Энергии кванта недостаточно для образования пары электрон-дырка, поэтому эмиттер прозрачен для света. Квант света поглощается в узкозонной базе p -типа, с образованием световой пары электрон-дырка (фотоэффект). Эффективность преобразования характеризуется величиной квантового выхода

$$\beta = \frac{N_e}{N_{\text{кв}}}, \quad (3)$$

где N_e – число пар электрон-дырка образовавшихся при поглощении $N_{\text{кв}}$ квантов света.

В глубине базы интенсивность светового потока экспоненциально падает согласно закону Бугера-Ламберта

$$\Phi = \Phi_0 \exp(-kx), \quad (4)$$

где Φ_0 – падающий на эмиттер световой поток, $k = k(\lambda)$ – коэффициент поглощения, зависящий от длины волны, x – расстояние в глубину базы. На расстоянии $x = \frac{1}{k}$, интенсивность светового потока уменьшается в $e = 2,71$ раз, это расстояние называется средней длиной диффузии электронов в базе p -типа L_n . Если толщина базы $l_b < L_n$, то это диод с «тонкой» базой, если $l_b > L_n$, то с «толстой». Обычно используют диоды с «тонкой» базой.

Вблизи красной границы фотоэффекта поглощение уменьшается, поэтому энергия квантов света должна быть больше ширины запрещенной зоны W_p . При этом как показано на рисунке электрон вначале переходит на уровни энергии выше дна зоны проводимости, а затем в результате соударений с атомами кристаллической решетки отдает последней часть своей энергии и опускается на свободный уровень энергии вблизи дна зоны проводимости. Высвободившаяся энергия превращается в тепло, которое нагревает прибор. Конструкторы вынуждены искать компромисс между процессами поглощения и нагрева выбирая лазерные источники излучения с длиной волны немного большей красной границы фотоэффекта.

Для создания электрического фототока в генераторном режиме работы ФЭП, электроны из глубины базы должны достичь границы p – n - перехода и дрейфуя навстречу электрическому полю $\vec{E}$ инжектироваться в эмиттер n^+ - типа. В базе электроны являются неосновными носителями заряда (их на несколько порядков меньше, чем дырок) и через короткое время – время жизни они могут комбинировать с дырками. Чтобы этого не произошло базу можно сделать многослойной состоящей из нескольких гетеропереходов с различной шириной запрещенной зоны, в которой область поглощения будет тонкой, а буферные слои (необходимые для согласования постоянных кристаллических решеток) и монокристалл (подложка), на котором наращиваются остальные слои – широкозонными, прозрачными для лазерного излучения. Возможны и другие варианты: поменять местами базу и эмиттер (см. рис. 2) или создать «встроенное» в базу электрическое поле путем её неравномерного легирования. Тогда в добавок

к диффузии (которая есть в любом случае) добавляется второй – дрейфовый механизм переноса электронов и эффективность генерации электрического тока возрастает.

При переносе электронов внутри базы электроны могут рекомбинировать с дырками. Для учета рекомбинации вводится коэффициент переноса

$$\chi = \frac{N_{\pi}}{N_e}, (5)$$

где N_e – число образовавшихся в результате световой генерации пар электрон-дырка, N_{π} – число нерекомбинировавших при переносе через базу электронов. Коэффициент переноса зависит от нескольких факторов: соотношения толщины базы со средней длиной диффузии электронов в базе, подвижности носителей заряда, наличия «встроенного» в базу электрического поля, а также соотношения концентрации электронов N_e и дырок N_d в базе p -типа. Для арсенида галлия при $T = 300$ К подвижность электронов $\mu_e = 8500 \left[\frac{\text{м}^2}{\text{В} \cdot \text{с}} \right]$ в 14,2 раза больше подвижности дырок $\mu_d = 600 \left[\frac{\text{м}^2}{\text{В} \cdot \text{с}} \right]$, поэтому при создании ФЭП всегда используют электронную проводимость. Типичная зависимость коэффициента переноса при $l_0 = L_n$ от силы фототока показана на рис. 3. Зависимость начинается из начала координат, т.к. при отсутствии тока нет переноса электронов и $\chi=0$. При этом в полупроводнике p -типа существует равновесная концентрация неосновных носителей заряда – электронов, задаваемая соотношением:

$$p_p n_p = p_i^2 = n_i^2, (6)$$

где концентрация основных носителей заряда – дырок $p_p \approx N_a$ при $T = 300$ К, здесь N_a – концентрация акцепторных примесей в базе, n_p – концентрация неосновных носителей – электронов, $p_i = n_i$ – концентрации «тепловых» дырок и электронов

$$n_i = N_c \exp\left(-\frac{\Delta W}{2k_B T}\right), (7)$$

где ΔW – ширина запрещенной зоны в электрон-вольтах, $k_B = 4,1 \times 10^{-15} [\text{эВ} \cdot \text{с}]$ постоянная Больцмана, а плотность квантовых состояний (число разрешенных

уровней энергии на единицу энергии, т.е. приведенную к 1 эВ) у дна зоны проводимости составляет

$$N_c = 2 \left(\frac{2\pi m_e^* kT}{h^2} \right)^{\frac{3}{2}}, \quad (8)$$

здесь m_e^* – эффективная масса электрона, а двойка перед скобкой появилась с учетом спина (на одном энергетическом уровне могут находиться два электрона с разными спинами).

При увеличении силы тока χ вначале возрастает, затем выходит на постоянный уровень и наконец при больших токах немного уменьшается вследствие уменьшения времени жизни электронов при их высокой неравновесной концентрации (см. Рисунок 2.5).

Чем больше концентрация электронов, тем больше вероятность их рекомбинации с дырками, а, следовательно, время жизни меньше.

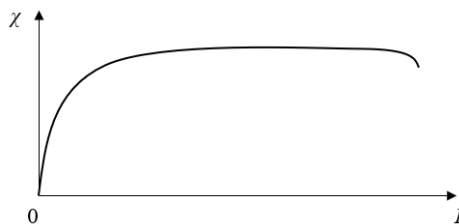


Рисунок 2.5. Зависимость коэффициента переноса от силы тока

Таким образом, фототок

$$I_{\Phi} = q\beta k_{\lambda} \chi S L_n N_{\text{кв}} = q\beta k_{\lambda} \chi S L_n \frac{\Phi}{h\nu}, \quad (9)$$

где k_{λ} – коэффициент поглощения на длине волны лазерного излучения λ , S – площадь освещаемой поверхности ФЭП, число фотонов, падающих на единицу площади в единицу времени $N_{\text{кв}} = \frac{\Phi}{h\nu}$, здесь частота кантов $\nu = \frac{c}{\lambda}$.

Формула (9) в дальнейшем будет использована для разработки цифрового двойника ФЭП.

2.4. Эквивалентная схема ФЭП

Электрические генераторы делятся на генераторы напряжения и тока, для анализа их работы используют эквивалентные схемы (схемы замещения), графические изображения которых приведены на рисунке 2.6, *а,б* [84].

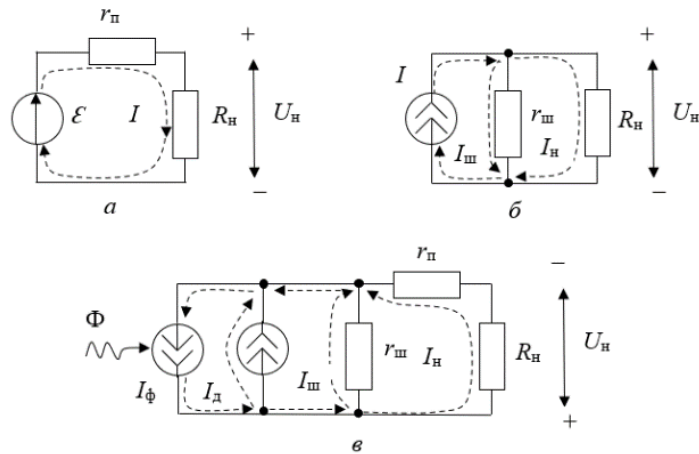


Рисунок 2.6. Эквивалентные схемы генераторов: *а* – напряжения, *б* – тока, *в* – фотоэлектрического преобразователя с нагрузкой

Схема генератора напряжения (рисунке 2.6, *а*) состоит из источника электродвижущей силы (ЭДС) $\mathcal{E}$ с внутренним сопротивлением r_n . Нагрузкой служит резистор R_n по которому течет ток

$$I_n = \frac{\mathcal{E}}{r_n + R_n}. \quad (10)$$

Генератор тока (рисунке 2.6, *б*) состоит из источника тока I с параллельно включенным внутренним сопротивлением $r_{ш}$ и внешнего сопротивления нагрузки R_n , по которому течет ток

$$I_n = I - I_{ш}, \quad (11)$$

задавая на нагрузке напряжение

$$U_n = \frac{I R_n}{r_{ш} + R_n}. \quad (12)$$

ФЭП можно представить в виде комбинации генераторов тока и напряжения. Тогда эквивалентная схема фотоэлектрического преобразователя (рисунке 2.6, *в*) содержит пять элементов: генераторы фототока I_ϕ и тока прямосмещенного p – n –перехода диода I_d , а также сопротивлений: внутренних шунтирующего $r_{ш}$ и

последовательного r_{Π} и внешнего сопротивления нагрузки R_{Π} . Эта наиболее часто используемая пятиэлементная эквивалентная схема, в большинстве практически важных ситуациях адекватно описывает поведение ФЭП, работающих в квазистационарном режиме при медленно изменяющихся световом потоке и активной нагрузке. В указанном режиме работы не учитываются влияние емкостей ФЭП – барьерной, диффузионной, а также паразитных ёмкостей ФЭП, нагрузки и соединительных проводов. Существуют и более сложные эквивалентные схемы ФЭП [85]. В настоящей работе используется пятикомпонентная схема. В этом случае сила тока нагрузки [86]

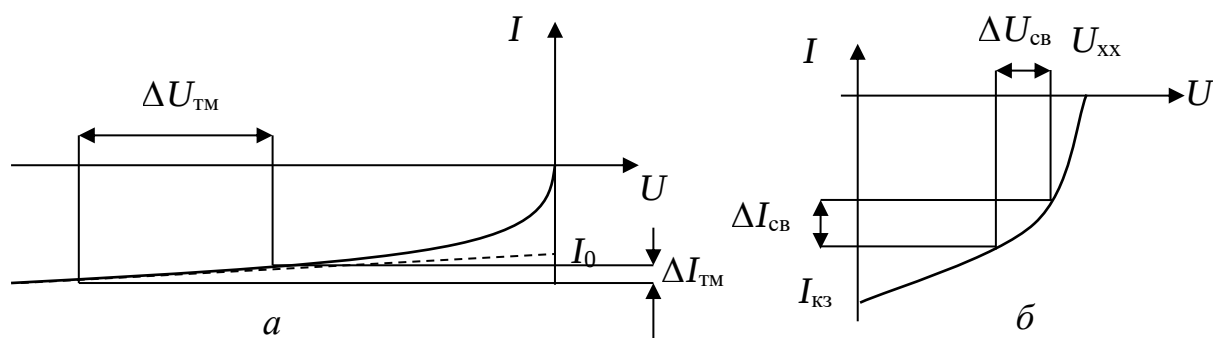
$$I_{\Pi} = I_{\Gamma\Pi} - I_{\Phi} + I_{\text{ут}} = I_0 \exp \left[\frac{q(U_{\Pi} + I_{\Pi} R_{\Pi})}{AkT} - 1 \right] - I_{\Phi} + \frac{U_{\Pi} + I_{\Pi} R_{\Pi}}{R_{\text{ш}}} . \quad (14)$$

Следует отметить, что для гетероперехода величина обратного тока диода I_0 зависит от напряжения смещения и температуры. Если в спецификации ФЭП она не указана, то ее для каждой температуры можно определить по обратной ветви темновой характеристики, как показано на рисунке 2.7, а. Величину шунтирующего сопротивления находят также по обратной ветви темновой характеристики

$$r_{\text{ш}} = \frac{\Delta U_{\text{тм}}}{\Delta I_{\text{тм}}} , \quad (15)$$

а последовательного сопротивления по прямой ветви световой характеристики (рисунке 2.7, б)

$$r_{\Pi} = \frac{\Delta U_{\text{св}}}{\Delta I_{\text{св}}} , \quad (16)$$



рисунке 2.7. Определение параметров: a – обратного тока I_0 и шунтирующего сопротивления $r_{ш}$, b – последовательного сопротивления $r_{п}$

Величина $r_{п}$ зависит от освещенности Φ и температуры T . С повышением температуры уменьшается контактная разность потенциалов

$$\varphi_0 = \frac{kT}{q} \ln \frac{n_n p_p}{n_i^2}, \quad (17)$$

т.к. при изменении температуры в пределах от температуры ионизации до температуры истощения примеси $n_n \cong N_d$ концентрации донорных примесей, $p_p \cong N_a$ концентрации акцепторных примесей, а $n_i = N_c \exp\left(-\frac{\Delta W}{2kT}\right)$. Напряжение холостого хода с увеличением температуры уменьшается, и прямая ветвь световой ВАХ сдвигается вправо.

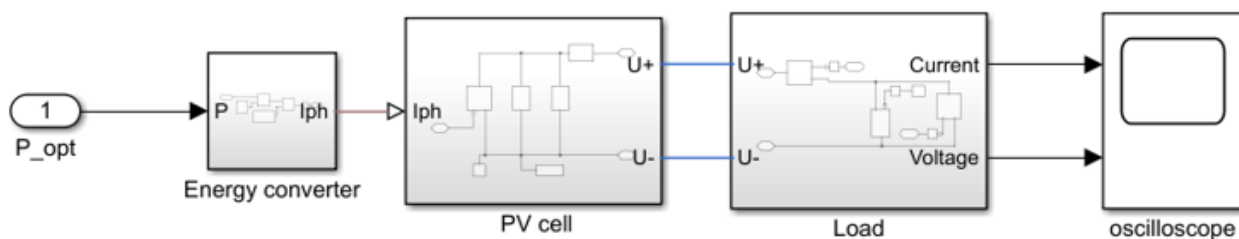
Параметр A (диодный фактор) определяется из соотношения

$$U_{xx} = \frac{AkT}{q} \ln \left(\frac{I_{кз}}{I_0} + 1 \right) \quad (18)$$

и также зависит от освещенности и температуры.

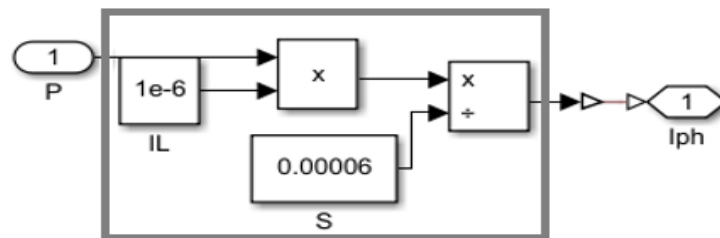
2.5. Моделирование ФЭП в MATLAB

В среде моделирования MATLAB Simulink разработана имитационная модель фотоэлектрического преобразователя [87, 88], представленная на рисунке 2.8.



рисунке 2.8 Имитационная модель фотоэлектрического преобразователя. Блоки: «P_opt» – выходная оптическая мощность источника оптического излучения; «Energy converter» – преобразователь оптической мощности в фототок; «PV cell» – эквивалентная схема фотоэлектрического преобразователя; «Load» – сопротивление нагрузки; «oscilloscope» – осциллограф

В блоке «P_opt» задаётся выходная оптическая мощность источника оптического излучения в ваттах. MATLAB позволяет моделировать процессы, протекающие в ФЭП в широком диапазоне изменения мощностей (например, от 0 до 45 Вт как в данной работе). В блоке «Energy converter» (см. рисунок 2.9) происходит преобразование оптической мощности «P» в фототок «I_{ph}». Для выполнения преобразования необходимо ввести параметры: освещенность «IL», площадь чувствительной области фотоэлектрического преобразователя «S», полученные опытным путем.



Коэффициент сгенерированного тока

Рисунок 2.9 Блок «Energy converter»

Задаваемые параметры:

- «P» – выходная оптическая мощность источника оптического излучения;
- «IL» – освещенность;
- «S» – площадь чувствительной области фотоэлектрического преобразователя;
- «I_{ph}» – результат генерации тока.

Ниже приведено соответствие вводимых параметров параметрам в формуле (1):

- оптическая мощности «P» [Вт];
- освещенность «IL» $E = (1 - R) \frac{\Phi}{S} \cos \alpha$, где R – коэффициент отражения, α – угол падения луча (т.е. между направлением волнового вектора и нормалью к площади чувствительной поверхности фотоприемника). В связи с малым коэффициентом отражения (не более 1%) и нормальным падением света на поверхность ФЭП формула упрощается

$$E = \frac{\Phi}{S}, \quad (19)$$

где «S» - площадь чувствительной области фотоэлектрического преобразователя;

- коэффициент сгенерированного тока (на рисунке 8 выделено прямоугольной областью) соответствует произведению $q\beta k\chi L_n \frac{1}{h\nu}$ в формуле (9).

В блоке «PV cell» моделируется эквивалентная схема фотоэлемента как показано на рисунке 2.10. Соответствует схеме на рисунке 2.6, б, без резистора нагрузки.

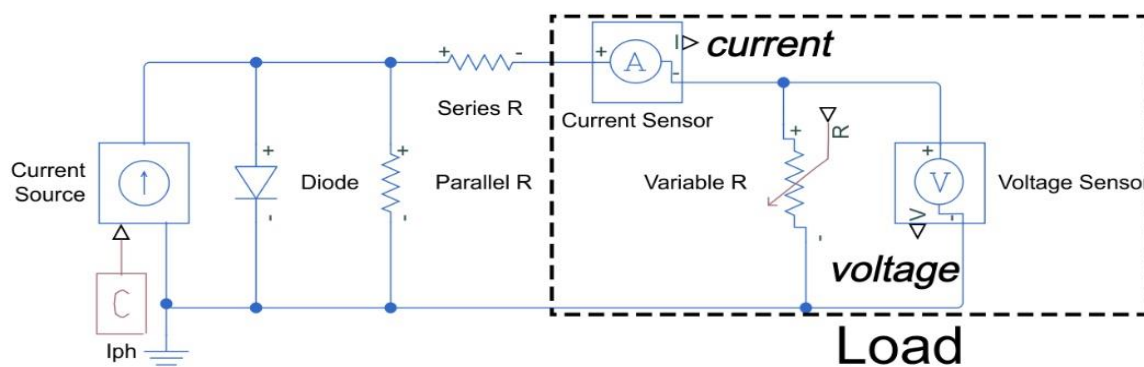


Рисунок 2.10. Эквивалентная схема замещения фотоэлемента в среде моделирования MATLAB Simulink

Ниже приведены параметры элементов схемы замещения:

- «Forward voltage» – прямое напряжение, которое необходимо приложить к диоду, чтобы запустить процесс фотоэлектрического преобразования. Имеет значение 19 Вольт;
- «On resistance» – сопротивление короткозамкнутого диода. Имеет значение 1 Ом;
- «Off conductance» – проводимость диода при обратном смещении. Имеет значение $1/\text{Om}=10^{-9}$ [См], что соответствует сопротивлению 1 МОм;
- «Series resistance» – последовательное сопротивление чувствительной зоны ФЭП. Имеет значение 7 Ом.

Указанные выше параметры моделируемой схемы замещения выбраны на основе экспертной оценки и могут быть уточнены в дальнейших исследованиях.

Блок «Load» – сопротивление нагрузки. В качестве сопротивления нагрузки выбран переменный резистор R , позволяющий изменять сопротивление в пределах от нуля до 1 ГОм.

2.6. Исследование основных характеристик модуля ФЭП

Фотография фотоэлектрического преобразователя YCH-N6424-15-FC-A со снятой верхней частью (переходом с торца оптического волокна) представлена на рисунке 2.11.

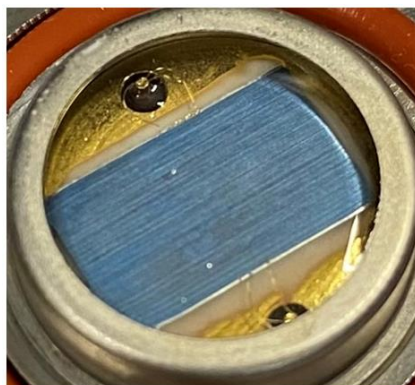


Рисунок 2.11. Фотография фотоэлектрического преобразователя YCH-N6424-15-FC-A

На рисунке видны металлические электроды контактов, соединенные проводниками с золотым покрытием с электрическими выводными контактами, изолированными от корпуса. На поверхности преобразователя видны продольные полосы чередующихся слоев полупроводников, последовательно соединенных отдельных фотоэлектрических преобразователей, что позволяет получить достаточно высокие (до 20 В) выходные напряжения, при однотипной конструкции отдельных преобразователей. Конструкция обеспечивает низкие потери на утечки (большую величину сопротивления $R_{ш}$, порядка 1 МОм), малые последовательные сопротивления $R_{п}$, порядка 10 Ом и меньше). При этом максимально достижимые токи при правильно подобранном сопротивлении нагрузки приближаются к 700 мА.

Блок-схема исследования основных характеристик фотоэлектрического преобразователя YCH-N6424-15-FC-A приведена на рисунке 2.12.

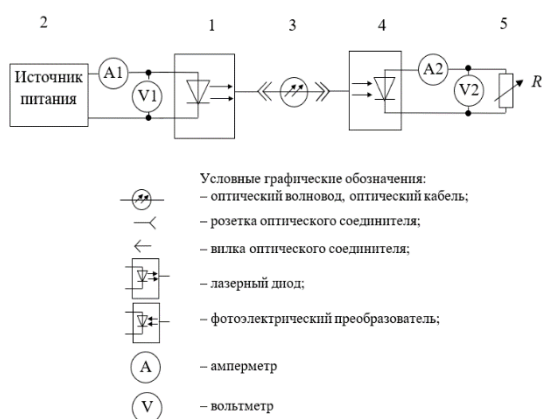


Рисунок 2.12. а) Блок-схема исследования нагрузочной характеристики фотоэлектрического преобразователя; б) Фотография собранного рабочего места

В качестве источника оптического излучения выбран регулируемый по мощности от 0,25 до 70 Вт на длине волны 980 нм твердотельный лазерный диод (K976DA5RN-70.00W) 1 с блоком питания (GPD 74303S) 2. Многомодовый оптический кабель 3, длиной 2 метра, служил для подачи оптической мощности на

вход фотоэлектрического преобразователя (YCH-H6424-15-FC-A) 4, нагрузкой которого служил магазин сопротивлений 5. Для контроля мощности на входе первичного и выходе вторичного преобразователей использовались амперметры и вольтметры A1 и V1 и A2 и V2, соответственно. Эксперимент проводился в лабораторных условиях при температуре окружающей среды 23°C и влажности порядка 50%. Для отведения избыточного тепла фотоэлектронный преобразователь был установлен на специально разработанную систему охлаждения на тепловых трубках.

В таблице 2.1 приведены паспортные характеристики фотоэлектрического преобразователя YCH-H6424-15-FC-A. В ходе работы исследована нагрузочная характеристика фотоэлектронного преобразователя YCH-H6424-15-FC-A и определены основные характеристики, приведенные в таблице 2.2 которые в пределах погрешности эксперимента, не превышавшей 2%, совпали с паспортными, приведенными в таблице 2.1.

Таблица 2.1. Паспортные характеристики модуля ФЭП YCH-H6424 -15-FC-A

Popt, W	10	30	50
Pmax, W	3,008	7,636	10,94
Vmax, V	18,2	17,5	16,5
I _{max} , mA	165,3	436,4	663
КПД, %	30,1	25,5	21,9

Основные характеристики преобразователя YCH-H6424-15-FC-A, полученные экспериментально приведены в таблице 2.2.

Таблица 2.2. Основные характеристики модуля ФЭП YCH-H6424-15-FC-A

P_{opt}, W	10,38		28,69		44,67	
	Эксп.	Модель	Эксп.	Модель	Эксп.	Модель
P_{max}, W	2,89	3,08	7,11	7,48	9,73	10,25
V_{max}, V	18,50	17,79	17,47	15,66	16,57	13,81
I_{max}, mA	156,23	172,90	407,32	477,41	587,17	742,37
КПД, %	27,80	29,63	24,78	26,06	21,77	22,94

Следует отметить, что использованные при проведении экспериментов оптические мощности немного отличались от паспортных. Это связано с тем, что при градуировке источника оптического излучения, указанные мощности были установлены с точностью не менее 0,1%. Наиболее близкие к паспортным (см. таблицу 2.1) опорные точки, представленные в таблице 2.2. Они были использованы при моделировании.

Из анализа (таблиц 2.1 и 2.2) следует, что экспериментально полученные значения совпали с паспортными с точностью 2%.

2.7. Проверка работоспособности цифрового двойника ФЭП

Для трех значений оптической мощности P_{opt}: 10,38; 28,69 и 44,67 Вт с помощью разработанного цифрового двойника были рассчитаны: максимальная электрическая мощность P_{max} (W), максимальное выходное напряжение V_{max} (V), максимальный ток нагрузки I_{max} (mA) и коэффициент полезного действия преобразователя Efficiency (%). Следует отметить, что каждый расчет был проведен для оптимальных сопротивлений нагрузки, разных при различной оптической мощности, при которых достижимы максимальные показатели. Только в таком случае их можно сравнить с паспортными. Для удобства анализа зависимости представлены на графиках рисунка 11, а-г, соответственно.

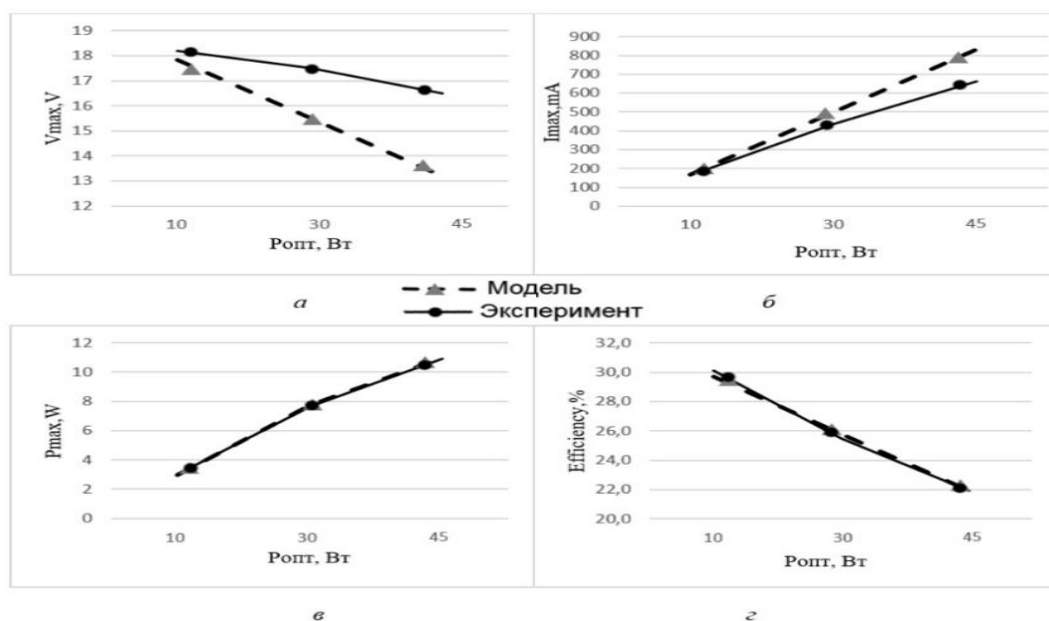


Рисунок 2.13. Графики зависимостей от оптической мощности $P_{\text{опт}}$: а – максимального выходного напряжения V_{max} ; б – максимального тока нагрузки I_{max} ; в – максимальной электрической мощности P_{max} ; з – коэффициента полезного действия преобразователя Efficiency (%)

Из рисунка 2.13, а–з видно, что при оптической мощности 10,38 Вт все основные характеристики расчетные, экспериментальные и паспортные совпали с точностью до 2%, что свидетельствует о работоспособности цифрового двойника ФЭП. При увеличении до 28,69 и далее 44,67 Вт наблюдаются расхождения на рисунке 2.13, а и б. Расчётное значение V_{max} уменьшается быстрее паспортного и при $P_{\text{опт}} = 44,67$ Вт ошибка достигает 20%. В свою очередь расчетное значение I_{max} увеличивается быстрее паспортного и при $P_{\text{опт}} = 44,67$ Вт расхождение составляет также 20%. При расчетах максимальной мощности

$$P_{\text{max}} = V_{\text{max}} \cdot I_{\text{max}} \quad (20)$$

и максимального КПД η

$$\eta_{\text{max}} = \frac{P_{\text{max}}}{P_{\text{опт}}} \cdot (21)$$

Эти эффекты компенсируют друг друга, поэтому как видно из рисунка 2.13 в и з расчетные и паспортные значения мощности в нагрузке и КПД совпали для всех оптических мощностей совпали с точностью до 2%.

