

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«СЕВАСТОПОЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

На правах рукописи

Аль-Руфай Фаиз Метаб Муса

**АВТОНОМНЫЕ ИСТОЧНИКИ ПИТАНИЯ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО
ТИПА С ПРЯМЫМ ПРЕОБРАЗОВАНИЕМ ЭНЕРГИИ ВОЛН В
ЭЛЕКТРИЧЕСТВО**

2.4.5 – Энергетические системы и комплексы (технические науки)

2.4.2 – Электротехнические комплексы и системы (технические науки)

Диссертация

на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор,

Б.А. Якимович

БЛАГОДАРНОСТИ

Выражаю глубокую благодарность научному руководителю моей диссертации за его неоценимый вклад в работу, непоколебимую поддержку и профессиональные комментарии на протяжении всего исследовательского процесса. Его содействие и экспертное мнение сыграли ключевую роль в формировании траектории этой диссертации.

Выражаю искреннюю благодарность профессорам кафедры возобновляемой энергетики Севастопольского университета. Их сотрудничество, академическое видение и конструктивные замечания способствовали разработке и совершенствованию моего исследования.

Выражаю благодарность Университету СевГУ за поддержку, которая сыграла ключевую роль в обеспечении ресурсами и условиями, необходимыми для завершения данного научного исследования.

От всего сердца благодарю моих родителей за их бесконечную веру в мои силы на протяжении всего учебного пути. Особенно я признателен своей жене и детям, чья неизменная поддержка и понимание были моими опорами. Без их постоянного участия мой успех был бы невозможен.

Благодарю всех, кто принимал участие в исследовательском процессе, и всех, кто внес свой вклад в развитие диссертации различными способами, чье участие способствовало продвижению научной работы. Также я искренне благодарен за коллективный дух, который сопровождал данный научный труд.

Но прежде всего, я благодарю Аллаха за то, что он благословил меня на выполнение моей диссертации.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	7
Глава 1. Анализ и классификация существующих волновых энергетических установок и электростанций	12
1.1 Анализ существующих волновых энергетических установок и электростанций.....	13
1.2 Классификация существующих волновых энергетических установок и электростанций.....	20
1.2.1 Слот-конус генератор (СКГ).....	26
1.2.2 Волновая Электростанция типа «Pelamis»	27
1.2.3 Система СЕТО	28
1.2.4 Система Oyster	30
1.2.5 Утка Солтера.....	31
1.2.6 Установка Oceanlinx с турбиной Denniss-Auld	33
1.2.7 Волновая установка Kaimei и Mighty Whale	34
1.2.8 Волновая энергетическая установка LIMPET	34
1.2.9 Волновая электростанция: плот Коккереля.....	35
1.3. Оценка ресурсов волновой энергии Черного моря.....	38
1.4. Энергообеспечения для различных маломощных устройств.....	52
1.4.1 Энергопотребление маломощных устройств	56
1.5. Обзор методов использования пьезоэлектрических эффектов для преобразования энергии в различных областях техники.....	59
1.5.1 Преобразования энергии из потока воды и волны с использованием пьезоэлектрических преобразователей	64
1.6 Краткая информация о существе рассматриваемой проблемы.....	68
1.7 Выводы.....	71

Глава 2. Разработка системы преобразования энергии волн в электрическую с применением пьезоэлектрических элементов.....	73
2.1 Математическое моделирование сбора пьезоэлектрической энергии из жидкостей.....	77
2.1.1. Уравнение движения потока жидкости	78
2.1.2 Пьезоэлектрические определяющие уравнения.....	79
2.1.3. Взаимодействие жидкости с пьезоэлектрическим элементом	81
2.2 Моделирование ПЭ с помощью COMSOL Multiphysics	83
2.2.1. Модель погруженного пьезоэлектрического элемента (ППЭ).....	85
2.2.2. Непогружная модель ПЭ	86
2.3 Лабораторный тест пьезоэлектрического элемента	88
2.4 Результаты моделирования в COMSOL.....	89
2.4.1. Результаты моделирования для ППЭ модели	89
2.4.2. Результаты моделирования для НПЭ модели	91
2.5. Результаты экспериментальных исследований.....	93
2.5.1. Результаты погружной модели ППЭ.....	93
2.5.2. Результаты непогружной модели НПЭ.....	95
2.5.3. Техничко-экономический анализ	102
2.5 Выводы	104
Глава 3. Структурный синтез электрических схем для пьезоэлектрических систем	106
3.1 Полный мостовой выпрямитель (ПМВ)	107
3.2 Схема синхронизированного коммутатора с индуктором (СКИ).....	111
3.2.1 Последовательный СКИ (С-СКИ)	115
3.2.2 Параллельный СКИ (П-СКИ)	116
3.3 Схема синхронного извлечения электрического заряда (СИЭЗ)	117

3.4 Методы переключения с самопитанием	122
3.5 Моделирование пьезоэлектрических цепей	126
3.5.1 Цепь полного мостового выпрямителя	131
3.5.2 Цепь СИЭЗ с самопитанием (СИЭЗс).....	134
3.5.3 Цепь СИЭЗопт с самопитанием (СИЭЗопт-с).....	136
3.6 Выводы	139
Глава 4 Экспериментальное исследование цепей, используемых в пьезоэлектрических системах	140
4.1 Цепь полного мостового выпрямителя	141
4.2 Цепь СИЭЗ с самопитанием.....	143
4.3 Цепь СИЭЗопт-с	145
4.4 Исследование электрических цепей с использованием нескольких ПЭ. 147	
4.4.1 Цепь полного мостового выпрямителя	147
4.4.2 Цепь СИЭЗопт-с	149
4.5 Структурная схема разработанной системы	151
4.5.1 Оценка цепей ПЭ.....	161
4.5.2 Стандартный полномостовой выпрямитель (СТ-ПМВ).....	163
4.5.3 Самопитание синхронное извлечение электрического заряда (СИЭЗс)	164
4.5.4 Синхронное извлечение электрического заряда (СИЭЗопт-с).....	166
4.6 Сравнение цепей СТ-ПМВ, СИЭЗс и СИЭЗопт-с	168
4.6.1 Выходное напряжение ПЭ ($V_{пэ}$).....	168
4.6.2 Выходное регулируемое напряжение ($V_{выход}$).....	169
4.6.3 Напряжение аккумулятора ($V_{акк}$).....	170
4.7 Выводы.....	171

ЗАКЛЮЧЕНИЕ	172
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	175
Приложение А	190
Приложение Б	194
Приложение В.....	195

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. Диссертационное исследование посвящено получению энергии от океанских и морских волн, посредством использования пьезоэлектрических элементов для обеспечения заряда и накопления энергией аккумуляторов, и путем создания автономных энергетических устройств на примере морских буев. Данная тематика становится более актуальной в контексте глобальной потребности в энергоэффективных решений и переходу к экологически чистым источникам энергии, таким как возобновляемая энергия, что особенно актуально в условиях ограниченности доступа к внешним источникам электроэнергии или высоких затрат на традиционную выработку электроэнергии.

Степень разработанности темы исследования. Проблемы разработки энергетических систем на базе возобновляемых источников энергии активно исследуются российскими учеными, среди которых Стребков Д.С., Безруких П.П., Щеклеин С.Е., Велькин В.И., Якимович Б.А., Бекиров Э.А., Юферев Л.Ю. и другие. Изучением способов преобразования энергии волновой активности в России занимались следующие исследователи: Виссарионов В.И., Коробков В.А., Вершинский Н.В., Васильев Ю.С., Дьяков А.Ф., Елистратов В.В., Сичкарев В.И. и др. Вопросы проектирования и эксплуатации морских буев освещались в трудах Мотыжева С.В., Корчмита Ю.В., Котта Ю.П., Вайсбанда В.Б., Грязина Д.Г. и ряда других исследователей. Существенно продвинули исследования в области применения пьезоэлементов такие российские ученые, как: Валла Б.М. и Гольдмана И.П., Милема Б.В., Дубовика М.Ф., Сильвестрова И.М. и др.

Цель работы заключается в разработке способов получения энергии от волн с применением интерфейсных схем для пьезоэлектрических элементов, направленных на повышение доступности и эффективности преобразования энергии для питания маломощных устройств, установленных на морских буях.

Достижение указанной цели предопределяет решение следующих задач:

1. Провести анализ существующих преобразователей энергии волн в электричество и их классификацию.

2. Оценка энергопотенциала Черного моря и других морских акваторий.
3. Разработать пьезоэлектрической энергетической системы, способной эффективно генерировать энергию из морских волн.
4. Изучить влияния различных компонентов схемы на эффективность генерации и преобразования энергии.
5. Провести экспериментальный анализ и моделирование различных методов выработки электроэнергии с использованием пьезоэлектрических элементов.
6. Повысить общую эффективность преобразования энергии на основании полученных результатов исследования.

Теоретическая и практическая значимость

Результаты данного диссертационного исследования, представленные в виде алгоритмов и моделей эффективных пьезоэлектрических систем могут служить основой для дальнейшего теоретического моделирования и оптимизации энергетических систем, функционирующих на пьезоэлектрическом эффекте, что открывает новые возможности в создании автономных источников энергии для беспроводных сенсорных сетей, морских буев и других маломощных устройств. Применение предложенной методики позволит существенно снизить зависимость от батарей, увеличить срок службы устройств и снизить экологические риски, связанные с их утилизацией.

Объект исследования: Автономные энергетические системы на основе пьезоэлектрических преобразователей, применяемые в маломощные морские оборудования.

Предмет исследования: различные схемы преобразования и накопления энергии с использованием пьезоэлектрических элементов, а также алгоритмы и модели эффективного функционирования пьезоэлектрических систем.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Впервые предложена система преобразования энергии волн в электрическую с применением пьезоэлектрических преобразователей.

2. Разработаны новые интерфейсные схемы для эффективного преобразования энергии от морских волн, предназначенные для создания автономного морского оборудования.

3. Разработаны и экспериментально проверены инновационные схемы извлечения заряда, демонстрирующие высокие показатели эффективности при преобразовании энергии.

4. Проведена оценка эффективности разработанных пьезоэлектрических схем для энергообеспечения в устройствах, использующих дрейфтерные технологии.

Методология и методы диссертационного исследования. Исследование базируется на моделировании работы пьезоэлектрических схем, основанном на принципах синхронного извлечения заряда. Применяются методы многофакторного анализа, прямого измерения напряжения и мощности, теории подобия и математической статистики. Дополнительно проводятся экспериментальные исследования на реальных моделях с целью подтверждения эффективности разработанных схем.

Положения, выносимые на защиту:

1. Результаты анализа эффективности пьезоэлектрической системы способной генерировать энергию из морских волн
2. Результаты оценки повышения энерго-эффективности автономного морского оборудования при использовании пьезоэлектрических систем.
3. Результаты экспериментального и имитационного моделирования пьезоэлементов в программной среде COMSOL.
4. Разработана интерфейсная схема для синхронных пьезоэлектрических элементов, увеличивающая доступность энергии.

Достоверность результатов исследования. Результаты данной работы подтверждаются применением научно обоснованных и проверенных методов расчета возобновляемых источников энергии, современными инженерными программами, такими как COMSOL Multiphysics, используемыми для моделирования работы пьезоэлектрических элементов.

Научная специальность, которой соответствует диссертация. Тематика и содержание работы соответствует паспорту специальности **2.4.5. «Энергетические системы и комплексы»** область исследования соответствует пункту паспорта 6: «Теоретический анализ, экспериментальные исследования, физическое и математическое моделирование, проектирование энергоустановок, электростанций и энергетических комплексов, функционирующих на основе преобразования возобновляемых видов энергии (энергии водных потоков, солнечной энергии, энергии ветра, энергии биомассы, энергии тепла земли и других видов возобновляемой энергии) с целью исследования и оптимизации их параметров, режимов работы, экономии ископаемых видов топлива и решения проблем экологического и социально-экономического характера».

2.4.2. «Электротехнические комплексы и системы» область исследования соответствует пункту паспорта 3: «Разработка, структурный и параметрический синтез, оптимизация электротехнических комплексов, систем и их компонентов, разработка алгоритмов эффективного управления».

Личный вклад автора. Автор внёс значительный личный вклад в исследование, проведя анализ влияния различных компонентов схемы на эффективность генерации энергии, а также осуществив практические тестирования. В рамках диссертационной работы описан процесс проведения экспериментального исследования различных методов выработки электроэнергии с помощью пьезоэлектрических элементов. Кроме того, автором была предложена конструкция и оптимальное размещение пьезоэлектрического элемента, способного генерировать энергию из морских волн.

Апробация работы. Апробация результатов исследования проводилась на международных научно-практических конференциях: «Экологическая, промышленная и энергетическая безопасность» (сентября 2023, Севастополь, Севастопольский государственный университет); «Актуальные проблемы транспорта и энергетики: пути их инновационного решения» г.Астана, марта 2025; «International Scientific Conference Energy Management of Municipal Facilities and Environmental Technologies» (EMMFT-2024), Astana, Kazakhstan.

Публикация результатов. По результатам диссертационной работы опубликованы 17 научных работ, из них 8 статей в рецензируемых научных журналах, определенных ВАК РФ и Аттестационным советом УрФУ, в том числе 2 статьи в журналах, индексируемых в Scopus, а также 9 тезисов докладов и статьи в международных научно-практических конференциях и научных журналах.

Структура и объем диссертационной работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложений. Основная часть работы состоит из 198 страниц печатного текста, 105 рисунков и 15 таблиц. Библиографический список содержит 145 наименования источников.

Глава 1. Анализ и классификация существующих волновых энергетических установок и электростанций

В контексте устойчивого развития человеческой цивилизации зелёная энергия играет ключевую роль [1]. Нефть, мазут, гидравлика, природный газ и атомная энергия продолжают доминировать среди ресурсов, используемых для генерации электроэнергии, однако в последнее время нашли распространение альтернативные источники, такие как солнечная, геотермальная, биомасса, ядерная, ветровая, волновая и водородная энергия [2-4]. Среди различных видов энергии, энергия волн выделяется как одна из наиболее перспективных технологий благодаря высокой плотности мощности, составляющей в среднем 2-3 кВт/м², что значительно больше, чем у ветровой (0,4-0,6 кВт/м²) и солнечной (0,1-0,2 кВт/м²) энергии. В среднем плотность мощности волн превосходит энергию ветра в 10 раз, а солнечную энергию - в 100 раз, что подчеркивает их превосходный энергетический потенциал [5,6]. Помимо высокой энергоотдачи, энергия волн обладает рядом неоспоримых преимуществ. Во-первых, она более предсказуема по сравнению с другими периодически возобновляемыми источниками энергии, что позволяет улучшить интеграцию в сеть и планирование энергопотребления. Во-вторых, преобразователи энергии волн (ПЭВ) оказывают минимальное экологическое и визуальное воздействие, что делает их менее навязчивым вариантом для производства энергии в прибрежной зоне. Кроме того, волновые фермы могут служить двойной цели, выступая в качестве берегозащитных сооружений, смягчая эрозию и сохраняя береговые линии [7]. В глобальном масштабе потенциал волновой энергии наиболее высок между широтами 40° и 60° как в Северном, так и в Южном полушариях, где среднегодовая плотность волновой энергии особенно велика. Примечательно, что запасы энергии волн в Южном полушарии превышают запасы в Северном полушарии, что делает эти регионы идеальным местом для крупномасштабного использования энергии волн [8- 10].

1.1 Анализ существующих волновых энергетических установок и электростанций

Идеи использования энергии океана начали формироваться ещё в XIX веке. Первые попытки практического применения волновой энергии зафиксированы в 1890 году, когда были созданы экспериментальные устройства для преобразования волновой энергии в электричество [11]. Фундаментальные исследования в России связаны с работами таких учёных, как А.Ф. Дьяков, В.А. Коробков, Ю.С. Васильев, Н.В. Вершинский и другие. Они внесли значительный вклад в разработку теоретических основ волновой энергетики.

Интенсификация исследований наблюдается в последние 10–15 лет, что обусловлено поиском альтернативных источников энергии [13]. Мировым лидером в реализации прикладных проектов является Япония, где эксплуатируется свыше 300 автономных буев и навигационных маяков, работающих на волновой энергии. В Великобритании реализуется государственная программа развития морской энергетики: в Эдинбургском университете функционирует специализированный гидродинамический резервуар, позволяющий моделировать волновые режимы от слабой зыби (амплитуда 0,1–0,5 м) до экстремальных штормовых условий (высота волн до 15 м) [14].

В Российской Федерации развитие волновой энергетики находится на этапе экспериментального внедрения. В этом контексте учёные Уральского федерального университета (УрФУ) разработали мобильную волновую электростанцию, предназначенную для преобразования энергии морских волн в электрическую. В 2014 году были инициированы её испытания в бухте Витязь на базе Морской экспериментальной станции «Мыс Шульца», функционирующей при Тихоокеанском океанологическом институте им. В. И. Ильчева Дальневосточного отделения Российской академии наук (ДВО РАН). Данный объект расположен на территории полуострова Гамова (Приморский край). Значимым этапом в развитии данной технологии стало введение в эксплуатацию первой опытно-промышленной волновой электростанции в

ноябре 2022 года, также размещённой на полуострове Гамова. [15, 16]. В исследовании Хоссайна и др.(2019) представлена инновационная конструкция плавучей микроволновой энергии (WMPP), акцентирующая внимание на её эффективности и масштабируемости. Работа описывает разработку закрытой металлической капсулы с отрицательной плавучестью, оснащённой пружинным маятником и трёхобмоточным генератором, что позволяет эффективно преобразовывать энергию волн. Экспериментальные исследования показали, что один микроагрегат способен генерировать от 20 до 60 Вт мощности при амплитуде волн 20 см и более и периоде колебаний от 1 до 5 секунд. Благодаря модульному дизайну возможно объединение нескольких микроагрегатов в кластеры, увеличивая общую мощность системы до нескольких киловатт [17].

Особый научный интерес представляет анализ условий эксплуатации энергетических установок в арктических морях, где сосредоточено до 60% российского волнового потенциала. В работе Т.Э. Уваровой (2013) предложена инновационная методика вероятностной оценки ледовой абразии, позволяющая прогнозировать износ гидротехнических сооружений под воздействием дрейфующих льдов. Данный подход повышает точность расчётов устойчивости конструкций в условиях Белого и Охотского морей, где сочетание низких температур и динамичных ледовых полей создаёт уникальные инженерные вызовы. В работе Vozzi et al. [18] проведена оценка производительности нескольких морских преобразователей энергии волн (ПЭВ) вдоль средиземноморского побережья с разрешением 10 км. Полученные результаты свидетельствуют о том, что большинство прибрежных регионов Средиземноморья подходят для использования энергии волн с применением масштабных моделей, основанных на критерии Фруда. В частности, шесть из проанализированных ВЭС продемонстрировали коэффициент мощности более 0,2 вдоль 40% береговой линии, а три устройства - AquaBuOY, Pelamis и WaveBob - достигли коэффициента мощности более 0,3 в 8% исследованных мест, что подчеркивает их потенциал для эффективного извлечения энергии в регионе. В работе Rusu и Onea [19] провели всесторонний анализ

производительности десяти различных систем преобразователей волновой энергии (ПВЭ), установленных в различных европейских прибрежных регионах. Согласно их выводам, понтонный преобразователь энергии продемонстрировал самый высокий коэффициент мощности, составляющий в среднем 14,5 % за весь период эксплуатации и достигающий 21,1 % в зимние месяцы, когда доступность волновой энергии обычно выше. В исследовании Raymond Alcorn [20] рассматривается разработка и тестирование программного обеспечения, основанного на данных фликерметра, применяемого для оценки качества электроснабжения волновой электростанции LIMPET (Айла, Шотландия). Анализируются флуктуации напряжения, вызванные работой станции, и предлагаются методы улучшения характеристик фликерметра при использовании предварительно записанных данных. Результаты показали, что измеренное напряжение остается в допустимых пределах, подтверждая работоспособность системы. Sierra et al. [21] проанализировали работу трех преобразователей волновой энергии (ПВЭ) - Pelamis, AquaBuOY и Wave Dragon - на побережье Менорки, Испания. По результатам исследования коэффициенты мощности составили 9 %, 10 % и 11 % соответственно, что указывает на умеренную эффективность этих устройств при данных волновых условиях. В работе Kanchana Amarasekara [22] рассмотрены волновые энергоустановки, адаптированные к климатическим условиям страны, а также возможности их подключения к энергосистеме. Анализ включает экономические показатели, оценивающие эффективность внедрения ВЭС. Гийо и Шапален [23] исследовали влияние временных колебаний на выработку электроэнергии тремя волновыми преобразователями энергии (ПВЭ) - Pelamis, AquaBuOY и Wave Dragon. Результаты исследования показали значительные сезонные колебания производительности, особенно в зимние месяцы, когда Wave Dragon достигал максимального среднемесячного коэффициента мощности около 65 %, что свидетельствует о его высокой эффективности в условиях пиковых волн. Исследование Jogn Kaldellis [24] представляет геопространственный многокритериальный анализ для выбора оптимального местоположения

волновой электростанции в Ионическом море (западное побережье Греции). Метод основан на технологии географических информационных систем (ГИС) и учитывает такие факторы, как удаленность от энергосистемы, высота волн и природоохранные зоны. Оценка волнового ресурса проводится с использованием реальных измерений и численного моделирования. Результаты позволяют определить наиболее перспективные участки для размещения электростанций. Разработанная методология может быть применена в пространственном планировании для других регионов.

В работе S.S.H. Najjaj [25] представлена конструкция Wave-Power генератора и проведено ее сравнение с существующими системами преобразования морской энергии в электричество. Цель исследования — продемонстрировать повышенную эффективность разработанного устройства. Анализ выполнен с помощью MATLAB. Результаты исследования показали значительное увеличение выработки электроэнергии, достигающее 80% по сравнению с существующими технологиями. Национальные программы развитых стран (Швеция, Норвегия, Дания, Ирландия, Великобритания) рассматривают характеристики волновой энергетики, технологии преобразования энергии и перспективы ее развития [26]. В литературе представлены описания устройств и генераторов, используемых в волновой энергетике, а также применяемые технологии в Норвегии, Ирландии, США, Великобритании, Австралии и Японии [6, 7]. В исследовании Сенькова А.П. и др. [27] Предложена модель описывает систему преобразования волновой энергии с использованием обтекаемого поплавка, паруса и генератора с блоком шкивов. Конструкция повышает устойчивость и эффективность за счёт оптимизации передачи энергии через гибкую связь, закреплённую на дне. Интегрированные электронные элементы обеспечивают высокое качество вырабатываемой электроэнергии. В патенте [88] описана волновая электростанция, основанная на двух телах, совершающих колебания в противоположных фазах. Устройство представляет собой сложную конструкцию, разработанную для эффективного преобразования энергии волн.

В изобретении [54] представлена поплавковая волновая электростанция, предназначенная для плавучего завода сжижения природного газа (СПГ). Плавучая волновая электростанция включает вертикальный цилиндрический корпус с механическими преобразователями энергии волн, содержащими винтовые пары и пружинные механизмы. Система повышает эффективность преобразования при малых амплитудах волн. Методика, представленная в [29], описывает принципы расчета преобразователей волновой энергии для поплавковых волновых электростанций (ПВЭС). Основу системы составляет линейный электрогенератор, в котором индуктор выполнен в виде инерционной массы с постоянными магнитами, обеспечивающей вертикальное возвратно-поступательное движение за счет упругих элементов.