Отличия в графиках напряжения и силы тока, вероятно, связаны с тем, что в цифровом двойнике учтены не все физические процессы, происходящие в реальном ФЭП, так на рисунке 4 видно, что при больших токах, генерируемых ФЭП коэффициент переноса χ вследствие повышения температуры уменьшается, что согласно формуле (9) приводит к уменьшению силы тока $I_{\text{ф}}$ и соответственно максимального тока нагрузки I_{max} .

Разогрев ФЭП при увеличении силы тока приводит к уменьшению напряжения холостого хода U_{xx} (рис. 2.5, б) и соответственно максимального выходного напряжения V_{max} , что и наблюдается на рисунке 2.13, а. Однако, как было сказано выше, расчётная зависимость уменьшается быстрее. Это можно объяснить тем, что при увеличении силы тока большее напряжение падает на внутреннем сопротивлении генератора R_p которое в цифровом двойнике остается постоянным, а в реальном генераторе уменьшается, как и во всех полупроводниках с увеличением температуры. Поэтому расчетная зависимость падает быстрее, причем падение V_{max} пропорционально увеличению I_{max} .

2.8. Выводы по 2-ой главе

Проработаны основные варианты конструкций фотоэлектрических преобразователей лазерного излучения. Рассмотрено воздействие света на p – n -переход с использованием основных положений зоной теории твердых тел. Показана связь основных параметров использованных при описании процессов преобразования оптической энергии в энергию электрического тока с основными паспортными характеристиками ФЭП. Обоснован выбор эквивалентной схемы ФЭП, состоящей из пяти элементов.

Разработана комплексная математическая модель ФЭП в среде моделирования MATLAB Simulink. Обоснован выбор параметров модели, наиболее близких к основным характеристикам ФЭП марки YCH-H6424-15-FC-A. Рассчитаны зависимости основных параметров цифрового двойника: максимального выходного напряжения V_{max} ; максимального тока нагрузки I_{max} ; максимальной электрической мощности P_{max} ; коэффициента полезного действия преобразователя Efficiency (%) от оптической мощности на входе преобразователя в режиме большого сигнала.

Собрана экспериментальная установка, на которой исследованы основные характеристики модуля ФЭП. Установлено, что при оптической мощности 10 Вт все характеристики (расчетные, экспериментально полученные и паспортные) совпали с точностью до 2%, что свидетельствует о работоспособности цифрового двойника ФЭП. Отмечено, что при повышении оптической мощности параметры

модели ФЭП – максимальное выходное напряжение $V_{\max}$ и максимальный ток нагрузки $I_{\max}$ отличаются от экспериментальных. Зависимости имеют разнонаправленный характер и в процентном соотношении по абсолютной величине изменяются примерно одинаково. Дано объяснение указанному явлению с точки зрения теории твердого тела.

Основные характеристики (максимальная электрическая мощность $P_{\max}$ и коэффициент полезного действия преобразователя Efficiency (%)) цифрового двойника совпадают с характеристиками реального преобразователя. Это свидетельствует об адекватном описании реальных процессов в программе цифрового двойника.

Разработанная модель цифрового двойника ФЭП, в дальнейшем будет подвергнута проверки на универсальность (с целью доказательства, что она подходит для фотоэлектрических преобразователей разных конструкций от различных производителей). Универсальная модель цифрового двойника, разработанная на основе результатов настоящей работы, позволит использовать ее для прогнозирования поведения других ФЭП на основе их паспортных данных без проведения дополнительных экспериментов. Это существенно сократит сроки разработки систем под технические требования от разных заказчиков.

3. ПОИСКОВЫЙ АЛГОРИТМ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОПТИЧЕСКОЙ МОЩНОСТИ ЛАЗЕРНОГО ДИОДА

В главе представлена разработка алгоритма обратной связи для управления мощностью оптического излучения лазерного диода системы энергоснабжения по оптическому волокну. Описанный алгоритм позволяет найти оптимальную оптическую мощность для диапазона рабочих значений нагрузочных сопротивлений. Также рассмотрено применение широтно-импульсной модуляции (ШИМ) для управления мощностью ЛДМ на интервале повышенных сопротивлений при низких рабочих значениях оптической мощности (до 15 Вт) с целью максимизации КПД. Для сглаживания ШИМ сигнала мощности, которая поступает к потребителю, используется электрическая емкость. Приведены результаты моделирования в пакете прикладных программ MATLAB в среде моделирования Simulink для различных режимов функционирования схемы.

Результаты, представленные в данной главе, опубликованы в работах [100, 101].

3.1. Влияние оптических компонентов на общую эффективность системы

Для создания алгоритма управления оптической мощностью лазерного диода в системе энергоснабжения по оптическому волокну исследован прототип на базе лазерного диода K976DA5RN-LLS70.00W с выходной оптической мощностью до 70 Вт и модуля фотоэлектрического преобразователя YCH-H6424-25-FC-A с максимальной входной мощностью 50 Вт. Эксперименты показали, что при работе с быстро изменяющейся, (менее 100 мс) в интервале 10 – 150 Ом нагрузкой для достижения максимального коэффициента полезного действия необходимо использовать систему обратной связи [92-94]. Для отлаживания системы использовался цифровой двойник разработанный в MATLAB Simulink [89].

Особенностью работы системы электропитания с передачей энергии по оптическому волокну является необходимость достижения максимального КПД за минимальное время [95], для обеспечения оптимальной электрической мощности в нагрузке при существенном, в десятки раз, изменении сопротивления нагрузки, которая в общем случае имеет комплексный характер. Задача является

многопараметрической и для ее решения создана система регулировки с двумя цепями дифференциальной обратной связи [96-99]. Это предполагает синхронное изменение электрической мощности лазерного диода и, соответственно передаваемой по волокну оптической мощности, при изменении сопротивления нагрузки. Реализация указанного алгоритма управления позволяет снизить паразитную (избыточную при текущем сопротивлении нагрузки) передаваемую мощность оптического излучения, что с одной стороны уменьшает энергопотребление лазерного диода, с другой стороны обеспечивает минимальный перегрев вторичного фотоэлектрического преобразователя и минимизирует потери энергии на его охлаждение при использовании вентилятора обдува. Таким образом, реализуются две цели: обеспечивается минимально необходимый для работы вторичных устройств уровень электропитания и достигается максимально возможный коэффициент полезного действия всей системы электроснабжения. Третья цель – достижение минимально возможного времени регулирования достигается путем выбора оптимального, в общем случае переменного, шага регулирования.

Структурная схема цифрового двойника системы автоматического регулирования, смоделированная в пакете прикладных программ MATLAB Simulink, представлена на рис. 3.1. Она состоит из блоков: расчета производной «delta_P» и «delta_Pff», регулятора «Set of rules», лазерного диода «Laser diode», фотоэлектрического преобразователя «Photovoltaic convertor» и нагрузки «Load». В системе имеются две цепи обратной связи: первая - с выхода регулятора электрической мощности лазерного диода P_{el_Ld} через верхний (по рисунку) дифференциатор подает сигнал (производную) ΔP на вход регулятора, вторая обратная связь проходит выхода ФЭП через нижний (по рисунку) дифференциатор подает сигнал (производную КПД) ΔP_{ff} на второй вход регулятора.

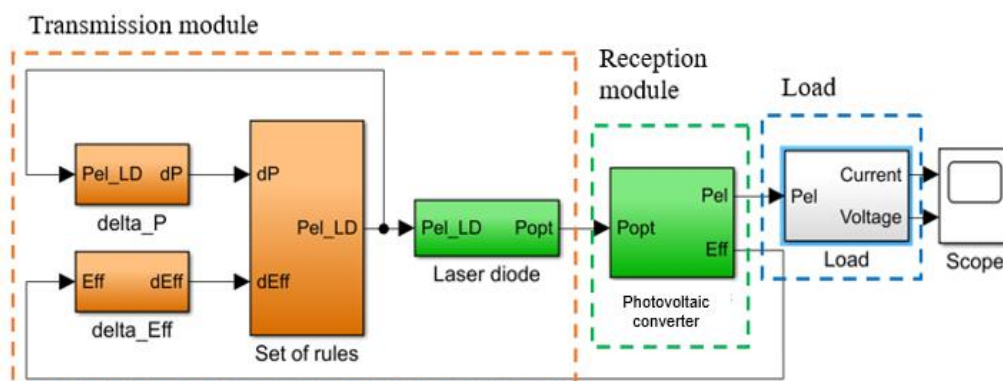


Рисунок 3.1 Структурная схема цифрового двойника системы электроснабжения с передачей энергии по оптическому волокну.

Наибольший вклад в КПД системы оказывают оптоэлектронные компоненты. Общее КПД системы PoF складывается из значений КПД лазерного диодного модуля, КПД фотоэлектрического преобразователя и затухания оптического сигнала в оптоволокну. В данной работе затухание оптоволокну не учитывается, так как исследования проводятся на малых (до 2м) расстояниях. Для модулей ЛД и ФЭП были исследованы входные и выходные параметры во всем рабочем диапазоне. Графики зависимости КПД от выходной оптической мощности ФЭП и ЛД представлены на рисунках 3.2 и 3.3:

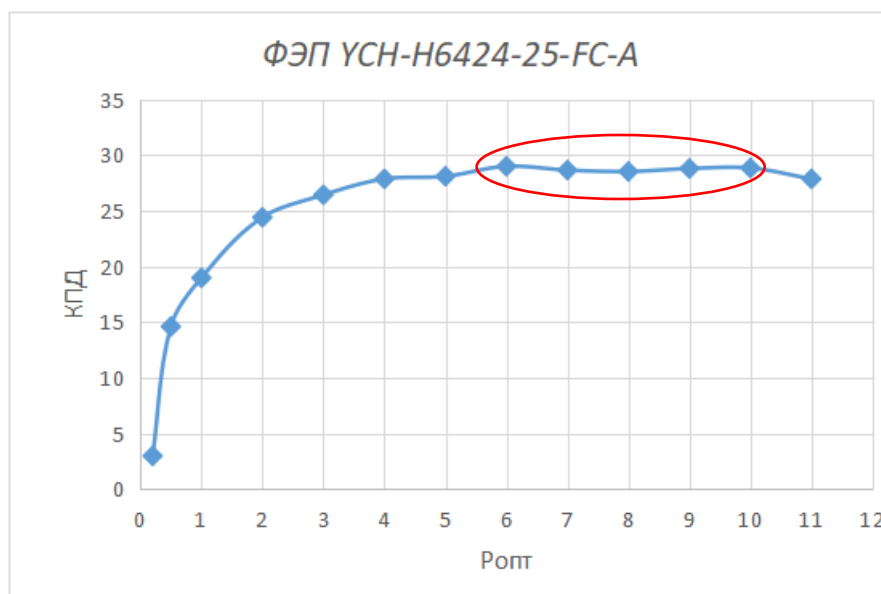


Рисунок 3.2 - График зависимости КПД от оптической мощности фотоэлектрического преобразователя YCH-H6424-25-FC-A

На графике зависимости КПД от входной оптической мощности для ФЭП YCH-H6424-25-FC-A (рисунок 3.2) минимальное и максимальное значение

мощности и КПД равны 6 Вт / 29%, и 10 Вт / 28% соответственно. Красной линией выделен диапазон оптимальных значений.

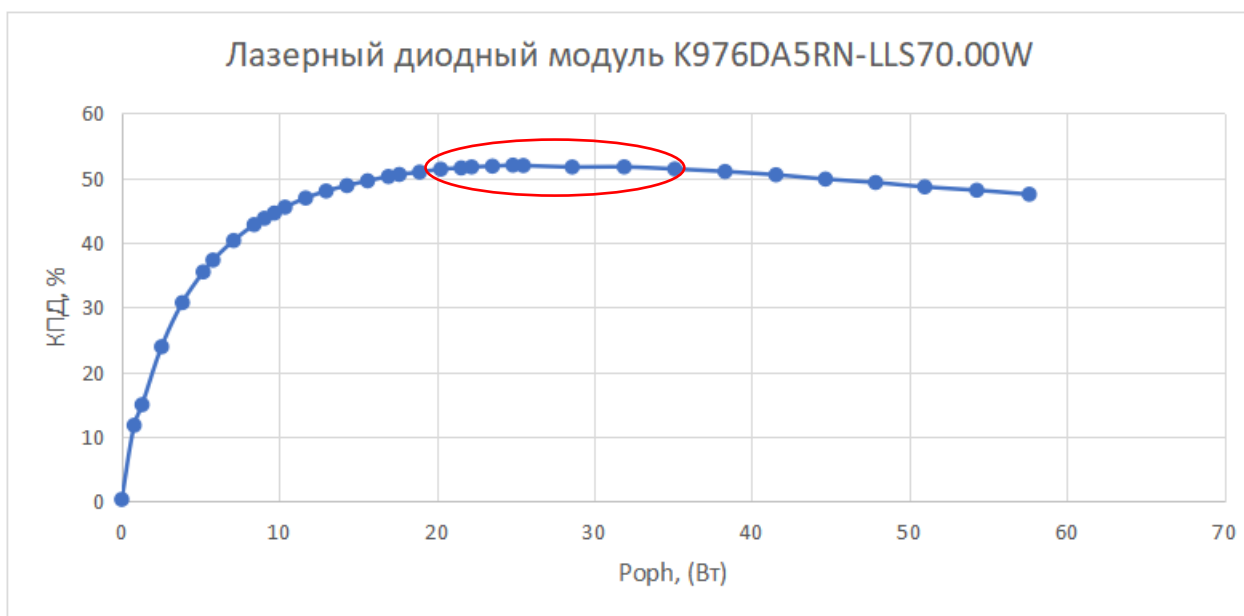


Рисунок 3.3 - График зависимости КПД от оптической мощности лазерного диодного модуля K976DA5RN-LLS70.00W

Из графика видно, что максимальное значение КПД достигает 51,9%.

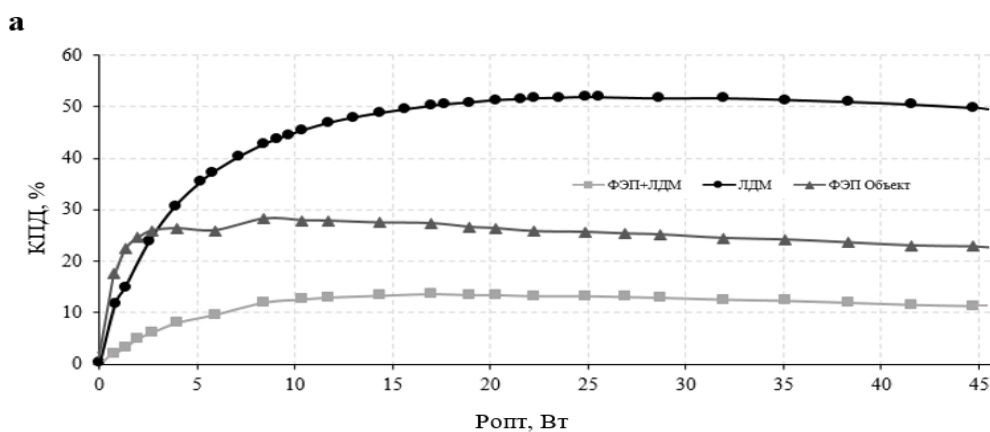


Рисунок 3.4 – зависимость КПД от оптической мощности ФЭП YCH-H6424-25-FC-A, ЛД K976DA5RN-LLS70.00W и суммарный вклад КПД ФЭП и ЛД

На рисунке 3.4 показан суммарный вклад фотоэлектрического преобразователя и лазерного диода в общую эффективность системы PoF. Следует отметить, что при использовании оптоэлектронных приборов с неоптимальным режимом работы (в данном случае, значений выходной и входной оптической мощности лазерного диодного модуля K976DA5RN-LLS70.00W и

фотоэлектрического преобразователя YCH-H6424-25-FC-A соответственно) приведёт к значительному уменьшению (6,7% вместо 14,4-15%) эффективности (КПД) всей системы PoF. Для поддержания оптимальной оптической мощности в системе PoF необходимо использовать алгоритм обратной связи, который будет определять значение выходной оптической мощности лазерного диода в любой момент времени с учетом потребляемой энергии в системе.

3.2. Алгоритм нахождения оптической мощности.

Для максимизации эффективности работы системы энергоснабжения по оптическому волокну необходимо автоматически в режиме реального времени отслеживать точку максимальной мощности [95]. Точка максимальной мощности – это та точка на кривой зависимости выходной мощности от напряжения, в которой мощность достигает максимального значения. Нахождение этой точки позволяет определить оптимальный режим работы системы, обеспечивая максимальную эффективность ее функционирования. Алгоритмы для нахождения точки максимальной мощности используются в различных областях [97,98], где важна оптимизация потребления энергии, таких как солнечная и ветровая энергетика, электромобили, и др.

Промоделируем работу алгоритма для нашей модели, а также опишем принцип его работы. Начнем с построения структурной схемы (см. Рисунок 3.5)

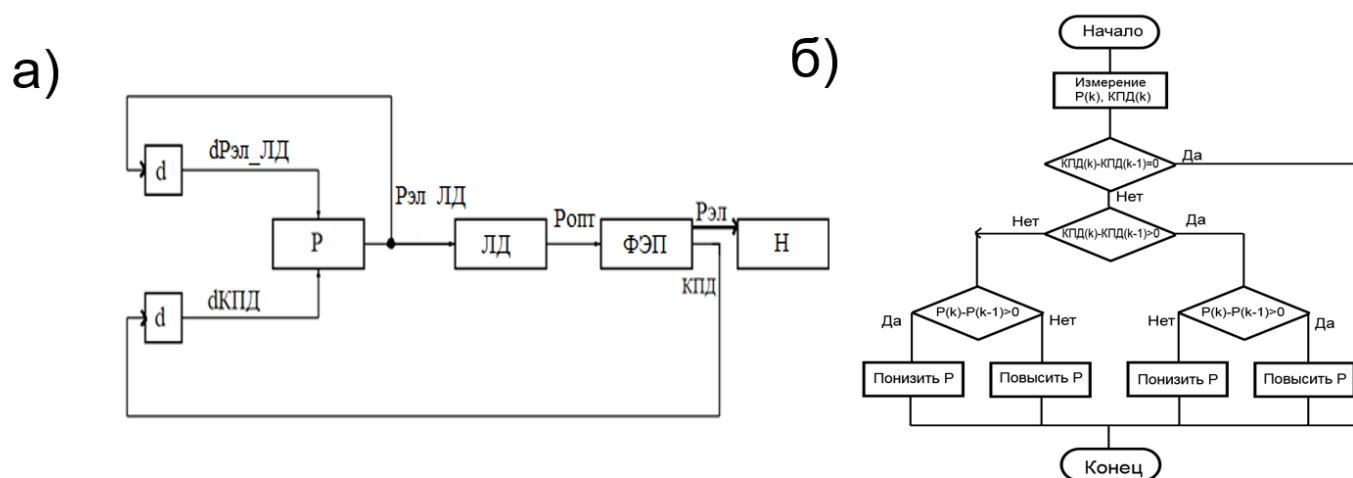


Рисунок 3.5 – а) Структурная схема модели б) алгоритм нахождения точки максимальной оптической мощности
Введем некоторые обозначения для понимания схемы:

- Блок “d” для “Рэл” – блок разности, описывающий выражение (3.1).

$$dP_{эл} = dP_{эл}(t) - dP_{эл}(t - 1) \quad (3.1)$$

- Блок “d” для “КПД” – блок разности, описывающий выражение (3.2).

$$dKПД = dKПД(t) - dKПД(t - 1) \quad (3.2)$$

- Блок “Р” – регулятор, который на основе изменений параметров, приведенных выше, выдает нужную мощность.
- Блок “ЛД” – лазерный диод, выдающий оптическую мощность на ФЭП.
- Блок “ФЭП” – фотоэлектрический преобразователь, преобразующий оптическую мощность в электрическую.
- Блок “Н” – нагрузка к ФЭП.

Напишем правила, по которым работает наш алгоритм:

- 1) Если “dРэл” > 0 и “dКПД” > 0, то “Рэл”↑
- 2) Если “dРэл” < 0 и “dКПД” > 0, то “Рэл”↓
- 3) Если “dРэл” > 0 и “dКПД” < 0, то “Рэл”↓
- 4) Если “dРэл” < 0 и “dКПД” < 0, то “Рэл”↑

Отообразим данные правила наглядно: каждая область, показанная на графике, соответствует номеру правила (см. Рисунок 3.6)

Алгоритм работы системы регулирования является поисковым. Входными переменными являются генерируемая оптическая мощность лазерного диода и КПД фотоэлектрического преобразователя. Функция оптимизации предполагает одновременное обращение в ноль двух производных по передаваемой оптической мощности, взятых при изменении сопротивления нагрузки: электрической мощности лазерного диода $\frac{d(P_{эл(ЛД)})}{d(P_{опт})} = 0$ и КПД фотоэлектрического преобразователя $\frac{d(КПД)}{d(P_{опт})} = 0$ при обеспечении необходимого уровня электрической мощности Рэл питания изменяющейся по времени нагрузки «Load».

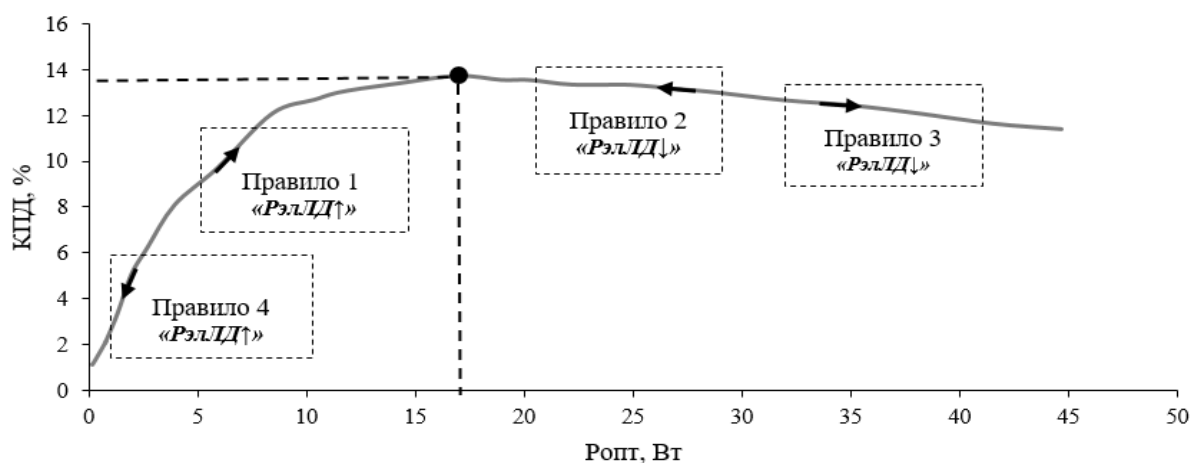
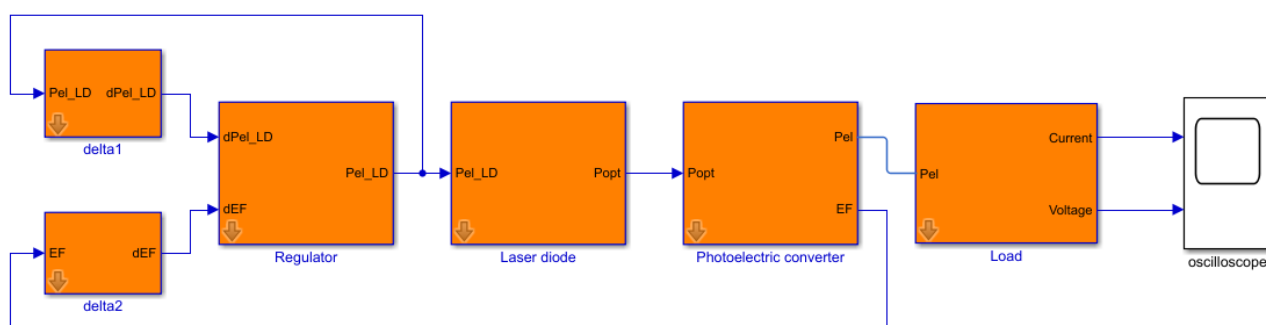
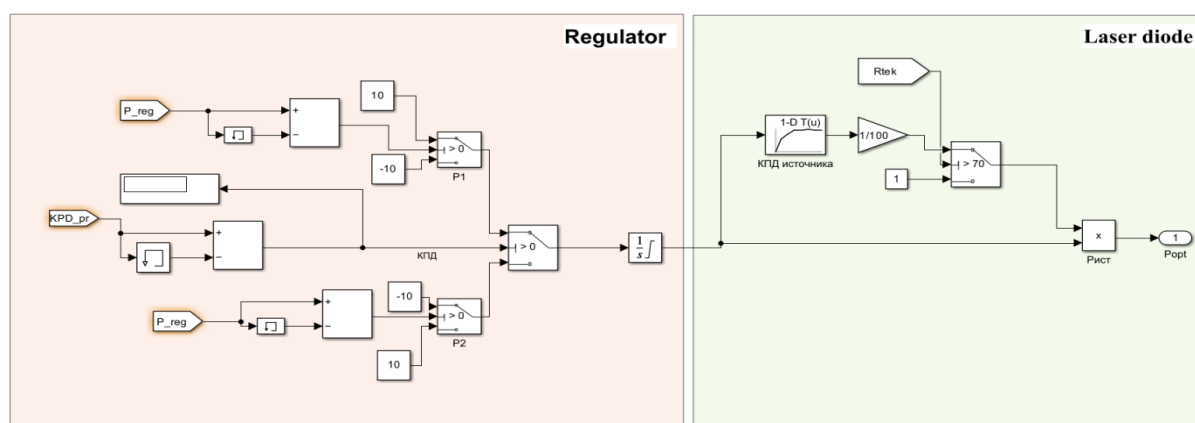


Рисунок 3.6 – Пояснения работы алгоритма: зависимость КПД от оптической мощности на выходе лазерного диода R_{opt}

На рисунке 3.7 показана модель данного алгоритма, интегрированная в модель ФЭП и реализация алгоритма поиска точки максимальной мощности



а)



б)

Рисунок 3.7 – а) модель ФЭП с интегрированной в неё моделью алгоритма нахождения точки максимальной оптической мощности

б) внутренняя структура алгоритма поиска точки максимальной мощности

Область Regulator

- Блоки разности, описывающие выражения для “EF”(efficiency factor – КПД) (4) и “Pel_LD” лазерного диода (3) (см. Рисунок 3.8).

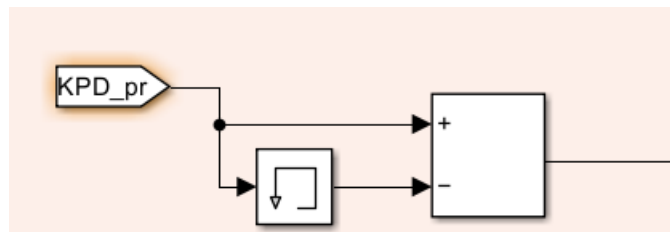
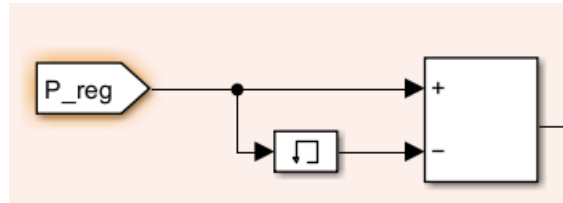


Рисунок 3.8 – Детальные модели блоков разности

- Блок, реализующий правила, описанные выше (см. Рисунок 3.9).

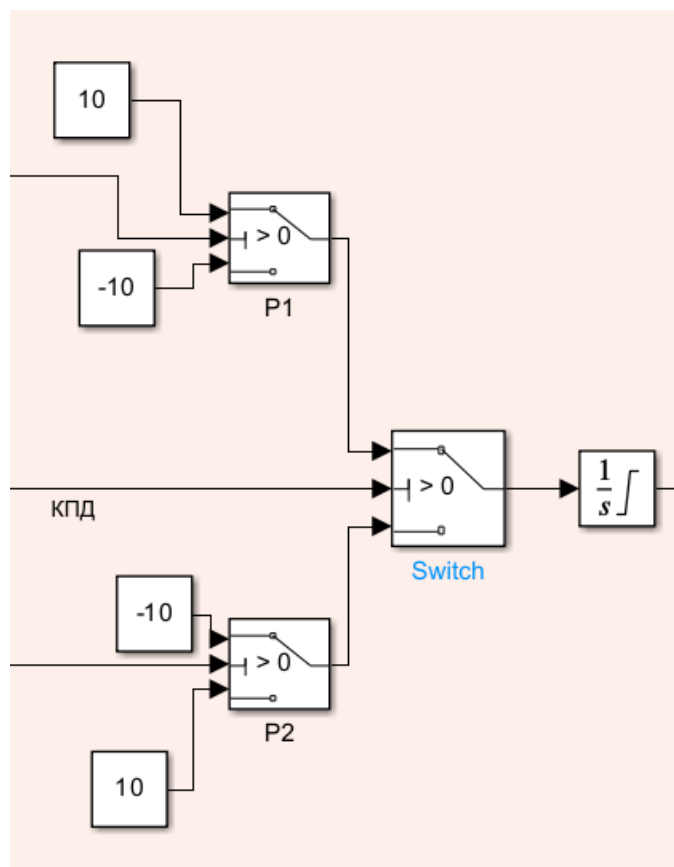


Рисунок 3.9 – Детальная модель блока правил

Область Laser diode

Область модели лазерного диода, подающего оптическую мощность на ФЭП (см. Рисунок 3.10).

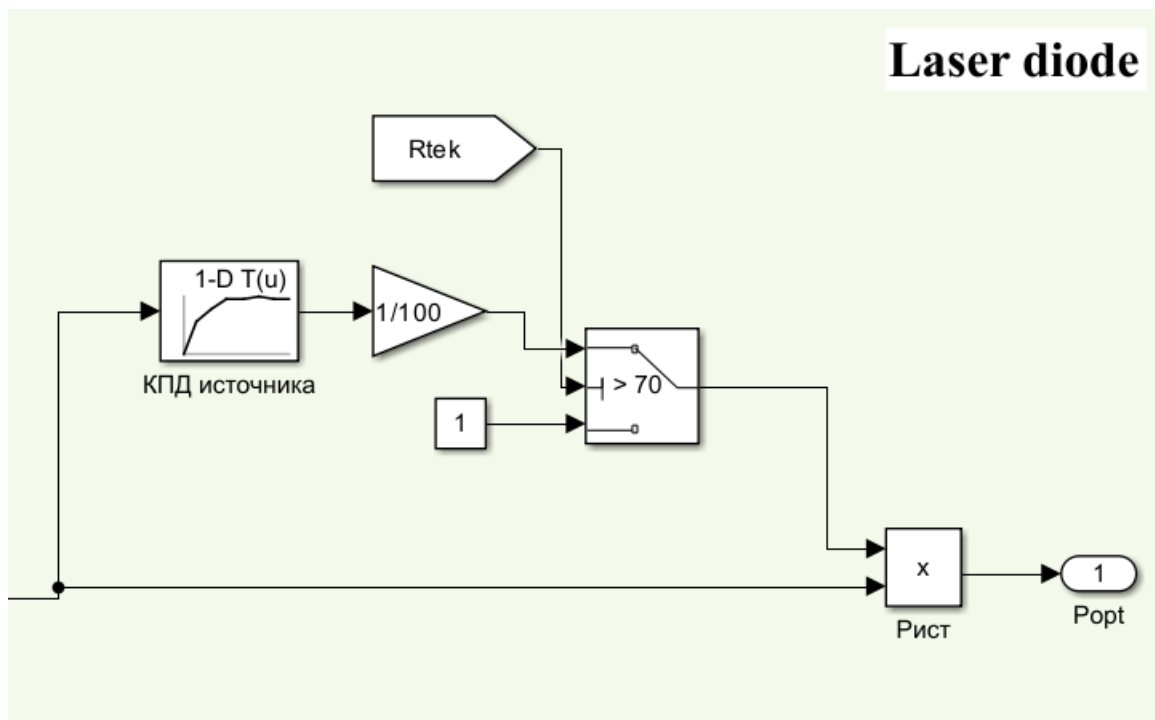


Рисунок 3.10 – Детальная модель области “Laser diode”

Rtek – сопротивление, которое выставлено на нагрузке в данный момент времени

ЛД – лазерный диод.

Зададим правило, по которому будет работать данная область: если “Rtek” > 70 Ом, тогда берутся значения КПД источника ЛД из таблицы, перемноженное на электрическую мощность, подаваемую на ЛД, иначе принимаем значение КПД ЛД за 1 и перемножаем на электрическую мощность, подаваемую на ЛД. Данные значения получены экспериментальным путем. На выходе модель выдает значение оптической мощности.

3.3. Моделирование работы алгоритма нахождения оптической мощности.

Промоделируем работу всей системы и покажем зависимости общего КПД системы, состоящего из КПД лазерного диода, полученного на реальном лазерном диоде, используемом в системе PoF, и КПД ФЭП, от оптической мощности (см. Рисунок 3.11) и оптимального сопротивления (см. Рисунок 3.12).

Значения, полученные в ходе моделирования, покажем в сравнении со значениями реального объекта (см. Таблица 3.1).

Таблица 3.1– Значения КПД системы PoF модели и реального

Ропт, Вт	Модель				Реальный объект			
	Ропт, Ом	КПД_ЛД, %	КПД_ФЭП, %	КПД_PoF, %	Ропт, Ом	КПД_ЛД, %	КПД_ФЭП, %	КПД_PoF, %
0,759	1497	11,7899	31,47	3,7102	2596	11,7899	17,54	2,06
1,328	852	14,9699	31,38	4,6975	1033	14,9699	22,44	3,36
1,96	575	16,5342	31,27	5,1702	731	16,5342	24,55	4,05
2,676	419	23,9196	31,12	7,4437	521	23,9196	25,91	6,19
3,954	281	30,7433	30,85	9,4843	298	30,7433	26,35	8,10
5,5	200	37,31096	30,54	11,3947	208	37,31096	29,60	11,04
5,9	186	38,11096	30,47	11,6124	198	38,11096	29,15	11,11
6,3	174	38,67	30,43	11,7672	180	38,67	29,75	11,50
7,5	145	40,3299	30,2	12,1796	154	40,3299	29,72	11,98
8,42	128	42,7846	29,93	12,8054	146	42,7846	28,22	12,07
10,38	103	45,4819	29,61	13,4671	116	45,4819	27,89	12,68
11,69	90,5	46,9009	29,38	13,7794	102	46,9009	27,8077	13,0421
14,31	72,7	48,8203	28,87	14,0944	84,4	48,8203	27,4623	13,4071
16,94	60,3	50,2214	28,37	14,2478	68,3	50,2214	27,3365	13,7288
18,92	53,3	50,9018	27,97	14,2372	64,3	50,9018	26,6226	13,5514
20,26	49,3	51,3495	27,71	14,2289	58	51,3495	26,3722	13,5420
22,22	44,3	51,6994	27,34	14,1346	50,8	51,6994	25,8068	13,3419
24,84	38,9	51,9720	26,83	13,9441	48,5	51,9720	25,6540	13,3329
26,85	35,5	51,9147	26,43	13,7211	44,9	51,9147	25,3622	13,1667
28,69	32,8	51,6935	26,06	13,4713	41,7	51,6935	25,1751	13,0139
31,9	28,8	51,7070	25,43	13,1491	36,6	51,7070	24,4932	12,6647
35,1	25,5	51,3862	24,83	12,7592	34,7	51,3862	24,1961	12,4335
38,3	22,8	50,9923	24,2	12,3401	31	50,9923	23,6531	12,0613
41,53	20,5	50,4827	23,57	11,8988	28,2	50,4827	23,0595	11,6411
44,67	18,6	49,8257	22,94	11,4300	26,9	49,8257	22,8803	11,4003

С добавлением поправочного коэффициента к значению “IL” удалось добиться улучшения результатов. Значения с учетом поправочных действий приведены в Таб. 8.

Таблица 3.2 – Значения КПД системы PoF модели и реального объекта с поправочным коэффициентом

Ропт, Вт	Модель				Реальный объект			
	Ропт, Ом	КПД_ЛД, %	КПД_ФЭП, %	КПД_PoF, %	Ропт, Ом	КПД_ЛД, %	КПД_ФЭП, %	КПД_PoF, %
0,759	2612	11,7899	18,11	2,13	2596	11,7899	17,54	2,06
1,328	1103	14,9699	24,34	3,64	1033	14,9699	22,44	3,36
1,96	687	16,5342	26,27	4,34	731	16,5342	24,55	4,05
2,676	484	23,9196	27,08	6,47	521	23,9196	25,91	6,19
3,954	310	30,7433	28,13	8,64	298	30,7433	26,35	8,10
5,5	206,7	37,31096	29,7	11,08	208	37,31096	29,60	11,04
5,9	192,2	38,11096	29,63	11,29	198	38,11096	29,15	11,11
6,3	179,6	38,67	29,56	11,43	180	38,67	29,75	11,50
7,5	149,7	40,3299	29,34	11,83	154	40,3299	29,72	11,98
8,42	132,6	42,7846	29,17	12,48	146	42,7846	28,22	12,07
10,38	106,3	45,4819	28,8	13,09	116	45,4819	27,89	12,68
11,69	93,5	46,9009	28,56	13,39	102	46,9009	27,80	13,04
14,31	75,2	48,8203	28,08	13,70	84,4	48,8203	27,46	13,40
16,94	62,4	50,2214	27,61	13,86	68,3	50,2214	27,33	13,72
18,92	55,1	50,9018	27,24	13,86	64,3	50,9018	26,62	13,55
20,26	51	51,3495	27	13,86	58	51,3495	26,37	13,54
22,22	45,9	51,6994	26,65	13,77	50,8	51,6994	25,80	13,34
24,84	40,3	51,9720	26,16	13,59	48,5	51,9720	25,65	13,33
26,85	36,8	51,9147	25,79	13,38	44,9	51,9147	25,36	13,16
28,69	34	51,6935	25,45	13,15	41,7	51,6935	25,17	13,01
31,9	28,8	51,7070	25,43	13,14	36,6	51,7070	24,49	12,66
35,1	25,5	51,3862	24,83	12,75	34,7	51,3862	24,19	12,43
38,3	22,8	50,9923	24,2	12,34	31	50,9923	23,65	12,06
41,53	20,5	50,4827	23,57	11,89	28,2	50,4827	23,05	11,64
44,67	18,6	49,8257	22,94	11,43	26,9	49,8257	22,88	11,40

результаты моделирования показаны на графиках:

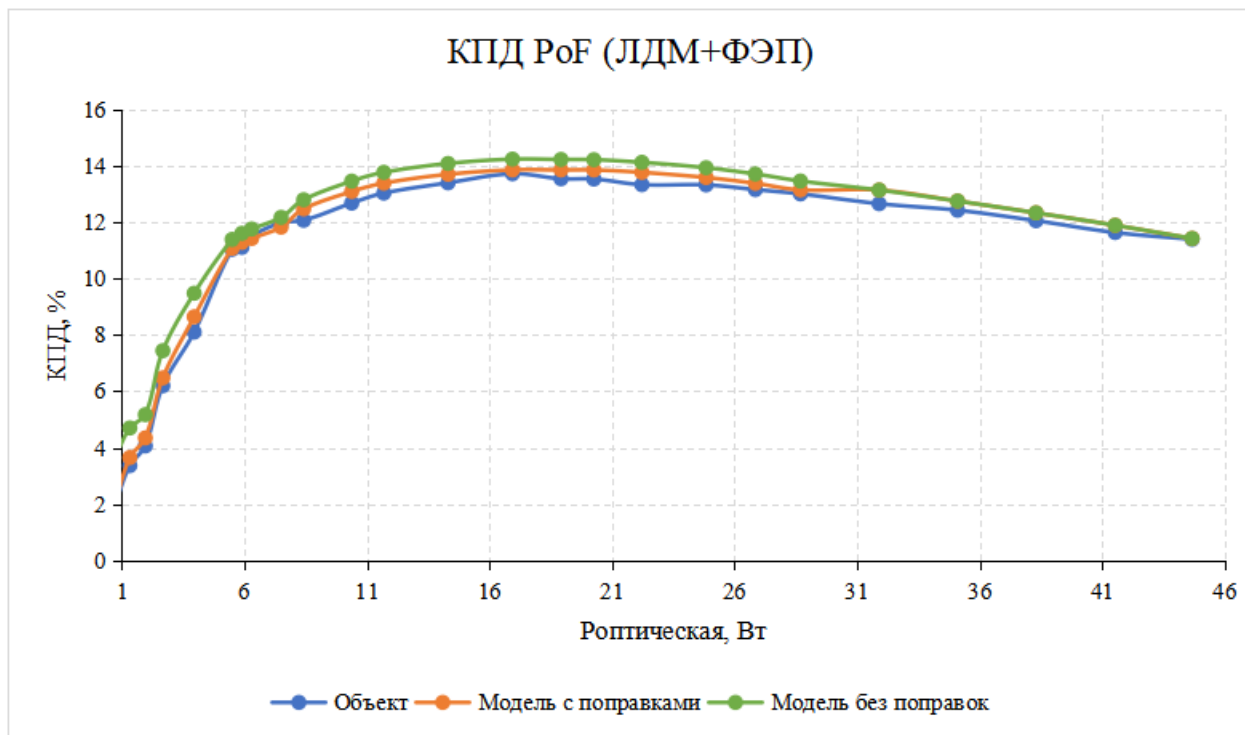


Рисунок 3.11 – Зависимость КПД PoF от оптической мощности

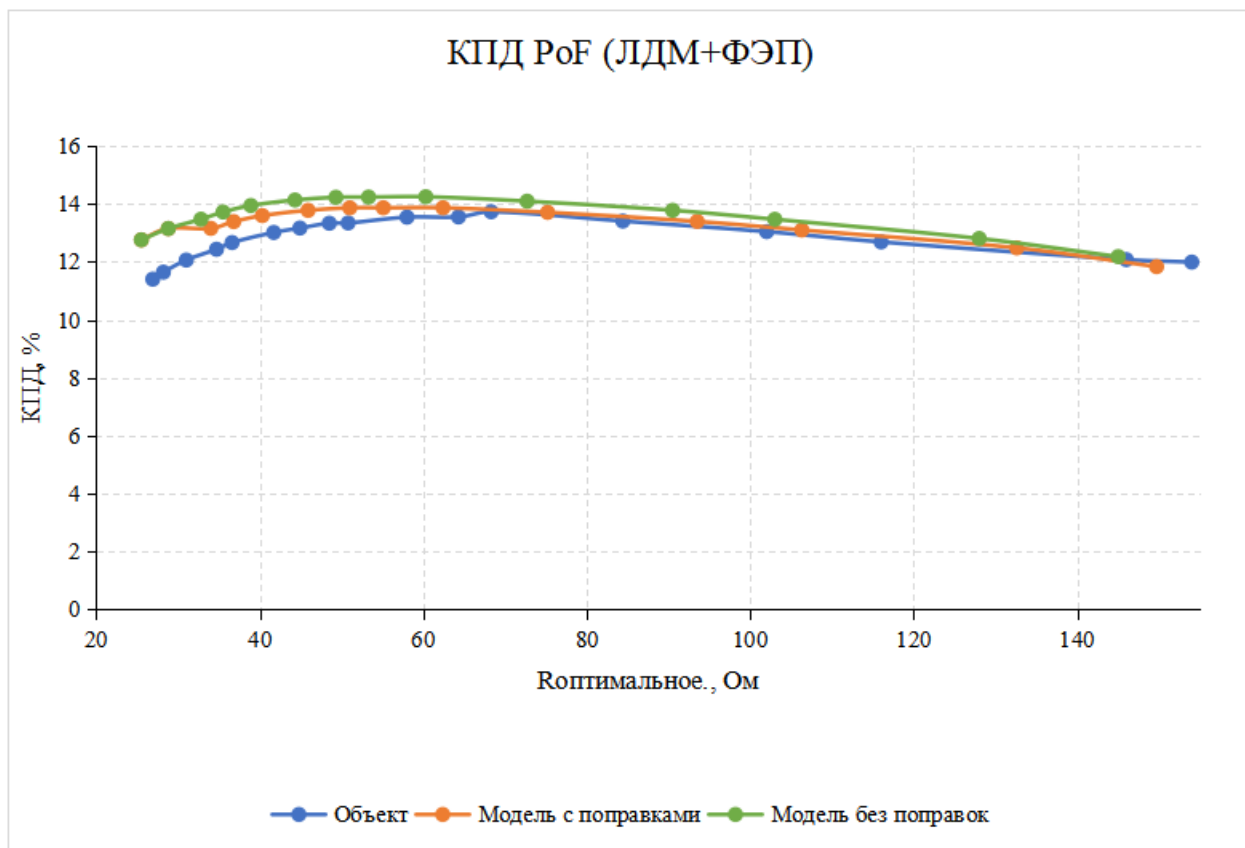


Рисунок 3.12 – Зависимость КПД PoF от оптимального сопротивления в диапазоне 20-150 Ом

Далее продемонстрируем работу алгоритма на графиках модели, сопоставив график изменения оптимального сопротивления случайным образом и график изменения КПД (см. Рисунок 3.13) в зависимости от изменения оптимального сопротивления (см. Рисунок 3.14):

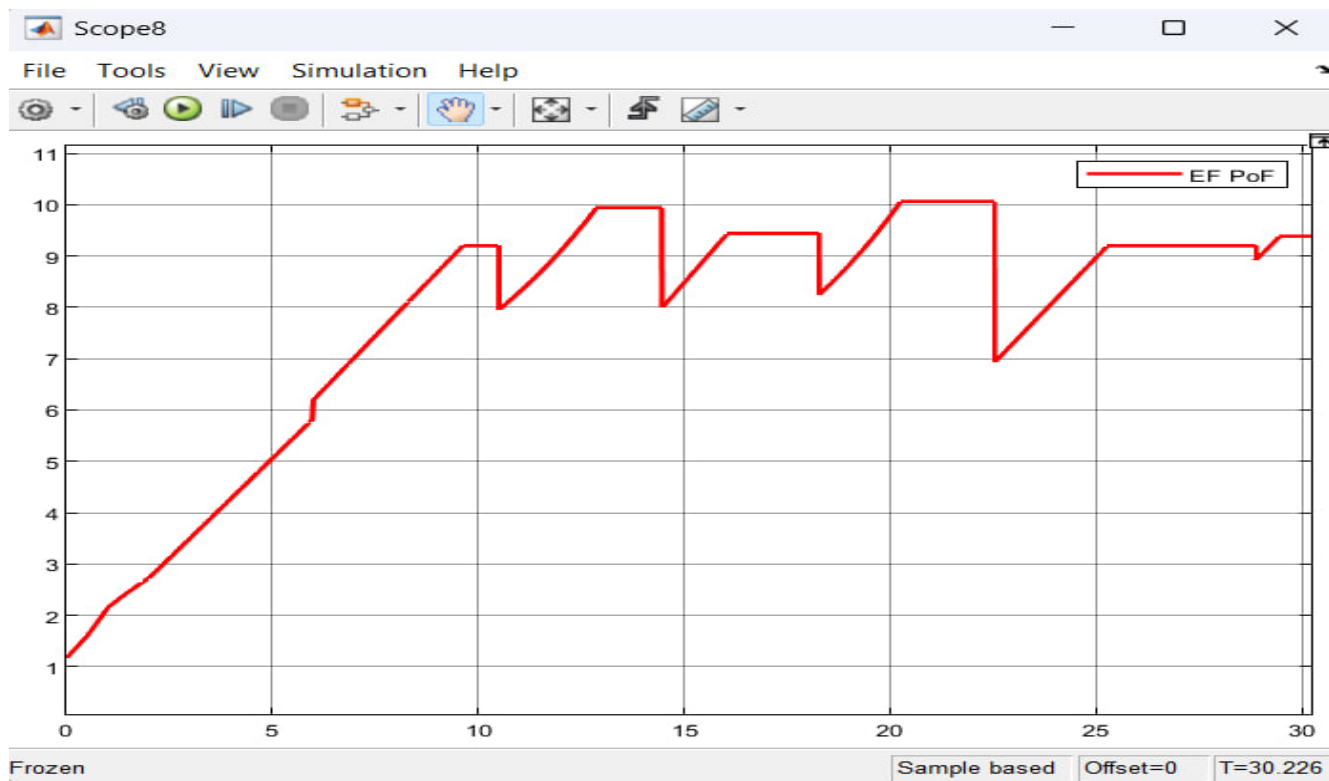


Рисунок 3.13 – График изменения КПД с использованием алгоритма в зависимости от изменения оптимального сопротивления

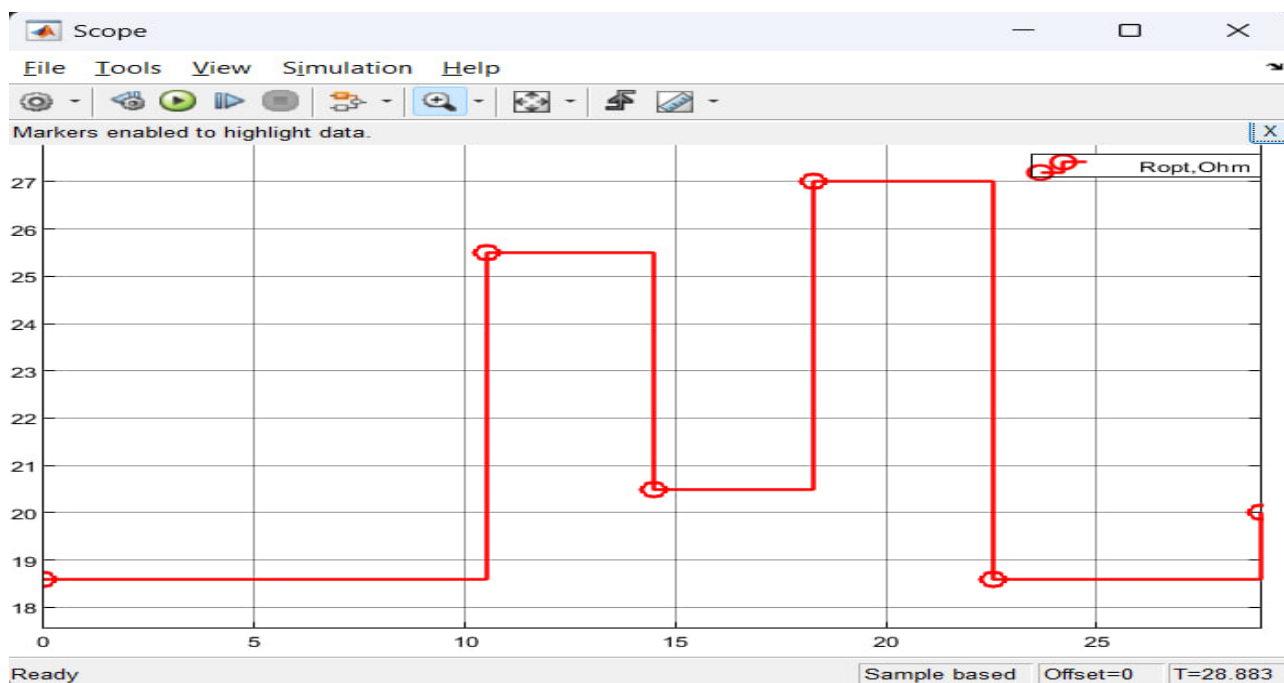


Рисунок 3.14 – График изменения оптимального сопротивления случайным образом

3.4. Алгоритм нахождения оптической мощности с ШИМ сигналом

Для работы в области низких значений мощности оптических компонентов (от 1 до 15 Вт) (см. рисунок 3.15) алгоритм поиска оптимальной мощности требует доработок. Необходимо добавить в режим работы лазерного диода широтно-импульсную модуляцию. Применение ШИМ для управления мощностью ЛДМ на интервале повышенных сопротивлений позволит повысить КПД за счет перемещения точки оптимальной мощности лазерного диода и фотоэлектрического преобразователя в область максимальных значений эффективности данных оптических компонентов. Для сглаживания ШИМ сигнала мощности, которая поступает к потребителю, необходимо использовать электрическую емкость, которая позволит сгладить нежелательные пульсации в цепи полезной нагрузки, поддерживая максимальный КПД на данном рабочем участке системы.

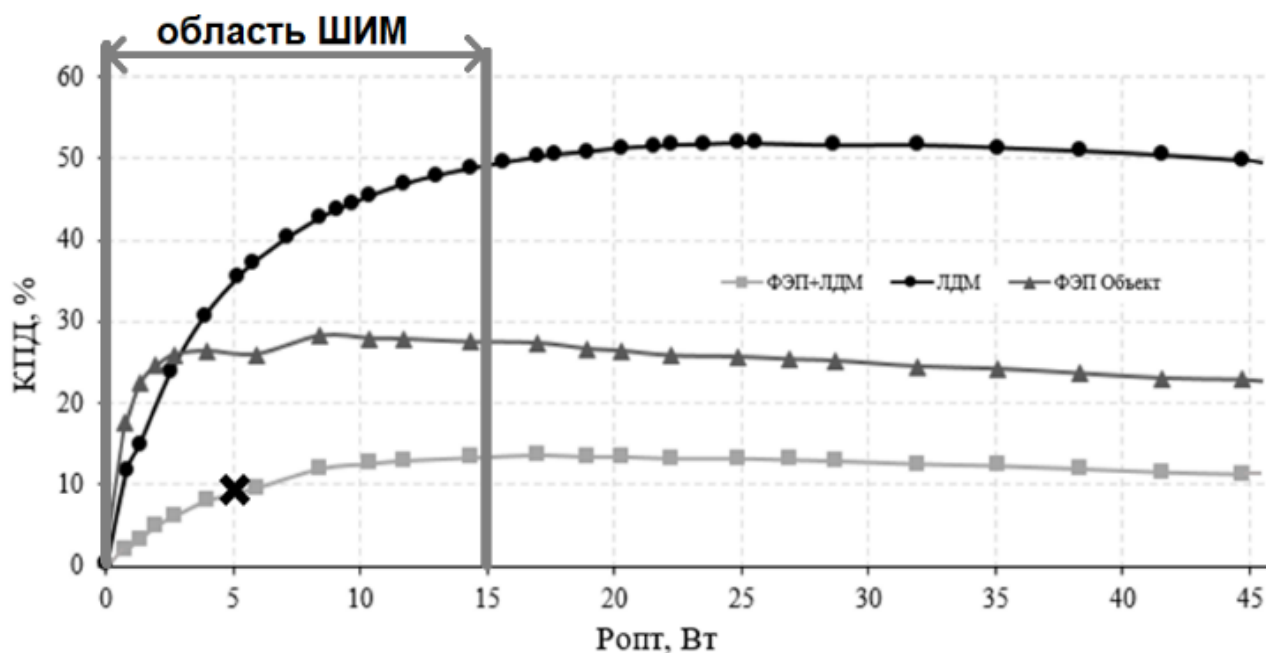


Рисунок 3.15.- Зависимость КПД компонентов RoF от оптической мощности: ФЭП объект, ЛДМ и ФЭП+ЛДМ. Х - значение, используемое для оценки работы ШИМ – 5 Вт (200 Ом)

На рисунке 3.16 Показана модель, реализующая алгоритма поиска точки максимальной мощности с добавлением ШИМ сигнала (блок PWM).