В патенте рассматривается возможность создания ПВЭС разной мощности:

- Малые установки (<1 кВт) – используются на судах как вспомогательные источники электроэнергии.
- Крупные установки (>1 кВт) – формируются за счет многомодульных связей, состоящих из оптимально подобранных ПВЭС, позволяя достигать мощностей в десятки мегаватт.

Авторы предлагают размещать такие энергетические комплексы в акваториях мирового океана с интенсивной штормовой активностью, а также в районах, мало пригодных для мореплавания или проживания человека. Дополнительно рассматривается возможность управления местоположением ПВЭС-связок с помощью спутниковых систем, что позволит перемещать их в зоны с наибольшей волновой активностью для повышения эффективности генерации. В Хорватском секторе Адриатического моря волновые преобразователи энергии Pelamis были определены как наиболее подходящий вариант благодаря их более высоким значениям коэффициента мощности по сравнению с другими технологиями ВЭС [30]. Это говорит о том, что местные волновые условия хорошо согласуются с эксплуатационными характеристиками системы Pelamis, повышая эффективность ее производства энергии. В работе Martić и Др. [31] проведен оценка потенциала волновой энергии на семи участках

Адриатического моря с использованием трех преобразователей волновой энергии. Применяя масштабирование Фруда, уменьшенные устройства AquaBuoy и Pelamis достигают коэффициентов мощности до 29% и 42%, соответственно. Эти оптимизированные ВЭС демонстрируют лучшую пригодность и экономическую жизнеспособность по сравнению с полномасштабными альтернативами, такими как волновые преобразователи Lysekil.

Развитие систем преобразования энергии волн (ВЭ) обусловлено различными методами улавливания энергии волн и специфическими характеристиками мест их размещения [32,33]. В таблице 1.1 представлены данные об установленной мощности (кВт) волновых энергетических систем по всему миру с 2016 года, включая запланированные проекты, текущие разработки и действующие установки [34,35].

Таблица 1.1 Установленная мощность ВЭС в мире с 2016 года

Страна	Планируемые проекты (кВт)	Установленные (кВт)	Действующие (кВт)	Всего (кВт)
Ирландия	5000	0	0	5000
Швеция	0	0	3200	3200
Соединенные Штаты	1335	500	30	1865
Португалия	350	0	400	750
Китай	0	400	300	700
Корея	0	0	665	665
Испания	0	230	296	526
Мексика	200	0	0	200
Италия	0	150	0	150
Дания	39	12	1	52
Новая Зеландия	0	20	0	20
Канада	0	0	11	11

Последние исследования показывают, что в настоящее время на разных стадиях разработки находится более 100 различных технологий ВЭС [121,122]. Один из важных способов классификации преобразователей волновой энергии (ПВЭ) основан на используемых ими гидромеханических принципах преобразования, можно выделить три основных метода как показано на рисунке 1.1.

Многочисленные исследования в области развития волновой энергетики показывают, что для обеспечения эффективности и экономической целесообразности волновые электростанции (ВЭС) должны функционировать в зонах, где среднегодовая плотность мощности волн составляет не менее 20 кВт/м. Кроме того, поскольку выработка электроэнергии волновыми преобразователями зависит от их установленной мощности и размеров, важно оценивать фактическое количество вырабатываемой энергии за определённый период по отношению к максимально возможному выходу, если устройство работало бы при номинальной мощности.



Рисунок 1.1 Классификация ПВЭ по принципу работы

Одной из ключевых проблем на пути к широкомасштабному внедрению и коммерциализации волновых электростанций является обеспечение их надежности и устойчивости в условиях экстремальных волн. Решение задач, связанных с прочностью конструкции и стабильной работой в суровых морских условиях, остается важнейшим направлением исследований для дальнейшего развития технологий волновой энергетики.

1.2 Классификация существующих волновых энергетических установок и электростанций.

В последние годы значительно возросло внимание к возобновляемым источникам энергии, достигшим коммерческой зрелости, таким как ветровая, геотермальная и солнечная энергия. Однако еще одним перспективным, но недостаточно используемым видом возобновляемой энергии является энергия океанских волн, которая доступна во всем мире [3]. В последнее десятилетие значительные усилия в области исследований и разработок были направлены на развитие различных технологических решений для использования энергии океанских волн [1-5]. Несмотря на свой потенциал, волновая энергия находится на ранней стадии развития, а связанные с ней энергетические затраты пока неконкурентоспособны по сравнению с более распространенными возобновляемыми источниками [11,12]. Основные проблемы, препятствующие широкой коммерциализации технологии использования энергии волн, включают суровую морскую среду, которая подвергает оборудование высокому уровню коррозии из-за воздействия соленой воды, а также экстремальные механические нагрузки, возникающие из-за суровых условий океана [36]. Эти факторы требуют надежных и долговечных конструкций, что еще больше усложняет продвижение и экономическую целесообразность систем волновой энергетики. Поскольку сектор продолжает развиваться, устранение этих технических и экономических барьеров будет иметь решающее значение для раскрытия всего потенциала этого возобновляемого ресурса [37, 38]. Системы преобразования энергии волн (ПЭВ) используют кинетическую и потенциальную энергию океанских волн, преобразуя ее в механическую или электрическую энергию,

пригодную для интеграции в системы хранения энергии или энергосистемы. Процесс преобразования в устройстве WEC происходит по структурированной цепочке преобразования энергии, как показано на рисунке 1.2, иллюстрирующем последовательные этапы захвата, преобразования и использования энергии [35].



Рисунок 1.2 Этапы преобразования энергии волн.

Концепции волновых преобразователей энергии (ПВЭ) можно классифицировать в зависимости от их местоположения, которое включает три основных типа: береговые, прибрежные и Оффшорные установки (Рис. 1.3) [39-41].

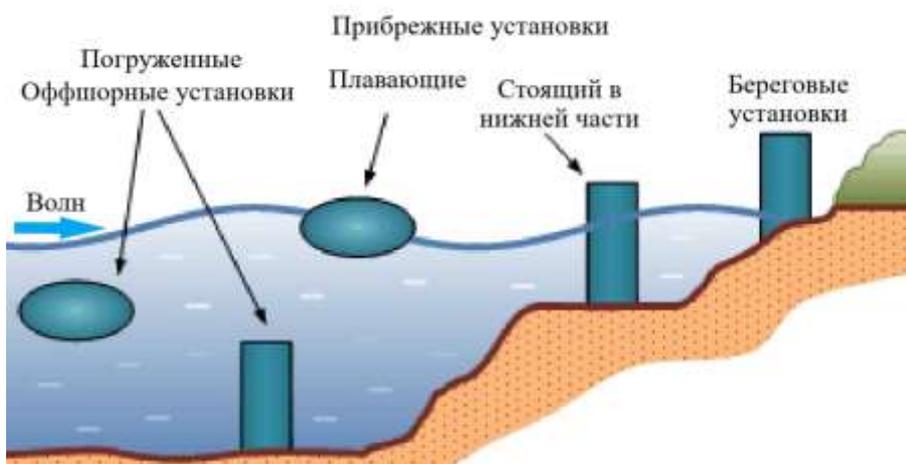


Рисунок 1.3 Классификация преобразователей волновой энергии в зависимости от их местоположения.

- Береговые преобразователи энергии волн (БПВЭ) представляют собой стационарные конструкции, интегрированные в береговую линию, гавани или волнорезы. Эти системы в основном используют технологию осциллирующего водяного столба (ОВС), которая включает в себя камеру, где

водяные волны заставляют воздух внутри колебаться. Когда уровень воды поднимается и опускается, движение воздуха используется турбиной, предназначенной для эффективного улавливания энергии волн. Одним из ключевых преимуществ береговых устройств является их близость к конечному потребителю, что снижает затраты на передачу энергии и упрощает обслуживание. Кроме того, их интеграция в существующую береговую инфраструктуру, такую как волнорезы или портовые стены, может обеспечить двойную функциональность, что повышает их привлекательность. В целом, несмотря на то, что береговые устройства для получения энергии волн обладают практическими преимуществами благодаря интеграции в прибрежную инфраструктуру и снижению сложности эксплуатации, их эффективность ограничивается доступностью энергии волн на мелководье [7,8,39-41].

- Прибрежные преобразователи энергии волн (ППЭВ) устанавливаются на мелководье, обычно на расстоянии от 0,5 до 2 километров от береговой линии. Эти устройства обладают рядом преимуществ, в том числе отсутствием необходимости в швартовной системе в стационарных установках. Одним из их основных преимуществ является близость к берегу, что облегчает техническое обслуживание и снижает затраты на передачу. Кроме того, поскольку они расположены ближе к открытому морю по сравнению с береговыми устройствами, они могут использовать более значительные ресурсы энергии волн. Для плавучих прибрежных ВЭС затраты на швартовку обычно ниже, чем для морских устройств, из-за меньшей глубины. Однако эти системы также сталкиваются с определенными проблемами. Их близкое расположение к береговой линии может привести к потенциальному воздействию на окружающую среду, например, к изменению морских экосистем или динамики осадочных пород. Кроме того, могут возникнуть социальные проблемы, связанные с эстетическими соображениями, рекреационной деятельностью и использованием прибрежных земель. Баланс этих факторов необходим для успешного развертывания и интеграции технологий использования энергии волн в прибрежной зоне [7,8, 39-41].

- Оффшорные преобразователи энергии волн (ОПЭВ) устанавливаются в глубоководной среде, где ресурсы энергии волн значительно более богаты по сравнению с береговыми и прибрежными установками. Эти системы могут быть спроектированы как плавучие конструкции или полностью погруженные устройства, обычно закрепленные на морском дне для обеспечения устойчивости. Благодаря своему размещению вдали от береговой линии, морские ВЭС обычно вызывают меньше экологических и социальных проблем, чем альтернативные варианты, расположенные вблизи берега, что сводит к минимуму их воздействие на прибрежные экосистемы и деятельность человека. Кроме того, их размещение в более глубоких водах обеспечивает более стабильный и высокий уровень улавливания энергии, что делает их перспективным решением для крупномасштабной генерации энергии волн [7,8, 39-41].

Один из важных способов классификации преобразователей волновой энергии (ПВЭ) основан на используемых ими гидромеханических принципах преобразования. За исключением нескольких не поддающихся классификации процессов, можно выделить три основных метода [5, 35-41]:

1. Переливные системы - Переливные (резервуарные) системы преобразователей энергии волн специально разработаны для улавливания и усиления энергии волн путем направления и концентрации проходящих волн, тем самым увеличивая их высоту. Когда эти волны разбиваются о наклонную конструкцию, они заполняют резервуар, расположенный выше уровня моря, из которого накопленная вода постепенно сбрасывается обратно в океан через турбины с низким напором, подключенные к электрогенераторам. Этот процесс позволяет преобразовывать гравитационную потенциальную энергию в электричество. Одним из существенных преимуществ этой системы является способность накапливать гравитационную потенциальную энергию, что позволяет выравнивать мощность и более стабильно вырабатывать электричество. Однако эти системы также имеют присущие им ограничения. Для эффективной работы требуется минимальный порог энергии волн, то есть если

энергия падающих волн недостаточна для преодоления рампы, электричество не будет вырабатываться. Кроме того, в наземных установках производительность этих преобразователей сильно зависит от колебаний приливов и отливов, поскольку колебания уровня моря могут повлиять на эффективность системы [39-42].

2. Осциллирующий водяной столб (ОВС) - использует колебания давления воздуха, вызванные волнами, в частично погруженной в воду камере для выработки электроэнергии. Камера имеет два отверстия: первое постоянно погружено в воду, что позволяет волновым движениям воздействовать на внутреннюю толщу воды, а второе остается открытым для атмосферы, обеспечивая поток воздуха (рисунок 1.4) [35, 40-42]. При движении волн внутренний столб воды совершает вертикальные колебания, работая как поршень, который попеременно сжимает и разжимает воздух, находящийся в камере. Циклические колебания давления заставляют воздух выходить и втягиваться через второе отверстие, имитируя поведение естественных выдувных отверстий, наблюдаемых на скалистых побережьях.

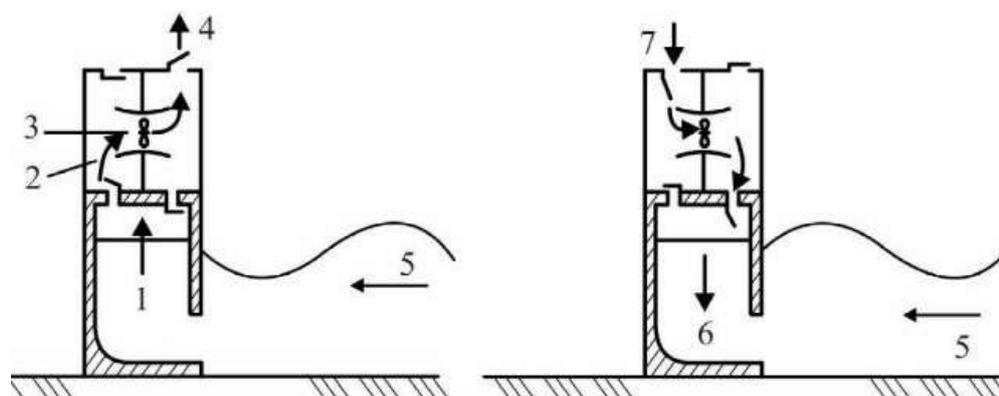


Рисунок 1.4 Схема установки, в которой используется принцип колеблющегося водного столба: 1 – волновой подъем уровня; 2 – воздушный поток; 3 – турбина; 4 – выпуск воздуха; 5 – направление волны; 6 – опускание уровня; 7 – впуск воздуха

Двунаправленный воздушный поток затем используется импульсными турбинами, такими как турбины Уэллса или Денниса-Аулда, которые имеют уникальную конструкцию, позволяющую вращаться в одном направлении

независимо от направления воздушного потока. Эти турбины соединены с электрическими генераторами, преобразующими колебательное движение воздуха в непрерывную электроэнергию. Способность системы ОВС эффективно работать в различных волновых условиях делает ее перспективной технологией для устойчивого извлечения энергии волн [8, 35].

Высокая скорость вращения турбин в системах ОВС позволяет использовать обычные вращающиеся генераторы с номинальной скоростью 1 500 или 3 000 об/мин [35, 40]. Использование технологии переменной скорости повышает эффективность преобразования энергии в различных морских условиях. Кинетическая энергия, запасенная во вращающихся компонентах, иногда дополняемая маховиком, помогает стабилизировать колебания механической мощности. Однако из-за ограниченного диапазона инерции (от ~ 100 до $1\ 000$ кг·м²) и скорости вращения ($\sim 1\ 500$ об/мин) такая стабилизация эффективна только для краткосрочных регулировок. Эффективное извлечение энергии требует точного управления крутящим моментом, которое осуществляется с помощью электрических преобразователей мощности либо на роторе в генераторе с двойным питанием, либо на статоре в преобразователе полной мощности. Камера, в которой размещается система ОВС, может быть наземной (построенной из бетона) или морской (построенной из стали на плавучих платформах). Ее конструкция и пропорции должны быть оптимизированы для максимального поглощения энергии волн. Колеблющаяся толща воды действует как резонирующая механическая система, оказывая гидростатическое восстанавливающее усилие [8,35, 40-42].

3. Колеблющиеся тела - эти устройства используют преимущества движения, вызванного волнами, с помощью плавающих или погруженных в воду структур, которые движутся в ответ на волны. Это движение преобразуется в электроэнергию с помощью гидравлических генераторов или генераторов с прямым приводом (например, Pelamis и Утка Солтера). Система колеблющихся тел состоит из удлиненной плавучей конструкции (например, корабля), которая

реагирует на воздействие волн, двигаясь по шести степеням свободы. Эти движения делятся на три поступательных и три вращательных [5, 8, 39-42]:

- Трансляционные движения: движение вдоль продольной оси (вперед и назад); движение вдоль поперечной оси (движение из стороны в сторону); движение вдоль вертикальной оси (движение вверх и вниз).
- Вращательные движения: вращение вокруг продольной оси (наклон из стороны в сторону); вращение вокруг поперечной оси (наклон вперед и назад); вращение вокруг вертикальной оси (поворот влево или вправо).

Эти сложные гидродинамические взаимодействия играют решающую роль в эффективности и действенности преобразования энергии волн, поскольку они определяют, как энергия извлекается из океанских волн.

1.2.1 Слот-конус генератор (СКГ)

Слот-конус генератор (СКГ), разработанный норвежской компанией Wave-Energy, представляет собой инновационный преобразователь энергии волн, в котором используется несколько рампов и бассейнов, расположенных на разной высоте (рис. 1.5). Такая многоступенчатая конструкция позволяет системе эффективно улавливать и накапливать энергию волн на разной высоте, что позволяет ей адаптироваться к колебаниям интенсивности волн и приливов [35, 43,44].

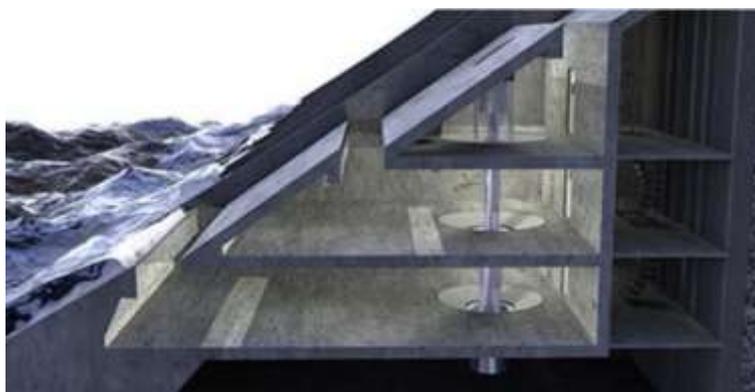


Рис. 1.5 Слот-конус генератор (СКГ)

Благодаря использованию бассейнов на разных уровнях, СКГ может использовать более широкий диапазон волновых условий, максимизируя захват энергии при различных состояниях моря. Собранная вода контролируемым

образом сбрасывается для приведения в действие многоступенчатой турбины, которая отвечает за питание одного электрогенератора. Такая конфигурация повышает энергоэффективность, обеспечивая стабильную и оптимизированную выходную мощность, что делает СКГ перспективным решением для устойчивого преобразования энергии волн [43, 44].

1.2.2 Волновая Электростанция типа «Pelamis»

Электростанция Pelamis, разработанная компанией Pelamis Wave Power Ltd. (рис. 1.6), состоит из цилиндрических сегментов (4 метра в диаметре), соединенных универсальными шарнирами с двумя степенями свободы [7, 8, 45, 46].



Рисунок 1.6 Электростанция (Pelamis) в Португалия

Эти шарниры обеспечивают относительное движение между сегментами, которое преобразуется в гидравлическую энергию с помощью гидравлических цилиндров, выполняющих роль насосов. Полученная энергия накапливается в пневматических аккумуляторах, где газ под давлением и гидравлическое масло регулируют поток жидкости. Такая система обеспечивает практически постоянную подачу жидкости в гидравлические двигатели, что позволяет получать стабильную электроэнергию, несмотря на то, что энергия волн по своей природе переменчива [8]. Кроме того, система Pelamis спроектирована таким образом, чтобы гидродинамически отключаться при экстремальных волновых условиях, предотвращая повреждение конструкции. Первое поколение Pelamis (P1) состояло из шести гидравлических моторов, распределенных по трем модулям преобразования (по одному на каждое соединение), каждый из которых

питал асинхронный генератор мощностью 125 кВт. Для управления избыточной энергией в условиях сильного волнения теплообменник масло-вода рассеивает избыточную мощность. При отключении от сети система может поглощать всю избыточную энергию. Шина переменного напряжения 690 В подает питание на повышающий трансформатор с конечным напряжением подключения к сети 11 кВ, выбранным на этапе создания прототипа [45, 46].

В 2008 году на севере Португалии была развернута волновая энергетическая ферма Pelamis, состоящая из трех установок P1. При мощности каждой установки в 750 кВт общая установленная мощность фермы достигла 2,25 МВт. Расчетная годовая выработка электроэнергии составила 2,7 ГВт-ч на единицу, при условии, что средний ресурс волновой энергии составляет 55 кВт/м, что соответствует примерно 3600 часам работы на полную мощность в год [45]. Коммерческая версия Pelamis (P2) имеет несколько большие размеры, сохраняя 4-метровый диаметр, но увеличиваясь до 180 метров в длину. Эта версия включает в себя один дополнительный шарнир, увеличивая количество активных шарниров с трех до четырех, в результате чего в общей сложности получается пять цилиндрических сегментов. Несмотря на эти изменения, номинальная выходная мощность осталась неизменной [7].

При этом «Pelamis» имеют следующие недостатки [45,46]:

1. Коэффициент использования установленной мощности (далее КИУМ) не превышает 0,4.
2. Значительная материалоемкость.
3. Цена за киловатт установленной мощности составляет 6000 долларов США, что значительно больше аналогов.
4. Из-за больших размеров является помехой и представляет опасность для судов.

1.2.3 Система СЕТО

Система СЕТО I, австралийская инновационная разработка, представляет собой полностью погруженный в воду преобразователь волновой энергии, работающий с морского дна. Он состоит из вертикально движущегося диска,

который реагирует на движение волн - опускается при гребнях волн и поднимается при впадинах. Это колебательное движение используется для привода двух насосов высокого давления, генерирующих воду под давлением более 6400 кПа. Вода под давлением затем транспортируется на берег по 125-миллиметровому трубопроводу, где выполняет две основные функции [7, 35, 47]:

- Выработка электроэнергии - вода под высоким давлением приводит в действие генератор для производства возобновляемой энергии.
- Опреснение воды - она используется в системе обратного осмоса для получения пресной воды, что делает СЕТО I системой двойного назначения, подходящей для прибрежных и островных сообществ.

Работая полностью под водой, СЕТО I минимизирует визуальное воздействие и защищена от экстремальных условий на поверхности, что повышает ее долговечность и эффективность при сборе энергии волн.

В то время как береговая инфраструктура СЕТО II остается идентичной инфраструктуре СЕТО I, морская составляющая претерпела значительные изменения (рис. 1.7). Большая подводная конструкция СЕТО I была заменена на более компактную и эффективную. В этой версии для улавливания энергии волн используется не неподвижный диск, а плавучий привод. Этот привод соединен с насосом с помощью гибкого троса или кабеля, что обеспечивает большую адаптивность и эффективность. В конфигурации волновой фермы вода под давлением из нескольких установок СЕТО II собирается и направляется в береговую систему отбора мощности (РТО), обеспечивая оптимальное преобразование энергии и опреснение воды. Эти усовершенствования повышают масштабируемость, надежность и эффективность системы СЕТО для широкого применения в области возобновляемых источников энергии и производства воды [7, 47].