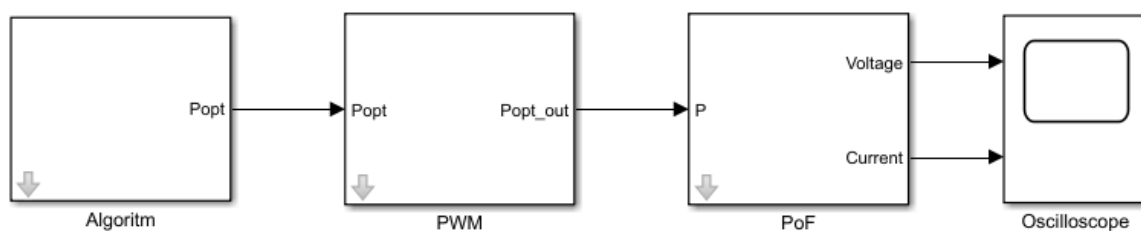


Рисунок 3.16 Алгоритма нахождения точки максимальной оптической мощности с ШИМ

Описание блока PWM (ШИМ сигнала)

Детальная модель блока PWM Показана на рисунке 3.17. Далее опишем правило, по которому будет работать ШИМ сигнала (R_{tek} – сопротивление, которое выставлено на нагрузке в данный момент времени):

Если “ R_{tek} ” > 70 Ом, тогда используется ШИМ для входящего сигнала (Рисунок 9), иначе подаем сигнал без ШИМ.

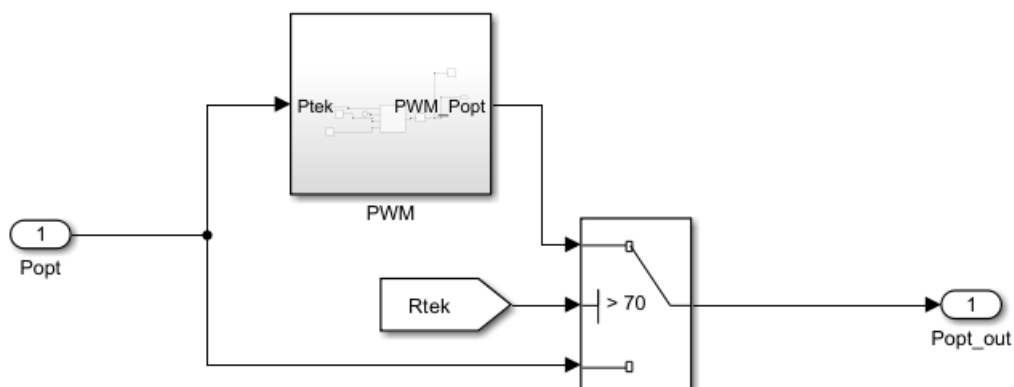
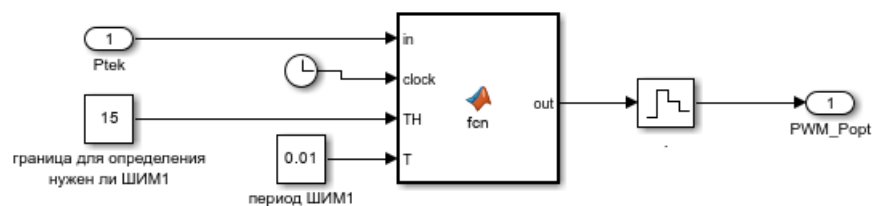


Рисунок 3.17 – Детальная модель блока PWM



```

MATLAB Function1
function out = fcn(in, clock, TH, T)
out=0;
if in>=TH
    out=in;
end

if in<TH
    if mod(clock,T)<((in/TH)*T)
        out=TH;
    end
    if mod(clock,T)>=((in/TH)*T)
        out=0;
    end
end
end

```

Рисунок 3.18 – Подблок PWM с листингом программы для реализации ШИМ сигнала

Область > 70 Ом эквивалентна области оптической мощности $P_{opt} < 15$ Вт

3.5. Моделирование алгоритма нахождения оптической мощности с ШИМ сигналом

Чтобы продемонстрировать работу алгоритма нахождения оптической мощности в широком диапазоне рабочих значений промоделируем работу системы для трех разных случаев:

1. Значение емкости 0.00001 Ф при сопротивлениях 18.6 , 60.3 и 204 Ом (Рис. 3.19);
2. Значение емкости 0.001 Ф при сопротивлениях 18.6 , 60.3 и 204 Ом (Рис. 3.20);
3. Значение емкости 0.1 Ф при сопротивлениях 18.6 , 60.3 и 204 Ом (Рис. 3.21).

Значение сопротивления 18.6 характеризует область высокой мощности, значение сопротивления 60.3 характеризует область средней мощности, значение сопротивления 204 Ом характеризует область малой мощности (область ШИМ)

Представим графики для всех случаев моделирования:

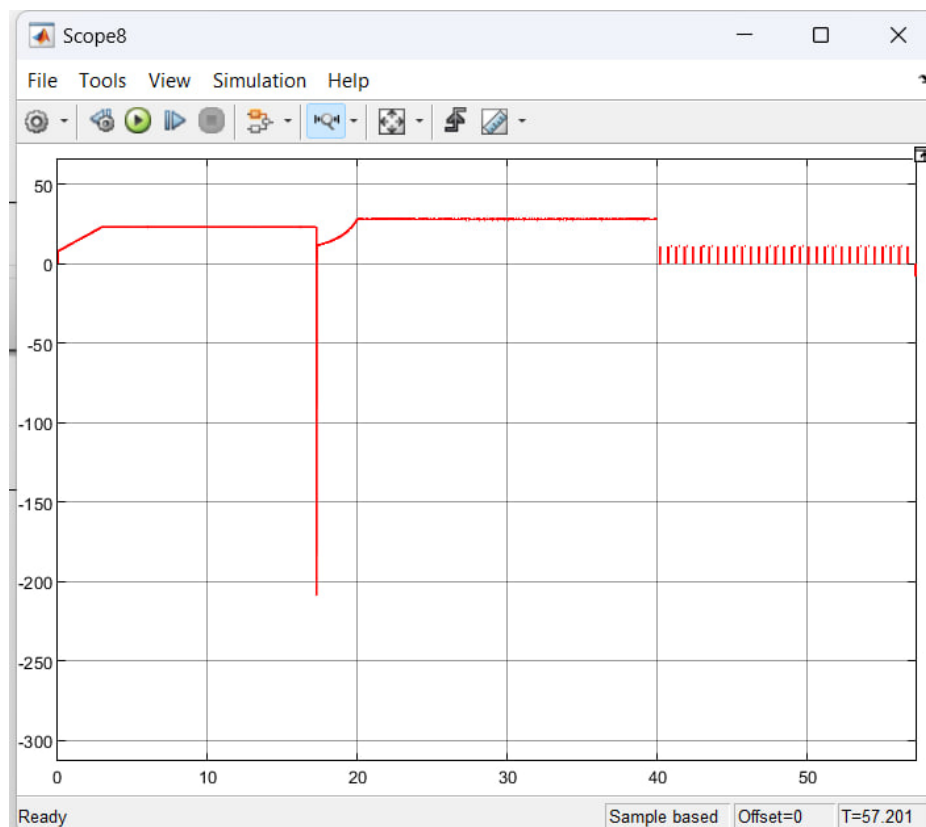


Рисунок 3.19 – График зависимости КПД от времени для $C = 0.00001$ Ф при различных сопротивлениях

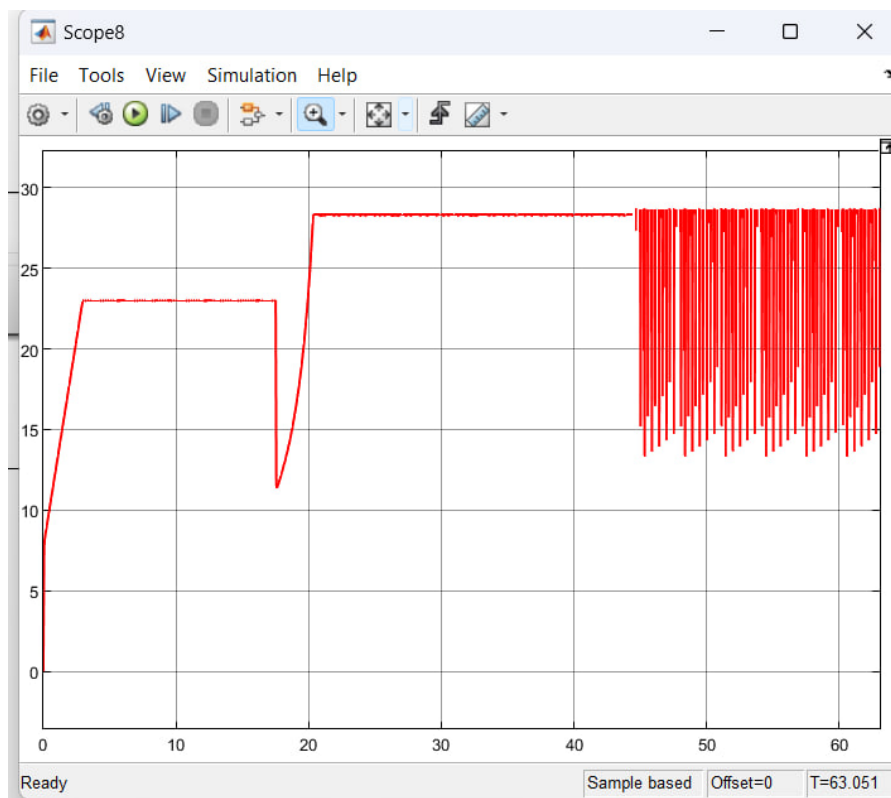


Рисунок 3.20 – График зависимости КПД от времени для $C = 0.001$ Ф при различных сопротивлениях

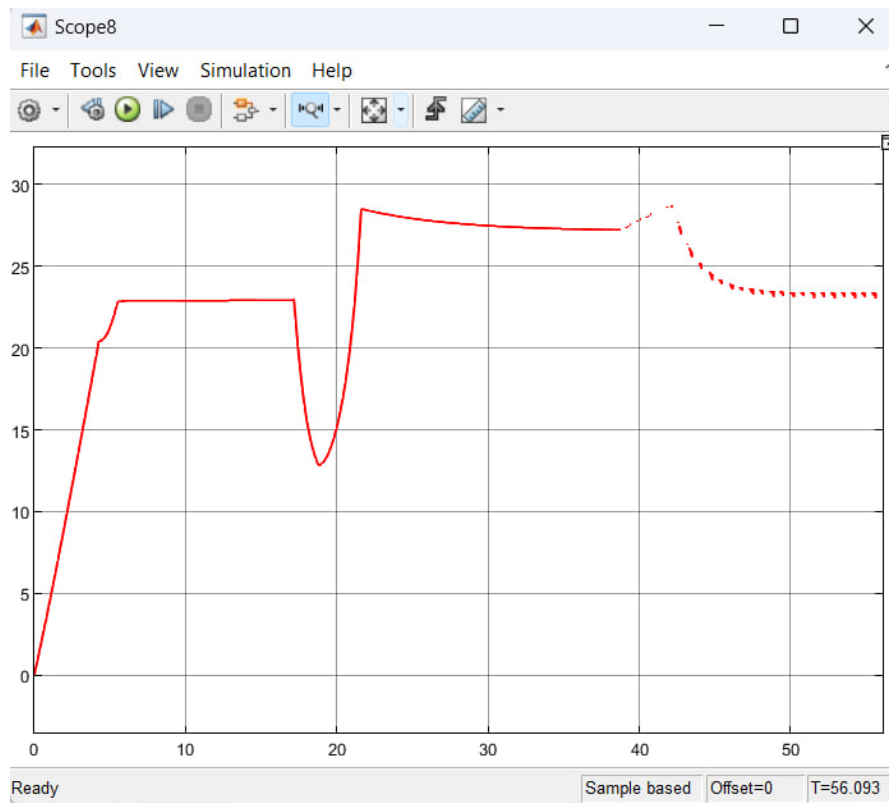


Рисунок 3.21– График зависимости КПД от времени для $C = 0.1$ Ф при различных сопротивлениях

Анализ графиков показывает, что при увеличении емкости конденсатора, увеличивается время переходного процесса, но при этом графики становятся более сглаженными без резких изменений выходных значений.

Дополнительно стоит акцентировать внимание на отработке алгоритма при разных сопротивлениях. Из графиков видно, что при смене сопротивления, КПД падает, значения $dKPD$ меньше нуля, алгоритм обрабатывает соответствующие значения и график КПД приходит к значению, соответствующее данному сопротивлению.

Также стоит отметить обрывистость графика в области малых мощностей, где сигнал проходит преобразование ШИМ. Причина такого поведения заключается в плохой фильтрации сигнала. В дальнейшем для моделирования данного процесса будет подобран подходящий фильтр.

3.6. Выводы по главе 3

В данной главе рассмотрена задача поиска оптимальной оптической мощности в системе PoF. В пакете прикладных программ MATLAB Simulink разработан новый алгоритм, который формирует управляющее воздействие на лазерный диод с помощью анализа значений производных электрической мощности лазерного диода и КПД фотоэлектрического преобразователя. Отличия полученных значений КПД модели от реального объекта в среднем не превышает 3%. Проведены исследования с переменным сопротивлением нагрузки системы PoF, которые подтверждают правильность работы предложенного алгоритма.

С целью увеличения КПД, предложено применение ШИМ для управления мощностью ЛД на интервале повышенных сопротивлений, при значениях оптической мощности до 15 Вт. Для сглаживания ШИМ сигнала мощности, которая поступает к потребителю, используется электрическая емкость. Результаты моделирования, показывают, что время нахождения оптимальной мощности и разброс КПД зависят от значения емкости.

Выработаны рекомендации по дальнейшему совершенствованию интеллектуальной системы электроснабжения с передачей энергии по оптическому волокну. Они предполагают: введение поправок в работу алгоритма в области малых сопротивлений нагрузки, уменьшения времени регулирования путем выбора переменного шага регулирования.

Полученные результаты, представленные в работах [100, 101], позволят в дальнейшем разработать адаптивный нелинейный регулятор для всей системы, который будет подбирать выходную оптическую мощность ЛД и режим системы охлаждения ЛД (0-100%) с учетом большого числа факторов, влияющих на работоспособность системы.

4. ПРОЕКТИРОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ МОДУЛЯ ФЭП С УЛУЧШЕННЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ

В главе рассматриваются основные элементы конструкции модуля фотоэлектрического преобразователя.

Показана взаимосвязь между равномерностью распределения оптического излучения на поверхности кристалла, затуханием излучения при прохождении конструкции гомогенизатора и общей эффективностью модуля ФЭП.

Проведено моделирование распространения и преобразования оптического излучения в элементах конструкции модуля фотоэлектрического преобразователя. Выполнена оптимизация конструкции гомогенизатора существующего модуля ФЭП и выполнен расчет оптимальной конструкции перспективного модуля ФЭП.

Описана конструкция устройства коррекции апертуры на входе модуля фотоэлектрического преобразователя на базе линзованного волокна.

Приведены конструкции модуля ФЭП с разъемным соединением и улучшенной конструкцией теплоотвода, на которые были получены патенты на изобретение и полезную модель соответственно.

4.1. Основные элементы конструкции ФЭП

На рисунке 4.1 представлена блок-схема системы электропитания с передачей энергии по оптическому волокну. Она состоит из: первичного преобразователя энергии (лазерного диода 1 и источника питания 2); оптического волновода 3 и вторичного преобразователя энергии (фотоэлектрического преобразователя 4 с сопротивлением нагрузки 5).

Модуль ФЭП является основным элементом технологии. К нему подсоединяется конец оптоволоконного кабеля, из которого выходит оптическое излучение. Затем оптическое излучение распределяется и попадает на кристалл фотоэлектрического преобразователя. Сам же кристалл является полупроводником, в котором посредством фотоэффекта происходит преобразование падающего оптического излучения в электрическую энергию. Эта энергия затем используется для питания электронного устройства или другого оборудования.

В ходе исследования ФЭП [61] было установлено, что для эффективной работы кристалл фотоэлектрического преобразователя необходимо равномерно освещать. Профиль излучения, распространяющегося в оптическом волноводе, обычно имеет форму гауссовой кривой. При этом в центре кристалла возникает локальный перегрев, что приводит к деградации его характеристик. Поэтому возникает необходимость использования гомогенизатора 6 для равномерного распределения интенсивности

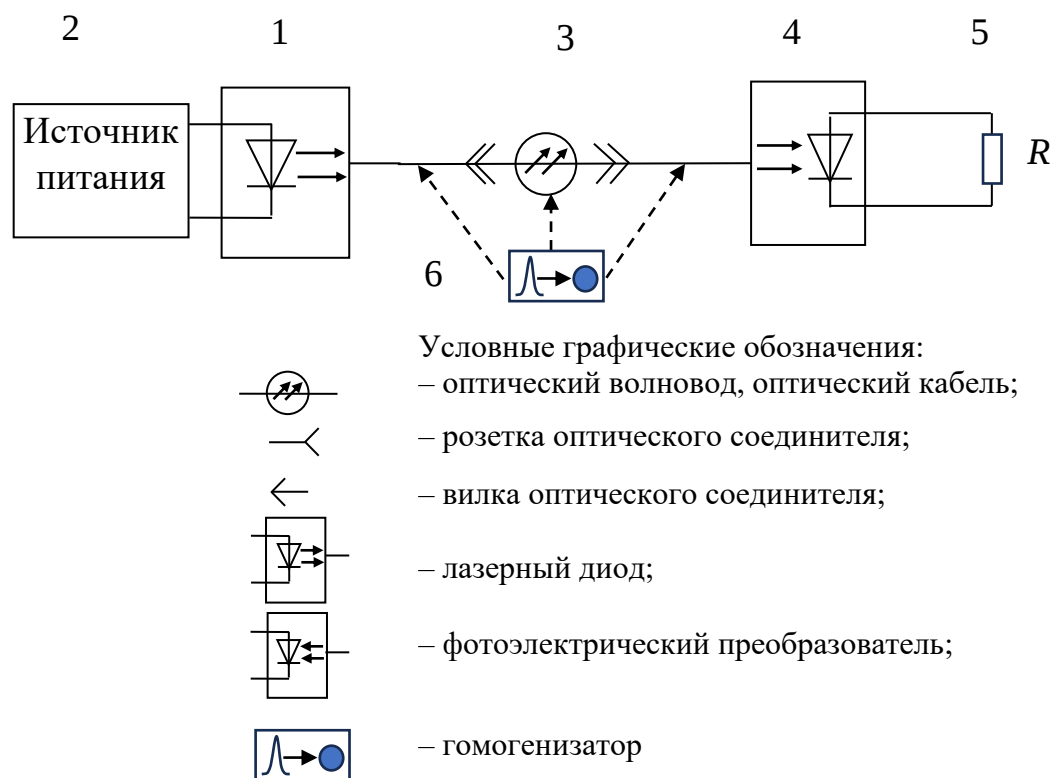


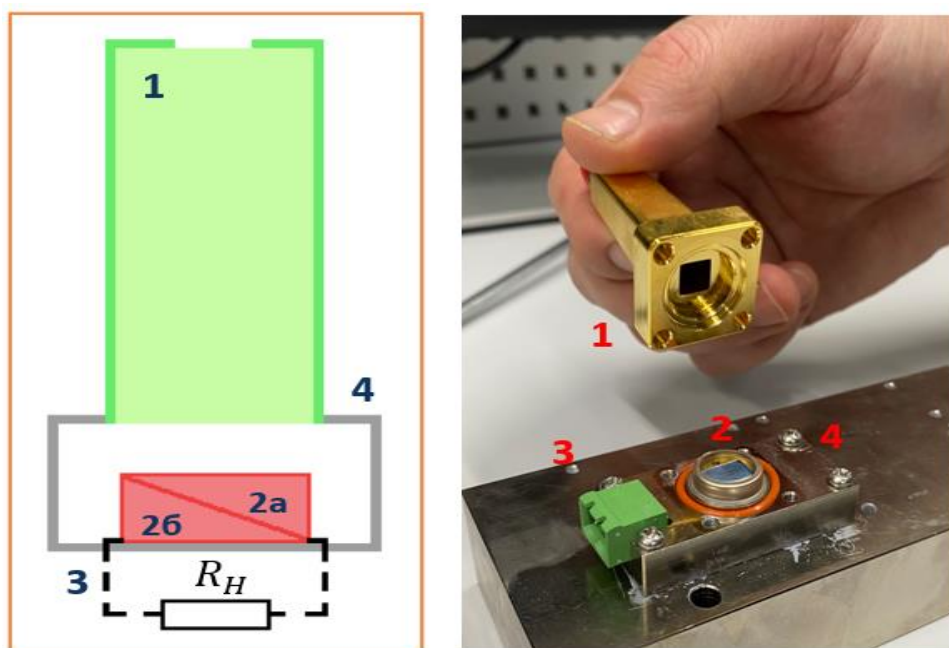
Рисунок 4.1. Блок-схема системы электроснабжения с передачей энергии по оптическому волокну

оптического излучения по поверхности кристалла преобразователя. На рис. 4.1 отмечены варианты размещения гомогенизатора: до или после оптического кабеля, а также само оптическое волокно может выполнять его функции. Используемое оптическое волокно с сердцевинной круглого сечения оптимизировано для передачи оптической энергии с минимальными потерями. Изготовление оптического волокна специальной формы, выполняющего функцию гомогенизатора, является отдельной сложной задачей. Его использование увеличит вносимые потери, что ограничивает длину линии оптической передачи, поэтому в настоящей работе этот вопрос не рассматривается. Расположение гомогенизатора между выходом лазерного диода и оптическим волноводом целесообразно при передаче больших оптических

мощностей, т.к. плотность потока излучения равномерно распределяется по сечению сердцевины оптического кабеля и позволяет передавать большие мощности вплоть до достижения напряженности электрического поля световой волны, соответствующей оптическому пробую. При меньших мощностях целесообразно располагать гомогенизатор после оптического кабеля. В этом случае он является распределителем приемной антенны и выполняет сразу две функции: формирует равномерный поток оптического излучения и создает световое пятно, максимально точно соответствующее геометрическим размерам кристалла фотоэлектрического преобразователя. Следует отметить, что возможен вариант установки двух гомогенизаторов в системе электроснабжения до и после оптического кабеля. Однако, этот вариант имеет существенный недостаток – большие потери энергии в каждом из гомогенизаторов. Вероятно, подобная схема может быть использована при передаче предельных для выбранного сечения сердцевины оптического волокна оптических мощностей. При этом первый гомогенизатор будет выполнять основную функцию равномерного распределения потока мощности по сечению оптического волокна, а второй – обеспечит трансформацию светового потока оптического выхода круглого сечения сердцевины оптического волокна малого диаметра к световому пятну большого размера, совпадающего по форме и размерам с поверхностью кристалла фотоэлектрического преобразователя.

На сегодняшний день интерес к технологии передачи энергии в виде оптического излучения по оптическому кабелю достаточно высок. Он направлен на разработку собственных систем по преобразованию энергии по технологии PoF [13,102-106]. Как и любая другая, технология PoF кроме преимуществ имеет ряд недостатков. В основном было выявлено, что такие системы имеют низкий коэффициент полезного действия. В связи с чем, многие исследователи задаются вопросом, как увеличить эффективность преобразования оптической энергии. Было выявлено, что увеличение эффективности преобразования можно добиться путем увеличения мощности или длины волны лазерного излучения. Но в этом случае появляется ряд минусов, связанных с работой фотоэлектрического преобразователя. Исследователями [107-110] было замечено, что в процессе

работы модуля ФЭП, кристалл преобразователя энергии, подвергаясь воздействию оптического излучения, начинает нагреваться, и уменьшать выработку электроэнергии. Снижение эффективности прежде всего связано с зависимостью параметров материала кристалла ФЭП от температуры и деградации кристалла. Сама же деградация проявляется из-за неравномерности падающего оптического излучения на кристалл ФЭП [111].



а) б)
Рисунок 4.2 Основные элементы и процессы конструкции ФЭП а) упрощенная схема фотоэлектрический преобразователя с полезной нагрузкой б) фотография фотоэлектрического преобразователя в разобранном виде

На Рисунке 4.2 приведены упрощенная структурная схема фотоэлектрического преобразователя и фотография фотоэлектрического преобразователя в разобранном виде, числами обозначены основные функциональные узлы и физические процессы, происходящие в них:

1. Гомогенизатор: в данном узле происходит распространение лазерного излучения в оптически прозрачной среде (воздух);
2. Ячейка ФЭП – основной функциональный элемент фотоэлектрического преобразователя. Процессы:
 - а. Поглощение оптической энергии;
 - б. Преобразование оптической энергии в электрическую – **внутренний фотоэффект**;

3. Электрические контакты: передача электроэнергии потребителям (R_H);
4. Теплоотвод: утилизация тепловой энергии из модуля ФЭП;

С целью повышения эффективности работы ФЭП требуется провести оптимизацию режимов работы наиболее значимых функциональных узлов и компонентов модуля. Указанная задача является комплексной мультифизической. Для ее решения необходимо одновременное комбинационное использование законов полупроводниковой электроники, физики твердого тела, оптики и оптоэлектроники, а также теплотехники.

Таким образом, одновременное достижение оптимизации всех компонентов модуля является сложной задачей. Экспериментальные исследования приведут к большим затратам по времени и ресурсам, поэтому для оптимизации проектирования модуля ФЭП с улучшенными характеристиками в работе были использованы численные методы [112].

4.2. Моделирование гомогенизатора модуля ФЭП

Цель моделирования: определение оптимальных размеров гомогенизатора модуля фотоэлектрического преобразователя для получения равномерного распределения интенсивности с минимальными потерями. Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- Построить модель распределения оптического излучения в гомогенизаторе модуля ФЭП
- Произвести верификацию модели (сравнить рассчитанную интенсивность излучения с экспериментальными данными);
- Осуществить оптимизацию размеров гомогенизатора. При оптимизации важными параметрами являются:
 - Потери мощности (эффективность);
 - Равномерность распределения интенсивности (проверка производится по методике оценки качества пятна);
 - Массогабаритные параметры.

4.2.1 Математический аппарат

Для решения поставленной задачи требуется описать распределение интенсивности оптического излучения внутри модуля фотоэлектрического преобразователя. Внутри модуля происходит гомогенизация излучения, нагрев устройства из-за потерь энергии и, в добавок, различные химические явления. В рамках данного исследования рассмотрены оптические явления. Влияние остальных факторов при моделировании не учитывается в силу их малого вклада на конечный результат.

Для математического описания оптического излучения необходимо обратиться к основным физическим теориям, описывающим поведение световых волн. Идеальное описание распространения таких волн дано уравнениями Максвелла, однако их решение для конкретной оптической системы зачастую трудоемко и не всегда осуществимо. Поэтому, обычно применяются приближенные методы. Для моделирования оптических элементов и систем используются три основных подхода: методы геометрической оптики, скалярной теории дифракции и векторной теории дифракции. [113, 114]

В геометрической оптике описывается распространение волнового фронта с помощью лучей. Когерентные явления, дифракцию и поляризационные эффекты исключают из рассмотрения. При этом геометрическая оптика имеет приемлемую точность для большинства задач.

В поставленной задаче будут рассматриваться законы геометрической оптики, поскольку из-за их упрощения имеется возможность моделирования распространения света в системах, где размеры объектов значительно превышают длину волны.

Используемые формулы геометрической оптики выводятся из волновой оптики путем аппроксимации с помощью квазиклассического приближения. Описываемое излучение является монохроматическим, когерентным с длиной волны 0,975 мкм, т.е. длиной волны можно пренебречь. Для полностью отражающей среды с показателем преломления n , волновое уравнение имеет вид [113,114]:

$$\nabla^2 E_0 + n^2 k^2 E_0 = 0 \quad (1)$$

где $k = \frac{\omega}{c}$ – волновое число для вакуума; E_0 – вектор напряженности электромагнитного поля.