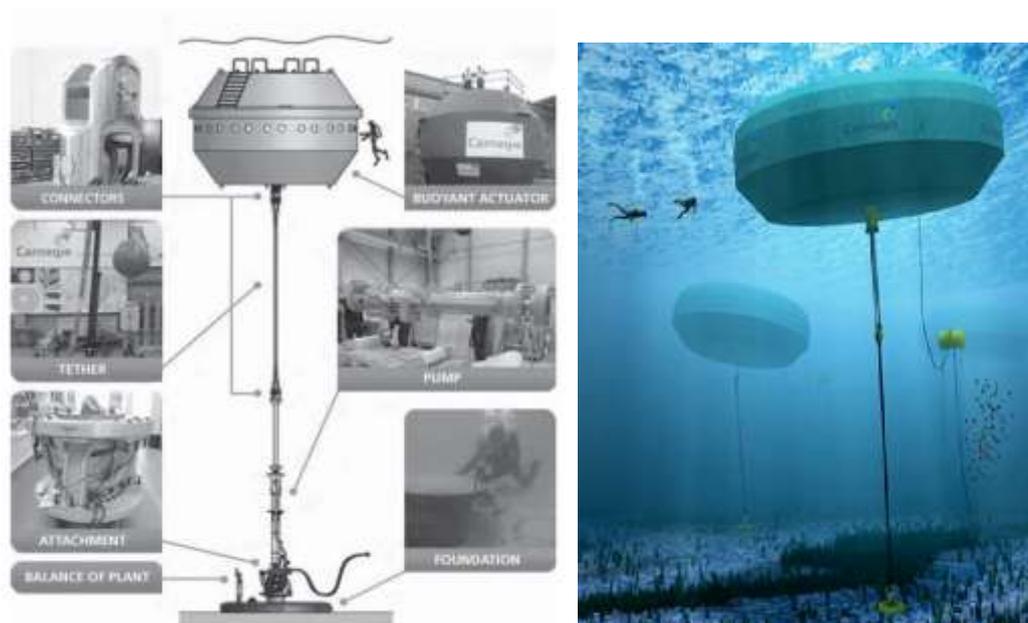


Рисунок 1.7 Волновая энергетическая установка СЕТО

1.2.4 Система Oyster

Система Oyster, разработанная компанией Aquamarine Power Ltd. в сотрудничестве с Университетом королевы Белфаста, представляет собой преобразователь энергии волн вблизи берега, относящийся к категории закрылков или нагонных устройств (рис. 1.8) [35, 48, 49]. Эти системы используют горизонтальное движение воды, которое более выражено на мелководье, что делает их хорошо подходящими для установки вблизи берега. Система Oyster состоит из большой колеблющейся панели, закрепленной на морском дне, которая движется вместе с набегающими волнами. Это движение приводит в движение два поршня, которые, в свою очередь, нагнетают давление в рабочую жидкость (воду). Вода под давлением транспортируется по подводному гидравлическому каналу на береговую гидроэлектростанцию, где она приводит в движение турбину Пелтона для выработки электроэнергии. Система отличается высокой надежностью, так как отказ одного поршня приводит лишь к снижению мощности на 25 %, а не к полной остановке [48,49].



Рисунок 1.8 Волновая энергетическая установка Oyster

Первый прототип, Oyster 1, имел размеры 18×11 метров и номинальную мощность 315 кВт при волнении 40 кВт/м. Он был развернут и испытан в Европейском центре морской энергии в Шотландии и успешно подключен к электрической сети [50]. Устройство второго поколения, Oyster 2, отличалось более крупной конструкцией (26×16 м) с увеличенной пиковой мощностью 800 кВт. Вес устройства составлял 194 тонны, а еще 100 тонн балласта из морской воды позволяли регулировать гидростатическую отдачу колеблющейся панели.

По состоянию на сентябрь 2011 года одна установка Oyster 2 была установлена в Биллиа Кроо (Шотландия), и планируется развернуть еще две установки в том же месте, сформировав волновую энергетическую ферму общей номинальной мощностью 2,4 МВт [48-50].

1.2.5 Утка Солтера

Волновая энергетическая установка Утка Солтера, названное так за характерное кивательное движение, работает за счет вращения в ответ на проходящие волны (рис 1.9). Это движение может быть использовано двумя способами [51-53]:

- Гидравлическая система - движение нагнетает гидравлическую жидкость, которая затем приводит в движение гидравлический мотор, подключенный к электрогенератору, вырабатывающему электричество.

- Пневматическая система - движение сжимает воздух, который используется для приведения в действие турбины для выработки электроэнергии.



Рисунок 1.9 Электростанция с «утками» Солтера

Первоначально разработанная в 1978-х годах, разработка «Утки» была приостановлена из-за высоких прогнозируемых эксплуатационных расходов. Однако недавняя переоценка показала, что фактические эксплуатационные расходы примерно в десять раз ниже, чем первоначально предполагалось, что вновь пробудило интерес к этой технологии как к жизнеспособному решению проблемы волновой энергии [52, 53].

Первые испытания волновых электростанций (ВЭС) в условиях, близких к морским, состоялись в мае 1977 года на озере Лох-Несс. В ходе тестов установка продемонстрировала коэффициент полезного действия (КПД) около 50% [53].

В 1978 году была испытана модель мощностью 10 кВт, имеющая длину 50 метров и состоящая из 20 поплавков диаметром 1 метр. Позднее разработали более мощную установку с номинальной мощностью 45 МВт. Она включала 20–30 поплавков диаметром 15 метров, закрепленных на валу длиной 1200 метров и расположенных у западного побережья Британских островов. Несмотря на перспективность технологии, ВЭС данного типа имеют ряд существенных недостатков [51-53]:

1. Для эффективной работы необходимо использовать от 20 отдельных устройств, соединенных в одну систему, что делает конструкцию громоздкой и сложной в эксплуатации.

2. Производительность таких станций зависит от направления волн, что ограничивает их универсальность.

3. Высокая стоимость и материалоемкость делают внедрение этих систем экономически затруднительным.

4. Подобно системе Pelamis, такие установки могут представлять помеху для судоходства и создавать потенциальную угрозу для морских судов.

1.2.6 Установка Oceanlinx с турбиной Denniss-Auld

Один из типов волновых электростанций (ВЭС), работающих по принципу осциллирующего водяного столба (ОВС), представлен на рисунке 1.10 [51]. Эти устройства представляют собой полые железобетонные конструкции, размещенные в зоне прибоя. Принцип работы основан на движении воды внутри шахты: поступающая волна поднимается вдоль внутренней стенки, вытесняя воздух, который затем прокачивается через турбину, вырабатывая электричество. В отличие от буйковых генераторов, использующих аналогичный принцип, ОВС-установки обладают значительно большей мощностью, но характеризуются более низким коэффициентом использования установленной мощности. Это обусловлено тем, что энергогенерация начинается только при достижении волнами определенной высоты, а в периоды низкого волнения станция не функционирует. В настоящее время в мире построены две такие установки, обе расположены в Австралии. Первая была создана в масштабе 1:10 для проведения испытаний, после чего была возведена вторая, более крупная станция (масштаб 1:2). Ее установленная мощность составила 1 МВт, а стоимость строительства достигла 8 миллионов долларов [51-54].



Рисунок 1.10 Волновая электростанция «Oceanlinx»

1.2.7 Волновая установка Kaimei и Mighty Whale

Несколько систем с осцилирующей водяной столб (ОВС) были разработаны в качестве плавучих конструкций для использования энергии морских волн. Один из самых ранних экспериментальных проектов был разработан профессором Тошио Масудой в сотрудничестве с JAMSTEC (Японский центр морской науки и технологии) [7]. В 1976 году они построили экспериментальное судно Kaimei размером 80 м × 12 м с четырьмя отдельными камерами ОВС, предназначенными для проверки работы системы в реальных морских условиях. В 1978 и 1979 годах на судне Kaimei проводились испытания, которые позволили получить ценные сведения о жизнеспособности технологии плавучих ОВС. На основе этих исследований впоследствии был разработан плавучий прототип «Mighty Whale» размером 50 м × 30 м, предназначенный для размещения на глубине 12 м и водоизмещением 4830 тонн (рис. 1.11). Mighty Whale была введена в эксплуатацию в 1998 году и имела общую номинальную мощность 110 кВт. В системе использовались три турбины Уэллса диаметром 11,7 м каждая, которые были соединены с тремя индукционными генераторами с регулируемой скоростью вращения: один мощностью 50 кВт и два по 30 кВт, работающие в диапазоне скоростей 300-1800 об/мин [7, 55].

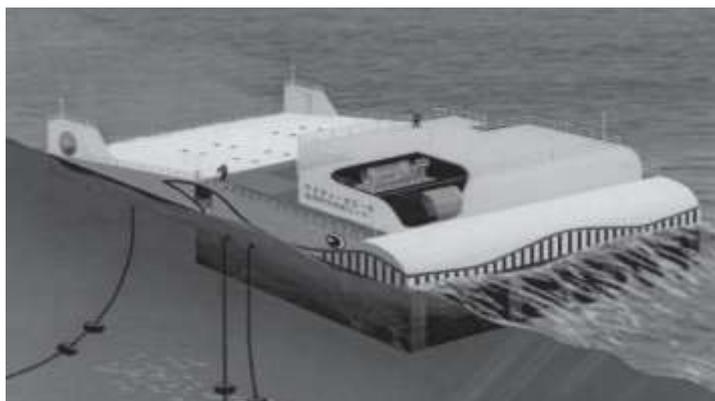


Рисунок 1.11 Волновая установка Kaimei и Mighty Whale

1.2.8 Волновая энергетическая установка LIMPET

В начале 2000-х годов на острове Айлей (Шотландия) была построена установка LIMPET (Land Installed Marine Powered Energy Transformer), которую компания Wavegen включила в электрическую сеть Великобритании (рис. 1.12).

Эта установка была спроектирована как система с колеблющейся толщей воды (OWC), использующая движение волн для выработки электроэнергии [51, 56].

Более ранний прототип, номинальной мощностью 75 кВт, был установлен на том же месте в 1991 году для проверки осуществимости технологии. После успеха была разработана более масштабная версия мощностью 500 кВт. Эта модернизированная система имеет длину 21 метр и площадь захвата 169 м², что позволяет оптимизировать извлечение энергии из падающих волн [56, 57].

Для улучшения гидродинамической адаптации и повышения структурной целостности система LIMPET разделена на три кессона. Такая конструкция не только обеспечивает лучшее взаимодействие с волнами, но и снижает механическую нагрузку на камеру. В конструкции используется Vi-steel - высокопрочный композитный материал, состоящий из стали и бетона, обеспечивающий долговечность и повышенную устойчивость к суровым морским условиям [56,57].



Рисунок 1.12 Волновая энергетическая установка LIMPET в Шотландии

1.2.9 Волновая электростанция: плот Коккереля

Концепция волнового плота Коккереля была разработана советским инженером П.А. Коккерелем и запатентована в СССР в 1926 году [58]. Плавающая конструкция состояла из нескольких шарнирно соединённых секций. Принцип работы был следующим: движение волн вызывало относительное перемещение секций, которое через гидравлическую систему преобразовалось в механическую энергию насосов, приводящих в действие электрогенераторы. Для

обеспечения стабильности положения конструкции использовалась анкерная система (Рис. 1.13).



Рисунок 1.13 Плот Коккереля

Первые практические испытания модели (масштабом 1:100) Коккерельского волнового плота были проведены в прибрежной зоне Чёрного моря в 1970-х годах. Трёхсекционный прототип обладал следующими характеристиками:

- Общая длина: 12 м;
- Ширина каждой секции: 0,4 м;
- Масса: 1,5 т;
- Развиваемая мощность: до 150 кВт;
- КПД: 45%;
- Длительность испытаний составило: 18 месяцев.

По результатам исследований была определена стоимость электроэнергии, вырабатываемой экспериментальной установкой на уровне 0,15 руб./кВт·ч, что являлось очень конкурентоспособным показателем для того времени.

В 1978 году в Великобритании были проведены расширенные испытания опытных образцов океанских электростанций по принципу волнового плота Коккереля. Трёхсекционная конструкция имела следующие параметры:

- Общая длина: 100 м;
- Ширина: 50 м;

- Высота: 10 м;
- Масса: 3000 т;
- Максимальная мощность: до 2 МВт;
- КПД: 45%;
- Длительность испытаний: 24 месяца.

Основные преимущества аналога оказались:

- Простота конструкции;
- Возможность использования местного сырья;
- Низкая стоимость производства энергии;
- Устойчивость к воздействию окружающей среды.

Однако данные преимущества перекрывались следующими недостатками:

- Высокие требования к надежности шарнирных соединений;
- Проблемы с герметичностью гидравлической системы в морской среде;
- Необходимость постоянного технического обслуживания;
- Зависимость эффективности выработки энергии от направления волн.

Проведение дополнительного аудита установок выявил следующее: КПД установок Коккереля выше аналогичных технологий того периода на 10-15%.

Испытания подтвердили высокую эффективность данной технологии – мощность советской модели остается от 3-5 раз выше больше современных установок с аналогичными габаритами (КПД лучших установок достигала 40-50%, стоимость электроэнергии в среднем 0,3 евро/кВт ч, а средняя мощность до 750 кВт). Концепция Коккерельского волнового плота остаётся актуальной в исследованиях возобновляемой энергетики, особенно в контексте в условиях растущего интереса к альтернативным источникам энергии [58-61], даже с учетом недостатка информации о сроках окупаемости инвестиций, показателями эффективности работы установки в зависимости от размера волн.

1.3. Оценка ресурсов волновой энергии Черного моря

Черное море, обладая значительной акваторией и умеренной волновой активностью, представляет интерес для разработки возобновляемых источников энергии. Однако его специфические гидрографические и климатические особенности требуют детального анализа энергетического потенциала [62].

Поверхностные волны в водной среде формируются под воздействием двух ключевых физических факторов: гравитационного поля Земли и кинетической энергии ветровых потоков. Ветер, взаимодействуя с поверхностью воды в течение продолжительного времени и на значительных акваториях, передаёт ей импульс через касательные напряжения. Данный процесс инициирует капиллярно-гравитационные волны, эволюционирующие от микроразмерной ряби (длина < 1.7 см) до зрелых гравитационных волн с длиной, превышающей 1 м [63-66].

Образование поверхностных волн в океане обусловлено комплексным воздействием ветрового потока, характеризуемого следующими параметрами [81]:

1. **Скорость ветра** (на высоте 10 м над поверхностью), определяет энергию, передаваемую воде через касательные напряжения.
2. **Продолжительность действия ветра** (t), влияет на достижение волнами предельного состояния (fully developed sea).
3. **Глубина акватории** (D), модулирует нелинейные эффекты при распространении волн (дисперсию и рефракцию).

Базовые параметры волн:

- Высота (H) — вертикальное расстояние между подошвой и гребнем;
- Длина (λ) — горизонтальное расстояние между соседними гребнями;
- Период (T) — время между прохождением двух последовательных гребней через фиксированную точку.

Динамика волн в прибрежной зоне (рис. 1.14) описывается теорией мелкой воды ($h < \lambda/20$) [64]:

- Уменьшение длины волны ($\lambda' = \lambda \cdot \tanh(2\pi h/\lambda)$);
- Ростом высоты ($H' = H \cdot (h_0/h)^{1/4}$) и крутизны волны ($S = H/\lambda$) вследствие shoaling, приводящего к обрушению при $S > 0.14$.

Инженерные требования к волновым электростанциям установок, рассчитанных на эксплуатацию в глубоководных зонах ($D > \lambda/2$), используют преимущества:

- Стабильность волновых характеристик (отсутствия трения о дно);
- Максимальную энергетическую плотность.

Пример: технологии на основе осциллирующих водяных столбов (ОВС), требующие глубины $D > 30$ м для минимизации потерь на турбулентность.

Критерий глубоководности ($D > \lambda/2$) обеспечивает выполнение дисперсионного соотношения $\omega^2 = gk$, где $k = 2\pi/\lambda$, что упрощает прогнозирование энергоотдачи установок.

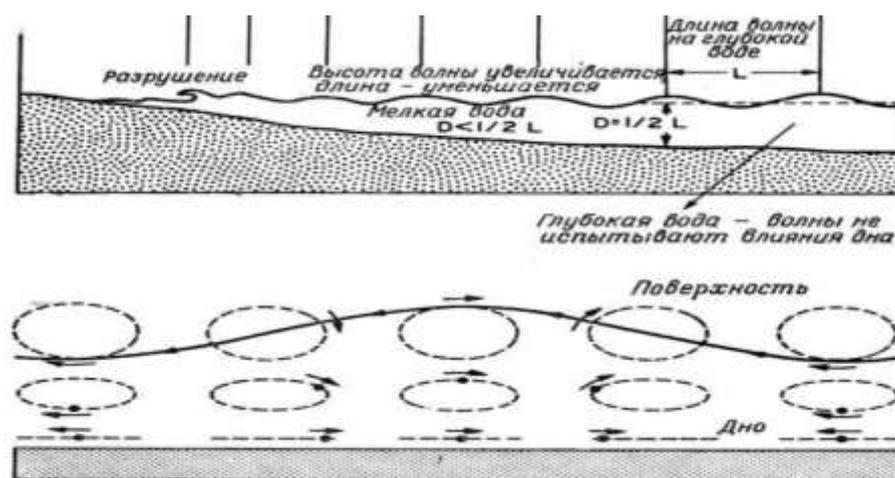


Рисунок 1.14 Профиль волны.

Поверхностные волны в глубоководных зонах ($D > \lambda/2h$, где D — глубина, λ — длина волны) обладают рядом специфических характеристик, определяемых отсутствием влияния донных границ [64]:

- Нерегулярность длины (λ), фазы (ϕ) и направления распространения (θ) волн. Волны представляют собой суперпозицию множества элементарных волновых компонент, что приводит к непредсказуемости параметров волны, таких как длина, фаза и направление распространения;

- Циркуляция движение частиц. Траектории частиц жидкости описываются замкнутыми круглыми орбитами с радиусом (r), который уменьшается экспоненциально с увеличением глубины (z);
- Экспоненциальное затухание амплитуды. Амплитуда частиц жидкости уменьшается экспоненциально с глубиной (z);
- Морская поверхность связана с ветровым воздействием, с учетом параметров: скорости, разгона, продолжительности. Амплитуда волны коррелирует с интегральными параметрами ветра, характеристики которой представлены на рисунке ниже (см. рис. 1.15) [65-67].

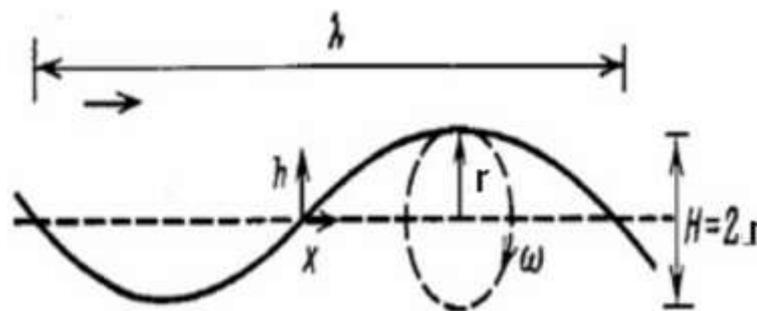


Рисунок 1.15 Волновые параметры

Гидродинамическая теория обозначает всего два компонента волновой энергии: E_k – кинетическая энергия (возникающая при движении волн) и E_p – потенциальная энергия (возникающая за счет колебаний жидкости – за счет изменения их уровня).

Аналитическое выражение для общей волновой энергии (E) можно представить в интегральной форме как сумму кинетической и потенциальной составляющих [65-67]:

$$E = E_k + E_p$$

где каждый из компонентов рассчитывается через параметры высоты, длины и скорости волны. В классической гидродинамике для изучения характеристик волновых процессов используется спектральный анализ, позволяющий проводить количественное исследование распределения энергии по различным частотам.

Энергетический поток P , действителен только для регулярных волн в глубокой воде, возникающий за счет сил давления [65-67]:

$$P = \frac{\rho g^2 H^2 T}{64\pi}$$

где ρ – где ρ – плотность воды (кг/м^3); g – ускорение свободного падения (м/с^2); H – высота волны, в м; T – период, в сек.

Данная зависимость показывает квадратичную связь между мощностью и амплитудой волны. Удвоение высоты волны вызывает четырёхкратное увеличение передаваемой мощности, что подчеркивает важность амплитудных характеристик при оценке энергоёмкости волновых процессов.

Приведённая формула применима для синусоидальных волн глубоководной среды. В реальных морских условиях подобная аппроксимация более точна для приливных колебаний, где длина волны значительно превышает её высоту. Для ветровых волн требуется использование спектрального анализа и статистических методов [68, 69].

Основными характеристиками нерегулярных волн являются значительная высота (H_s) и значительный период (T_s), определяемые как:

$$\begin{aligned} H_s &= 4\sigma \\ T_s &= T * 0.1 \end{aligned}$$

где σ - стандартное отклонение вертикальных перемещений поверхности; $T * 0.1$ - период, соответствующий 10% наибольших волн.

Историческая методология волнового исследования начиналась с визуальных наблюдений по шкале Бофорта, затем развивалась с помощью радиолокационных методов и достигла современного уровня с применением спутниковых систем и моделей машинного обучения [66-69].

По результатам исследований, средняя удельная мощность волнения в прибрежных зонах составляет около 15-30 кВт/м. Максимальные значения (до 90 кВт/м) наблюдаются в высокоширотных регионах Атлантического океана (40° - 60° с.ш.) и Южного океана (40° - 60° ю.ш.), что обуславливает интенсивной циклонической атмосферой в этих регионах (см. рис. 1.16) [70].

Сезонная изменчивость параметров существенного волнения: в северном полушарии максимальные значения приходятся на зимний период, в южном - на летний. Глубина акватории также влияет на параметры волнения, что требует корректировки формулы для мелководных условий.

Ограничения применения приведенной формулы:

- Идеализированные условия (чистая вода, отсутствие внешних факторов);
- Применимо только для гравитационных волн;
- Не учитывает нелинейные эффекты при больших значениях H/L .

Современные методы исследования включают использование ряда моделей и спутниковых данных для повышения точности прогнозирования параметров волновой энергетики [66-70].

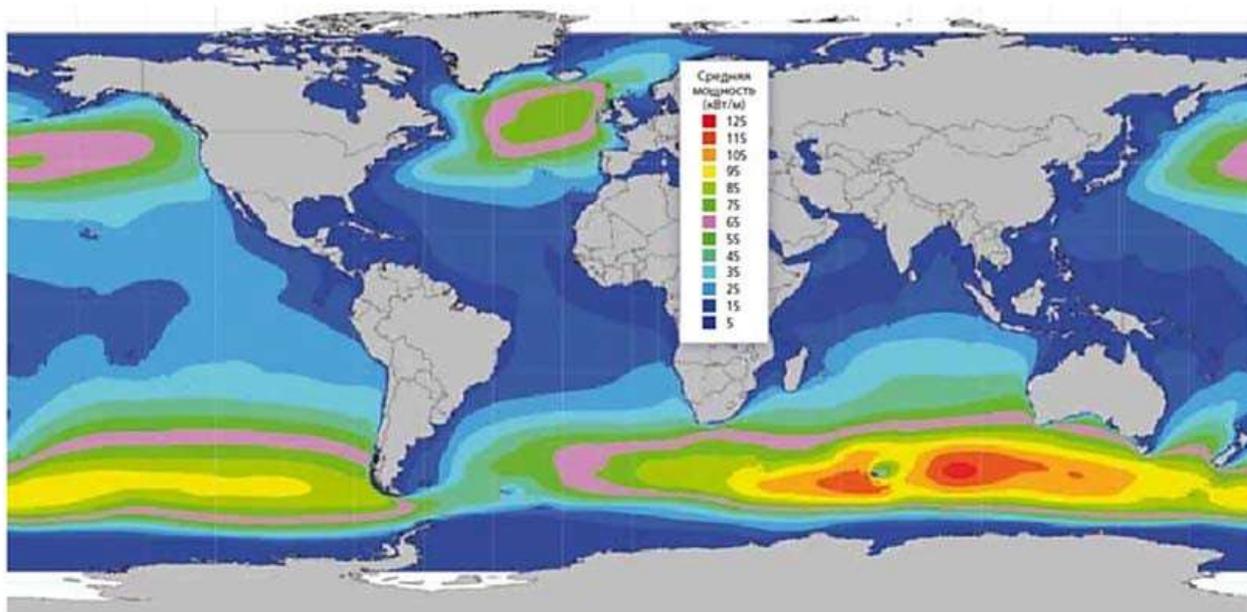


Рисунок 1.16 Мощность волн по акваториям.