При помощи формулы логарифмического дифференцирования получаем:

$$\nabla^2 (\ln E_0) + [\nabla (\ln E_0)]^2 + n^2 k^2 = 0 \quad (2)$$

где, подставив $E_0 = e(r) \exp(jk\varphi(r))$, формула (2) преобразуется к виду:

$$[\nabla (\varphi(r))]^2 = n^2 \quad (3)$$

где r – радиус вектор точки луча.

Оптическая длина пути между точками P_1 и P_2 :

$$L = \int_{P_1}^{P_2} n ds \quad (4)$$

где s – геометрическая длина пути.

Дифференциальное уравнение световых лучей, используемое для описания траектории движения света, выводится из уравнения (3):

$$\frac{d}{ds} \left(n \frac{dr}{ds} \right) = \text{grad } n \quad (5)$$

- Граничные условия на поверхностях гомогенизатора:

Законы преломления (закон Снеллиуса) (6-7) и отражения (8) отвечают за изменение траектории движения луча при переходе через две разные среды

$$n_2 (n_{12} \times s_2) = n_1 (n_{12} \times s_1) \quad (6)$$

или

$$n_2 \sin \theta_{\text{прел}} = n_1 \sin \theta_{\text{пад}} \quad (7)$$

$$\theta_{\text{нал}} = \theta_{\text{отр}} \quad (8)$$

где, n_1 , n_2 – показатели преломления первой и второй среды, n_{12} – единичный вектор нормали к разделяющей поверхности, направленный из среды 1 в среду 2;

соответственно; $\theta_{пад}$, $\theta_{прел}$, $\theta_{отр}$ – углы падения, преломления и отражения, соответственно;

Также, на границах перехода двух сред имеется рассеивание энергии, определяемое коэффициентом отражения p :

$$p = \left(\frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \right)^2 \quad (9)$$

Граничные условия на поверхности полупроводникового кристалла:

излучение, попавшее на поверхность полупроводникового кристалла, поглощается по формуле:

$$I_{sum} = \frac{1}{V} \sum_{i=1}^N R_i \quad (10)$$

где I_{sum} – общая интенсивность излучения в одном элементе; V – объем элемента; N – кол-во лучей попадающих на элемент; R_i – интенсивность одного луча.

4.2.2. Распространение оптического излучения в среде по закону Гаусса

В работе, используется Гауссова форма распределения оптического излучения. Интенсивность оптического излучения задается формулой [37]:

$$I(x, y) = \frac{2P_0}{\pi w(z)^2} \exp \left(-2 \frac{x^2 + y^2}{w(z)^2} \right) \quad (11)$$

где: P_0 – общая мощность пучка; x , y – расстояние от центра пучка (координата); $w(z)$ – радиус лазерного пучка на расстоянии z от выхода лазера.

Для наглядности на рисунке 4.3 приведены основные параметры Гауссова пучка.

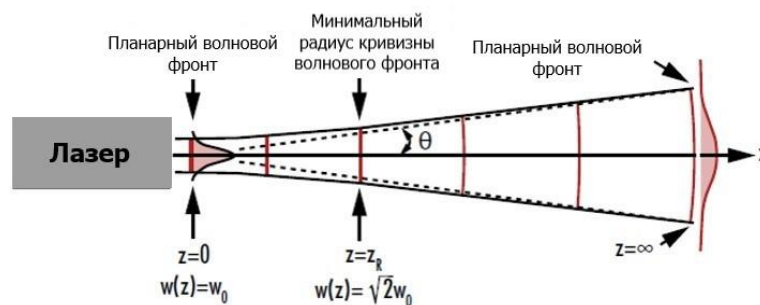


Рисунок 4.3 Гауссов пучок с основными параметрами

Радиус пучка $w(z)$ описывается следующим образом:

$$w(z) = w_0 \sqrt{1 + \left(\frac{z}{z_R} \right)^2} \quad (12)$$

где: z_R – диапазон Рэлея — это осевое расстояние от «тали» луча, при котором радиус увеличился в $\sqrt{2}$.

Диапазон Рэлея рассчитывается по формуле:

$$z_R = \frac{\pi w_0^2}{\lambda} \quad (13)$$

где λ – длина волны источника ОИ.

Выражение (12) может записываться в другом виде, в том случае если расстояние от лазера до излучаемой поверхности во много раз больше, чем диапазон Рэлея $|z| \gg z_R$:

$$w(z) = w_0 \sqrt{1 + \left(\frac{z}{z_R} \right)^2} \approx w_0 \frac{z}{z_R} \quad (14)$$

Луч приближается к биконической форме по мере увеличения расстояния z . Каждая из асимптот образует угол α с осью луча, где:

$$\alpha = \frac{\lambda}{\pi w_0} \quad (15)$$

где α - половина угла расходимости луча.

С учетом соотношений (12-14), формула (11) примет вид:

$$I(x, y) = \frac{2P_0}{\pi_0 \left(\frac{z\lambda}{\pi w_0} \right)^2} \exp \left(-2 \frac{x^2 + y^2}{\left(\frac{z\lambda}{\pi w_0} \right)^2} \right) \quad (16)$$

Значение интенсивности, возникающей на излучаемой поверхности, зависит от длины волны лазера λ , диаметра пучка на выходе из оптического волокна w_0 , мощности P_0 , расстояния, преодолеваемого лучом от оптического волокна до излучаемой поверхности z .

Также необходимо учесть потери при прохождении луча внутри среды, его интенсивность уменьшается по закону Бугера-Ламберта.

$$I = I_0 \exp[-\alpha_k x] \quad (17)$$

где $\alpha_k \equiv \frac{4\pi k}{\lambda_0}$ - коэффициент поглощения; x - расстояние поглощения; k - коэффициент экстинкции, зависит от материала.

4.2.3. Методика оптимизации с несколькими критериями

Искомые оптимальные параметры модуля ФЭП, должны удовлетворять нескольким критериям, которые могут быть конфликтующими или взаимозависимыми. За счет этого поиск оптимального решения существенно усложняется. Для решения задачи необходимо использовать методы многокритериальной оптимизации, которые позволят учесть одновременно все критерии.

Постановка многокритериальной задачи оптимизации выглядит следующим образом. [115, 116]

$$f(x) = (f_1(x), f_2(x), \dots, f_n(x)) \rightarrow \min_{x \in X}, \quad n \geq 2, \quad (17)$$

$f(x)$ векторный критерий, в котором хранятся частные критерии, определенные на множестве допустимых решений X . Каждый частный критерий является минимизируемым.

$$f_i(x) \rightarrow \min \quad (18)$$

Всем возможным решениям x из множества X , при многокритериальной оптимизации ставится в соответствие её векторная оценка. Поиск оптимального решения сводится к выбору оптимальной оценки из множества векторных оценок.

$$Y = f(X) = \{y \in R^n \mid y = f(x), x \in X\} \quad (19)$$

где R^n - критериальное, n -мерное пространство.

Множество эффективных оценок записывается множеством Парето:

$$P(Y) = \{y \in Y \mid p(y) = \emptyset\} \quad (20)$$

$$p(y) = \{y' \in Y \mid y' \leq y, y' \neq y\} \quad (21)$$

В таких задачах множество Парето обладает несколькими неоднородными результатами. Итоговый выбор результата проводится либо эвристически, либо с

использованием методов для нахождения паретовских оптимумов. К ним относится группа методов по сведению многокритериальной задачи к однокритериальной. В данном исследовании использовался метод свертки. Суть метода описывается следующим образом [117, 118].

$$\Lambda(X, f) \subseteq P(X, f) \quad (22)$$

$$\Lambda(Y) = \bigcup_{\lambda \in \Lambda_n} \Lambda(Y, \lambda), \quad \lambda = (\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n) \quad (23)$$

$$\Lambda_n = \left\{ \lambda \in R^n \mid \sum_{i=1}^n \lambda_i = 1, \lambda_i > 0, i \in N_n \right\} \quad (24)$$

$$\Lambda(Y, \lambda) = \arg \min \left\{ \sum_{i=1}^n \lambda_i y_i \mid y \in Y \right\} \quad (25)$$

где Λ – оптимальная оценка; λ – весовой коэффициент.

В совокупности метод Парето и линейная свертка предоставляют эффективный способ для проведения многокритериальной оптимизации, позволяя находить оптимальные решения в условиях наличия нескольких конфликтующих критериев.

4.2.4. Построение модели распределения оптического излучения в модуле ФЭП

Для создания модели, была отрисована 3D модель модуля ФЭП (рис. 4.3.а) и нанесена конечно-элементная сетка (рис. 4.3.б), для решения задачи методом конечного элемента. На рис. 4.3.в показано распределение оптического излучения в модуле ФЭП. ОИ выходит из оптоволокна (показано красной точкой), далее распространяется по траектории, указанной на рисунке. Здесь необходимо обратить внимание на «неиспользуемую область» при прохождении лучей внутри гомогенизатора. Этот факт в дальнейшем можно применить для оптимизации конструкции корпуса.

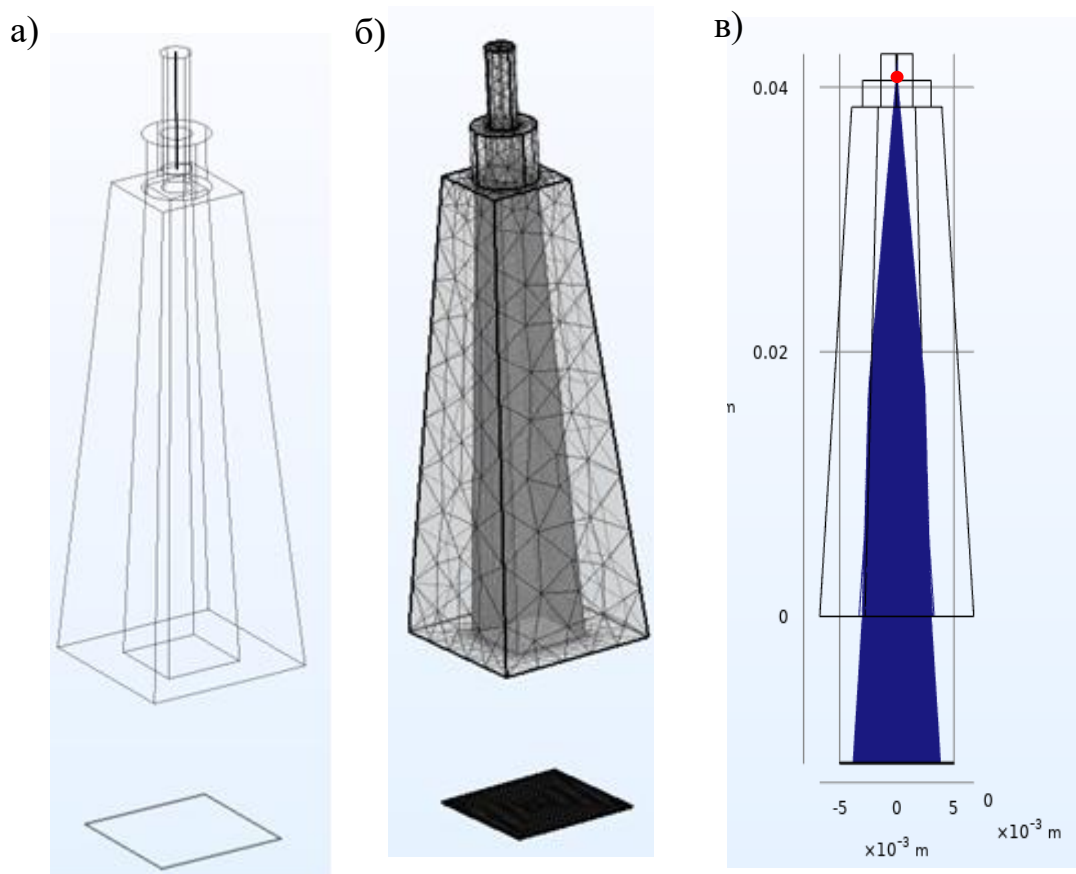


Рисунок 4.3. а) 3D модель, б) Конечно – элементная сетка в) Распределение потока лучей в модуле ФЭП

После моделирования были получены профили оптического излучения, а именно: рис. 4.4.а – не гомогенизированный (ОИ без прохождения через модуль ФЭП) рис. 4.4.б – гомогенизированный (ОИ прошедшее через модуль ФЭП).

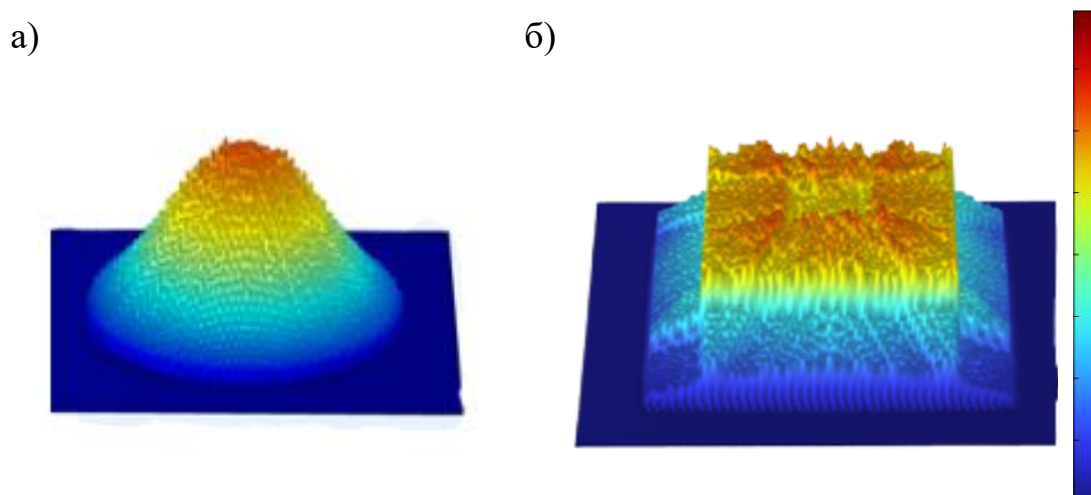


Рисунок 4.4. Модели профилей оптического излучения: а) без гомогенизации, б) с гомогенизацией

Анализ полученных профилей оптического излучения позволяет сделать следующие выводы:

- Конструкция корпуса модуля ФЭП трансформирует круговой/эллиптический профиль излучения в квадратный/прямоугольный, приводя его в соответствие форме полупроводникового кристалла фотоэлектрического преобразователя;
- Использование гомогенизатора выравнивает интенсивность оптического излучения на всей площади поверхности кристалла.

4.2.5. Верификация модели для одномодового и многомодового канала распространения оптического излучения

На следующем этапе была произведена верификации модели по средствам ее сравнения с различными профилями оптического излучения, полученными в результате экспериментальных измерений. Для снятия профиля оптического излучения (ОИ) использовался профилометр DataRay Inc, WinCamD-LCM-NE, диапазон длин волн от 355 до 1150 нм.

На рисунке 4.5. представлена структурная схема рабочего места для получения профиля распределения ОИ.

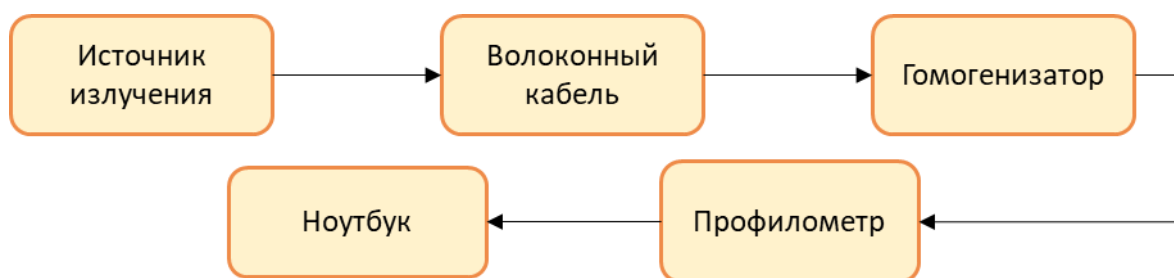


Рисунок 4.5. Структурная схема рабочего места для измерения профиля ОИ

Исследование профиля производилось с учетом различных комбинаций факторов, влияющих на профиль ОИ, для чего варьировались следующие параметры:

- мощность
- длина пути луча
- использование фильтров, снижающих мощность излучения
- наличие гомогенизатора

Следует отметить, что вид излучения зависит от характеристик оптического волокна, и как следствие, количества мод излучения, распространяющихся внутри него (см. рис. 4.6). Количество мод регулируется размерами оптоволоконного кабеля и источником излучения. Эти факторы необходимо учитывать при верификации модели.

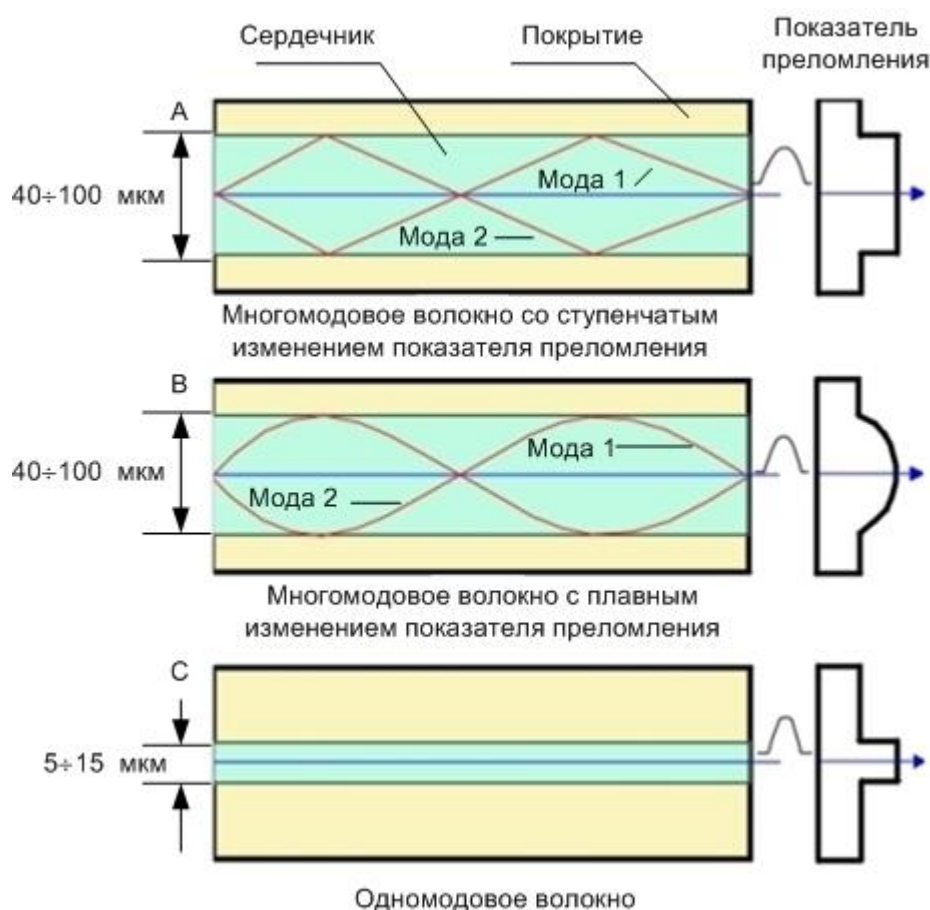


Рисунок 4.6. Влияние параметров волокна на ОИ

1) При моделировании с учетом законов геометрической оптики существует сложность в увеличении количества мод излучения. В связи с этим, первая верификация проводится для одномодового источника излучения. На рисунке 4.7 представлены профили оптического излучения для одномодового волокна без использования гомогенизатора.

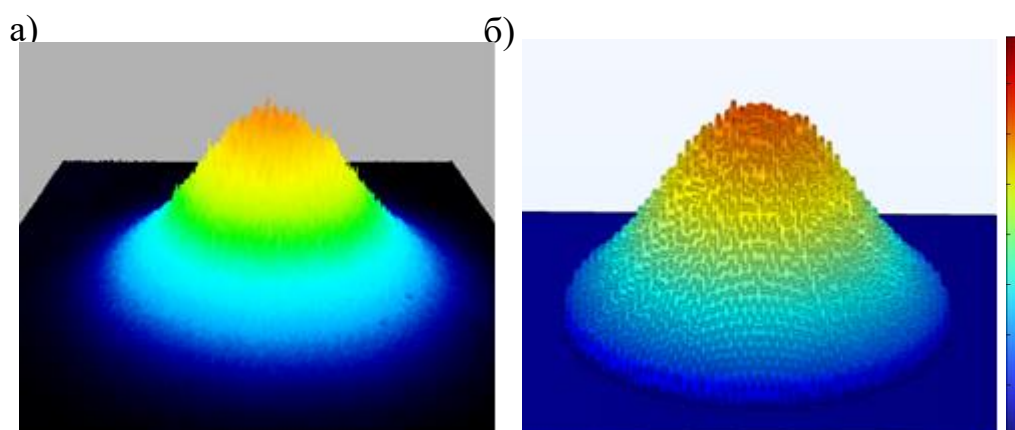


Рисунок 4.7. Профили оптического излучения для одномодового ОВ в объёме, без гомогенизатора: а) эксперимент, б) модель

Количественное сравнение снижения равномерности представлено в таблице 4.1.

Таблица 4.1. – Снижение равномерности: одномодового ОВ, без гомогенизатора.

	Эксперимент	Модель
Снижение равномерности, %	48,4	49,0

Полученные результаты демонстрируют качественную и количественную сходимость эксперимента и модели. Различие коэффициента гомогенизации не превышает 1,5%, что является отличным результатом для моделирования по законам геометрической оптики.

2) Далее проведено сравнение модели с экспериментальными данными для одномодового волокна с использованием гомогенизатора (рис. 4.8)

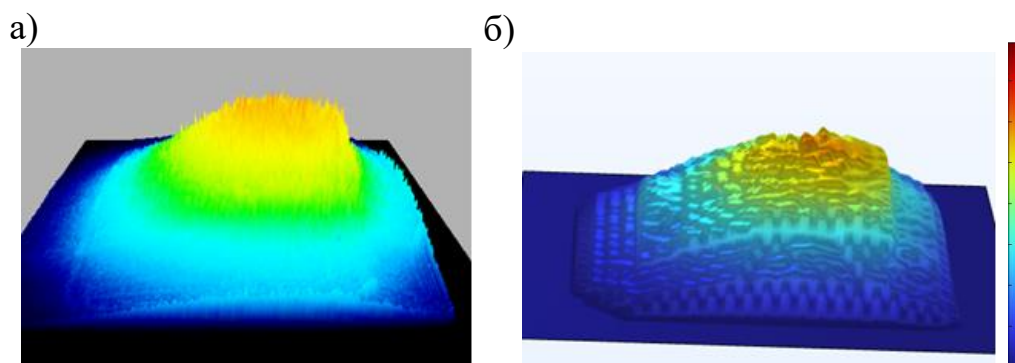


Рисунок 4.8. Профили оптического излучения в объёме, для одномодового ОВ с гомогенизатором: а) эксперимент, б) модель

Таблица 4.2. – Снижение равномерности одномодового ОВ с гомогенизатором.

	Эксперимент	Модель
Снижение равномерности, %	24,8	20,0

Полученные результаты демонстрируют качественное совпадение профилей излучения, так как количественное различие составляет менее 5% (см. табл 4.2). Увеличение погрешности, относительно результата, описанного ранее, может быть связано с вычислительной погрешностью из-за появления преломления лучей от стенок гомогенизатора, которое не было учтено при моделировании, а также с погрешностью средств измерения. Полученные результаты находятся в пределах нормы и модель может использоваться для одномодового излучения.

3) На третьем шаге проведено сравнение модели многомодового волокна с использованием гомогенизатора (рис. 4.9). Для достижения режима

многомодовости в модели было выполнено увеличение количества пучков излучения. Описанное дополнение модели не является полностью верным с точки зрения законов волновой оптики, однако, на текущий момент, это наиболее оптимальный вариант, имеющихся вычислительных ресурсов и программного обеспечения, который даёт значения приближенные к результатам эксперимента.

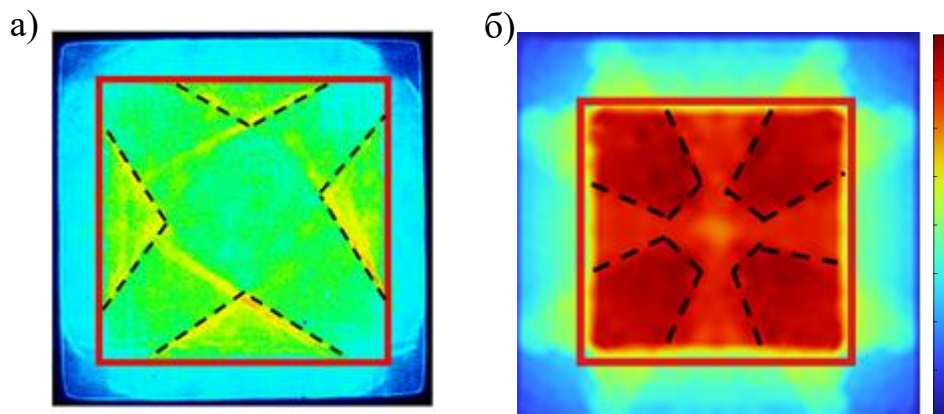


Рисунок 4.9. Профили оптического излучения для многомодового ОВ вид сверху, с гомогенизатором: а) эксперимент, б) модель

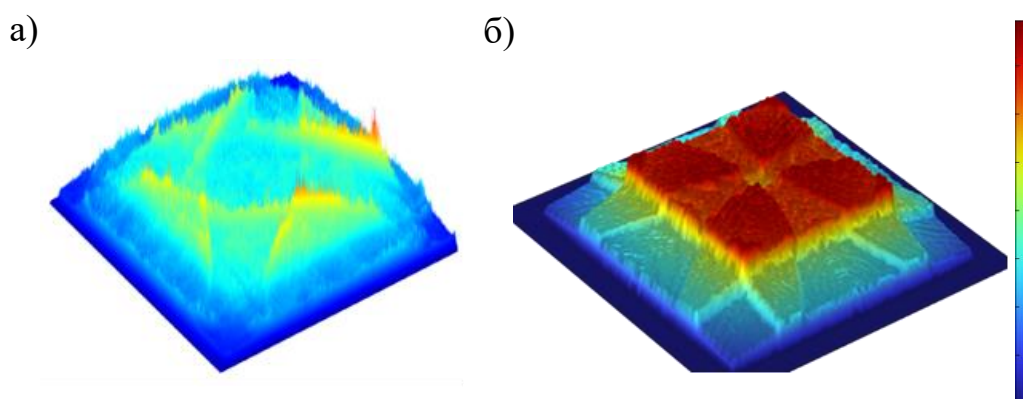


Рисунок 4.10. Профили оптического излучения многомодового ОВ в объёме, с гомогенизатором: а) эксперимент, б) модель

Таким образом, полученное различие эксперимента и модели - 8 % (табл 4.3.) Различие результатов может быть связано с влиянием физических процессов и явлений, которые не были учтены в текущей модели. Кроме того, анализ показал ряд совпадений и различий для профилей излучения, полученных в результате моделирования и измеренного в ходе натурного эксперимента.

Таблица 4.3. – Снижение равномерности многомодового ОВ с гомогенизатором

	Эксперимент	Модель
Снижение равномерности, %	29,9	21,5

Совпадения:

- Зоны с максимальной интенсивностью, выделенные красным квадратом на рисунке 4.9. соответствуют размерам выходного отверстия гомогенизатора
- Происходит формирование «лепестков», показанных пунктирными линиями на рис. 4.9 - симметричных чередующиеся зон, с близкой усредненной интенсивностью

Различия:

- Выявлено смещение «лепестков» - локальных зон с близкой максимальной и минимальной усредненной интенсивностью (на рисунке 4.9. выделены пунктирными линиями черного цвета)
- Параметр «Снижение равномерности» различается на 8%.

Повышение погрешности и различие профиля оптического излучения, может быть связано с влиянием неучтенных явлений или иных факторов, не добавленных в текущую модель. В целом, полученную модель следует считать рабочей и использовать ее при проведении дальнейших работ по оптимизации параметров модуля ФЭП.

4.2.6. Проведение многокритериальной оптимизации гомогенизатора модуля ФЭП

Для проведения многокритериальной оптимизация были выбраны параметры и критерии. В таблице 4.4. представлены изменяемые параметры и их стандартные значения (для модуля YCH-H6424-25-FC-A), а также интервалы, в которых они будут варьироваться.

Таблица 4.4. – Параметры оптимизации

Параметр	Стандартное значение (для модуля YCH-H6424- 25-FC-A)	Интервал значений
Апертура, рад	0,22	0,12 – 0,6
Высота гомогенизатора, мм	40	10 - 80
Отношение входного отверстия к выходному	0,53	0,1 - 2
Скругление, мм	0	0 - 3

Для параметра отношение входного отверстия к выходному, размеры выходного отверстия являются стандартными - 6,8 мм, меняется только размер входного отверстия. Таким образом, изменяется угол наклона стенок гомогенизатора относительно плоскости размещения кристалла.

Основные критерии оптимизации:

- минимальные потери равномерности падающего оптического излучения;
- минимальные потери мощности;
- минимальные массогабаритные параметры.

Далее проведен ряд расчетов, при которых варьировался один параметр, а остальные оставались стандартными. Результаты расчетов представлены на рисунке 4.11.

На рисунке 4.11.а) показан график влияния изменения апертуры волокна, на котором видно, что с ростом апертуры потери равномерности уменьшаются до значения 0,27 радиан, а после этого перестают изменяться. При этом заметно возрастание потерь мощности, связанных с увеличением отражения лучей от стенок гомогенизатора. Расчеты показывают, что повышение апертуры до максимального значения нецелесообразно, этот параметр следует оптимизировать.

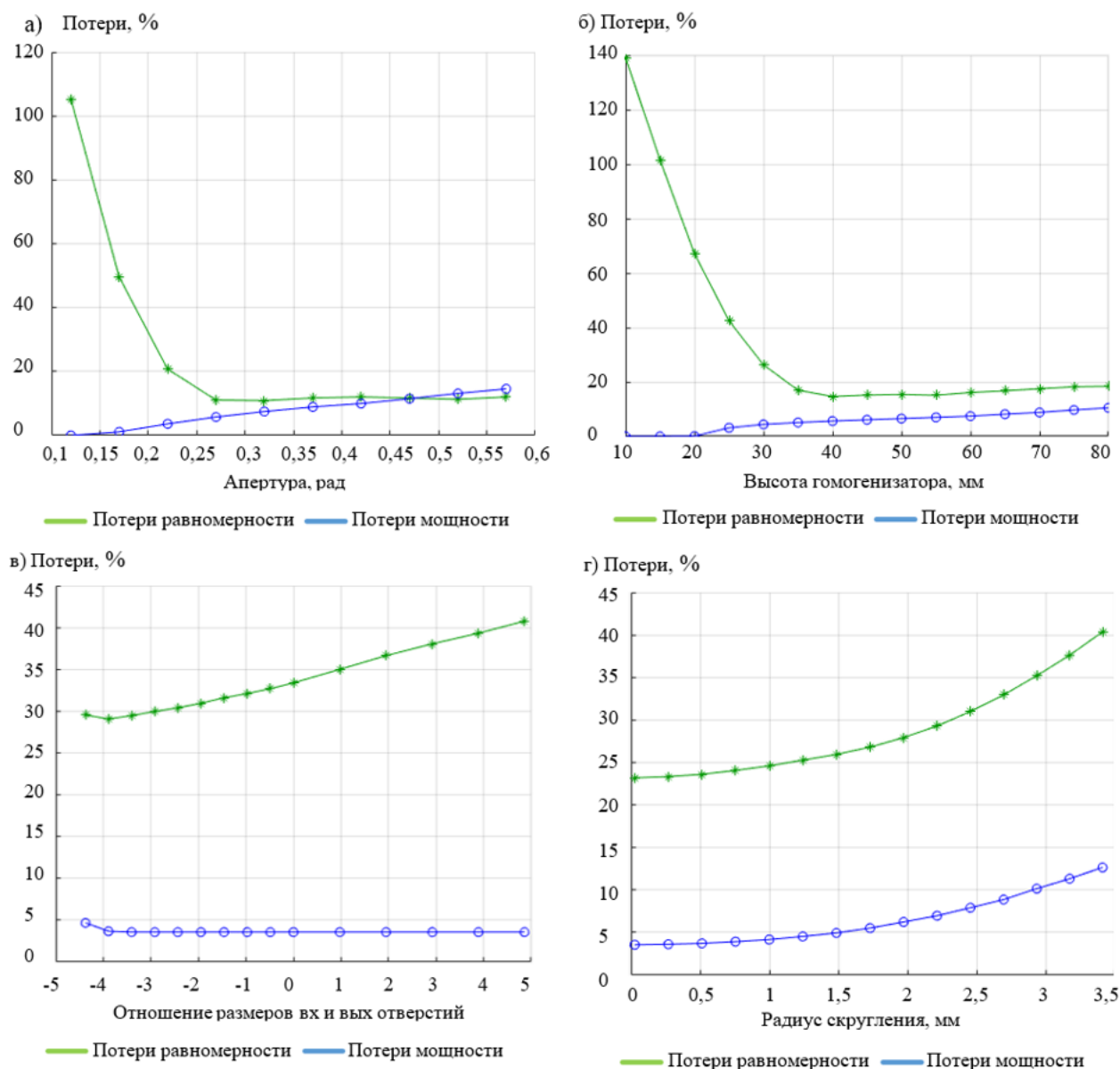


Рисунок 4.11. Графики зависимости потерь в гомогенизаторе: а) от изменения апертуры волокна; б) от высоты гомогенизатора; в) от изменения отношения размера входа к выходу г) от изменения скругления углов стенок

График влияния изменения высоты гомогенизатора (рис. 4.11.б) показывает, что с ростом высоты потери равномерности уменьшаются. Однако, при этом возрастают потери мощности. При достижении значения высоты 35-40 мм наблюдается стабилизация потерь равномерности. Это может указывать на достижение точки насыщения, в которой увеличение высоты уже не приносит существенного повышения равномерности. Однако, с ростом высоты наблюдается постоянное увеличение потерь мощности, что является негативным фактором.

Из графика (рис. 4.11.в), на котором отображается влияние изменения отношения размера входного отверстия к выходному, заметно, что увеличение входного отверстия приводит к росту потерь равномерности. Стоит отметить, что данный параметр не оказывает видимого влияния на потери мощности. Из этого

следует, что в дальнейшем необходимо стремиться максимально уменьшить размер входного отверстия, при этом стоит учитывать, что существует пороговое значение минимального размера отверстия, при котором появятся дополнительные потери связанные с многократным переотражением входящего излучения

График влияния изменения скругления углов стенок, изображенный на рисунке 4.11.г показывает, что с увеличением радиуса скругления потери равномерности и мощности значительно увеличиваются. Из этого следует, что скругление стенок гомогенизатора нецелесообразно и в дальнейшем данный параметр рассматриваться не будет.

Далее будет рассмотрена оптимизация параметров одновременно по нескольким критериям, эффективность которых будет высчитываться по формуле

$$\eta = a\lambda_1 + b\lambda_2 \quad (26)$$

В рамках данного исследования проведена оптимизация по 2 критериям, a – потери равномерности и b – мощности, на следующем этапе к ним добавиться дополнительный критерий – масса и их весовые коэффициенты, которые мы можем варьировать с учетом специфики конкретной задачи.

Поскольку, были выбраны различные параметры без задания весовых коэффициентов, то в данном приближении, при любом варьировании весовых коэффициентов максимальную эффективность имеет гомогенизатор, представленный в таблице 4.5. с параметрами из столбца Б. То есть, оптимальными параметрами из представленных является средняя высота, средняя апертура и минимальное отношение размеров отверстий, что подтверждает предыдущие анализы результатов. При таких параметрах потери равномерности составляют 14%, а потери мощности 5%.

Однако, если выбрать в качестве критерия оптимизации массогабаритные параметры (то есть считать, что весовой коэффициент массы выше чем остальные), то результаты оптимизации будут другими (см. столбец В таблицы 4.5.) Отношение массы будет составлять 50,3%, при этом потери равномерности составят 18,3%, а потери мощности 9,2%, что существенно хуже предыдущих значений. Для получения такого результата используется гораздо большая апертура и отношение размеров отверстий.

Таким образом, на данном этапе были выявлены конкретные значения, при которых критерии достигают оптимальных результатов. С целью уточнения полученных значений, дальнейшую оптимизацию необходимо проводить в области этих значений.

Таблица 4.5. –Многопараметрическое варьирование по различным критериям оптимизации

Параметры многопараметрического варьирования	А)	Б)	В)	Г)	Д)
Апертура, рад	0,22	0,27	0,44	0,22	0,22
Высота гомогенизатора, мм	40	40	20	39	45,4
Отношение входного отверстия к выходному	0,53	0,2	0,53	0,1	0,1
Критерий оптимальности	Пром. образец	Потери	Масса	Масса	Потери
Потери равномерности, %	22	14	18,3	22,5	12,7 %
Потери мощности, %	7	5	9,2	4,6	4,8 %
Отношение массы к стандартной, %	100	67,0%	50,3%	59,2	68,0

Последним этапом многокритериальной оптимизации является уточнение параметров, влияющих на эффективность работы гомогенизатора оптического излучения и их сравнение с базовыми значениями гомогенизатора от производителя (см. столбец А таблицы 4.5.)

Также стоит отметить, что было принято решение оставить стандартную апертуру равную - 0,22 радиана, поскольку увеличение апертуры является довольно сложной задачей. В связи с чем, дальнейшая оптимизация будет проводиться для фиксированного значения апертуры равного 0,22 радиана. В столбцах Г) и Д) таблицы 4.5. представлены оптимизированные параметры конструкции гомогенизатора. Минимальные потери по равномерности достигают 12,7 % с потерями по мощности 4,8 %, что на 9,3 % и 2,2 % лучше стандартных значений, кроме того, масса уменьшилась на 32 %.

В случае, если ключевую роль играет масса модуля, например, для задач авиационной промышленности, то после оптимизации по данному критерию можно получить снижение массы на 40 %. В таком случае потери равномерности существенно возрастают и достигают 22,5 %, а потери по мощности составляют 4,6 %, почти совпадая со стандартными значениями.

Сравнивая полученные параметры, стоит обратить внимание, что снижение массы на дополнительные 8 % значительно ухудшает (на 10%) равномерность оптического излучения на поверхности кристалла. Таким образом, результаты полученные при проведении оптимизации указывают на необходимость тщательного анализа при выборе компромиссов между различными параметрами в зависимости от конкретных требований решаемой задачи.

4.2.7. Подтверждение результатов оптимизации параметров гомогенизатора модуля ФЭП

С целью верификации результатов, полученных в ходе многокритериальной оптимизации, собранно несколько конструкций гомогенизатора из фольгированного стеклотекстолита (рис. 4.12. а). Выбор фольгированного стеклотекстолита в качестве материала корпуса гомогенизатора обусловлен схожестью основных характеристик, влияющих на оптимизируемые параметры, а также простоты его механической обработки на станке ЧПУ.

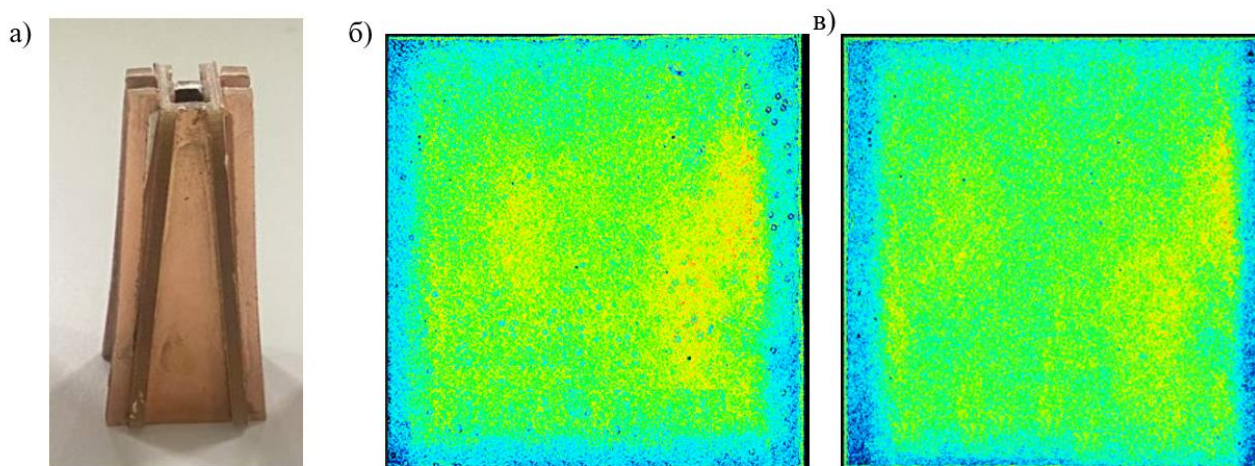


Рисунок 4.12. а) конструкция гомогенизатора и стеклотекстолита, б) и в) профили распределения ОИ со стандартными и оптимизированными параметрами

После прохождения ОИ через изготовленную конструкцию гомогенизатора профили распределения могут отличаться от значений, полученных во время измерения параметров оригинальной конструкции, так как она собрана по другой технологии, нежели оригинальная. Поэтому, на этапе макетирования, было собрано две конструкции гомогенизатора с базовыми размерами (совпадающими с параметрами серийно выпускаемого изделия) и оптимизированными. На рисунке 4.12. б) и в) показаны их профили излучения. Полученные профили оптического излучения визуально практически не отличаются друг от друга, однако, в некоторых областях заметно увеличение интенсивности ОИ, что может свидетельствовать о потерях равномерности. Расчет критериев показал, что снижение равномерности для стандартных размеров гомогенизатора достигают – 15,5 %, а потери мощности – 19%. Анализ полученных результатов позволяет сделать вывод, что гомогенизатор собственной конструкции даёт лучшую равномерность, но большие потери мощности по сравнению с оригинальным.

Таблица 4.6. Значения параметров для экспериментальных данных

	Снижение равномерности, %	Потери мощности, %
Оригинальный гомогенизатор	29	7
Макет с параметрами оригинального гомогенизатора	15,5	19
Макет, оптимизированный по параметрам равномерности ОИ	11,2	12,3

Для макета конструкции гомогенизатора с оптимизированными параметрами были получены следующие результаты: увеличение равномерности - на 4,3%, снижение потерь мощности - на 6,7% в сравнении с макетом с параметрами оригинального гомогенизатора.

Анализ полученных результатов показывает, что реализованная методика оптимизации является рабочей и её можно использовать в дальнейших исследованиях, а также для получения новых конструкций модуля ФЭП с улучшенными характеристиками под конкретную решаемую задачу.

4.2.8. Разработка перспективной конструкции модуля ФЭП с оптимизированными параметрами

На следующем этапе была проведена оптимизация параметров перспективного модуля ФЭП собственной конструкции. Разрабатываемый модуль будет сконструирован на базе полупроводникового кристалла фотоэлектрического преобразователя квадратной формы с размерами 10 на 10 мм. Используемый в предыдущей части работы кристалл модуля фотоэлектрического преобразователя имеет размеры 6х6 мм.

Геометрические размеры планируемого к применению кристалла, были использованы в качестве новых входных параметров для проведения многокритериальной оптимизации конструктивных параметров гомогенизатора. Были выполнены процедуры оптимизации, аналогичные описанным выше, в соответствии с новыми размерами полупроводникового кристалла ФЭП и получены параметры, указанные в таблице 4.7.

Таблица 4.7. Параметры гомогенизатора для кристалла 10x10 мм, оптимизированные по потерям мощности

Параметр	Значение	Потери равномерности	Потери мощности
Апертура, рад	0,22	29,5 %	2,75 %
Высота гомогенизатора, мм	68,6		
Отношение входного отверстия к выходному	0,1		

Анализ полученных результатов показывает, что увеличение размера кристалла, а следовательно, выходного отверстия, приводит к увеличению высоты корпуса гомогенизатора. Это связано с тем, что апертура волокна, равная 0,22 рад., не позволяет ОИ достичь стенок гомогенизатора и отразиться от них при меньших значениях высоты гомогенизатора. При таких параметрах потери мощности - 2,75%, при потерях равномерности в 29,5%. Дальнейшее улучшение параметров потерь мощности и равномерности без увеличения высоты и массогабаритных характеристик гомогенизатора может быть достигнуто за счёт увеличения апертуры оптического волокна. Вопросы, связанные с оптимизацией апертуры волокна, рассматриваются в следующем разделе.

Результаты, полученные в ходе оптимизационного моделирования будут проверены экспериментально позже при сборке модуля ФЭП собственной конструкции с улучшенными параметрами.

4.3. Проектирование узла коррекции апертуры ФЭП на базе линзованного оптического волокна

Как было сказано выше, для эффективной работы фотоэлектрического преобразователя необходимо равномерно освещать поверхность полупроводникового кристалла. Для этого передаваемое по сердцевине оптического волокна лазерное излучение необходимо трансформировать из круглого в прямоугольное равномерно освещенное пятно, соответствующее по размерам сечению кристалла фотоэлектрического преобразователя. Чаще всего эту функцию выполняют гомогенизаторы оптического излучения [110]. К сожалению,

они существенно, в разы, увеличивают габариты модуля фотоэлектрического преобразователя и вносят дополнительные потери оптической мощности, сопоставимые с потерями в оптическом кабеле.

В этом разделе будет описана конструкция гомогенизатора оптического излучения на базе оптического волокна с интегрированной линзой на его торце – линзованного волокна [119]. Основной задачей является создание компактного устройства, обеспечивающего трансформацию оптического излучения круглого сечения диаметром 105 мкм в равномерно освещенное пятно прямоугольного сечения, совпадающее по размерам с сечением кристалла преобразователя (фирмы МН GoPower 5S1010.4) 10x10 мм с минимальными потерями оптической мощности. Основная функция данного устройства, выступающего в роли оптического трансформатора, заключается в решении двух задач: согласование волновых сопротивлений между оптическим трактом и гомогенизатором для снижения обратных отражений и преобразование гауссова профиля энергии на входе в равномерное П-образное распределение на выходе.

4.3.1 Математический аппарат

Стандартные формы скола торца оптического волокна не обеспечивают решения поставленной задачи. Поэтому принято решение рассчитать профиль линзованного окончания волоконного световода, как показано на рис. 4.13.

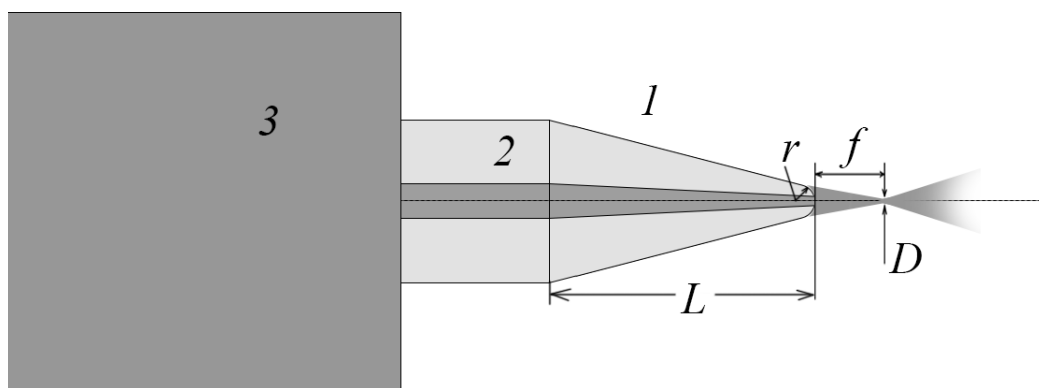


Рисунок 4.13. Схема линзованного окончания волоконного световода

На рисунке обозначены цифрами составляющие оптического волокна: 1 – сердцевина, 2 – оболочка, 3 – защитно-упрочняющее покрытие; буквами: L – длина

конусного участка, r – радиус кривизны линзы, f – фокусное расстояние, D – диаметр поля моды.

Фокусное расстояние – минимальное расстояние между линзой и точкой фокуса пучка. Оно зависит от радиуса кривизны линзы и от геометрии сердцевины.

Диаметр поля моды (ДПМ) волоконного световода ВС характеризует часть оптического волокна, где передается большая часть энергии оптического излучения.

Для упрощения дальнейших расчетов профиль интенсивности света аппроксимируется функцией распределения Гаусса

$$I_{BC}(x, y, z) = I_{\max} \cdot e^{-\left(\frac{x^2+y^2}{\omega_0^2}\right)}, \quad (27)$$

где $I_{\max}$ – максимальное значение напряженности электрического поля, ω_0 – расстояние между точкой максимальной интенсивности и точкой, в которой оно падает в e раз (Рис. 4.14.а).

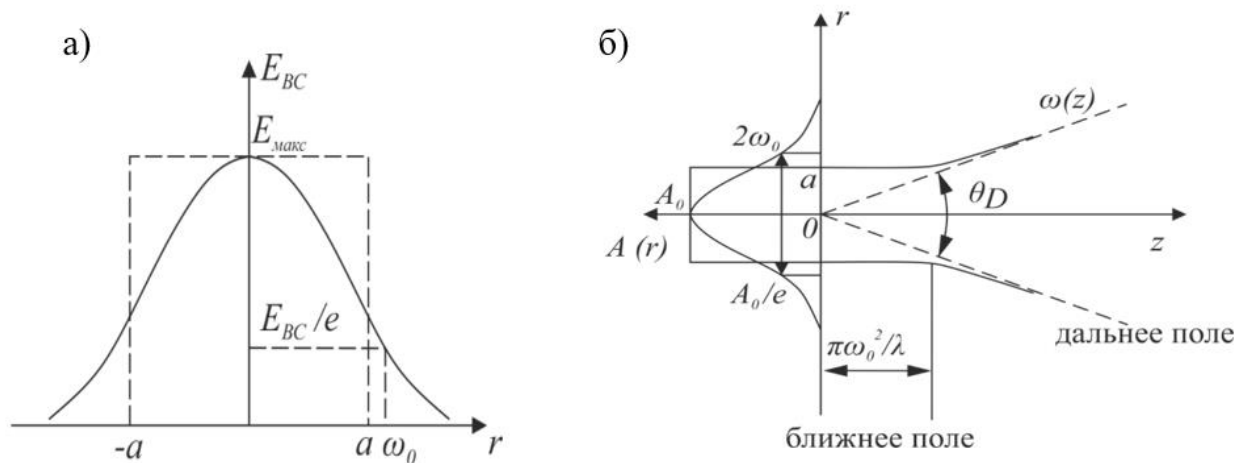


Рисунок. 4.14. а) аппроксимация моды в сердцевине оптического волокна функцией распределения Гаусса, б) распределение поля моды на выходе из волоконного световода

На рисунке $E_{\max}$ – максимальное значение напряженности электрического поля, a – радиус сердцевины, ω_0 – расстояние между точкой максимальной

напряженности и точкой, в которой амплитуда падает в e раз, r – расстояние от оси оптического волокна. Предполагается, что распределение напряженности поля является симметричным в горизонтальной и вертикальной плоскостях. В этом случае диаметр поля моды D на выходе оптического волокна определяется по формуле:

$$D = 2\omega_0, \quad (28)$$

При построении численной модели линзового окончания оптического волокна необходимо выделить области ближнего и дальнего поля как показано на рис. 4.14.б. Здесь: A_0 – максимум амплитуды поля фундаментальной моды, $2\omega_0$ – диаметр поля моды, θ_D – угол расхождения поля на выходе из сердцевины оптического волокна.

Ближнее поле представляет собой область пространства на выходе из сердцевины оптического волокна, в которой поле в направлении оси z изменяется слабо, а условием ближнего поля является соотношение:

$$\frac{\lambda z}{\pi \omega_0^2} \ll 1 \Rightarrow \omega(z) \approx \omega_0, \quad (29)$$

где λ – длина волны, z – координата в направлении оси z , ω_0 – модовый радиус, $\omega(z)$ – модовый радиус в области ближнего поля. Дальнее поле – это область пространства, в которой поле на выходе из ВС расходится под постоянным углом θ_D , а условием дальнего поля является:

$$\frac{\lambda z}{\pi \omega_0^2} \gg 1 \Rightarrow \omega(z) \approx \frac{\lambda z}{\pi \omega_0}, \quad (30)$$

где λ – длина волны, z – координата в направлении оси z , ω_0 – модовый радиус, $\omega(z)$ – модовый радиус в области дальнего поля.

Для длины волны 980 нм ближним полем конусного линзового окончания волоконного световода является область сфокусированного пучка, а дальним – область расходящегося пучка на расстоянии нескольких миллиметров от фокуса и более.

4.3.2. Численное моделирование линзованных волоконных световодов

Перед проведением работ по изготовлению и испытанию конусных линзованных окончаний волоконного световода необходимо ознакомиться с основными закономерностями работы конусных линз. Для этого проведено моделирование распространения излучения в конусной линзе, на основе которого получены зависимости фокусного расстояния и ДПМ от радиуса кривизны линзы.

Моделирование было проведено в программе Comsol Multiphysics 6.2. Принцип работы основан на численном расчете уравнений Максвелла, записанных в дифференциальной форме, с помощью метода конечных элементов в пространственно-частотной области [120]. Для двумерной линейной немагнитной среды без дисперсии уравнения, используемые при расчётах, будут иметь следующий вид:

$$\nabla \times \mu_r^{-1}(\nabla \times E) - k_0^2 \left(\epsilon_r - \frac{j\sigma}{\omega\epsilon_0} \right) E = 0, \quad (31)$$

$$E(x, y, z) = \tilde{E}(x, y)e^{-ik_z z}. \quad (32)$$

Численный эксперимент был проведен для линз с конусной оболочкой в двумерном пространстве. Пространство разделялось на две области: сердцевину и остальное пространство, как показано на рис.4.13. Здесь r – радиус кривизны линзы, L – длина конуса.

В области сердцевинного пространственный шаг $\Delta x = \Delta y$ был в диапазоне от 0.103 до 0.115 мкм, в остальной области пространственный шаг варьировался в диапазоне 0.155 до 0.258 мкм. Основные параметры материалов и структур: $d_{об} = 125$ мкм, $d_c = 105$ мкм, $n_b = 1$, $n_{об} = 1.46$, $n_c = 1.48$, $\lambda = 0.980$ мкм, r варьировался от 2 до 98 мкм, $L = 200$ мкм, где $d_{об}$ и d_c – диаметры оболочки и сердцевинки ВС соответственно, n_b – показатель преломления воздуха, $n_{об}$ – показатель преломления оболочки ВС, n_c – показатель преломления сердцевинки волоконного световода.

Конечный результат численного эксперимента представлял собой двумерный массив данных, состоящий из x , y координат и значений модулей векторов Умова-Пойтинга в каждой точке.

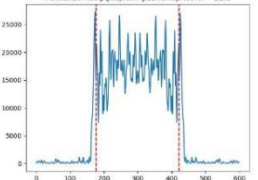
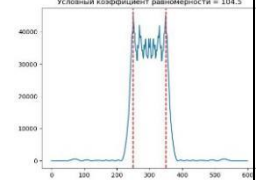
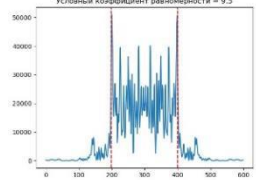
Далее вычислялись определяющие параметры расположения линзы и ее геометрии, при котором происходило наиболее эффективное преобразование формы моды: радиус кривизны линзы, диаметр пятна, расстояние сечения на котором строится пятно (x), эффективность ввода и условный коэффициент равномерности.

4.3.3. Обработка результатов численного моделирования линзованных волоконных световодов

При анализе массива обработанных данных получено три наиболее удачных варианта геометрии линзы и расположения входа гомогенизатора. В таблице 4.8. приведены их краткие описания и основные характеристики,

Как показал проведенный анализ, можно получить или наиболее широкое пятно и эффективность ввода излучения, или наиболее равномерный профиль, или наиболее простую в изготовлении конструкцию линзы.