Анализ проведенных исследований показал, что ключевым недостатком традиционного метода оценки волнового климата является его ограниченность фиксированным моментом времени. Данный фактор не позволяет учесть динамическую изменчивость волновых процессов. В целях устранения данного недостатка Г. В. Матушевский предложил методику, которая используют усредненные характеристики волнения, что позволило учитывать режимную

климатическую функцию плотности распределения высот волн (h) и их периодов (T) [66].

При учёте данной двумерной функции плотности распределения поток энергии морского волнения может быть рассчитан по следующей формуле [71]:

$$\Phi = \frac{\rho g^2}{32\pi} \iint_0^{\infty} \psi(h, T) h^2 T dh dT,$$

где: Φ – плотность потока энергии морского волнения (кВт/м); ρ – плотность воды; g – ускорение свободного падения; T – период волны; h – высота волны; $\psi(h, T)$ – климатическая функция плотности распределения волновых параметров.

Для измерения потока волновой энергии использовалась методика Матушевского [66], основанная на формуле расчета интенсивности волнового потока (результат данных смотреть в таблице 1.2).

Таблица 1.2 Результаты данных потока энергии волн по методу Матушевского [66]

Море	Черное	Азовское	Берингово	Охотское	Балтийское	Баренцево
Φ , кВт/м	8	3	15 до 44	12 до 20	8	20 до 25

В основе моделирования волнового климата, во всем мире лежат расчеты гидродинамических спектральных моделей. Такой метод позволяет не только получать режимные сведения о волновых характеристиках в разных акваториях, но и прогнозировать изменения волнового климата с учётом метеорологических и океанографических факторов.

Гидродинамические спектральные модели (например: WAM, WaveWatch III) позволяют:

- Получать периодические данные о волновых характеристиках;
- Прогнозировать изменения волнового климата;
- Учитывать метеорологические и океанографические факторы;
- Анализировать параметры сезонной изменчивости.

Учёные географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова разработала открытый веб-атлас доступной волновой и ветровой энергетики морей России [72]. Атлас содержит такие данные, как:

- Пространственное распространение энергетической волны;
- Среднегодовые значения скорости волнового потока;
- Максимальные высоты волны;
- Параметры сезонной изменчивости.

Атлас описывает следующие акватории (рис. 1.17-1.19):

- Чёрное море;
- Каспийское море;
- Азовское море;
- Балтийское море;
- Баренцево море;
- Карское море;
- Японское море;
- Охотское море;
- Берингово море.

Данные атласа, на примере Черного моря:

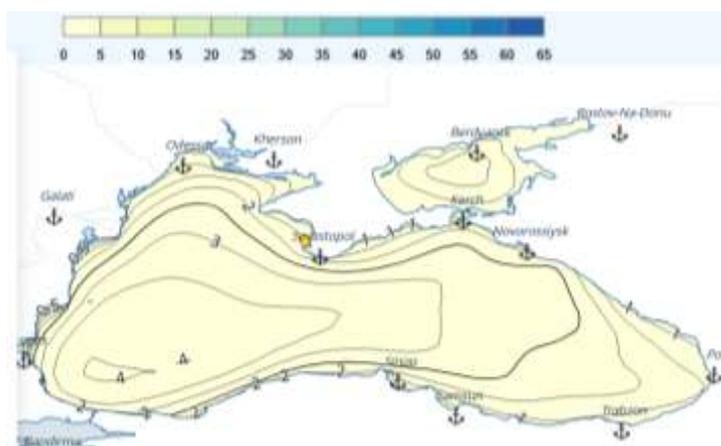


Рисунок 1.17 Среднее энергии волн, в кВт/м

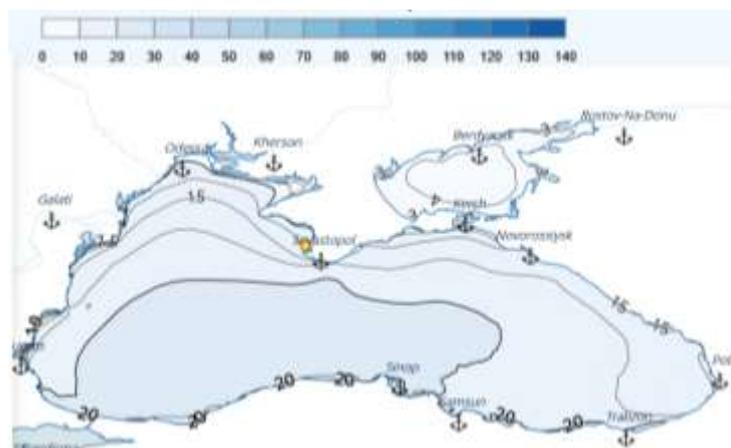


Рисунок 1.18 Средняя длина волн, в м

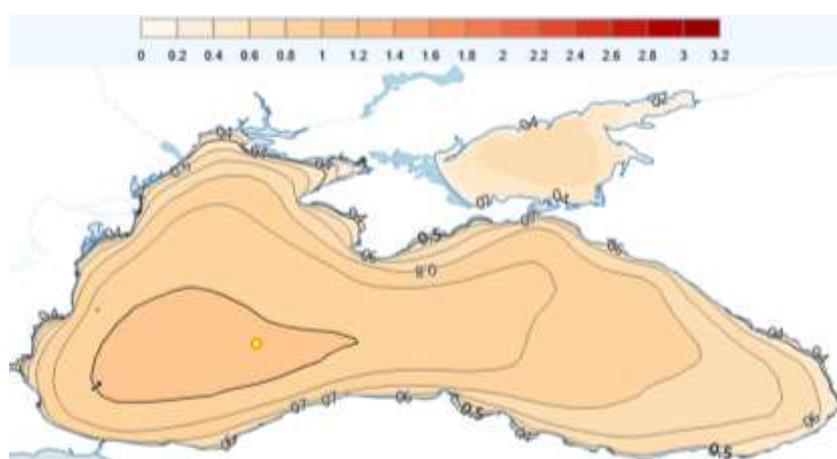


Рисунок 1.19 Средняя высота волн, в м

Сравнительный анализ показывает потенциал волновой энергии в морях России, составляющий 5-25% от среднемировых результатов, что обусловлено особенностями географических и климатических условий региона.

Ограничения применения данных:

- Результаты представлены для открытых акваторий;
- Требуется корректировки для морских зон;
- Не учтено влияние ледовых условий;
- Данные получены за период 1980-2020 гг.

Анализ энергетического потенциала волновых ресурсов побережья Крыма свидетельствует о том, что среднегодовая удельная мощность волн Чёрного моря варьируется в пределах 6-8 кВт/м, при этом значительные сезонные колебания

связаны с преобладающими климатическими условиями. Увеличение интенсивности волновой активности в период с октября по март связано с преобладанием зимних погодных условий, характеризующихся усилением северо-западных и восточных ветровых систем, что приводит к увеличению энергии волн до 8-9 кВт/м. Напротив, в летние месяцы (июнь-август) это значение снижается до 5-6 кВт/м в результате стабилизации погоды и уменьшения интенсивности приземных ветров [67-69]. Азовское море характеризуется низким среднегодовым потенциалом волновой энергии (~3 кВт/м). Ограниченные размеры акватории, малая средняя глубина (6-7 м) и периодическое образование ледяного покрова ограничивают развитие волновых процессов. В холодные зимы (конец декабря - март) поверхность моря может полностью замерзнуть, что практически прекращает работу источников волновой энергии.

Для оценки практической реализации использования волновой энергии В.И. Сичкарев [94] ввёл концепцию возобновляемой волны волнения - доля всей активности, которая обеспечивает волновую систему из внешних источников и поддерживает ее в устойчивом режимно-климатическом состоянии. Суммарная возобновляемая мощность волнения для заданной акватории площадью S обозначается как N_B (Вт) и представляет собой ключевой параметр при оценке энергетического потенциала морских волн., может быть рассчитана по следующей формуле:

$$N_B = 1,34 \cdot 10^{-4} \Phi^{0,6} S,$$

где: $T_{\text{год}}$ – продолжительность года в секундах, S – площадь акватории. Соответственно, годовой объем возобновляемой волновой энергии E_B (Дж) в пределах заданной акватории рассчитывается как:

$$E_B = N_B T_{\text{год}}$$

Возобновляемая мощность и годовой энергетический потенциал различных морей России (Черное море и Азовское море) представлены в таблице 1.3. В данной таблице приведены значения удельной мощности волнения (Φ),

площади акватории (S), суммарной возобновляемой мощности (N_v) и годового объема возобновляемой энергии (E_v) для Черного, Азовского, Белого и Баренцева морей.

Таблица 1.3 Возобновляемая мощность и энергия морей России

Море	Φ , кВт/м	S , 10^{12} м ²	N_v , Вт	E_v , Дж
Черное	6–8	0.422	12.42×10^9	1.08×10^{14}
Азовское	3	0.039	0.64×10^9	5.6×10^{12}
Белое	10	0.090	3.03×10^9	9.55×10^{16}
Баренцево	25	1.420	0.83×10^{11}	2.61×10^{18}

Согласно исследованиям Г.В. Матушевского [83], доля возобновляемой мощности, извлекаемой из волновой энергии, составляет всего 0,026–0,040% от общего энергопотенциала волнения. Это свидетельствует о крайне низком экологическом воздействии даже при полном использовании доступных ресурсов. Удельные показатели мощности: Чёрное море: 29,4 кВт/км² и Азовское море: 16,4 кВт/км².

Современные технологии преобразования волновой энергии представляют собой установки различных типов:

- плоты Коккереля;
- пульсирующие системы Массуды;
- поплавковые станции;
- осциллирующие водяные столбы;
- генераторы типа «утка Солтера».

Теоретический КПД данной системы составляет порядка 70–95%. Однако реальная эффективность после учета потерь преобразования механической энергии в электрическую, снижается до 30–80%. При среднем КПД 60% потенциальная мощность электростанций составит в чёрном море около 7,45 ГВт. Суммарный технический ресурс оценивается в 68,6 ТВт·ч/год, что подчеркивает значимость региона для развития возобновляемой энергетики.

Зональное распределение ресурсов по Землякову (рис. 1.20) отражает неоднородность волнового потенциала Чёрного моря, связанную с глубинами, ветровыми режимами и морфологией береговой линии [71].



Рисунок 1.20 Разделение Черного моря по зонам

Анализ, предложенный по методике Матушевского [66], который показывает, что наиболее перспективное использование волновой энергии, связанной с акваториями, где преобладают волны высотой 1,5–3,0 м (таблица 1,4). Однако все типы волновых электростанций сталкиваются с фундаментальным недостатком – ограниченной адаптацией к меняющимся условиям морской среды.

Основная проблема заключается в неспособности установки эффективно работать в нестационарных условиях волны, что приводит к значительным потерям энергии и, как следствие, снижает общий коэффициент полезного действия (КПД) установок.

В акватории Чёрного моря могут формироваться ветровые волны с максимальной высотой в диапазоне 5,1–20,0 м, однако такие явления наблюдаются крайне редко. Согласно данным таблицы 1.4, волны, имеющие 3%-ю и большую обеспеченность, обычно достигают высоты 1,5–3,0 м [71]. Это подчёркивает актуальность разработки волновых электростанций, оптимизированных для функционирования в условиях малых и средних волн,

что позволит повысить их эффективность и надёжность в реальных эксплуатационных условиях.

Таблица 1.4 Характеристики волн в Черном море

Высота волн, м	Повторяемость, в %												
	Янв	Фев	Март	Апр	Май	Июнь	Июль	Авг	Сен	Окт	Ноя	Дек	Год
0-1	64.3	64.9	71.3	83.2	88.8	87.8	84.1	81.1	77.4	72.1	68.5	64.1	75.7
до 2,0	25	25.3	21.4	13.3	9.6	10.4	13.5	15.9	18.2	20.8	23	25.7	18.5
до 3,0	8	7.1	5.2	2.6	1.3	1.4	2.1	2.5	3.3	5.4	6.7	7.5	4.4
до 4,0	2	2	1.3	0.6	0.2	0.3	0.3	0.3	0.8	1.2	1.4	1.9	1
до 5,0	0.5	0.5	0.5	0.2	0.1	0.1	0	0.1	0.2	0.3	0.3	0.5	0.2
до 20,0	0.2	0.3	0.2	0.1	0	0	0.1	0	0.1	0.2	0.1	0.2	0.1

В таблице 1.5 приведены сведения о сезонных вариациях скорости ветра в различных районах Чёрного моря. Представленные данные охватывают диапазон изменений скорости ветрового потока в январе и июле, что позволяет провести оценку его воздействия на потенциальную эффективность использования волновой энергии в данном регионе.

Таблице 1.5 Предел сезонных изменений скорости ветра

Район	Январь (м/с)	Июль (м/с)
Северо-западный	4,4-8,8	3,5-5,4
Крымский	3,3-8,3	2,5-4,6
Северо-восточный	3,6-7,7	2,3-4,8
Юго-западный	4,0-8,5	3,0-4,3
Центральный	4,7-7,5	3,0-4,9
Юго-восточный	1,6-6,8	1,8-3,9

Анализ данных, представленных в таблицах 1.4 и 1.5 (приложения), позволяет сделать вывод о том, что наиболее перспективным районом для строительства Волновой электростанции является северо-западная часть Чёрного моря (44°-46° с.ш., 32°-34° в.д.). Ниже представлены ключевые благоприятные условия хорошей акватории.

Основные параметры региона:

- Среднегодовая скорость ветра: >6 м/с;
- Средняя высота волны: 1,0-1,5 м;

- Период волн: 5-7 с;
- Длина волн: 80-120 м.

Технический потенциал региона:

- Прибрежная зона (10 км): ~83 ГВт·ч/год;
- Установленная мощность: до 10 МВт;
- Коэффициент использования установленной мощности: ~95%.

Дополнительная информация о повторяемости (%) различных градаций высот волн по месяцам на береговых станциях представлена на рисунке 1.21 [71]. Градации волн установлены на основе шкалы волнения и соответствуют принятым баллам морской турбулентности.

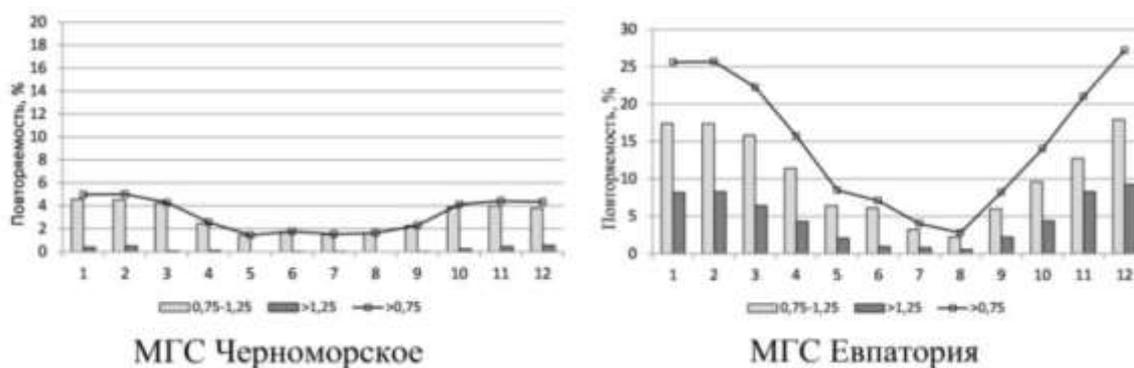


Рисунок 1.21 Анализ данных береговых станций по месяцам.

А) Повторяемость, в %, Б) градация высоты волн, в м

Более детальное исследование показало, что наибольший потенциал для эффективного использования волновой энергии имеет прибрежная зона между Евпаторией и Севастополем. Расчет технических ресурсов выполняется по формуле:

$$N = P \times L \times T \times \eta$$

где:

P - средняя мощность волнения (кВт/м);

L - длина прибрежной полосы (м);

T - продолжительность года (дней);

η - коэффициент извлечения (~0,1).

Данные статистического анализа указывают на следующие сезонные характеристики:

- Летний период: $H = 0,25$ м;
- Зимний период: $H = 0,4$ м;
- Открытая акватория: $H_{\max} = 1,0$ м (3 балла).

Классификация типов морских волн в зависимости от их природы возникновения:

1. Ветровые – образуются под воздействием ветра на поверхность воды.
2. Корабельные – вызваны движением судов и искусственными возмущениями.
3. Сейсмические – возникают в результате подводных землетрясений и могут вызывать цунами.
4. Анемобатические – связаны с резкими изменениями атмосферного давления.
5. Приливные – обусловлены гравитационным воздействием Луны и Солнца, проявляются в виде приливных волн.

Описанные категории отражают различные механизмы формирования волн в морской среде, которые важно учитывать при проектировании волновых электростанций и других морских инженерных сооружений.

Таблица 1.6 Параметры морской волны

Волнение в баллах	Описание	Характеристики волны		
		Высота (м)	Длина (м)	Период (с)
0	отсутствует	0	0	0
1	слабое	менее 0,25	5	2
2	умеренное	0,25-0,75	5 - 15	2 - 3
3	значительное	0,75 – 1,25	15 - 25	3 - 4
4				
5	сильное	2 – 3,5	40 – 75	5 – 7
6				
7	очень сильное	6 – 8,5	125 – 170	9 – 11
8				
9	исключительное	11	220	12

Для обеспечения высокой эффективности генерации электроэнергии на волновых электростанциях предпочтительно использовать ветровые волны, а также образующиеся под их воздействием зыбь и прибой. Учитывая, что волновой потенциал у побережья Крыма относительно невелик, наиболее рациональным решением является размещение энергетических установок перед зоной прибоя, что позволит максимально эффективно использовать доступную кинетическую и потенциальную энергию морских волн. В этом районе волны обладают большей высотой и совмещают как потенциальную, так и кинетическую энергию, что способствует увеличению эффективности преобразования. При этом размещение перед прибойной зоной минимизирует риск повреждения оборудования. Для черного моря мощность волны составляет 4,55 кВт при высоте волны 1 м, а общая энергия 5,24 кДж.

1.4. Энергообеспечения для различных маломощных устройств

В настоящее время ограничения по производительности, сроку службы, массе и объему источников питания существенно сдерживают развитие большинства низковольтных систем. Для маломощных и микроощных

устройств применяются два основных типа источников питания: традиционные и возобновляемые. Эти источники могут использоваться как в автономных системах, так и в составе гибридных энергосистем. К ним относятся небольшие фотоэлектрические установки, термофотовольтаические элементы, источники электромагнитной и индуктивно связанной плазмы, а также системы, работающие за счет преобразования акустической энергии, малых ветровых турбин, термоэлектрических генераторов, электростатических и пьезоэлектрических элементов [73].

Традиционные источники электроэнергии обычно относятся к категории систем, которые требуют ограниченного или непрерывного подачи активного материала или топлива для производства электроэнергии. Сюда включаются тонкопленочные и микробатареи, микротепловые двигатели, микротурбины и микротопливные элементы [74].

Микротурбинные системы, включающие миниатюрные камеры сгорания, турбины, компрессоры и генераторы, рассматриваются как альтернатива микробатареям благодаря своей потенциальной высокой плотности мощности. Однако, они обладают рядом недостатков. Например, эффективность их рабочего цикла без применения рекуператоров оказывается ниже, чем у поршневых двигателей при высоком коэффициенте нагрузки и/или повышенных оборотах. На высоких скоростях вращения возникает необходимость в использовании оборудования для снижения передаточного числа и высокочастотных генераторов переменного тока с прямым приводом, сопряжённых со стационарными выпрямителями. Это приводит к увеличению сложности конструкции, её габаритов и массы [75].

Для обеспечения работы микроприборов также широко применяются топливные элементы. Их конструкция включает анод (источник водорода) и катод (как правило, кислород из окружающего воздуха), разделённые электролитом. Среди преимуществ данной технологии следует отметить: 1) высокую плотность энергии и удельную энергоёмкость, 2) низкие выбросы

вредных веществ, 3) отсутствие шумового загрязнения, а также 4) возможность функционирования как в тепловом, так и в энергетическом режиме [76].

Для маломощных устройств морского назначения, таких как навигационные буи, критически важен надёжный источник питания. Ранее для этих целей использовались дизельные генераторы, однако отдельные исследования проводились с применением ядерных реакторов [77].

Использование энергии окружающей среды для питания устройств позволяет либо полностью заменить, либо значительно увеличить срок службы традиционных источников питания, таких как батареи и аккумуляторы.

Одним из самых распространённых методов получения энергии является использование солнечной энергетики. Подобные системы включают солнечные панели и соответствующие схемы управления сигналами. Фотоэлектрический эффект, основанный на прямом преобразовании падающего света в электрическую энергию, обеспечивает генерацию мощности солнечными элементами [77].

К преимуществам систем с солнечными батареями относят простоту интеграции, модульность, отсутствие излучений и шума, отсутствие подвижных компонентов, а также доступность основного ресурса – солнечного света. Вместе с тем, солнечные системы имеют ряд существенных недостатков: необходимость дополнительных схем обработки сигнала для поддержания стабильного уровня постоянного тока при заданном напряжении; зависимость качества и объёма генерируемой электроэнергии от внешних условий; значительная площадь, требуемая для размещения массива солнечных панелей. Из недостатков отмечены низкая эффективность преобразования и высокая стоимость подобных систем. Ограничения по доступности солнечного света и ветра также затрудняют эксплуатацию данных установок в неблагоприятных погодных условиях.

Термальная энергия представляет собой ещё один вид регенеративного источника питания, применяемого для обеспечения работы устройств.

Термоэлектрические генераторы характеризуются высокой надёжностью, долговечностью, отсутствием подвижных частей, минимальным уровнем шума

и выбросов [78]. Однако их массовое внедрение тормозят проблемы, связанными с производством термопарных модулей, модули которых создаются на основе интерметаллических соединений, таких как Bi_2Te_3 , Pb-Te и Si-Ge , обладающих низкими температурами плавления и разложения, низкой эффективностью преобразования энергии и токсичными свойствами. Сегодня эти материалы остаются редкими и дорогими. Недостаточная эффективность преобразования энергии и температурные ограничения препятствуют широкому применению термоэлектрических устройств, включая радиоизотопные термоэлектрические генераторы [78].

Тенденция последних семи лет говорит о том, что методам извлечения энергии из механических воздействий внешней среды уделяется особое внимание. На Рисунке 1.22 представлена зависимость удельной мощности от выходного напряжения для различных видов регенеративной выработки энергии [79]. Из графика видно, что устройства, собирающие энергию из вибраций, демонстрируют показатели плотности мощности, сравнимые с другими источниками энергии.

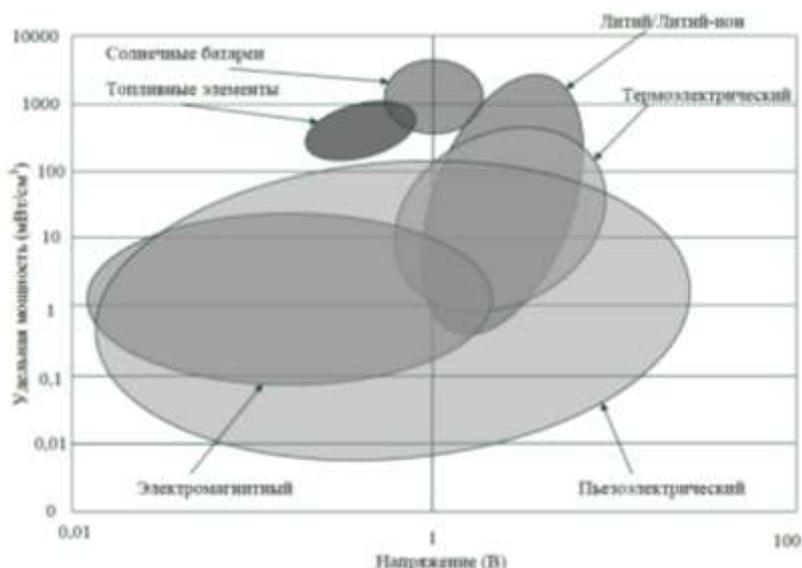


Рисунок 1.22 Зависимость удельной мощности от выходного напряжения для разных форм рекуперативного производства энергии.

Учитывая начальный этап развития многих технологий и потенциал их включения в гибридные энергетические системы, в рамках данного исследования основное внимание будет уделено сбору энергии на основе вибраций, особенно с акцентом на пьезоэлектрическое извлечение энергии.

1.4.1 Энергопотребление маломощных устройств

Энергетические потребности сенсоров варьируются в значительной степени в зависимости от их функциональных характеристик. Пассивные сенсоры – датчики освещённости или температуры, потребляют сравнительно мало энергии по сравнению с другими компонентами беспроводного сенсорного узла. Активные сенсоры – гидролокаторы, датчики почвенной влажности и газовые анализаторы, могут требовать значительных затрат энергии, как показано в таблице 1.7 [80-87]. Каждый сенсорный узел может включать множество датчиков, каждый из которых обладает своими характеристиками потребления энергии и частотой дискретизации. Анализ данных таблицы 1.2 указывает на большой диапазон требований к мощностям и широкий спектр энергопотребления сенсоров.

Таблица 1.7. Энергопотребление датчиков.

Тип датчика	Мощность (мДж)	Источник
Ускорение MMA7260Q	0,0048	[80]
Давление серии 2200/2600	0,0225	[81]
Освещенность ISL29002	0,123	[82]
Близость CP18	48	[83]
Влажность SHT1X	72	[84]
Температура SHT1X	270	[84]
Уровень LUC-M10	1660	[85]
Газ(ВОК) микс-5521	4800	[86]

Регулятор расхода FCS-G1/2A4-AP8X-H1141	17500	[86]
Газ (CO2) GE/Telaire 6004	225000	[87]

Буи для сбора данных, также известные как морские или океанские буи, представляют собой плавучие платформы, оснащённые оборудованием для сбора и передачи разнообразных экологических данных в океанах, морях, озёрах и прочих водоёмах (см. рисунок 1.23). Буи играют ключевую роль в океанографических исследованиях, метеорологических наблюдениях и мониторинге состояния окружающей среды. Каждое устройство оборудуется различными датчиками и измерительными приборами для регистрации таких параметров, как: температура морской поверхности, температура воздуха, атмосферное давление, высота волн, скорость и направление течений, солёность воды и другие океанографические и метеорологические данные.



Рисунок 1.23 Различные типы буев.

На протяжении последних лет методы использования буев для сбора океанографической информации претерпели существенные изменения. В исследовании Майндла описаны первые буи, использовавшие дизельные генераторы в качестве основного источника питания [88]. Хотя дизельные генераторы обеспечивали необходимую мощность, они имели ряд недостатков,

связанных с воздействием на окружающую среду, зависимостью от ископаемых ресурсов и необходимостью регулярного технического обслуживания. Осознание этих ограничений стимулировало исследователей к поиску альтернативных решений для улучшения автономии и надёжности работы буёв [88].

Одним из важнейших этапов в развитии буёв стало совершенствование аккумуляторных технологий. Усовершенствованные аккумуляторы оказали значительное влияние на изменение энергетического профиля буёв. Современные конструкции буёв часто включают возобновляемые источники энергии, обеспечивающие устойчивое и непрерывное питание. Солнечные панели и ветровые турбины стали стандартными компонентами, способствующими снижению углеродного следа и повышению экологической безопасности эксплуатации буёв [89].

Процесс эволюции буёв по сбору океанографических данных характеризуется переходом к использованию возобновляемых источников энергии, что способствует повышению автономности и устойчивости их работы. Исследования в области инновационного извлечения энергии из волн, включая применение пьезоэлектрических генераторов и методов прямого пьезоэлектрического возбуждения, отражают стремление к дальнейшему улучшению экологической чистоты и энергоэффективности работы буёв. Такие достижения не только повышают точность мониторинга океанов, но и соответствуют глобальным инициативам по созданию более устойчивого и экологически ответственного будущего. Примеры датчиков, используемых в системе буя, приведены в таблице 1.8.

Таблица 1.8 Энергопотребление датчиков.

Тип датчика	Напряжение (В)	Мощность (мВт)	Источник
Высота волны (3595)	7-14	24	[90]
Аналоговое давление	0.5-5	5	[91]

(Rev-11-1107-DS)			
Датчик мутности (DTS-12)	9.6-16	3.36-5.6	[92]
Датчик мутности (4112)	7-20	24.5	[93]
Датчик мутности и температуры (Ponsel SE00017)	5-12	21	[94]
Датчик температуры (S-5851A Series)	2.7	1.22	[95, 96]

Потребляемая мощность датчиков составляет менее 100 милливатт, с учетом временной активности ограниченного количества датчиков, которые во время спящего режима накапливают энергию в аккумуляторах.

1.5. Обзор методов использования пьезоэлектрических эффектов для преобразования энергии в различных областях техники

Пьезоэлектрический эффект был впервые открыт французскими учеными Пьером и Джексоном Кюри в 1880 году. Братья обнаружили, что при приложении механической силы к кристаллам кварца и некоторым другим кристаллическим материалам на их поверхностях возникают электрические заряды. Когда кристалл подвергается сжатию или растяжению, на его гранях образуются электрические заряды противоположной полярности. Подключение электродов к этим граням позволяет зафиксировать электрический импульс при изменении формы кристалла. Постоянное давление на кристалл не приводит к возникновению электрического импульса [97].

На рисунке 1.24 приведена схема возникновения пьезоэлектрического эффекта.

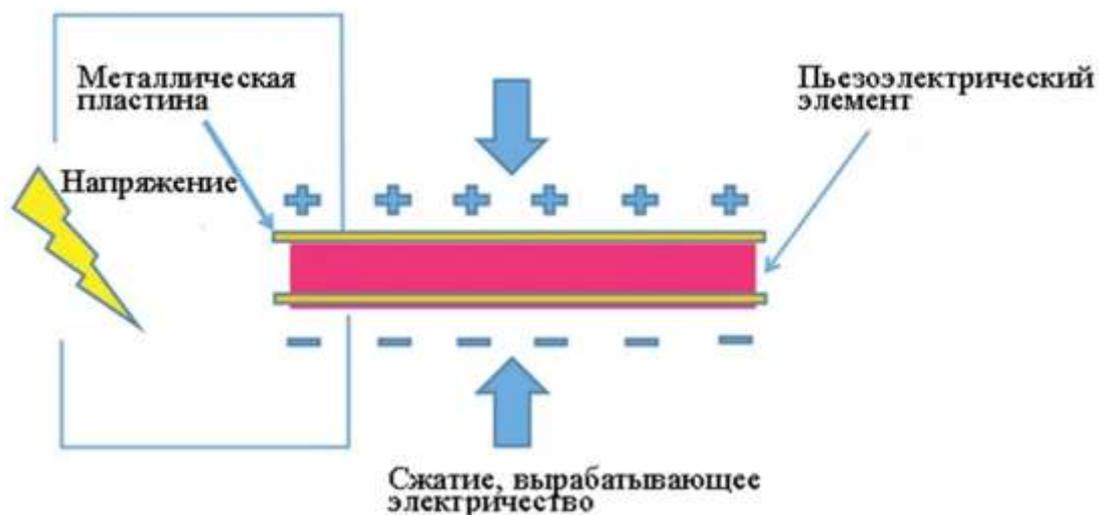


Рисунок 1.24 Схема возникновения пьезоэлектрического эффекта.

Инициирование пьезоэлектрического эффекта возможно посредством различных видов механических воздействий, таких как:

- 1) приложение избыточного давления;
- 2) сжатие;
- 3) растяжение;
- 4) кручение.

Прямой пьезоэлектрический эффект обусловлен упругой деформацией кристалла, сопровождающейся асимметричным смещением положительно и отрицательно заряженных частиц внутри структуры кристалла. В результате образуется общий дипольный момент, приводящий к поляризации твёрдого тела [98].

Деформация кристалла вызывает относительное смещение положительных и отрицательных ионов в кристаллической решётке, что ведёт к изменению электрического момента кристалла и появлению поляризации, вызванной изменением расстояния между центрами тяжести разноимённо заряженных ионов [99].

В 1881 году французский физик Габриель Липшман теоретически предсказал существование обратного пьезоэлектрического эффекта, который позже был подтверждён экспериментально братьями Кюри. Обратной

пьезоэффект заключается в механической деформации кристалла под действием электрического поля [100].

Схема обратного пьезоэлектрического эффекта представлена на рисунке 1.25.

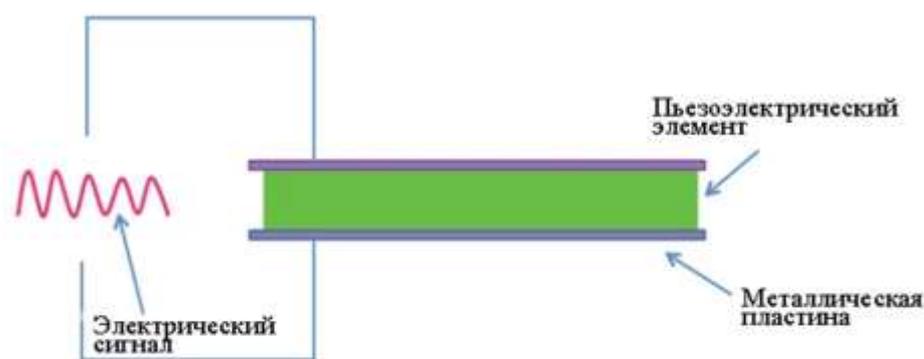


Рисунок 1.25 Схема обратного пьезоэлектрического эффекта.

Развитие направления по использованию пьезоэлектрической энергии привело к активному развитию технологий производства кристаллов. Практическое применение пьезоэлектрического эффекта началось в период Первой мировой войны, когда в 1917 году французский математик Поль Ланжевен предложил использовать данный эффект для создания приборов обнаружения подводных лодок [99,10]. В частности, ученый использовал кварцевые пластины в составе излучателей и приёмников эхолотаторов, между которыми располагались стальные пластины для снижения резонансной частоты преобразователей. Впоследствии появились такие устройства, как микрофоны, телефоны, звукозаписывающие аппараты и различные датчики.

Как видно из рисунка 1.26, пьезоэлектрический сбор энергии является одним из наиболее эффективных способов преобразования энергии. Эффективность пьезоэлектрического преобразования напрямую зависит от амплитудного напряжения [97].

Поскольку пьезогенераторы могут использоваться в любом устройстве, создающем вибрации (например: двигатели внутреннего сгорания, станки,

здания, пешеходные потоки и др.), преобразование механических колебаний в электрическую энергию будет максимально эффективным при использовании пьезобиморфов. Данные устройства представляют собой гибкие пьезоэлектрические датчики. Конструкция преобразователя на основе пьезобиморфа представлена на рисунке 1.26 [101].

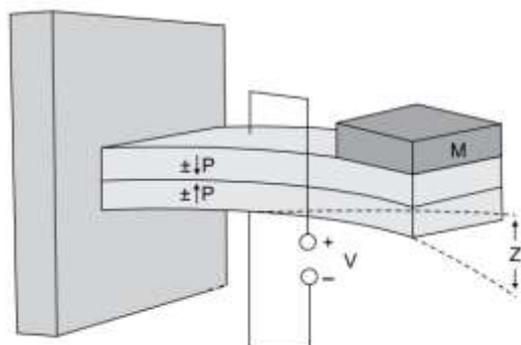


Рисунок 1.26 Конструкция преобразователя на основе пьезобиморфа.

Применение пьезобиморфов позволяет разрабатывать устройства любой необходимой длины, но имеющий небольшую толщину. Для производства пьезобиморфов применяются:

- 1) PZT – керамика;
- 2) ПВДФ – полимер.

Такие устройства позволяют преобразовывать энергию вибраций, обеспечивая выходную мощность до 250 мВт. Система накопления и хранения энергии таких генерирующих устройств представлена на рисунке 1.27 [97-100].

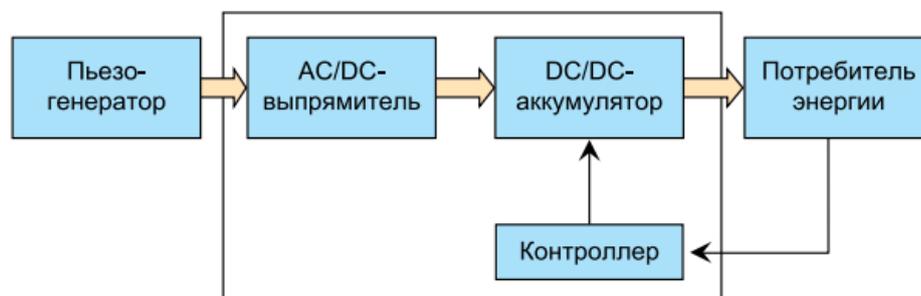


Рисунок 1.27 Блок-схема генерирующего устройства.

Для поддержания устройства и стабилизации напряжения на необходимом уровне используется система с обратной связью. Специальный контроллер применяется для согласования сопротивлений пьезогенератора и устройства-потребителя энергии.

Разнообразие форм механической энергии, могут питать пьезоэлектрические устройства, см. рисунок 1.28. Различные виды механической энергии могут обеспечивать работу пьезоэлектрических устройств. Источники энергии включают природные явления, физическую активность людей, а также кинетическую энергию транспортных средств. Важно, чтобы пьезоэлементы могли воспринимать и эффективно использовать различные виды кинетической энергии, включая:

- поперечные колебания;
- продольные колебания;
- ударные воздействия различной направленности;
- поступательное движение;
- вращательные движения;
- энергия, выделяемая в процессе химических реакций или изменений агрегатного состояния веществ.

Для достижения наивысшей эффективности, пьезоэлектрические элементы должны устанавливаться в местах, где воздействие и сбор энергии будут максимальны.

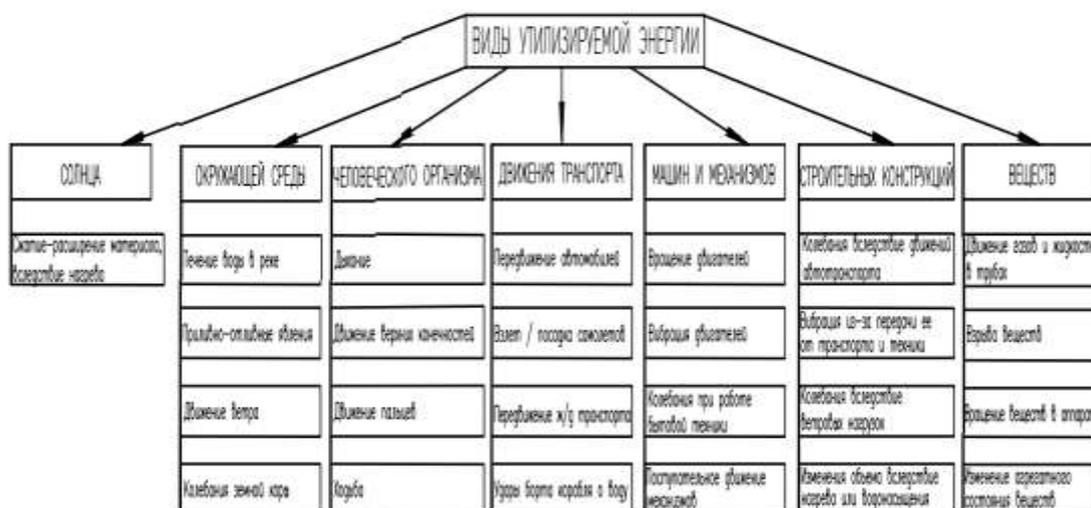


Рисунок 1.28 Классификация пьезопреобразователей по видам преобразуемой энергии и ее источники.

Большими преимуществами пьезоэлементов являются: компактность, удобство в управлении, быстродействие.

Принцип работы пьезоэлементов основан на перемещении и развиваемой элементом силе в зависимости от приложенного к нему напряжения.

К основным техническим характеристикам пьезоэлементов относятся:

- усилие, которое может развить актюатор;
- максимальное напряжение;
- емкость.

Обладающая ПЭ ёмкостью отвечает за величину его быстродействия. Чем выше эта величина, тем большую реакцию на изменение напряжения имеет данное устройство.

1.5.1 Преобразования энергии из потока воды и волны с использованием пьезоэлектрических преобразователей

Исследование возможностей получения энергии из потоков жидкостей было менее обширным по сравнению с работами по преобразованию энергии из воздушных потоков, отчасти из-за отсутствия легко доступных источников. Стоит отметить, что такие источники потока жидкости как: вода, могут предоставлять непрерывный приток энергии, обладая большей плотностью энергии по сравнению с воздушными потоками. Учитывая высокий уровень кинетической энергии в водном потоке и меньшую зависимость от условий окружающей среды, можно говорить о существенном потенциале для получения энергии из водных источников. В одном из исследований авторы использовали пьезоэлектрическое устройство для сбора энергии из водного потока. Оно представляло собой консольный преобразователь с одним или несколькими слоями пьезоэлектрического материала, закрепленного на его поверхности.

Принцип работы устройства основывался на движении жидкости, вызывающем вибрацию кантилевера, помещенного в сужающийся и расширяющийся канал. Эксперимент показал, что при скорости потока 20 литров в минуту и перепаде давления 165 кПа выходная мощность составила 20 мВт [101-103].

Также исследователями был рассмотрен метод сбора энергии вибрации воды с использованием пьезоэлектрических композитных материалов на основе макроволокна [104]. Экспериментальные данные свидетельствуют о том, что выходная мощность преобразователя энергии, работающего на основе вихревой вибрации (BBV), составляла 1,32 мВт.

Предложен двухцилиндровый ВВ ПЭС для оптимизации следующих параметров: нагрузка сопротивления, диаметр цилиндра и скорость воды, с целью увеличения электрической мощности. Максимальная собранная энергия составила 21,86 мВт [105, 106]. В другом исследовании была разработана новая система сбора энергии с вертикальной ориентацией цилиндра для сбора энергии через BBV в водяном потоке. Эта конструкция позволила достичь максимальной выходной мощности 84,49 мВт [107].

Авторы исследовали конфигурацию тандемных цилиндров для сбора пьезоэлектрической энергии с помощью BBV в водной среде [108]. Стоит подчеркнуть, что производительность преобразователя зависела от скорости течения воды. В итоге им удалось достичь выходной мощности 533 мВт.

Авторы использовали пьезоэлектрические преобразователи для сбора энергии из потока жидкости в узком канале, где создавались вихревые колебания вокруг D-образного отвесного тела, соединенного с пьезоэлектрической консольной балкой. Начальные результаты показали выходное напряжение около 0,7 В, что свидетельствовало о возможности дальнейшей оптимизации.

Авторы исследовали поведение гибкой пьезоэлектрической мембраны в следе за отвесным телом, используя вихревую дорожку Кармана для извлечения энергии из движения жидкости. В работе [109] была разработана аналитическая модель флаттер-мельницы для сбора энергии на основе вибрации, вызванной потоком жидкости, аналогичная схемам, предложенным авторами [107] и [108].

Авторы создали пьезоаэродинамическую систему сбора энергии на основе вихревой дорожки Кармана, включающую ПВДФ, прикрепленный к гибкой диафрагме с камерой давления, встроенной под ней [109]. Полученные результаты показали максимальное напряжение 2,2 В и мгновенную мощность 0,2 мВт. Затем исследователи изучили эту концепцию с использованием отвесного тела, расположенного в центре камеры [110].

В другой работе авторы представили систему сбора энергии с использованием пьезоэлектрических материалов, прикрепленных к концу отвесного тела, для создания вихрей в потоке воды. Они сообщили о максимальной выходной мощности в 0,18 мВт и выходном напряжении 6,6 мВ [49].

С другой стороны, энергия океанских волн, обладающая глобальным потенциалом генерации 2 ТВт энергии, стала перспективным и стабильным источником сбора энергии [111]. Плотность энергии океанских волн, по сравнению с другими возобновляемыми ресурсами, значительно превосходит энергию ветра и, по оценкам, в 4-30 раз [112]. Такая высокая плотность энергии подчеркивает важность разработки эффективных преобразователей энергии волн, адаптированных к условиям сбора энергии океанских волн. Устойчивость энергии океанских волн делает её ключевым фактором в решении текущего энергетического кризиса и экологических проблем [113].

Устройства для преобразования энергии волн (ПЭВ) отличаются широким разнообразием конструкций, превышающим разнообразие ветроэнергетических систем. Огромный энергетический потенциал, заключённый в движении океанских волн, позволяет рассматривать их как альтернативный или автономный источник энергии. В одном из успешных исследований пьезоэлектрический эффект позволил извлечь 50 кВт электрической энергии с каждого метра волны. Оценка доступной мощности энергии океана, признаваемого устойчивым энергетическим ресурсом, составляет примерно 2×10^3 кВт/м² [114]. Эффективность, продемонстрированная

пьезоэлектрическими комбайнами при поглощении энергии волн, делает их одной из наиболее востребованных технологий в области производства энергии.

Предыдущие исследования в основном были направлены на устройства, использующие пьезоэлектрические элементы для сбора энергии морских волн. Эти устройства включают в себя колебательные цилиндры, гибкие мембраны на поверхности океана и преобразователи, закрепленные на дне океана. Гибкость этих устройств позволяет адаптировать их к различным условиям окружающей среды, увеличивая их эффективность в использовании энергии океанских волн. Новейшее достижение в области сбора энергии океанских волн связано с внедрением метода преобразования частоты вверх, направленного на устранение проблемы несоответствия частот между устройствами сбора энергии и окружающей средой [115]. Метод преобразования частоты вверх выходит за рамки устройств для получения энергии океанских волн и применяется в генераторах для низкоскоростного вращающегося оборудования. Более детально в контексте устройств для сбора энергии океанских волн для буев, исследователи изучали возможность внедрения метода преобразования частоты в конструкцию пьезоэлектрического ветрогенератора с использованием механической передачи [113].