Таблица 4.8. Выбранные варианты конструкций конусных линзовых окончаний оптического волокна

Приоритет	1	2	3
Описание	Наиболее широкое пятно и эффективность ввода излучения	Наиболее равномерный профиль	Возможно проще изготавливать
Радиус, мкм	55	96	43
Расстояние от кончика линзы	5	114	5
Диаметр пятна, мкм	51	21	42
Коэффициент эффективности	0.86	0.75	0.81
Условный коэффициент равномерности	22	104	9,5
График	Радиус (ммк) = 55, x (ммк) = 5, Диаметр пластины (ммк) = 51,2. Коэффициент эффективности = 0.86. Условный коэффициент равномерности = 22.8 	Радиус (ммк) = 96, x (ммк) = 114, Диаметр пластины (ммк) = 21,2. Коэффициент эффективности = 0.75. Условный коэффициент равномерности = 104.5 	Радиус (ммк) = 43, x (ммк) = 5, Диаметр пластины (ммк) = 42,5. Коэффициент эффективности = 0.81. Условный коэффициент равномерности = 9.5 

Полученная база данных для линз с радиусами кривизны от 2 до 96 мкм с шагом в 1 мкм позволяет выбрать наиболее подходящие профили для решения различных задач.

Для решения задачи создания оптимального гомогенизатора необходимо дополнительно выполнить моделирование линзованных волокон различной конфигурации и произвести совместное моделирование распределения светового пятна при совместной работе конического линзового окончания и гомогенизатора.

4.3.4. Экспериментальная проверка результатов численного моделирования линзованных волоконных световодов

Для проверки достоверности полученных результатов моделирования, собрана экспериментальная установка для исследования пространственного распределения интенсивностей излучения оптических волокон с линзованными окончаниями (рисунок 4.15.) Она состоит из источника излучения 1, оптического волокна с линзованным окончанием 2, микропозиционера 3, приемника излучения 4 и персонального компьютера с программным обеспечением для обработки изображения. Источник лазерный диод накачки SM96Z200-74 генерировал непрерывное одномодовое лазерное излучение мощностью 180 мВт на длине волны 980 нм. Волоконный выход лазера с помощью адаптера с разъемом для волокон диаметром 125 мкм состыкован с отрезком оптического волокна с

линзованным окончанием. Диаметр германо-силикатной сердцевины волокна составлял 105 мкм, а силикатной оболочки – 125 мкм.

Фотографии трех линзованных окончаний, изготовленных методом химического травления с последующим электродуговым оплавлением, сделанных под микроскопом, представлены на рисунке 4.16. а-в.

В ходе проведения исследований были получены профили освещенности для

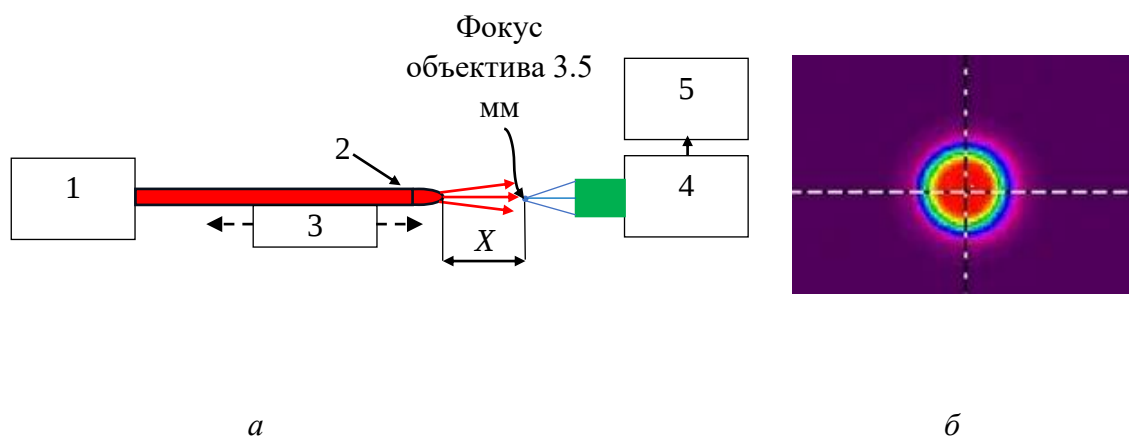
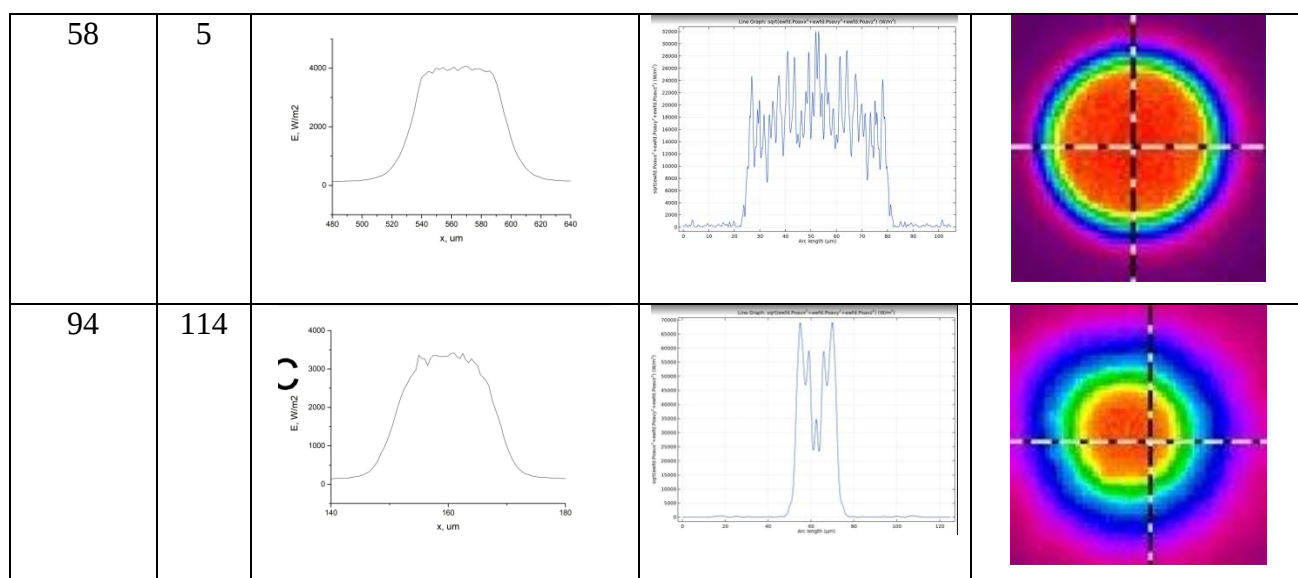


Рисунок 4.15. Экспериментальная установка для измерения распределения интенсивности излучения: *а* – схема; *б* – визуализированное изображение профиля освещенности матрицы трех оптических волокон с линзованным окончанием на длине волны 980 нм на расстояниях $L = 5.5; 14; 30$ и 120 мкм. Результаты исследований занесены в сравнительную таблицу 4.8.

Таблица 4.9. Сравнительная таблица линзованных волокон с радиусами 46, 58 и 94 мкм

Радиус линзы, мкм	X , мкм	Экспериментально измеренный профиль	Полученный при моделировании профиль	Визуализация распределения интенсивности
46	5			



В таблице 4.9. приведены результаты анализа экспериментально полученных и математически смоделированных распределений интенсивности излучения. Сравнение проводилось по диаметрам пятен распределения интенсивности, внутри которых профиль распределения полагался приближенным к равномерному. На фотографиях, визуализирующих распределения интенсивности инфракрасного излучения на длине волны 980 нм, это границы между жёлтыми и красными окружностями. Результаты численного моделирования и эксперимента совпадают в пределах погрешности эксперимента.

По результатам, проведенных исследований, были построены графики зависимости диаметра поля моды от расстояния (X) для прямосколотого и линзованного волокон (рисунок 4.16). Для графиков а и б черные квадраты – результат моделирования, белые квадраты – натурный эксперимент. Как видно из графиков, в обоих случаях модель и эксперимент сходятся с хорошей точностью. Таким образом, можно сделать вывод о том, что результаты моделирования можно использовать при проектировании подобных устройств в части получения заданной формы профиля пучка.

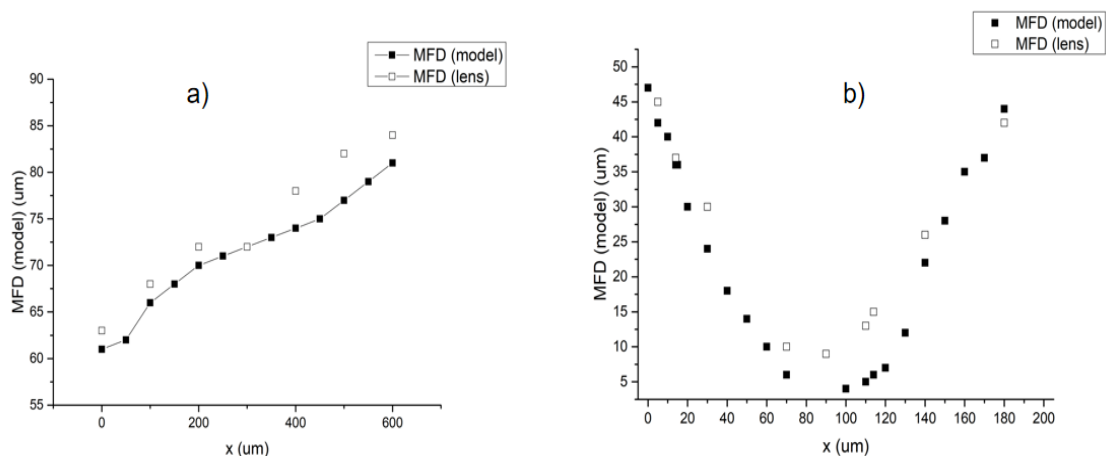


Рисунок 4.16. Сравнение результатов моделирования и экспериментально измеренных значений поля моды (MFD): а) для прямосколотого (90°); б) для линзованного волокна с радиусом закругления 46 мкм

Также необходимо отметить, что изменение торцевого профиля оптического волокна существенно влияет на пространственное распределение интенсивности оптического излучения. В отличие от обычного волокна, линзованное обеспечивает согласование волновых сопротивлений между оптическим волокном и свободным пространством (или входом гомогенизатора). При использовании гомогенизатора оно также формирует требуемую диаграмму направленности оптического излучения. Таким образом, линзованное волоконное окончание, интегрированное взамен прямоугольного скола оптического волокна, является узлом коррекции апертуры. Благодаря его применению появляется потенциальная возможность уменьшения габаритов, а следовательно, и массы гомогенизатора при заданных параметрах светового пятна (форма, размер) и его равномерности при минимальных потерях оптической мощности, связанной с поглощением лазерного излучения при многократном отражении от внутренних поверхностей гомогенизатора.

Необходимо отметить, что в ходе проведенного исследования, была разработана обобщённая методика для получения оптимальной конструкции узла коррекции апертуры. Она состоит в следующем. Получив исходные данные геометрических размеров фотоэлектрического преобразователя и прикинув оптимальные габариты переходного модуля (гомогенизатора), можно расчетным путем определить профиль поверхности линзованного окончания оптического

волокна, позволяющее получить заданные параметры однородности светового пятна со снижением равномерности в диапазоне 10-25% без проведения промежуточных натурных экспериментов. Это позволит избежать большого числа экспериментов и существенно снизит трудоемкость по подбору оптимальных параметров линзованного волокна. По результатам оптимизации на численной модели делается одно линзованное волокно с рассчитанным профилем поверхности. После чего проводится одно экспериментальное испытание, которое должно подтвердить правильность расчетов.

4.4. Проектирование модуля ФЭП с разъемным узлом для оптического кабеля

В рамках данной работы была решена техническая задача – создание условий, обеспечивающих защиту оптического кабеля и фотоэлектрического элемента от загрязнений, приводящих к выходу их из строя, а также защиту пользователя от поражения оптическим излучением. Созданная конструкция модуля фотоэлектрического преобразователя, обеспечивает защиту оптического кабеля от загрязнения и защиту пользователей от оптического излучения за счет герметизации разъемного узла для оптического кабеля, путем одновременного закрытия диафрагм обеих частей узла при его размыкании.

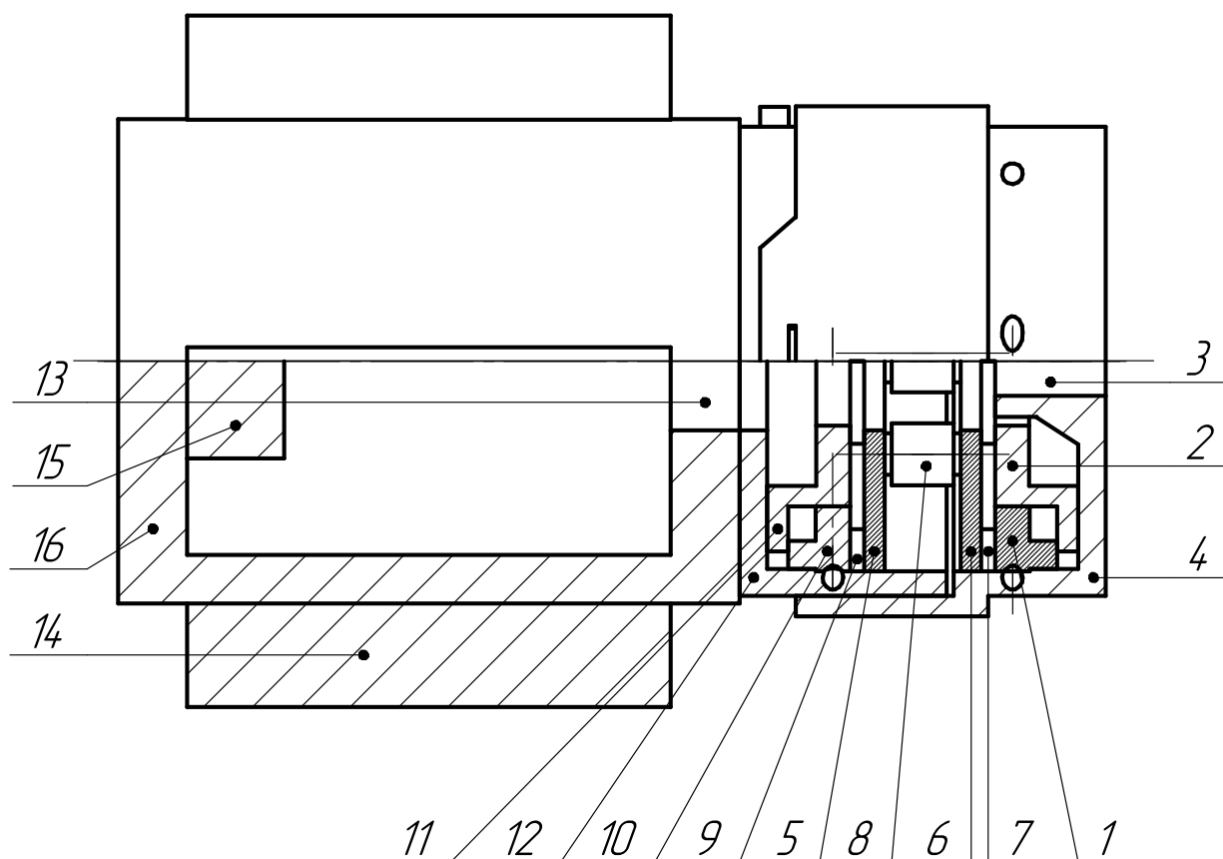


Рисунок 4.17. модуль ФЭП в разрезе

На рисунке 4.17. изображен модуль в разрезе, где:

- 1 – внешнее кольцо диафрагмы второй части разъемного узла
- 2 – внутреннее кольцо диафрагмы второй части разъемного узла
- 3 – канал для оптического кабеля второй части разъемного узла
- 4 – корпус второй части разъемного узла
- 5 – прижимная пластина диафрагмы первой части разъемного узла
- 6 – прижимная пластина диафрагмы второй части разъемного узла
- 7 – лепестки диафрагмы второй части разъемного узла
- 8 – коронки, сцепляющие штифты обеих диафрагм
- 9 – лепестки диафрагмы первой части разъемного узла
- 10 – внешнее кольцо диафрагмы первой части разъемного узла
- 11 – внутреннее кольцо диафрагмы первой части разъемного узла
- 12 – корпус первой части разъемного узла
- 13 – отверстие для прохождения оптического излучения

14 – ребра радиатора кожуха ФЭП

15 – кристалл фотоэлектрического элемента

16 – кожух ФЭП

Совокупность компонентов 1-12 составляет разъемный узел.

На описанную выше конструкцию получен патент на изобретение №2814799 «МОДУЛЬ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ С РАЗЪЕМНЫМ УЗЛОМ ДЛЯ ОПТИЧЕСКОГО КАБЕЛЯ» [122].

4.5. Проектирование конструкции ФЭП с улучшенным теплоотводом

Была решена еще одна техническая задача – получение высокого КПД модуля ФЭП при отсутствии энергетических затрат на охлаждение конструкции и без использования дополнительных средств. Достигнут технический результат – создание модуля ФЭП с высоким КПД за счет качественной теплопередачи, обеспечивающей эффективное отведение тепла от кристалла.

Такой результат достигается за счет того, что модуль фотоэлектрического преобразователя (ФЭП) содержит кристалл, преобразующий оптическую энергию в электрическую, закрепленный на теплосъемной площадке и расположенный внутри полой вертикальной конструкции, состоящей из четырех плоских теплопроводящих трубок, нижние участки которых загнуты, а их наружные поверхности спаяны между собой и с поверхностями нижней и боковых сторон теплосъемной площадки с возможностью образования максимальной площади контакта, при этом верхние участки трубок изогнуты в радиальных направлениях, а на них закреплены лепестки радиаторов.

Формирование полой вертикальной конструкции, состоящей из четырех плоских теплопроводящих трубок с изогнутыми нижними участками, наружные поверхности которых спаяны между собой и с поверхностями нижней и боковых сторон теплосъемной площадки, позволяет получить максимальную площадь контакта, что обеспечивает требуемый отвод тепловой энергии от поверхности кристалла без применения дополнительных активных элементов, что позволяет повышать КПД ФЭП благодаря более низкой температуре кристалла ФЭП.

Использование плоских теплопроводящих трубок обеспечивает максимальную площадь контакта между поверхностями изогнутых концов этих трубок при их спайке, т.к. роль теплопроводящих трубок заключается в эффективном переносе тепловой энергии от нагревателя до радиатора.

Верхние участки трубок изогнуты в радиальных направлениях, а на них закреплены лепестки радиаторов, обеспечивая пассивное рассеяние тепла в окружающую среду.

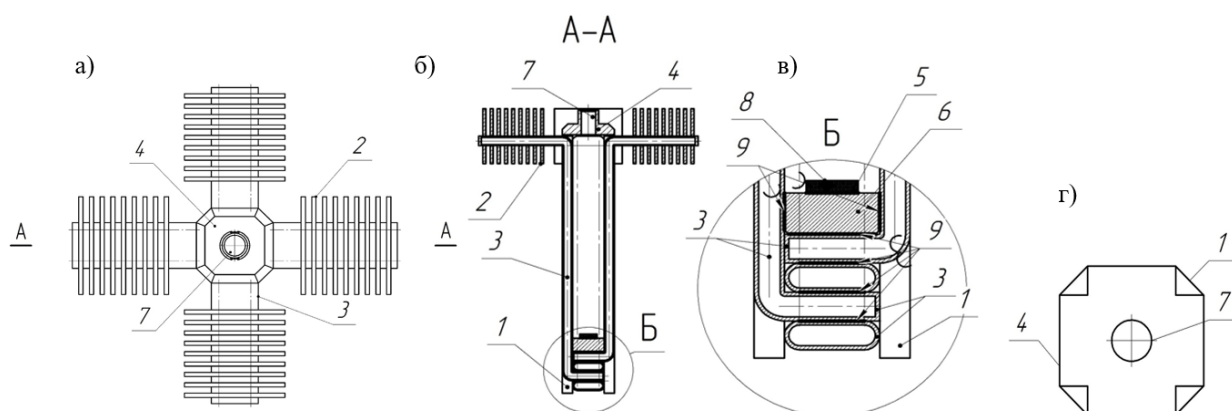


Рисунок 4.18. Модуль ФЭП с теплоотводом на тепловых трубках: а) вид сверху; б) фронтальный разрез А-А в) элемент Б в увеличенном виде; г) крышка модуля, вид сверху

Конструкция модуля показана на рисунке 4.18., где 1) опорный штифт, 2) лепестковый радиатор, 3) теплопроводящая медная трубка, 4) крышка, 5) полупроводниковый кристалл, преобразующий оптическую энергию в электрическую, 6) теплосъемная площадка.

Модуль содержит каркас из опорных штифтов и разъемную крышку. Таких опорных штифтов 4 штуки, они имеют треугольное сечение для более удобного размещения в местах стыка медных теплопроводящих трубок. Каркас обеспечивает устойчивость конструкции к деформации.

Разъемная крышка служит для фиксации оптического разъема посредством разъемного соединения. В крышке имеется отверстие, через которое проходит оптическое излучение.

На конструкцию, описанную в данном разделе получен патент на полезную модель №№232070 «МОДУЛЬ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ» [123].

4.6. Выводы по главе 4

В главе рассмотрены этапы создания и оптимизации модели ФЭП с целью минимизации потерь и улучшения его массогабаритных характеристик. Была реализована модель гомогенизатора модуля ФЭП по законам геометрической оптики. В процессе работы над моделью была проведена многокритериальная оптимизация с использованием метода Парето и метода линейной свертки. Основными критериями для оптимизации выступали потери равномерности, потери мощности и массогабаритные параметры.

Результаты оптимизации продемонстрировали значительное улучшение рассматриваемых критериев. В частности, потери равномерности удалось уменьшить на 9,3%, потери мощности снизились на 2,2% по сравнению со стандартными значениями. Кроме того, масса итоговой модели была уменьшена на 32%, что значительно улучшило её массогабаритные параметры.

Кроме того, проведена оптимизация параметров и получены оптимизированные конструктивные параметры кристалла ФЭП с размерами 10x10 мм. Потери равномерности - 29,5 % и потери мощности - 2,75%. Полученные результаты можно использовать при создании конструкции модуля ФЭП в будущем.

Спроектировано устройство коррекции апертуры на входе модуля фотоэлектрического преобразователя. Устройство выполнено в виде линзы, интегрированной с оптоволоком доставки лазерного излучения ко входу кристалла фотоэлектрического преобразователя, что позволяет существенно увеличить угол расхождения оптического излучения и получить оптимальное его значение на входе в модуль ФЭП. Использование линзованного окончания оптического волокна позволяет уменьшить длину гомогенизатора и, как следствие, снизить затухание излучения и массогабаритные параметры всего модуля ФЭП. При этом профиль излучения согласован с формой и размером кристалла

преобразователя, а поверхность кристалла равномерно освещена. Результаты этой работы представлены в публикации [121].

Приведены две конструкции модуля ФЭП с разъемным соединением и улучшенной конструкцией теплоотвода, на которые были получены патенты [122,123] на изобретение и полезную модель соответственно.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представлены принципы построения систем энергоснабжения по оптическому волокну. Сформулированы основные требования, которые нужно учитывать при выборе данных компонентов. Проведена оценка ключевых факторов, влияющих на эффективность и основные технические характеристики систем на базе технологии PoF. Показано, что за счет уменьшения рабочей температуры лазерного диода и фотоэлектрического преобразователя можно добиться повышения коэффициента полезного действия на 3% и повысить надежность системы.

Разработаны подходы для проведения оптимизации режимов работы с целью повышения коэффициента полезного действия и надежности системы.

Проработаны основные варианты конструкций фотоэлектрических преобразователей лазерного излучения. Показана связь основных параметров использованных при описании процессов преобразования оптической энергии в энергию электрического тока с основными паспортными характеристиками ФЭП. Обоснован выбор эквивалентной схемы ФЭП, состоящей из пяти элементов. Разработана модель цифрового двойника ФЭП. Проведены исследования, которые подтверждают правильность работы предложенного ЦД.

Разработан алгоритм обратной связи для управления выходной оптической мощностью лазерного диодного модуля. Проведено его моделирование, показывающее, что применение данного алгоритма существенно повышает эффективность работы системы энергоснабжения по оптическому волокну. Также, с целью увеличения КПД, предложено применение широтно-импульсной модуляции (ШИМ) для управления мощностью ЛД на интервале повышенных сопротивлений.

Выработаны рекомендации по дальнейшему совершенствованию интеллектуальной системы электроснабжения с передачей энергии по оптическому волокну.

Рассмотрены этапы создания и оптимизации модели ФЭП с целью минимизации потерь и улучшения его массогабаритных характеристик. Реализована модель гомогенизатора модуля ФЭП и проведена оптимизация его параметров для

исследуемой и перспективной конструкций. Результаты оптимизации продемонстрировали значительное улучшение рассматриваемых критериев.

Проведенного исследования факторов, влияющих на эффективность функционирования устройства коррекции апертуры: Проведены расчеты оптимальных параметров устройства для использования в модуле фотоэлектрического преобразования. Разработана численная модель узла коррекции апертуры на основе линзованного окончания оптического волокна для систем энергоснабжения по оптическому волокну.

В ходе проведения исследования получен патент на изобретение патент на изобретение №2814799 и патент на полезную модель №№232070 на конструкции модулей фотоэлектрических преобразователей с разъемным соединением и улучшенной конструкцией теплоотвода.

Полученные результаты, представленные в работе, будут использованы в дальнейшей научно-исследовательской и опытно-конструкторской работе по созданию перспективного образца системы энергоснабжения по оптическому волокну для питания удаленных потребителей.

БЛАГОДАРНОСТИ

Автор диссертации благодарит:

- Криштопа Виктора Владимировича, д.ф-м.н., профессора кафедры Общей физики факультета Прикладной математики и механики ПНИПУ, за руководство настоящей диссертационной работой и за **неоценимый** вклад в работе над диссертацией и публикациями результатов диссертации;
- Перминова Анатолия Викторовича, д.ф-м.н, доцента, заведующего кафедрой общей физики факультета Прикладной математики и механики ПНИПУ, за **создание благоприятных условий** для выполнения научного исследования, а также за оказанное содействие при решении организационных вопросов;
- Первадчука Владимира Павловича д.т.н, профессора, заведующего кафедрой Прикладная математика ПНИПУ за организацию **оптимального** учебного процесса и курирование результатов работы.
- Вольхина Игоря Львовича, к.ф-м.н, доцента кафедры радиоэлектроники и защиты информации физического факультета ПГНИУ за **огромную** помощь при анализе и интерпретации полученных результатов исследования и в работе над публикацией этих результатов.
- Сторожева Сергея Александровича, к.т.н, доцента кафедры автоматики и телемеханики электротехнического факультета ПНИПУ, за оказанную помощь и содействие при разработке алгоритмов обратной связи;
- сотрудников Молодежной Лаборатории интегральной фотоники ПГНИУ в лице Пономарева Романа Сергеевича, к. ф-м.н, доцента кафедры НМТ и Жукова Леонида Олеговича за успешное сотрудничество при исследовании линзованных оптических волокон.
- Дмитрия Александровича Кустова, аспиранта кафедры Прикладной математики и механики ПНИПУ за совместную плодотворную работу при проведении моделирования и оптимизации конструкции модуля ФЭП
- любимую жену Гаркушину Ирину Константиновну, детей Елизавету и Георгия за вдохновение, моральную поддержку и **бесконечное** терпение;

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

Power-over-Fiber (PoF) -технология передачи энергии по оптическому волокну для питания удаленных потребителей

DCF – оптическое волокно с двойной оболочкой

OWPT -передача энергии по оптический беспроводным и волоконным линиям

SMF- одномодовое оптическое волокно

MMF – многомодовое оптическое волокно

MSF – оптическое волокно с несколькими сердцевинами

HCF – полое оптическое волокно

5G NR - технология сетей мобильной связи нового поколения

ОВ – оптическое волокно

ОК – оптоволоконный кабель

КПД – коэффициент полезного действия

ФЭП – фотоэлектрический преобразователь

ОИ – оптическое излучение

ЛД – лазерный диод

ЛДМ – лазерный диодный модуль

ЦД – цифровой двойник

УФ – ультрафиолетовое излучение

ИК – инфракрасное излучение

СПИСОК 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, M. A. Optically Powered Radio-Over-Fiber Systems in Support of 5G Cellular Networks and IoT / Fahad M. A. Al-Zubaidi , Student Member, IEEE, J. D. López Cardona, D. S. Montero and C. Vázquez , Senior Member // IEEE JOURNAL OF LIGHTWAVE TECHNOLOGY, 2021-VOL. 39-№13
4. Michel, A.H. Counter-drone systems / A.H. Michel // Second edition – Center for the Study of the Drone at Bard College. – 2019.
5. H. Wang et al.] A Design Method of In-band Communication Link in Power-Over-Fiber Application System / // Proceedings of PURPLE MOUNTAIN FORUM 2019 – International Forum on Smart Grid Protection and Control. – Springer, Singapore, 2020. – С. 891–903.
6. J.D. López-Cardona, Carmen Vázquez, David Sánchez Montero, Pedro Contreras Lallana / Remote Optical Powering Using Fiber Optics in Hazardous Environments // J. Lightwave Technol. – 2018. – № 36. – P. 748–754.
7. Rosolem, J.B. Power-over-fiber applications for telecommunications and for electric utilities/ J.B. Rosolem, R. Roka // Optical Fiber and Wireless Communications. – 2017. – С. 255–278.
8. Зеневич А. О. и др. Исследование возможности совмещения волоконно-оптической линии связи и системы мониторинга объекта // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – 2022. – Т. 65. – №. 6. – С. 406-412.
9. Гаркушин А. А. и др. Прототип системы мониторинга с энергоснабжением по оптическому волокну // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – 2024. – Т. 67. – №. 1. – С. 80-95.
10. Sun T., Xie X., Wang Z. Wireless power transfer for medical microsystems. – New York : Springer, 2013. – С. 5-7.