Исследователи изучали возможность интеграции метода преобразования частоты в устройства ПЭВ, стремясь повысить их производительность. В работе [112] метод преобразования частоты вверх был интегрирован в конструкцию пьезоэлектрического ветрогенератора с использованием механической передачи. Манипуляция количеством зубьев шестерни позволила эффективно увеличить входную частоту, показывая адаптацию этой техники.

Кроме того, в ряде случаев было продемонстрировано включение пьезоэлектрических комбайнов в швартовные системы устройств ВЭС, основанных на волновом или тангажном движении [114]. Этот новаторский подход повысил эффективность поглощения энергии океанских волн, что способствовало увеличению общей производительности этих систем.

Авторы предложили использовать пьезоэлектрические вибраторы в системе ПЭВ, применяя метод преобразования частоты вверх [115]. В их конструкции поглощённая энергия волн передавалась пьезоэлектрическим вибраторам, установленным на колеблющейся платформе, пришвартованной к дну. Затем энергия высвобождалась через плавучий поглотитель, что привело к росту производительности пьезоэлектрического генератора. Эта конфигурация с двумя буюми показала потенциал для улучшения преобразования энергии за счёт стратегического проектирования и применения техники преобразования частоты вверх.

Авторы добились успеха в создании устройства (ПЭВ), использующего преимущества пьезоэлектрической технологии [115]. Их инновационный подход и разнообразие рассмотренных конструкций по сравнению с ветроэнергетическими системами подчёркивают адаптируемость и потенциал сбора энергии океанских волн.

Таким образом, сбор пьезоэлектрической энергии из потока воды и волн представляет собой перспективное направление для устойчивого производства электроэнергии. Исследователи изучили различные конструкции и параметры, оптимизирующие их для повышения эффективности преобразования энергии. Эти достижения указывают на возможность создания самоподдерживающихся энергетических систем, которые могут найти применение в различных сферах, таких как морские буи.

1.6 Краткая информация о существе рассматриваемой проблемы

Компания «Марлин-Юг» занимается разработкой и производством автономных морских наблюдательных буюв, предназначенных для научно-исследовательского и прикладного мониторинга морской среды и приземной атмосферы. В частности, разрабатывает и производит автономные морские измерительные платформы с различными типами связи (в т.ч. спутниковой) – поверхностные дрейфующие буи (дрифтеры) (см. рисунки 1.29 и 1.30), и на их основе занимается развитием и внедрением дрифтерной технологии как одного

из наиболее перспективных средств для исследования океана и приподной атмосферы [116].

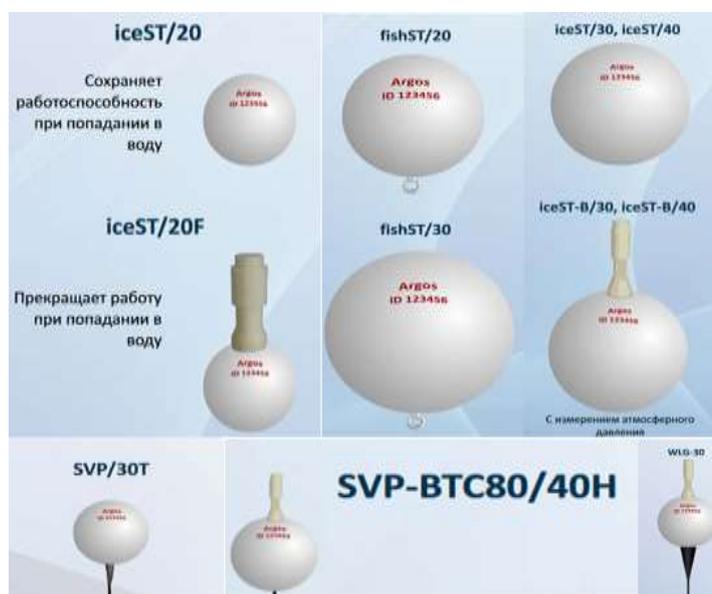


Рисунок 1.29 Различные тип буе, разработанные и произведенные в «Марлин-Юг»

Современные измерительно-информационные возможности дрейфтеров позволяют выполнять контактные измерения практически всего комплекса параметров среды в любом районе Мирового океана, обеспечивая доставку информации пользователям в режиме времени, близком к реальному.

Одна из наблюдаемых проблем заключается в том, что автономные буи, производимые компанией, на самом деле источник питания зависит только от аккумуляторов, что ограничивает срок службы буя [116]. В таблице 1.10 показан срок службы различных типов буев, производимых компанией. Для решения этой проблемы можно использовать альтернативных источников энергии: возможность использования других источников энергии, таких как солнечные панели или ветрогенератор, чтобы увеличить автономность буев и расширить их срок службы.

Таблица 1.10 Срок службы различных типов буев

Типы	Размер	Форма	Срок службы
------	--------	-------	-------------

	(см)		(месяц)
SVP/30H	34	Сферическая	18
SVP/40H	41	Сферическая	24
SVP/30T	34	Сферическая	не менее 48 ч.
iceST/30	35	Сферическая	12
SVP-TC80/40H	41	Сферическая	24
iceST/20	20	Сферическая	3.5
fishST/20	20	Сферическая	4

Ввиду конструктивных особенностей и специфики эксплуатации морских буёв использование традиционных источников энергии оказывается затруднительным или невозможным (см. рис. 1.30), что обусловлено необходимостью разработки альтернативных решений, способных соответствовать предъявляемым требованиям к автономности работы и длительности срока службы. Одним из перспективных вариантов является создание энергетического источника, который бы обеспечивал питание буёв за счёт возобновляемых ресурсов окружающей среды, либо предусматривал возможность подзарядки аккумуляторов.

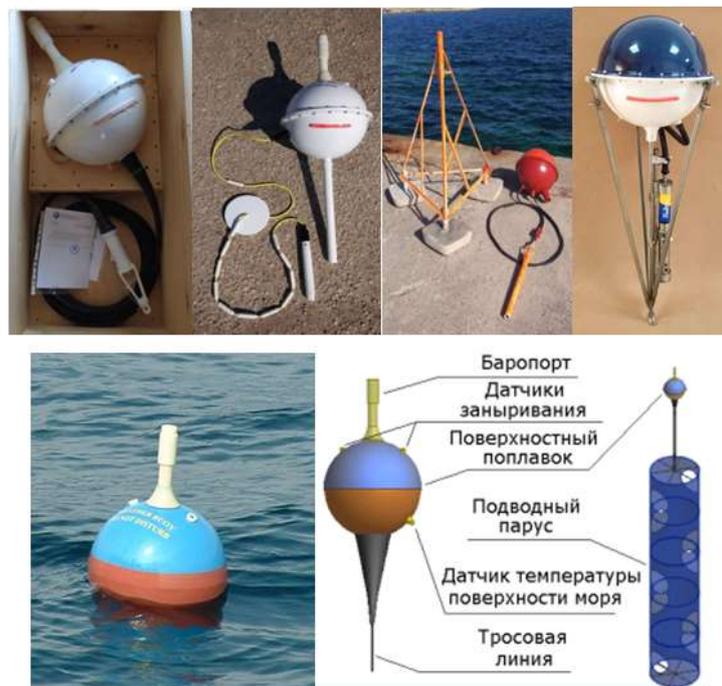


Рисунок 1.30 Различные типы и формы буёв

Как было отмечено ранее, пьезоэлектрические элементы обладают потенциалом для адаптации под конкретные требования разрабатываемых устройств, что делает их особенно подходящими для генерации энергии в низкоомных системах. В настоящей главе рассматриваются возможности применения пьезоэлектрических преобразователей для извлечения энергии из водных потоков и морских волн, что может оказаться полезным для функционирования современных морских буёв.

1.7 Выводы

Исследование потенциала волновой энергии Чёрного моря: Выполнен теоретический анализ возможностей использования волновой энергии водной поверхности для целей энергоснабжения в акваториях Чёрного моря.

Оценка существующих технологий волновой энергетики: Изучены принципы работы известных волновых энергогенераторов и электростанций. Обнаружены их основные недостатки, в ключая низкую эффективность в условиях эксплуатации на внутренних морях.

Цель работы заключается в разработке способа получения энергии от волн с применением интерфейсных схем для пьезоэлектрических элементов, направленных на повышение доступности и эффективности преобразования энергии для питания маломощных устройств, установленных на морских буях.

Достижение указанной цели предопределяет решение следующих задач:

1. Провести анализ существующих преобразователей энергии волн в электричество и их классификацию.
2. Оценка энергопотенциала Черного моря и других морских акваторий.
3. Разработать пьезоэлектрической энергетической системы, способной эффективно генерировать энергию из морских волн.
4. Изучить влияния различных компонентов схемы на эффективность генерации и преобразования энергии.

5. Провести экспериментальный анализ и моделирование различных методов выработки электроэнергии с использованием пьезоэлектрических элементов.

6. Повысить общую эффективность преобразования энергии на основании полученных результатов исследования.

Глава 2. Разработка системы преобразования энергии волн в электрическую с применением пьезоэлектрических элементов.

На сегодняшний день в сравнении с исследований процессов извлечения энергии из воздушных потоков, значительно меньше внимания уделено изучению возможностей сбора энергии из жидкостных потоков. Несмотря на это, водные потоки, такие как реки и океаны, обладают значительным потенциалом для генерации постоянной энергии с высокой плотностью мощности, превосходящей аналогичные показатели для воздушных потоков. Водные ресурсы характеризуются стабильным энергопотоком, который слабо зависит от внешних факторов, таких как погодные условия, что делает их перспективными источниками для сбора энергии.

Использование пьезоэлектрических материалов для преобразования кинетической энергии водного потока в электричество является относительно новым направлением, активно изучаемым как экспериментальными, так и численными методами [100-110]. Одним из интересных подходов к эффективному использованию возобновляемых ресурсов окружающей среды является интеграция пьезоэлектрических устройств в природные водные течения [111-115]. Потоки жидкостей способны передавать значительную часть своей механической энергии пьезоэлектрическим элементам [101], что открывает новые возможности для создания автономных систем энергоснабжения.

Океанские волны представляют собой важный и пока недостаточно освоенный источник возобновляемой энергии, обладающий высоким уровнем плотности энергии [7]. В частности, для малых беспилотных морских судов, которым сложно организовать регулярную зарядку аккумуляторов, крайне актуален поиск эффективных методов использования данного источника энергии. Решение данной проблемы требует учета множества физических процессов, связанных с механикой твердых тел, гидродинамикой, электростатическими явлениями и взаимодействием электрических цепей. Основная идея заключается в преобразовании механических деформаций

пьезоэлектрических материалов, возникающих под воздействием водного потока, в электрическую энергию [102-104].

Полученная таким образом энергия может использоваться для обеспечения работы плавучих объектов, таких как океанские наблюдательные буи. Рост спроса на системы раннего предупреждения о цунами, высокоточные метеопрогнозы и проведение широкомасштабных океанографических исследований способствуют увеличению числа подобных устройств [105]. Однако традиционные методы зарядки аккумуляторных батарей этих буев, находящихся далеко от береговой линии, неэффективны и непрактичны. В настоящее время применяются альтернативные решения, включающие установку солнечных панелей или ветровых турбин, однако они имеют ряд недостатков. Солнечные панели являются дорогими, подвержены износу в агрессивной морской среде и требуют регулярного технического обслуживания. Ветровые турбины громоздки, создают шумовые загрязнения и негативно влияют на окружающую среду [106]. В связи с этим пьезоэлектрическая технология сбора энергии от океанских волн остается актуальной и продолжает развиваться, хотя до сих пор основное внимание уделялось применению аналогичных технологий в других сферах, таких как промышленная вибрация, дорожное строительство и биомеханика движения человека [107, 108].

Исследования показывают, что одной из наиболее перспективных форм извлечения энергии из океанов является поглощение вибрационных колебаний, создаваемых водяными потоками. Среди различных видов колебаний, характерных для водных течений, особое значение имеют вихревые колебания (ВК), которые широко используются в пьезоэлектрических системах сбора энергии. Когда вертикальное тело помещается в движущуюся воду, оно создает вихревую зону, параметры которой (частота и амплитуда) зависят от формы и размеров тела [117]. При установке пьезоэлектрической мембраны на конце такого тела, мембрана начинает колебаться синхронно с вихрями, генерируя электрический ток [118].

Преобразование энергии пьезоэлектрическими материалами сталкивается с существенным препятствием, обусловленным значительной разницей между частотами внешних воздействий и резонансными частотами пьезоматериалов. Частоты волн в диапазоне 1–100 Гц значительно ниже собственных частот колебаний пьезоэлектриков, которые обычно превышают этот диапазон на несколько порядков. В результате эффективность преобразования механической энергии в электрическую оказывается низкой. Исследования в этой области преимущественно направлены на использование динамических механических колебаний, тогда как потенциал гидродинамической энергии остается недостаточно изученным.

На рисунке 2.1 представлена принципиальная схема функционирования морского буя. Устройство оснащается датчиками для измерения параметров окружающей среды, таких как температура воды, соленость и давление. Конкретный набор датчиков выбирается исходя из целей исследования или мониторинга. Энергоснабжение системы обеспечивается за счет встроенного источника питания. Датчики размещаются внутри корпуса буя таким образом, чтобы обеспечить доступ к среде измерений. Получаемые данные передаются на внутренний процессор для обработки и последующей отправки [103-107].

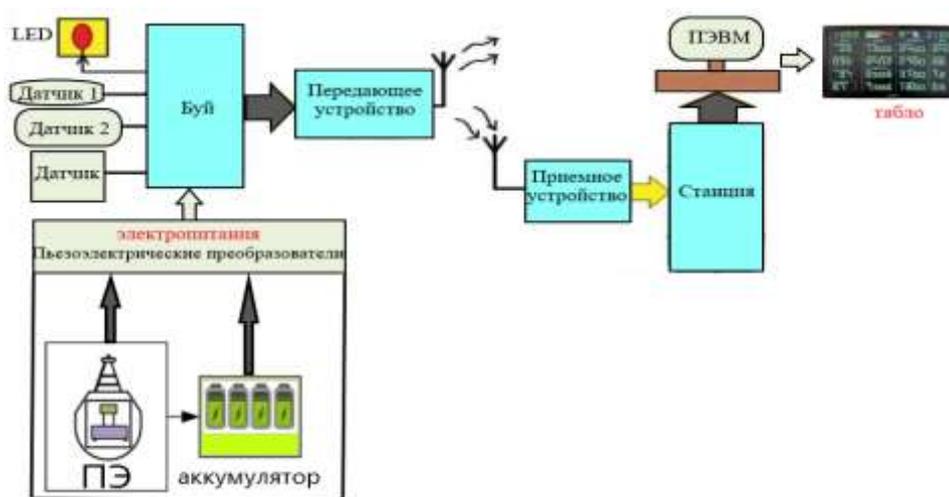


Рисунок 2.1 ПЭ модели, анализируемой в исследовании.

Передача данных осуществляется посредством беспроводных технологий, включая Bluetooth или сотовые сети. Буй программируется на периодическое

отправление информации либо при возникновении определенных условий, например, резкого изменения температуры воды. Приемное оборудование, установленное на берегу или на судне, принимает сигналы, декодирует информацию и выводит ее в удобочитаемом формате. Данные могут быть проанализированы и сохранены для дальнейшего использования. В случае критически значимых изменений возможно включение системы уведомлений для оперативного информирования пользователей. Таким образом, морские буи обеспечивают непрерывный или периодический сбор и передачу данных о состоянии водной среды.

В рамках данного исследования рассматриваются две модели для генерации электрической энергии из волн. Обе модели ориентированы на различные сценарии применения и предлагают свои подходы к решению задачи. Первая модель – погружного типа (ППЭ) – функционирует непосредственно в водной среде, используя пьезоэлектрики для прямого преобразования кинетической энергии подводных течений и волн в электричество. Вторая модель – непогружного типа (НПЭ) – располагается на поверхности воды и использует погруженные в воду рычаги или аналогичные механизмы для захвата вибрационных движений и передачи их на пьезоэлементы. Данные модели демонстрируют различные способы интеграции пьезоэлектрических элементов в систему, позволяя адаптироваться к различным условиям эксплуатации и эффективно использовать доступные ресурсы энергии водных сред (см. рисунок 2.2).

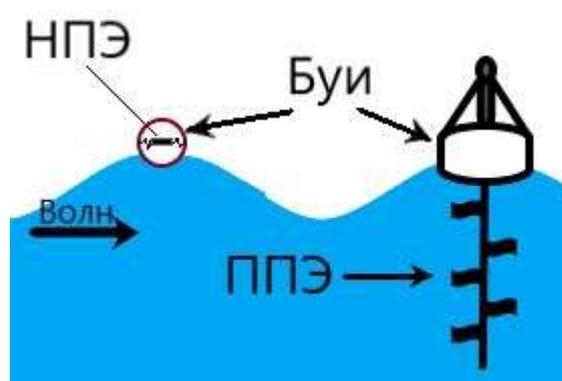


Рисунок 2.2 ПЭ модели, анализируемой в исследовании.

Здесь следует отметить, что оба предложенных подхода представляют собой эффективные и масштабируемые решения для устойчивого получения энергии в разнообразных водных условиях. Модели основаны на уникальных свойствах пьезоэлектрических материалов, позволяющих преобразовывать механические воздействия в электрическую энергию. Окончательный выбор той или иной модели определяется конкретными условиями окружающей среды, требованиями к мощности и экономическими соображениями. Такой гибкий подход обеспечивает адаптацию к широкому спектру потребностей в сборе энергии в различных водных средах.

2.1 Математическое моделирование сбора пьезоэлектрической энергии из жидкостей

Процесс генерации электроэнергии с использованием пьезоэлектрических элементов, реагирующих на воздействие жидкости, требует разработки математических моделей для численного анализа генерируемого электрического напряжения. В зависимости от конструктивных особенностей системы применяются различные математические модели, описывающие взаимодействие жидкости и пьезоструктуры. Приведённые далее уравнения являются основными для расчёта процессов течения жидкости, деформации структуры и их взаимного влияния. Тем не менее, модель ламинарного течения применима лишь для областей с умеренными значениями числа Рейнольдса.

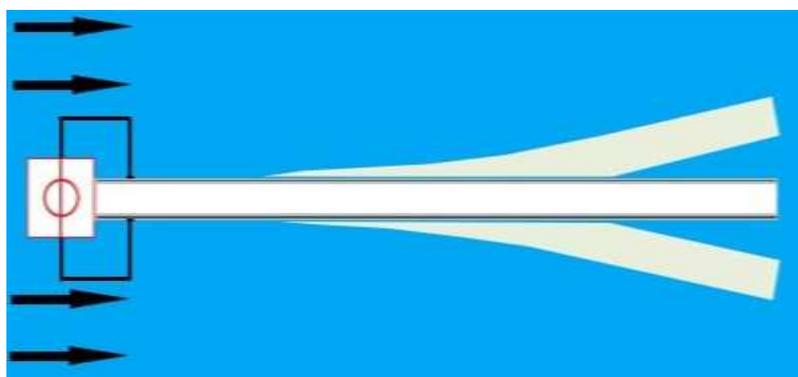


Рисунок 2.3 Пьезоэлектрический элемент для потока жидкости.

2.1.1. Уравнение движения потока жидкости

Для дискретизации жидкостей использовались уравнения несжимаемой жидкости Навье-Стокса для течения жидкости и уравнения неразрывности [100-109]:

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + (u \cdot \nabla)u \right) = \nabla \cdot T + F_B, \quad (2.1)$$

где F_B — внешние силы тела;

T — Тензор напряжений Коши;

u — скорость жидкости;

ρ — плотность жидкости.

Тензор напряжений Коши T определяется как:

$$T = 2\mu D(u) - pI, \quad (2.2)$$

где I — единичный тензор;

μ — кинематическая вязкость;

p — гидростатическое давление;

D — тензор деформации.

Второй закон Ньютона задается формулой:

$$\frac{\partial^2 u_c}{\partial t^2} - \nabla \cdot \sigma = F, \quad (2.3)$$

где u_c — вектор перемещения конструкции;

σ — тензор напряжений;

F — объемное силовое поле.

Уравнение неразрывности имеет вид:

$$\nabla \cdot u = 0. \quad (2.4)$$

Данные уравнения позволяют проводить численное моделирование поведения жидкости в различных условиях, что необходимо для оценки эффективности взаимодействия пьезоэлектрических элементов с потоками.

2.1.2 Пьезоэлектрические определяющие уравнения

Пьезоэлектрические материалы обладают уникальными свойствами, связывающими механические и электрические характеристики. Взаимосвязь между этими характеристиками описывается пьезоэлектрическими определяющими уравнениями, которые учитывают как механические нагрузки, так и индуцированные ими электрические поля. Эти уравнения были разработаны и обоснованы в ряде работ [100]:

$$S = s^E T + d^t E, \quad (2.5)$$

$$D = dT + \varepsilon^T E. \quad (2.6)$$

В настоящем исследовании для анализа поведения пьезоэлектрических материалов использованы определяющие уравнения пьезоэлектричества, представленные в работах [88, 89]. Эти уравнения описывают поведение консольных балок в режиме 31, представляя их в виде матриц 2×2 в статических условиях следующим образом:

$$\begin{pmatrix} \delta \\ Q \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{S_{11} L^3}{2Wh^3} & -\frac{3d_{31} L^2}{4h^2} \\ -\frac{3d_{31} L^2}{4h^2} & \frac{2\varepsilon_{33} WL}{h} \left(1 - \frac{k_{31}^2}{4}\right) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} F \\ V \end{pmatrix} \quad (2.6')$$

где S — упругая деформация, [м/м];

T — механическое напряжение, [Па];

E — электрическое поле, [В/м]; D — электрическое смещение, [Кл/м²];

s^E — коэффициент упругой податливости, [м²/Н];

d — пьезоэлектрическая модель заряда относительной деформации, [Кл/Н или м/В];

ε — диэлектрическая проницаемость, [Ф/м].

Линейное электрическое поведение материала можно рассчитать по формуле:

$$D = \varepsilon E. \quad (2.7)$$

Закон Гука для линейно-упругих материалов определяется из следующего выражения:

$$S = sT. \quad (2.8)$$

При приложении механической силы к пьезоэлектрическому материалу возникает электрический заряд (Q) на электродах площадью (A), что приводит к появлению плотности электрического заряда (D). Этот процесс описывается следующими уравнениями:

$$Q = DA, \quad (2.9)$$

А напряжение, полученное из этого, определяется:

$$V = \frac{Q}{C}, \quad (2.10)$$

$$C = \frac{\varepsilon^T A}{t_p}, \quad (2.11)$$

$$D = dT, \quad (2.12)$$

$$T = d \frac{F}{A}. \quad (2.13)$$

Когда к пьезоэлектрическим материалам прикладывается сила, в материале генерируется электрическое напряжение. На основе уравнений 2.10, 2.11, 2.12 и 2.13 можно определить данное напряжение:

$$V = \frac{F d t_p}{A_p \varepsilon}, \quad (2.14)$$

$$A_p = L_p \times w_p. \quad (2.15)$$

где C — емкость пьезоэлектрического элемента, [Ф];

t_p — толщина пьезоэлемента;

A_p — площадь пьезоэлектрического элемента;

L_p и w_p — длина и ширина пьезоэлемента;

$$\varepsilon = \varepsilon_r \varepsilon_0, \quad (2.16)$$

где ε_r — относительная диэлектрическая проницаемость;

ε_0 — диэлектрической проницаемости вакуума = $8,85 \cdot 10^{-12}$ [Ф/м].