11. Gopinath A. All about transferring power wirelessly //Electronics for You E-zine. – 2013. – С. 52-56.
12. Agbinya J. I. Wireless power transfer. – CRC Press, 2022.
13. Гаркушин, А.А. Системы передачи энергии по оптическому волокну // Бюллетень научный сообщений: сборник научных трудов. вып. 25. –2020. – №. 25. – с. 48–53.
14. Juan D. López-Cardona, Smart Remote Nodes Fed by Power Over Fiber in Internet of Things Applications // IEEE sensors journal, vol. 19, № 17, 2019.
15. Гаркушин, А.А. и др. Зависимость характеристик системы PoF от расстояния передачи энергии // Бюллетень научных сообщений: сборник научных трудов. Вып. 6. –2021. – №. 6. – С. 42–43.
16. Расулев Р. П., Гаркушин А. А., Нифонтова Е. В., Криштоп В. В., Вольхин И Л. Разработка системы мониторинга с энергоснабжением по оптическому волокну // Сборник Физика для Пермского края.112-118. 2022 г. Пермь, 2022. – Вып. 15. – 20 Мб; 178 с.
17. Соколовский А. А., Черторийский А. А., Веснин В. Л. Волоконно-оптический датчик напряжения гибридного типа //Радиоэлектронная техника. – 2010. – №. 1. – С. 7-12.
18. Chen Y. et al. Optically powered gas monitoring system using single-mode fibre for underground coal mines //International Journal of Coal Science & Technology. – 2022. – Т. 9. – №. 1. – С. 26.
19. Haid M. et al. 5 W optical power link with generic voltage output and modulated data signal //Proceedings of the 1st Optical Wireless and Fiber Power Transmission Conference (OWPT2019). – 2019. – С. 23-25.
20. Helmers H. et al. 6-W optical power link with integrated optical data transmission //IEEE Transactions on power electronics. – 2020. – Т. 35. – №. 8. – С. 7904-7909.
21. Carmen Vázquez, Multicore fiber scenarios supporting power over fiber in radio over fiber systems / Juan Dayron lópez-cardona , Pedro Contreras Iallana , David

- Sánchez Montero, Fahad Mohammed Abdulhussein Al-Zubaidi, Sandra Pérez-Prieto, Isabel Pérez Garcilópez // IEEE journal of lightwave technology, (2019).
22. Modes, J. D. Optically feeding 1.75 W with 100 m MMF in efficient C-RAN front-hauls with Sleep / Modes J. D., López Cardona, P. C. Lallana, R. Altuna, A. Fresno-Hernández, X. Barreiro, C. Vázquez Senior Member // Journal of lightwave technology, vol. 39, № 24, december 15, 2021.
 23. C. Vazques, Fiber-Optic Pyrometr with Optically Powered Switch for Temperature Measurements / C. Vazques, S. Perez-Prieto, J. Lopez-Cardona // Scopus. — 2018. — C.1-10.
 24. Willsch M, Temperature Fiber Optic Pyrometer for Fast Time Resolved Temperature Measurements / Willsch M, Bosselmann, T.; Gaenshirt, D.; Kaiser, J.; Villnow, M.; Banda, M. Low Proceedings of Sixth European Workshop on Optical Fibre Sensors, Limerick, Ireland, 31 May–3 June 2016; Paper 99160R.
 25. Esenowo K, The design of a signal conditioning & acquisition elements of a chopped broadband radiation pyrometer / Esenowo K., Etu I., Ukanide V.N. // Int. J. Res. Eng. Technol. 2015, 4, 461–470.
 26. Burgess, G.K Characteristics of Radiation Pyrometers; Bulletin of Bureau of Standards / Burgess G.K, Foote P.D. // University of Michigan: Ann Arbor, MI, USA, 1915; Volume 12.
 27. С.В. Головин, Ю.А. Разин, С.В. Курков, Е.Р. Надеждин. Российский опыт и перспективы создания систем сейсмического 4D мониторинга // Геофизические исследования, 2019, том 20, № 4, с.52-64.
 28. Разин, А.Ю. 4D сейсмический мониторинг нефтегазовых шельфовых месторождений акваторий северных морей с помощью донных регистрирующих систем / Ю.А. Разин, С.В. Головин // Научный аспект. 2018. № 4. С.779–798.
 29. K. J. Linden, “Diode lasers, LEDs and detectors for consumer electronics,” Proc. SPIE 10317, 1031709 (2017).
 30. C. Basu, M. Meinhardt-Wollweber, and B. Roth, “Lighting with laser diodes,” Adv. Opt. Technol. 2(4), 313–321 (2013).

31. B. Guzowski et al., “Efficiency evaluation of photovoltaic power converters for ultra-low power supply systems,” in *Int. Conf. Perspect. Technol. Methods MEMS Des.*, IEEE, pp. 56–60 (2019).
32. B. L. Volodin et al., “Wavelength stabilization and spectrum narrowing of high-power multimode laser diodes and arrays by use of volume Bragg gratings,” *Opt. Lett.* 29(16), 1891–1893 (2004).
33. S. Hashmi et al., *Comprehensive Materials Processing*, Elsevier (2014).
34. R. Hülsewede and M. Zorn, “Efficient and high-brightness broad area laser diodes designed for high-temperature operation,” *PhotonicsViews* 17(2), 52–56 (2020).
35. D. Wake et al., “An optically powered radio over fiber remote unit using wavelength division multiplexing,” in *IEEE Int. Meet. Microw. Photonics jointly held with the 2008 Asia-Pacific Microw. Photonics Conf.*, pp. 197–200 (2008).
36. C. Vázquez et al., “Integration of power over fiber on RoF systems in different scenarios,” *Proc. SPIE* 10128, 101280E (2017).
37. J. B. Rosolem, “Power-over-fiber applications for telecommunications and for electric utilities,” in *Opt. Fiber and Wireless Commun.*, pp. 256–278 (2017).
38. Ohnuki S., Further attenuation improvement of a pure silica core fiber with large effective area. In *SubOptic conference, SubOptic 2010 conference & convention, The 7th International Conference & Convention on Undersea Telecommunications*, 11–14 May 2010.
39. Matsuura, M. Over 100-W power-over-fiber for remote antenna units. In *Proceedings of the 1st Optical Wireless and Fiber Power Transmission Conference (OWPT 2019)*, Yokohama, Japan, 23–25 April 2019; p. OWPT-5-01.
40. Kashyap, R. The fiber fuse—From a curious effect to a critical issue: A 25th year retrospective. *Opt. Express* 2013, 21, 6422–6441.
41. Zhu, B.; et al. First Demonstration of hollow-core-fiber cable for low latency data transmission. In *Proceedings of the Optical Networking and Communication Conference & Exhibition (OFC 2020)*, Online, 8–12 March 2020; p. Th4B.3.
42. Sakr, H.; et al. Hollow core NANFs with five nested tubes and record low loss at 850, 1060, 1300 and 1625 nm. In *Proceedings of the Optical Networking and*

- Communication Conference & Exhibition (OFC 2021), Online, 6–10 June 2021; p. F3A.4.
43. Li, J.; Zhang, A.; Zhou, G.; Liu, J.; Xia, C.; Hou, Z. A large-core microstructure optical fiber for co-transmission of signal and power. *IEEE OSA J. Lightwave Technol.* 2021, 39, 4511–4516.
 44. Al-Zubaidi, F.M.A.; Montero, D.S.; Vázquez, C. SI-POF supporting power-over-fiber in multi-Gbit/s transmission for in-home networks. *IEEE OSA J. Lightwave Technol.* 2021, 39, 112–121.
 45. Tonini, A.; Cerini, A.; Coggi, V. High power single mode expanded beam fiber optic connectors for power over fiber applications. In *Proceedings of the 3rd OpticalWireless and Fiber Power Transmission Conference (OWPT 2021)*, Online, 19–22 April 2021; p. OWPT-6-04.
 46. Diouf, C. et al., characterization, and test of a versatile single-mode power-over-fiber and communication system for seafloor observatories. *IEEE J. Ocean. Eng.* 2020, 45, 656–664.
 47. Гаркушин А. А. и др. Зависимость характеристик системы PoF от длины оптического волокна // *Фотон-экспресс*. – 2021. – №. 6. – С. 42-43.
 48. Helmers, H.; Höhn, O.; Lackner, D.; López, E.; Ruiz-Preciado, L.; Schauerte, M.; Siefer, G.; Dimroth, F.; Bett, A.W. Highly efficient III-V based photovoltaic laser power converters. In *Proceedings of the 1st Optical Wireless and Fiber Power Transmission Conference (OWPT 2019)*, Yokohama, Japan, 23–25 April 2019; p. OWPT-1-01.
 49. Helmers, H.; Lopez, E.; Höhn, O.; Lackner, D.; Schön, J.; Schauerte, M.; Schachtner, M.; Dimroth, F.; Bett, A.W. 68.9% efficient GaAs-based photonic power conversion enabled by photon recycling and optical resonance. *Phys. Status Solidi RRL* 2021, 15, 2100113.
 50. Fafard, S. Photovoltaic power converters and application to optical power transmission. In *Proceedings of the 2nd Optical Wireless and Fiber Power Transmission Conference (OWPT 2020)*, Online, 21–23 April 2020; p. OWPT-1-01.

51. Keller, G.; Wierzkowski, T.; Leest, R.; Fuhrmann, D.; Volk, A.K.; Khorenko, V. Advantages of III/V metamorphic technology for high efficiency infrared laser power converters. In Proceedings of the 2nd Optical Wireless and Fiber Power Transmission Conference (OWPT 2020), Online, 21–23 April 2020; p. OWPT-4-01.
52. Fafard, S. Power and spectral range options for optical power converter products. In Proceedings of the 3rd Optical Wireless and Fiber Power Transmission Conference (OWPT 2021), Online, 19–22 April 2021; p. OWPT-3-01.
53. Perales, M.; Yang, M.-H.; Wu, J. Low cost laser power beaming and power over fiber systems. In Proceedings of the 1st Optical Wireless and Fiber Power Transmission Conference (OWPT 2019), Yokohama, Japan, 23–25 April 2019; p. OWPT-7-01.
54. Wilkins, M.M.; Huang, H.-H.; Sodabanlu, H.; Sugiyama, M.; Hinzer, K. Laser power conversion at 977 nm using InGaAs/GaAsP multi-quantum-wells. In Proceedings of the 2nd Optical Wireless and Fiber Power Transmission Conference (OWPT 2020), Online, 21–23 April 2020; p. OWPT-4-04.
55. Helmers, H. New frontiers in III-V based photonic power converters. In Proceedings of the 3rd Optical Wireless and Fiber Power Transmission Conference (OWPT 2021), Online, 19–22 April 2021; p. OWPT-6-01.
56. Wilkins, M.M.; Beattie, M.N.; Xia, D.; Tam, M.C.; Zamiri, M.; Valdivia, C.E.; Fafard, S.; Masson, D.P.; Krich, J.J.; Wasilewski, Z.R.; et al. Progress towards vertically stacked InAlGaAs photovoltaic power converters for fiber power transmission at 1310 nm. In Proceedings of the 1st Optical Wireless and Fiber Power Transmission Conference (OWPT 2019), Yokohama, Japan, 23–25 April 2019; p. OWPT-2-05.
57. Helmers, H.; Franke, A.; Lackner, D.; Höhn, O.; Dimroth, F. Photovoltaic laser power converter for O-band wavelengths around 1310 nm. In Proceedings of the 2nd Optical Wireless and Fiber Power Transmission Conference (OWPT 2020), Online, 21–23 April 2020; p. OWPT-3-03.
58. Beattie, M.N.; Helmers, H.; Valdivia, C.E.; Lackner, D.; Höhn, O.; Hinzer, K. Non-uniform illumination impacts on O-band InGaAsP and metamorphic GaInAs photonic

- power converters. In Proceedings of the 3rd Optical Wireless and Fiber Power Transmission Conference (OWPT 2021), Online, 19–22 April 2021; p. OWPT-3-04.
59. Sweeney, S.J.; Jarvis, S.D.; Mukherjee, J. Laser power converters for eye-safe optical power delivery at 1550 nm: Physical characteristics and thermal behavior. In Proceedings of the 1st Optical Wireless and Fiber Power Transmission Conference (OWPT 2019), Yokohama, Japan, 23–25 April 2019; p. OWPT-2-04.
60. Sweeney, S.J.; Eales, T.D.; Jarvis, S.D.; Mukherjee, J. Optical wireless power at eye-safe wavelengths: Challenges and opportunities. In Proceedings of the 3rd Optical Wireless and Fiber Power Transmission Conference (OWPT 2021), Online, 19–22 April 2021; p. OWPT-4-04.
61. Delgado M. et al. Design and characterization of multijunction photovoltaic laser power converters for nonuniform irradiance light profiles //Progress in Photovoltaics: Research and Applications. – 2023.
62. МН GoPower: официальный сайт, Datasheet – Тайвань, 2021. –URL: http://www.mhgopower.com/images/YCH-H6424_15V_PPC_Datasheet_Rev_3.0_04-29-2022.pdf (дата обращения 15.06.25);
63. Fafard S., Masson D. P. 74.7% Efficient GaAs-Based Laser Power Converters at 808 nm at 150 K //Photonics. – MDPI, 2022. – Т. 9. – №. 8. – С. 579.
64. Cardona J. D. L. et al. Optically feeding 1.75 W with 100 m MMF in efficient C-RAN front-hauls with sleep modes //Journal of Lightwave Technology. – 2021. – Т. 39. – №. 24. – С. 7948-7955.
65. МН GoPower: официальный сайт, Datasheet – Тайвань, 2021. –URL: http://www.mhgopower.com/images/PoF%20Sensing%20Platform_Datasheet_Rev_1.5_10-01-2021.pdf (дата обращения 15.06.25);
66. Свойства световода, основанные на законах электромагнитного поля. URL:<http://foos.sfedu.ru/glava1/1.3.html> (дата обращения 15.06.2025).
67. Zhengzhou Winsen Electronics Technology Co.: официальный сайт, Datasheet – Чжэнчжоу, 2003. – URL: https://www.winsen-sensor.com/d/files/PDF/MEMS%20Gas%20Sensor/gm-702b%E7%BC%88ver1_1%E7%BC%89manual.pdf (дата обращения 15.06.25);

68. Chen Y. et al. Optically powered gas monitoring system using single-mode fibre for underground coal mines //International Journal of Coal Science & Technology. – 2022. – Т. 9. – №. 1. – С. 26.
69. Гаркушин А. А. и др. РАЗРАБОТКА МОДУЛЕЙ СИСТЕМЫ СБОРА ДАННЫХ С ДАТЧИКОВ ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН //Физика для Пермского края. – 2022. – С. 119-124.
70. Кадочиков И. В. и др. УНИВЕРСАЛЬНАЯ МЕТЕОСТАНЦИЯ НА ОСНОВЕ ЦИФРОВЫХ КОМПОНЕНТОВ //Физика для Пермского края. – 2022. – С. 138-143.
71. Гаркушин А. А. и др. Перспективы применения технологии Power-over-Fiber //ПРИКЛАДНАЯ ФОТОНИКА Учредители: Пермский национальный исследовательский политехнический университет. – 2023. – Т. 10. – №. 1. – С. 46-67.
72. Matsuura M. Recent advancement in power-over-fiber technologies //Photonics. – MDPI, 2021. – Т. 8. – №. 8. – С. 335.
73. Garkushin A.A., Struk V.K., Krishtop V.V., Boichuk E.S., Karpets Y.M. POWER OVER FIBER SYSTEMS Bulletin of Scientific Communications. – 2020. – Vol. 25. - pp. 48-53.
74. Борейшо А. С., Ким А. А., Страхов С. Ю. Ограничения в применении волоконно-оптических технологий для дистанционной передачи энергии //Радиопромышленность. – 2017. – Т. 4. – С. 34-41.
75. Vázquez C. et al. Fiber-optic pyrometer with optically powered switch for temperature measurements //Sensors. – 2018. – Т. 18. – №. 2. – С. 483.
76. Sater B. L., Sater N. D. High voltage silicon VMJ solar cells for up to 1000 suns intensities //Conference Record of the Twenty-Ninth IEEE Photovoltaic Specialists Conference, 2002. – IEEE, 2002. – С. 1019-1022.
77. Khvostikov V. P. et al. GaSb photovoltaic cells for laser power conversion //AIP Conference Proceedings. – AIP Publishing, 2019. – Т. 2149. – №. 1.

78. R. Algora C. et al. Beaming power: Photovoltaic laser power converters for power-by-light //Joule. – 2022.
79. Толбанов О. П. и др. Полупроводниковые приборы на основе арсенида галлия с глубокими примесными центрами. – 2016.
80. Ю.Н. Хижняков. Нечеткое, нейронное и гибридное управление: учеб. пособие / Ю.Н. Хижняков. – Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2013. – 303 с.
81. Авров Д. Д. и др. Технология материалов микроэлектроники: от минерального сырья к монокристаллу. – 2017.
82. Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук: [сайт]. URL: <https://www.ioffe.ru/SVA/NSM/Semicond/GaInAs/bandstr.html>
83. Zheng H. et al. Simulation and Experimental Research on a Beam Homogenization System of a Semiconductor Laser //Sensors. – 2022. – Т. 22. – №. 10. – С. 3725.
84. Гордеев-Бургвиц М. А. Общая электротехника и электроника: учебное пособие //Текст: электронный // Электронно-библиотечная система IPR BOOKS: [сайт]. — URL: <https://www.iprbookshop.ru/35441.html> (дата обращения: 15.06.2023). — Режим доступа: для авторизир. пользователей. – 2015. – Т. 7.
85. Lee J. S. Z., Tan R. H. G., Babu T. S. Design and Implementation of Low-Cost Solar Photovoltaic Emulator Utilizing Arduino Controller and DC–DC Buck Converter Topology //DC—DC Converters for Future Renewable Energy Systems. – 2022. – С.203-222.
86. Игумнов Д. В., Костюнина Г. П. Основы полупроводниковой электроники. – 2005.
87. Kozyukov D. A., Tsygankov B. K. Simulation of photovoltaic modules characteristics in MATLAB/SIMULINK. Scientific Journal of KubSAU.– 2019. – V. 19. issue 112, pp. 1573 – 1588.

88. Бутаков С. В., Червочков А. С. Моделирование автономной фотоэлектрической системы в программной среде MATLAB Simulink //Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. – 2019. – Т. 19. – №. 4. – С. 112-119.
89. Garkushin A. A. et al. Digital Twin of the Photoelectric Converter of the Power Transmission System over Optical Fiber //Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2024. – Т. 2701. – №. 1. – С. 012146.
90. Официальный сайт NREL URL: <https://www.nrel.gov/pv/interactive-cell-efficiency> (дата обращения 15.06.2025)
91. Серебрянский С. А. и др. Цифровой двойник в едином информационном пространстве жизненного цикла как инструмент обеспечения конкурентоспособности изделия авиационной техники //Автоматизация в промышленности. – 2021. – №. 1. – С. 20-26.
92. Мухамбедьяров Б. Б., Лукичев Д. В., Полюга Н. Л. Исследование алгоритмов поиска точки максимальной мощности для повышения эффективности фотоэлектрических преобразователей //Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2018. – Т. 18. – №. 6. – С. 1099-1107.
93. Garkushin A.A. et. al.// 12th International Conference on Mathematical Modeling in Physical Sciences. – Journal of Physics: Conference Series, 2023.
94. Ю.Н.Хижняков Теория многопозиционного релейного регулирования и ее приложение. Перм. гос. техн. тн-т, Пермь, 1999. - 99 с.
95. Балаев П. А. и др. Методы определения точки максимальной мощности фотоэлектрической батареи //Столыпинский вестник. – 2022. – Т. 4. – №. 9. – С. 4982-4997.
96. Хижняков Ю.Н. Алгоритмы нечеткого, нейронного и нейро-нечеткого управления в системах реального времени.: учеб. пособие. – Пермь, Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2013. – 156 с.

97. Интеллектуальные системы автоматического управления / Под ред. И.М. Макарова, В.М. Лохина. – М.: ФИЗМАИЛИТ, 2001. – 576 с.
98. Пегат А. Нечеткое моделирование и управление (пер. с англ.) 2-е изд. М.: Бином. Лаборатория знаний. 2013. – 798 с. (электронная версия).
99. A. Dehghani and H. Khodadadi Designing a neuro-fuzzy PID controller based on smith predictor for heating system // 17th International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS), 2017, pp. 15-20. DOI: 10.23919/ICCAS.2017.8204416.
100. Garkushin A. et al. Algorithm for Finding the Optimal Optical Power in a Fiber Optic Power Transmission System //2024 IEEE Ural-Siberian Conference on Biomedical Engineering, Radioelectronics and Information Technology (USBEREIT). – IEEE, 2024. – С. 95-97.
101. Garkushin A. A. et al. Intelligent Power Supply System with Power Transmission via Optical Fiber //Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. – 2024. – Т. 88. – №. 6. – С. 986-990.
102. Meghan N. Beattie, Henning Helmers. InP- and GaAs-Based Photonic Power Converters Under O-Band Laser Illumination: Performance Analysis and Comparison // IEEE JOURNAL OF PHOTOVOLTAICS, VOL. 13, NO. 1, JANUARY 2023. DOI 10.1109/JPHOTOV.2022.3218938
103. Хвостиков В.П., Калюжный Н.А., Минтаиров С.А. Модуль фотоэлектрических преобразователей лазерного излучения. // Физика и техника полупроводников, 2019, том 53, вып. 8. DOI: 10.21883/FTP.2019.08.48007.9118
104. Schubert J., Oliva E., Dimroth F. High-Voltage GaAs Photovoltaic Laser Power Converters // IEEE TRANSACTIONS ON ELECTRON DEVICES, VOL. 56, NO. 2, FEBRUARY 2009. DOI 10.1109/TED.2008.2010603
105. Varlamov A., Agruzov P. Power-over-Fiber with Simultaneous Transmission of Optical Carrier for a High Frequency Analog Signal over Standard Single-Mode Fiber // Photonics 10, no. 1: 17. <https://doi.org/10.3390/photonics10010017>
106. Hailin Yang, Di Peng. 10-W power light co-transmission with optically carried 5G NR signal over standard single-mode fiber // Opt. Lett. 46, 5116-5119 (2021)

107. Стоянова Т.В., Тупицкая Н.А. ФИЗИКА. Фотоэлектрические преобразователи: Методические указания к лабораторным работам / Санкт-Петербургский горный университет. Сост.: СПб, 2023. 23 с.
108. Тихонов П. В. Обоснование параметров фотоэлектрического теплового модуля // федеральное агентство научных организаций государственное научное учреждение. – 2014.
109. Панченко В. А., Чирский С. П. Моделирование теплового состояния фотоприёмника концентраторного теплофотоэлектрического модуля // Актуальные научные исследования в современном мире. Выпуск 5(61) ч. 2– ISSN 2524-0986.
110. Kalyuzhnyy N.A., Emelyanov V.M., Evstropov V.V. Thermal and Resistive Losses in InGaAs Metamorphic Laser ($\lambda=1064$ nm) Power Converters with over 50% Efficiency // AIP Conference Proceedings 2149, 050006 (2019); <https://doi.org/10.1063/1.5124191>
111. Андреев В. М., Грилихес В.А., Румянцев В. Д. / Фотоэлектрическое преобразование концентрированного солнечного излучения. // Л.: Наука, 1989. – 310 с. Корнилов В. А., Мацак И. С., Разуваев А. Е. Приёмник-преобразователь лазерного излучения // заявитель Открытое акционерное общество "Ракетно-космическая корпорация "Энергия" имени С.П. Королева". – EDN TWYMJD.
112. Агаповичев А. В., Князева А. Г., Смелов В. Г. Численное исследование влияния параметров лазерного излучения на теплофизические параметры процесса селективного лазерного сплавления // Высокие технологии в современной науке и технике (ВТСНТ-2017): сборник научных трудов VI Международной научно-технической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов, г. Томск, 27–29 ноября 2017 г. — Томск : Изд-во ТПУ, 2017. — [С. 342-343].
113. Казанский Н.Л. Математическое моделирование оптических систем: Учеб. пособие / Самар, гос. аэрокосм. ун-т. - Самара, 2005. - 240 с

114. Бобученко Д. С., Пустовалов В. К., Хорунжий И. А., Математическое моделирование нелинейного распространения интенсивного оптического излучения в слое металлического аэрозоля // Матем. моделирование, 2:6 (1990), 26–39
115. Емеличев В.А., Пашкевич А.В. О линейной свертке критериев в векторной дискретной оптимизации // Дискретный анализ и исследование операций. Серия 2. – 2000. – Т. 7, № 2. – С. 12-21. – EDN IBBFDB.
116. Кравцов М.К. Применение алгоритма линейной свертки критериев для нахождения эффективных решений в векторной задаче дискретной оптимизации // Экономика, моделирование, прогнозирование. – 2021. – № 15. – С. 123-138. – EDN IMTIML.
117. Богданова П.А., Сахаров Д.М. Обзор методов многокритериальной оптимизации в задачах принятия решений. // IX международная научно-практическая конференция.
118. Зобнина О. В., Дю А. И., Бабаева Ю. А. Многокритериальная оптимизация. // Научно-образовательный журнал для студентов и преподавателей «StudNet» №1/2021
119. Anastasia S. et al. Measuring the focal length of a tapered fiber: experiment and modeling in the approximation of geometric optics //St. Petersburg Polytechnic University Journal: Physics and Mathematics. – 2023. – Т. 68. – №. 3.1. – С. 357-361.
120. Lee H. J. et al. Fiber modeling and simulation of effective refractive index for tapered fiber with finite element method //2016 IEEE 6th International Conference on Photonics (ICP). – IEEE, 2016. – С. 1-3.
121. Garkushin A. A. et al. Photovoltaic Converter with Aperture Correction for Power-over-Fiber Systems //Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. – 2024. – Т. 88. – №. Suppl 3. – С. S361-S369.

122. Гаркушин А.А., Кадочиков И.В., Криштоп В.В., Модуль фотоэлектрического преобразователя. Патент RU 232070 U1. Дата публикации: 21.02.2025.
123. Гаркушин А.А., Кадочиков И.В., Нифонтова Е.В., Криштоп В.В. Модуль фотоэлектрического преобразователя с разъемным узлом для оптического кабеля. Патент RU 2814799 C1. Дата публикации: 04.03.2024.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение 1 – Патент на изобретение №2814799 «МОДУЛЬ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ С РАЗЪЕМНЫМ УЗЛОМ ДЛЯ ОПТИЧЕСКОГО КАБЕЛЯ»