Уравнение генерации напряжения может быть выражено следующим образом:

$$V = \frac{F d t_p K}{A_p \varepsilon_r \varepsilon_0}, \quad (2.17)$$

где K — коэффициент пьезоэлектрической связи.

Из уравнения 3.6` следует, что приложенная сила F в зависимости от деформации выражается следующим образом [89]:

$$F = \frac{2 w_p t_p^3}{s^E L^3} \delta, \quad (2.18)$$

где δ — деформация.

Максимальная мощность, которая может быть получена от пьезоэлектрического элемента, зависит от его размеров и свойств. Согласно литературным данным [89, 101], максимальная мощность достигается, когда напряжение на устройстве равно половине напряжения разомкнутой цепи, а ток равен половине тока короткого замыкания. Мощность для каждого цикла может быть вычислена следующим образом:

$$P = \frac{9}{32} \frac{g_{33} d_{33} L^3 Q^2 m^2 A^2 f}{w_p t_p^3}. \quad (2.19)$$

2.1.3. Взаимодействие жидкости с пьезоэлектрическим элементом

Погруженный в жидкость пьезоэлектрический элемент с плотностью ρ , подвергается влиянию коэффициентов инерции (C_i) и аэродинамическому сопротивлению (C_d) [100-104]. Уравнение Морисона может быть использовано для расчета силы, оказываемой жидкостью на ПЭ. (Данное уравнение позволяет учитывать как инерционные, так и вязкостные компоненты силы, возникающие вследствие обтекания тела потоком жидкости):

$$F = 0,5 \rho D_p u C_d |u| + \frac{\pi D_p^2}{4} \rho C_i \frac{du}{dt}, \quad (2.20)$$

где F — приложенная сила;

D_p — диаметр пьезоэлемента;

u — скорость жидкости;

C_i и C_d — инерционный и аэродинамическое сопротивление коэффициенты [105,106]. Из уравнений 3.17 и 3.18 напряжение может быть выражено как:

$$V = \left(\frac{d t_p K}{\varepsilon_r \varepsilon_0} \right) \frac{0,5 \rho D_p u C_d |u| + \frac{\pi D_p^2}{4} \rho C_i \frac{du}{dt}}{L_p \times w_p}. \quad (2.21)$$

Тогда вырабатываемая мощность равна:

$$P = \frac{\left[\left(\frac{d t_p K}{\varepsilon_r \varepsilon_0} \right) \frac{0,5 \rho D_p u C_d |u| + \frac{\pi D_p^2}{4} \rho C_i \frac{du}{dt}}{L_p \times w_p} \right]^2}{R}. \quad (2.22)$$

Таким образом была установлена взаимосвязь между параметрами потока жидкости и величиной напряжения, мощностью и энергией, генерируемыми пьезоэлектрическим элементом.

2.2 Моделирование ПЭ с помощью COMSOL Multiphysics

Моделирование пьезоэлектрического элемента проводилось с применением встроенных физических модулей программы COMSOL Multiphysics. Данный программный комплекс позволяет эффективно решать разнообразные инженерные задачи, связанные с многодисциплинарным моделированием. На рисунке 2.4 изображён пошаговый процесс моделирования, а также представлены результаты моделирования механической конструкции. Данные результаты подтверждают предположение о том, что пьезоэлектрический генератор энергии эффективно реагирует на движение жидкости. Этапы моделирования и симуляции пьезоэлектрического преобразователя энергии на основе поливинилиденфторида (ПВДФ) с использованием программного комплекса COMSOL.

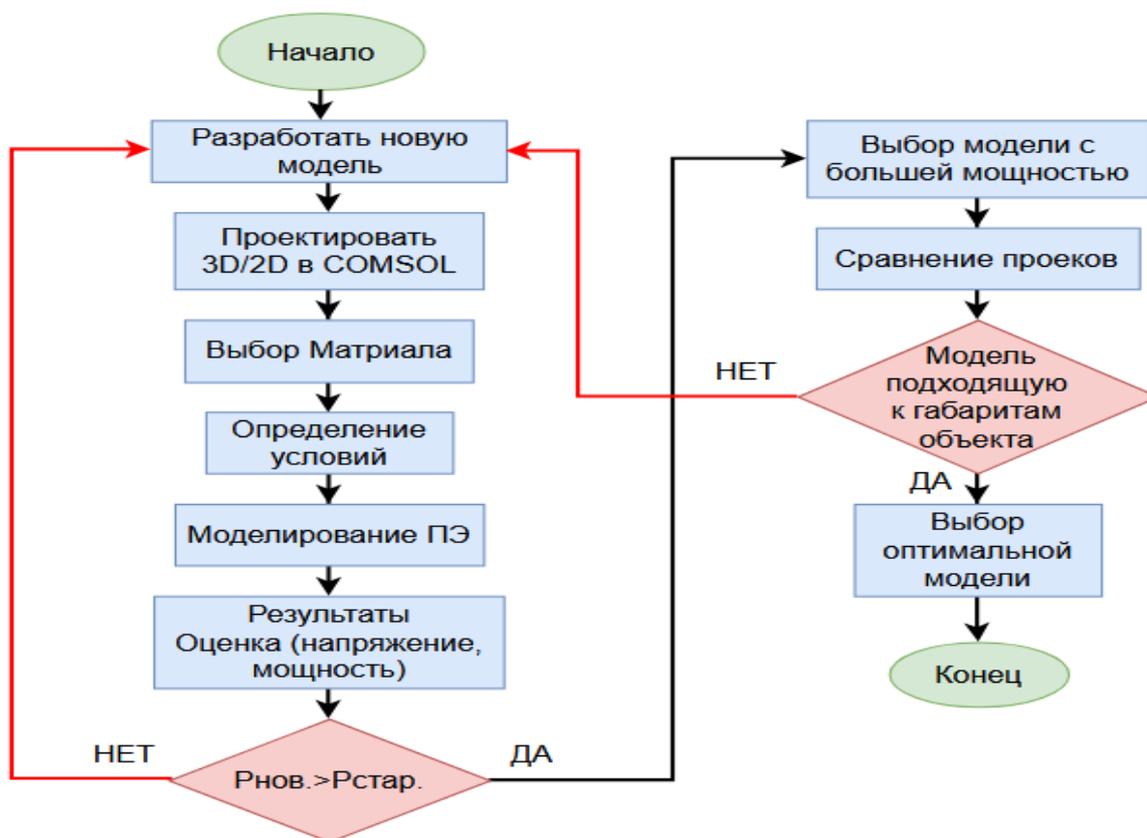


Рисунок 2.4 Блок-схема моделирования пьезоэлектрического элемента в программе COMSOL.

В настоящей главе рассмотрены две модели для получения энергии из морских волн с использованием пьезоэлектрического материала ПВДФ. Первая модель подразумевает полное погружение пьезоэлектрического элемента (ППЭ) в водную среду, что позволяет волнам и течению воды оказывать непосредственное воздействие на элемент. Во второй модели, непогруженном пьезоэлектрическом элементе (НПЭ), колебания, вызванные движением воды и волн, передаются на пьезоэлемент через механический механизм, такой как пружина или рычаг.

Эффективность и надёжность пьезоэлектрических устройств существенно зависят от выбора материала и конструктивного исполнения. В данном исследовании для извлечения энергии из морских волн был использован материал поливинилиденфторид (ПВДФ). Этот выбор обусловлен рядом преимуществ ПВДФ, среди которых высокая гибкость, способность выдерживать значительные нагрузки, малый вес, устойчивость к ультрафиолетовому излучению и высокая механическая прочность. Основные пьезоэлектрические и упругие свойства этого материала представлены в таблице 2.1 [118-120].

Таблица 2.1 Свойства пьезоэлектрического материала ПВДФ

Параметры	Значение		Ед. изм.
Плотность	1800		кг/м ³
Относительная диэлектрическая проницаемость $\epsilon_{33}^T/\epsilon_0$	13		-
пьезоэлектрические коэффициенты деформации	d_{33}	33	пКл/Н
	d_{31}	22	

пьезоэлектрические коэффициенты напряжения	g_{33}	340	мВ-м/Н
диэлектрические проницаемости ϵ		113	-
модуль Юнга $\cdot 10^9$		3	Н/м ²

Принципиальные схемы обеих моделей приведены на рисунках 2.5 и 2.6, соответственно.

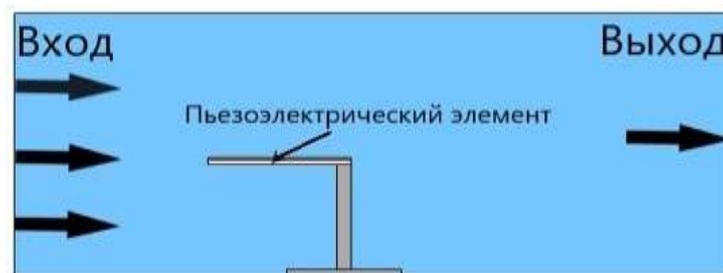


Рисунок 3.5 ППЭ модель, анализируемые в данной работе.

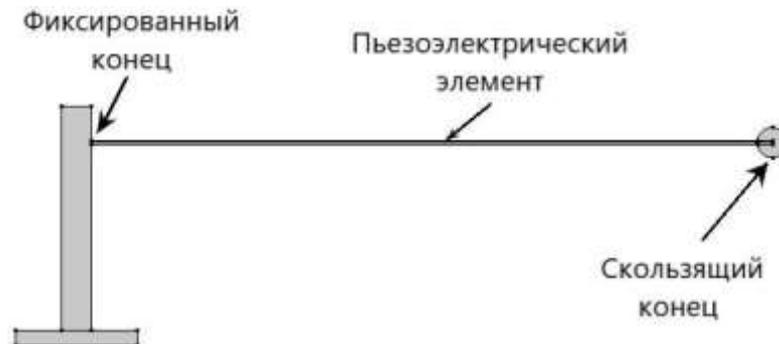


Рисунок 3.6 ППЭ модель, анализируемые в данной работе.

2.2.1. Модель погруженного пьезоэлектрического элемента (ППЭ)

Первая модель представляет собой конструкцию, полностью погружённую в водную среду и подверженную динамическому воздействию потоков воды и волн, как показано на рисунке 2.7. Данный подход позволяет использовать постоянные и часто значительные силы, создаваемые подводными течениями и

волнами. Пьезоэлектрические элементы, интегрированные в погружаемую структуру, реагируют на механические напряжения, вызванные движением воды, генерируя тем самым электрические заряды. Описываемая модель особенно эффективна для применения в подводных условиях, таких как реки, приливные зоны и океаны, где стабильный поток воды служит надёжным источником кинетической энергии.

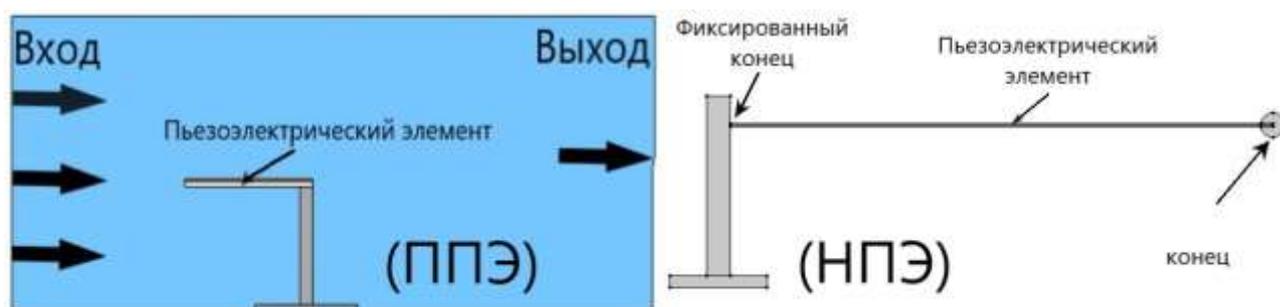


Рисунок 2.7 Модели ПЭ, разработаны в COMSOL.

2.2.2. Непогружная модель ПЭ

Вторая модель функционирует на поверхности воды, не требуя полного погружения, как видно на рисунке 2.7. Конструкция включает в себя рычаг или подвижную штангу, которая частично опускается в воду. Подвижная часть улавливает колебательные движения, возникающие при перемещении воды, и передаёт их на пьезоэлектрические элементы, находящиеся над поверхностью воды. Подобная конфигурация позволяет извлекать энергию без необходимости полного погружения устройства в воду. Данная модель универсальна и пригодна для использования в различных водоёмах, включая озёра, пруды или прибрежные акватории, где наблюдается волновое движение на поверхности воды. Стоит отметить, что подвижная часть конструкции имеет ограниченное направление перемещения.

При воздействии воды или волн пьезоэлектрический элемент деформируется, превращая механическую энергию в электрическую. Пьезоэлектрический компонент в данной модели выполнен в форме тонкой гибкой ленты из поливинилиденфторида (ПВДФ). Один край ленты закреплён

на нижней стороне устройства, чтобы находиться под водой и обеспечивать прямой контакт с волнами. Деформация ленты ПВДФ под действием волн вызывает генерацию электрической энергии, которая затем направляется в изолированную цепь. Цепь соединяется с аккумулятором, расположенным внутри устройства.

Физические взаимодействия, включённые в модель, охватывают два основных аспекта: взаимодействие жидкости и структуры, которое связывает эффекты ламинарного потока с механикой твёрдых тел, и пьезоэлектрический эффект, объединяющий механику твёрдого тела с электростатикой. В начальный момент времени $t=0$ секунд для оптимизации вычислительных ресурсов моделируется прохождение одиночной волны через волновой бассейн. Предполагалось, что среда в модели несжимаемая. Упрощенная модель была разработана с использованием COMSOL. В процессе моделирования пьезоэлектрический элемент погружался в воду при температуре 25°C и нормальном атмосферном давлении, находящейся в бассейне. Периодические волны поступали в резервуар с водой через входное отверстие с левой стороны, вызывая изгибание пьезоэлектрического элемента.

В результате этого процесса на элементе возникал электрический потенциал, который затем разряжался через внешнюю электрическую цепь. На рисунке 2.8 показана структура пьезоэлектрического преобразователя энергии, ключевым компонентом которого является гибкая пьезоэлектрическая лента из поливинилиденфторида (ПВДФ), заключённая между двумя тонкими слоями электродов. ПВДФ элемент имеет размеры $41,4*16,26$ мм и толщину $0,28$ мм. Пьезоэлектрическая полоса была закреплена на опоре, погружённой в волновой бассейн, что обеспечивало электрическое соединение и фиксировало её положение. Входное отверстие находилось на левой границе бассейна, а выходное — на правой. Предполагалось, что условия водной среды оставались постоянными по температуре и давлению.

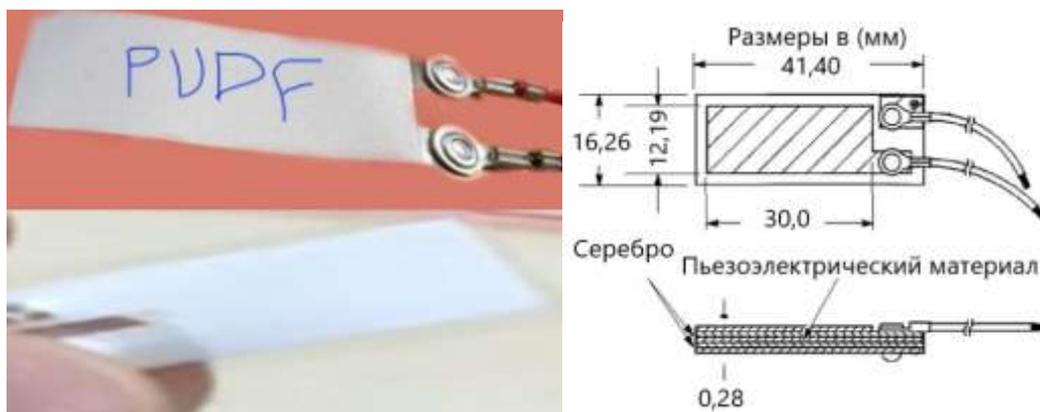


Рисунок 2.8 Пьезоэлектрический элемент.

Для учёта поверхностей контакта, в частности поверхности пьезоэлектрического элемента, в модели использовалась сеточная структура, основанная на физической интерпретации. В ходе моделирования использовалось около 10000 элементов сетки. Решение модели исследовали в интервале времени от 0 – до 0,6 секунды, что соответствует прохождению одной волны через волновой резервуар.

2.3 Лабораторный тест пьезоэлектрического элемента

Для проверки работоспособности и практической осуществимости модели пьезоэлектрического волнового генератора энергии было выполнено лабораторное тестирование в канале с проточной водой. Предложенная механическая конструкция (Gun Hamburg HM150) состояла из резервуара для воды, проточного канала, циркуляционной трубы и вставки из ПВДФ. Эта установка могла бы применяться в местах с постоянным водоснабжением, таких как реки, озёра, мосты, водопады и другие подобные объекты. Схематичное изображение испытательной установки представлено на рисунке 2.9.



Рисунок 2.9. Схематическая система, используемое в эксперименте.

Вода комнатной температуры и нормального давления подавалась в резервуар, формируя волновой фронт. Волна распространялась вдоль всего резервуара, воздействуя на пьезоэлектрический элемент и вызывая его деформацию. После прохождения через канал вода покидала резервуар через выходное отверстие.

2.4 Результаты моделирования в COMSOL

Моделирование проводилось в двумерной плоскости (2D), а не трёхмерной (3D), с целью сокращения времени сходимости модели. Было сделано предположение о ламинарном характере потока для упрощения модели. Температура и давление элементов внутри резервуара считались постоянными, а выделение тепла из-за трения или выполнения внешней работы не учитывалось.

2.4.1. Результаты моделирования для ППЭ модели

Для уменьшения времени сходимости моделирования использовался двумерный (2D) анализ, как показано на рисунке 2.5 (модель ППЭ). В ходе моделирования скорость потока воды изменялась от нуля до 1,8 м/с в течение времени от 0 до 0,38 с. Затем скорость потока постепенно снижалась и достигала нуля к моменту времени 0,6 с. Изменение скорости привело к образованию пика напряжения, наблюдаемого примерно через 0,38 секунды после начала эксперимента. Выходная мощность пьезоэлектрических элементов изменялась аналогично.

Изменение скорости вызвало пик напряжения примерно через 0,38 секунды, при котором максимальное значение напряжения составило 5,2 В, как показано на рисунке 2.10. Аналогично изменялась выходная мощность пьезоэлектрических элементов, достигнув значения $13.5 \cdot 10^{-2}$ мВт, как показано на рисунке 2.11.

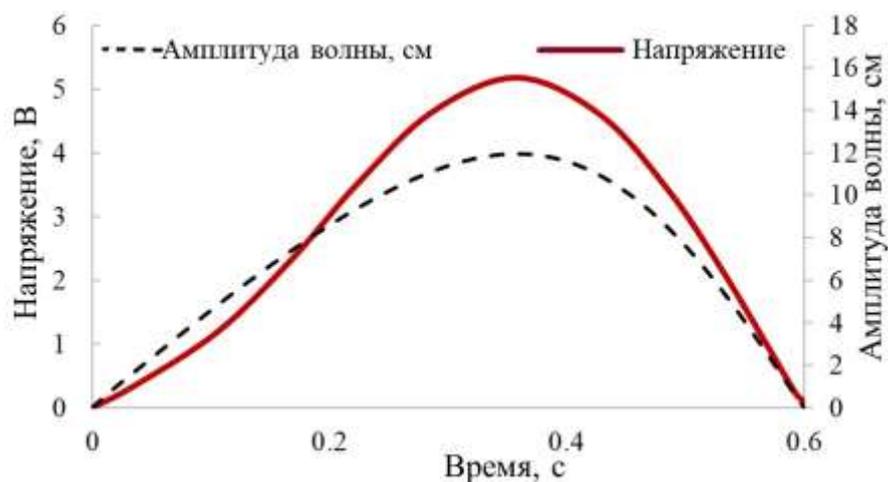


Рисунок 2.10 Изменение выходной мощности за время одной волны ППЭ.

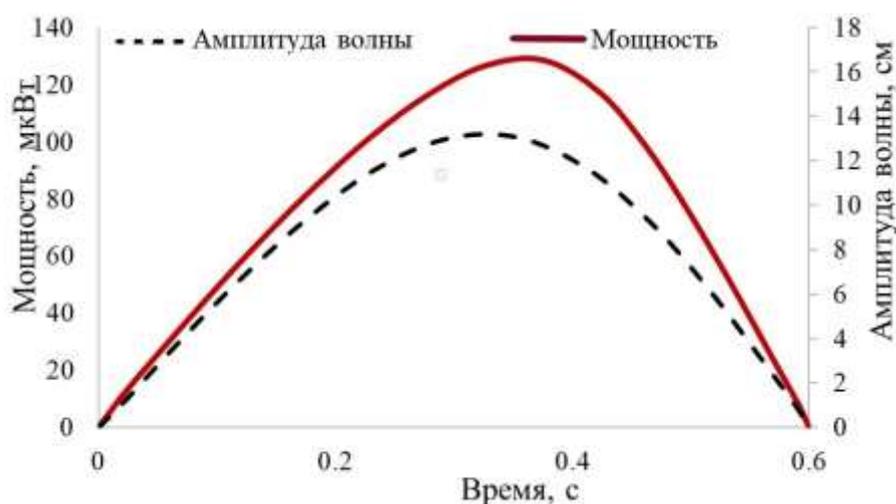


Рисунок 2.11 Изменение напряжения за время одной волны ППЭ.

Исследовалось влияние изменения скорости воды на входе в резервуар на напряжение и выходную мощность пьезоэлектрического элемента. График зависимости выходного напряжения от скорости показан на рисунке 2.12. Из графика видно, что максимальное выходное напряжение варьируется от 0,5 до 7

В для разных скоростей воды. Можно заключить, что увеличение скорости волны значительно повышает выходное напряжение.

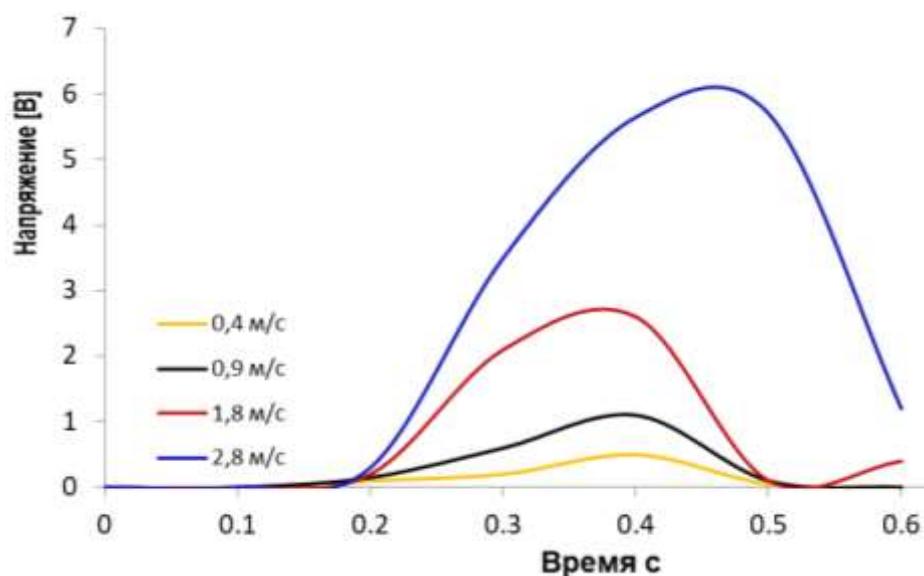


Рисунок 2.12 Выходное напряжение при различных скоростях.

На высоких скоростях гибкий пьезоэлектрический компонент подвергается большей деформации, что увеличивает напряжение и выходную мощность. Однако генерируемая мощность остаётся ограниченной даже при самых интенсивных волнах.

2.4.2. Результаты моделирования для НПЭ модели

В данном исследовании проводился анализ влияния частоты вибрации на выходную мощность и напряжение. Рассматриваемый диапазон частот составлял от 0 до 100 Гц, что позволило выявить специфичные частоты, влияющие на показатели мощности и напряжения на выходе системы.

На рисунке 2.14 показаны выходные значения напряжения и мощности, а также резонансная частота элемента ПЭ.

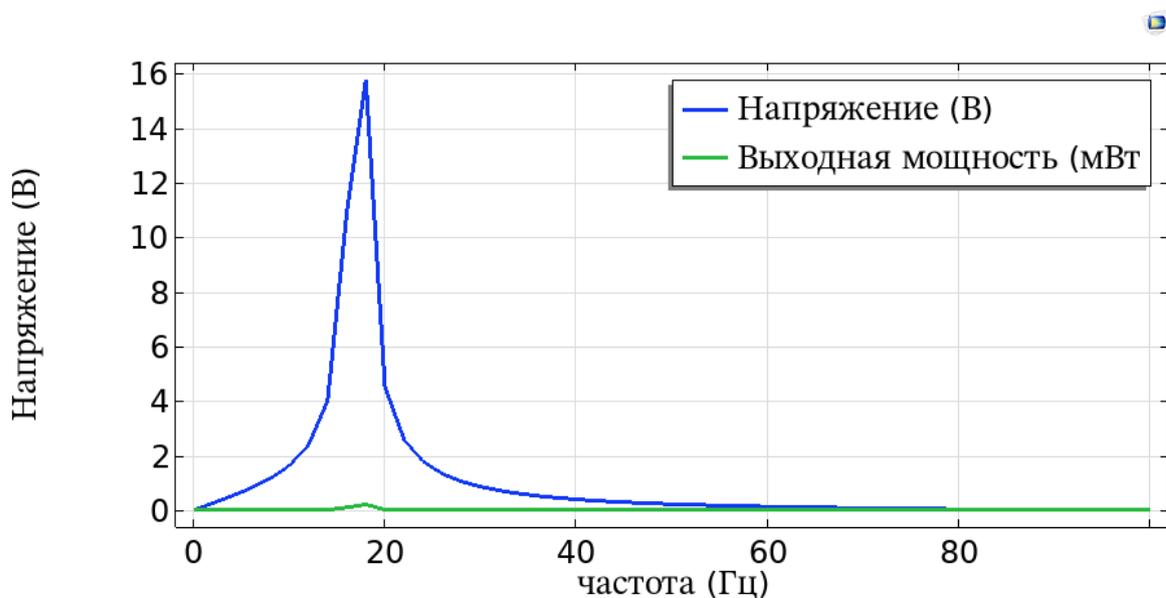


Рисунок 2.14 Напряжение и выходная мощность ПЭ.

Резонансная частота пьезоэлектрического элемента составила 18 Гц, при которой максимальные значения напряжения и выходной мощности достигли 49 В и 0,23 мВт соответственно.

На рисунке 2.15 продемонстрирована зависимость выходной мощности от частоты. Как видно из рисунка 2.16, максимальная выходная мощность, составляющая 0,25 мВт, достигается при сопротивлении 0,6 МΩ. Таким образом, оптимальным сопротивлением для данной конфигурации является 0,6 МΩ. Очевидно, что выходная мощность, обеспечиваемая разработанной системой, достаточно велика для питания низкопотребляющих датчиков.

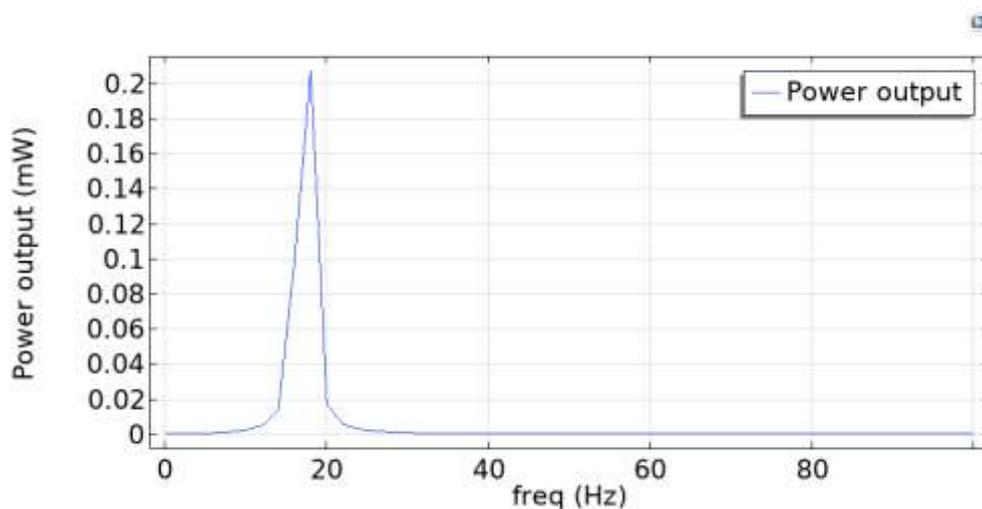


Рисунок 2.15 Изменение мощности в зависимости от частоты.

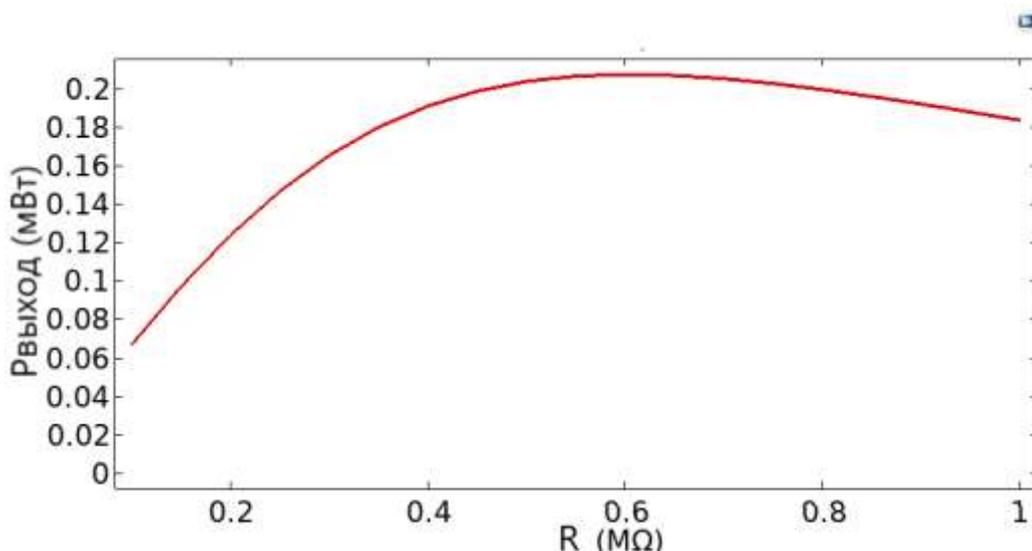


Рисунок 2.16 Изменение мощности в зависимости от нагрузки.

2.5. Результаты экспериментальных исследований

2.5.1. Результаты погружной модели ППЭ

Напряжение на выходе пьезоэлектрических элементов было измерено и сопоставлено с результатами моделирования в COMSOL. Экспериментальные значения напряжения оказались сравнимы с результатами, полученными в ходе моделирования для пьезоэлектрического материала при комнатной температуре.

Эксперимент, проведённый с использованием волнового резервуара, предоставил репрезентативные данные, подтверждающие, что напряжение на выходе пьезоэлектрического элемента приблизительно составляет 4,9 В, как показано на рисунке 2.17.

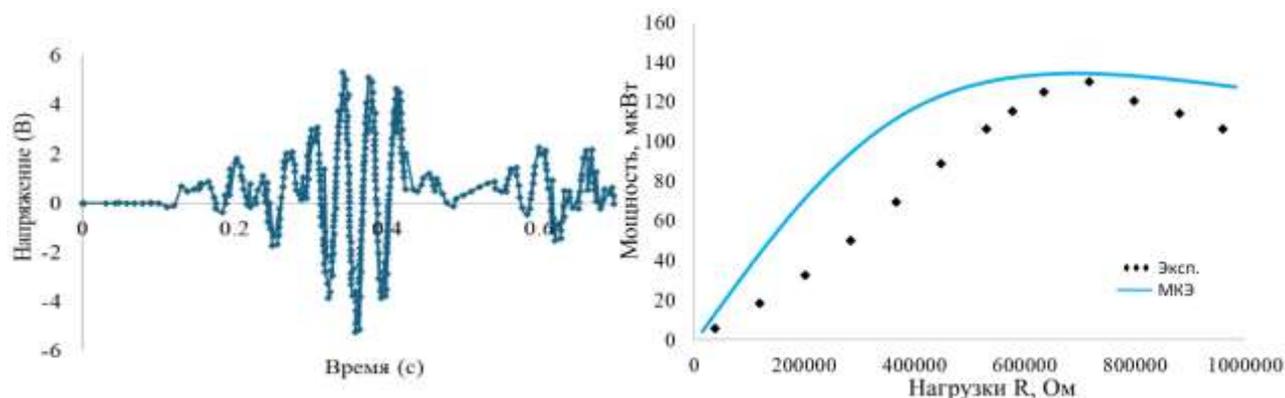


Рисунок 2.17 Выходные экспериментальные результаты ППЭ.

Полученные результаты свидетельствуют о согласованности практических и имитированных данных, подтверждая точность модели. На рисунке 2.18 представлено детализованное визуальное сравнение, демонстрирующее соответствие реальных экспериментальных результатов предсказаниям модели. Это дополнительно подтверждает надёжность и эффективность моделирования, отражающего поведение системы, а также указывает на высокие прогностические способности модели.

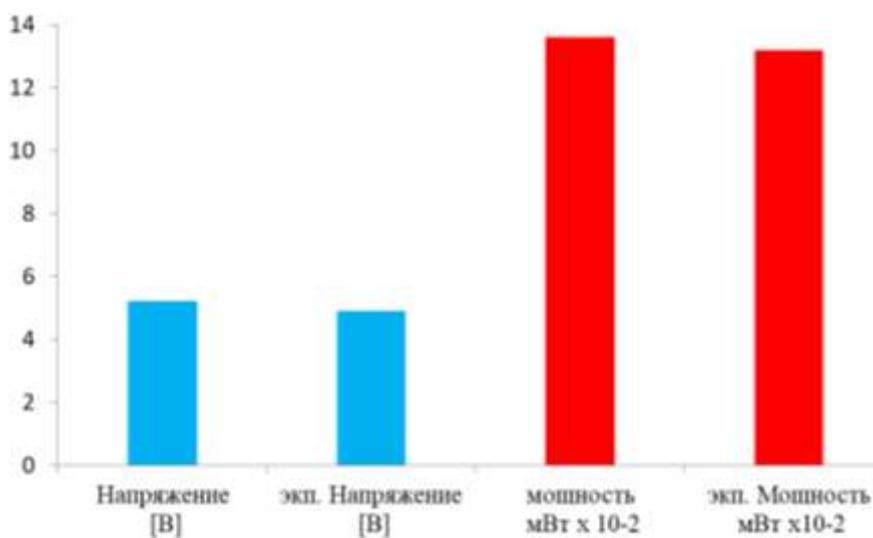


Рисунок 2.18 Сравнение данных моделирования с экспериментальными результатами, характерными для погружного ПЭ.

Результаты моделирования, представленные на рисунках 2.10 и 2.11, показывают, что выходное напряжение начинается с 0 В, возрастает до 5,2 В в период времени от 0 до 0,38 с, а затем вновь снижается до нуля в течение 0,6 с. Эта динамика отражает прохождение одной волны в ходе моделирования. Одновременно с этим выходная мощность пьезоэлектрического элемента достигает своего максимального значения – 13×10^{-2} мВт. Смоделированные данные сравнивались с экспериментальными результатами, как показано на рисунке 2.18. Полученные результаты указывают на явное сходство, что усиливает доверие к точности и обоснованности имитационной модели.

Таким образом, предлагаемый метод обеспечивает устойчивую выходную мощность на уровне микроватт, что делает его наиболее подходящим для приложений с крайне низким энергопотреблением.

2.5.2. Результаты непогружной модели НПЭ

Морские волны характеризуются различными параметрами, включая линейные, нелинейные и стохастические режимы. Для воссоздания реальных условий волнения в контролируемых лабораторных условиях, в данном исследовании применяется установка волновода. Волновод представляет собой полезный инструмент для моделирования и оценки работы волновых генераторов энергии в различных условиях. Установка разделена на две секции: зону генерации волн и зону тестирования. Длина волновода составляет около 3 метров, глубина — 90 см, ширина — 90 см. Генерация волн осуществляется с помощью насоса и лопасти, способных формировать волну. Схема экспериментальной установки волновода представлена на рисунке 2.19. Для создания стабильных условий экспериментов уровень воды поддерживается на отметке 60 см.

Экспериментальная установка в данном исследовании включает пьезоэлемент и сферический буй диаметром 30 см. (рисунок 2.19).



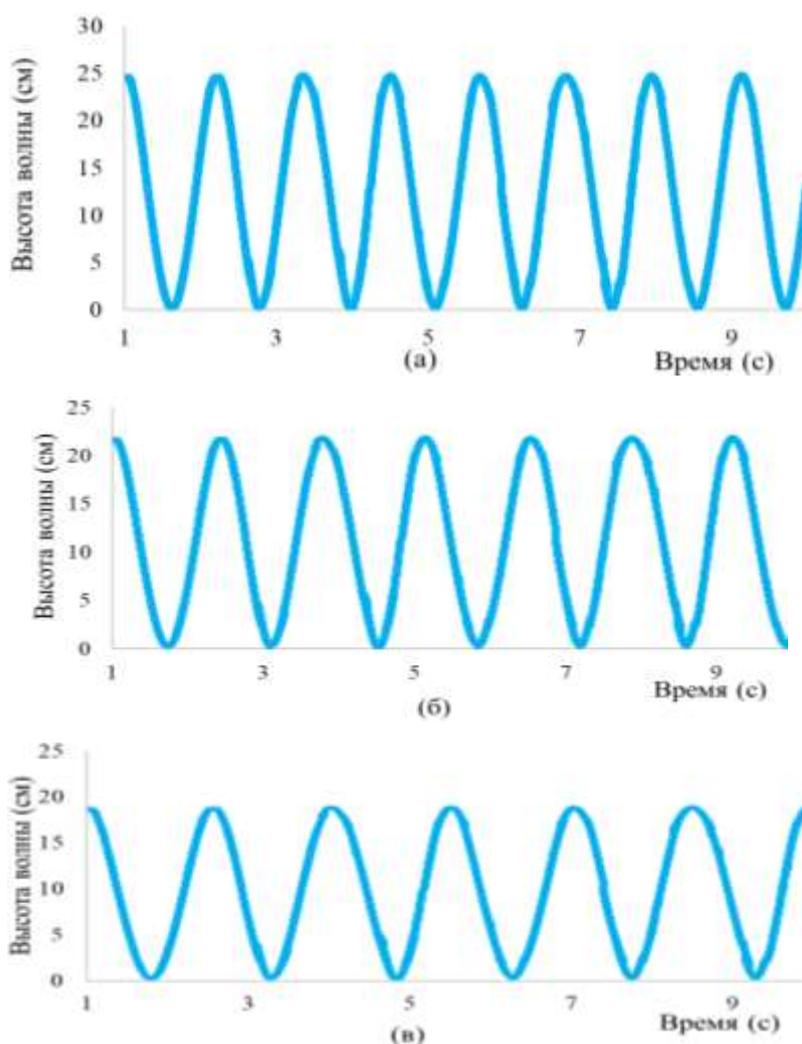
Рисунок 2.19 Принципиальная схема экспериментальной установки

Для мониторинга и регистрации данных в реальном времени снаружи буя установлен регистратор данных. Воздействие волн в волноводе вызывает движение буя, который, в свою очередь, возбуждает пьезоэлемент, вырабатывая электроэнергию. Для изучения влияния различных волновых режимов были реализованы различные сценария возбуждения путём изменения частоты генератора волн в диапазоне от 10 до 50 Гц с шагом 10 Гц в течение 5 минут для

каждой выбранной частоты. В ходе эксперимента колебания уровня волн регистрировались с помощью микроконтроллера и системы генерации волн.

Для анализа возможностей выработки электроэнергии использовались три различных режима волн с разными частотами генератора волн (50 Гц, до 10 Гц), которые генерировались в волновом канале для анализа амплитуды выходного напряжения при различных параметрах волн. Частота генератора волн волновода варьировалась в пределах от 10 до 50 Гц с учётом ограничений, связанных с размерами установки и особенностями проведения эксперимента.

Были проанализированы колебания высоты волны (в см) в зависимости от различных периодов волн, а графическая диаграмма колебаний представлена на рисунке 2.20. Также были оценены зависимости высоты волны, периода и длины волны от частоты затвора в волновом канале.



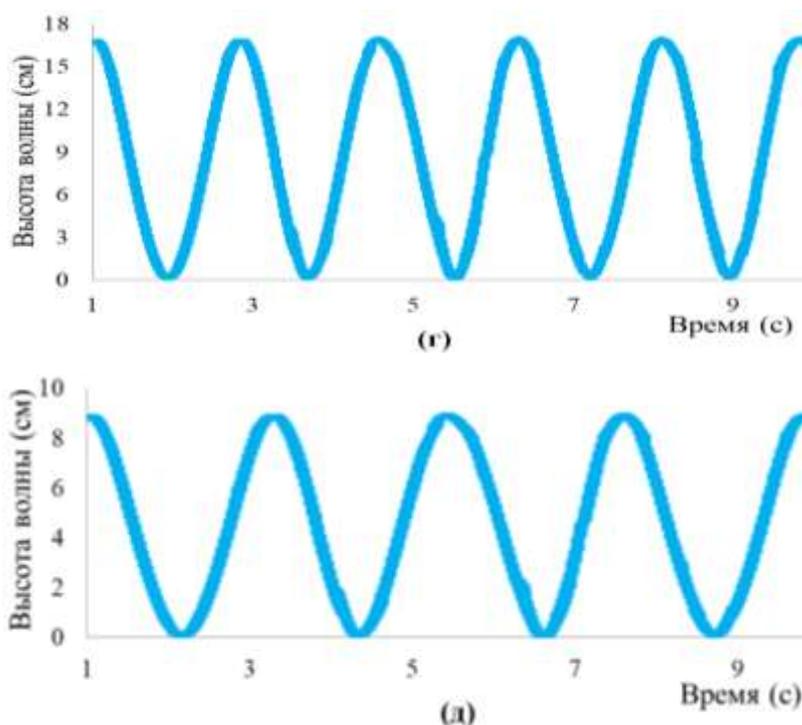


Рисунок 2.20 Изменения высоты волны (см) в зависимости от различных частотах генератора волн (а) 50 Гц (б) 40 Гц (в) 30 Гц (г) 20 Гц (д) 10 Гц

Экспериментальная установка основывается на принципах волновой теории для анализа изменений высоты, периода и длины волн, коррелируя их с выходной мощностью. Используются таблицы волн, позволяющие определить соотношение глубины к длине волны (D/L), что помогает рассчитать длину волны (L). Уровень воды в волноводе поддерживается на высоте 70 см для обеспечения однородности условий в различных испытаниях.

Полученные данные показывают, что применима теория глубоководных волн, поскольку высота волны остаётся существенно меньше других параметров волны, таких как длина волны и глубина воды. На основании рисунка 2.20 и таблицы 2.2 выявляется тенденция, согласно которой более высокие частоты волн соответствуют более коротким длинам волн, что, в свою очередь, усиливает движение элемента. Это ведёт к усиленному механическому воздействию на пьезоэлемент, повышая эффективность генерации энергии. Генерируемое напряжение непрерывно фиксируется с помощью регистратора данных на базе

микроконтроллера, что позволяет осуществлять точные измерения и анализ в реальном времени.

Таблица 2.2 Влияние частоты генератора волн на характеристики волны и генерируемое напряжение

Частота Генератора создающего волны (Гц)	Характеристики волны			Мощность волны (Вт)	Выходы Напряжение НПЭ (В)
	H (см)	T (с)	L (м)		
50	25	1,22	1,85	36.51	12,7
40	22	1,32	2,1	30.59	8,3
30	19	1,42	2,4	24.55	6,2
20	17	1,57	2,59	21.73	5,6
10	9	1.95	2,8	7.56	4,3

Теоретическая мощность волны может быть оценена с использованием стандартных гидродинамических соотношений. Поток энергии волны на единицу длины гребня волны выражается формулой:

$$P = \frac{\rho g^2}{64\pi} H^2 T$$

где:

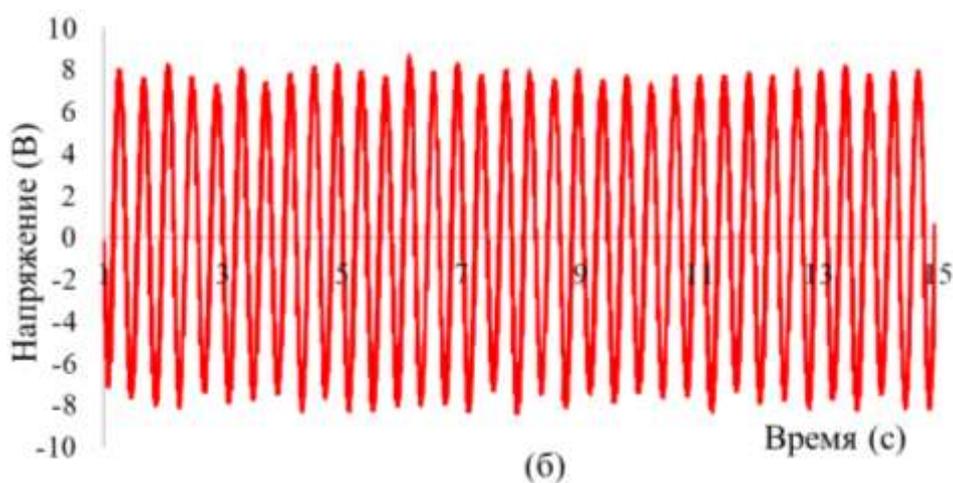
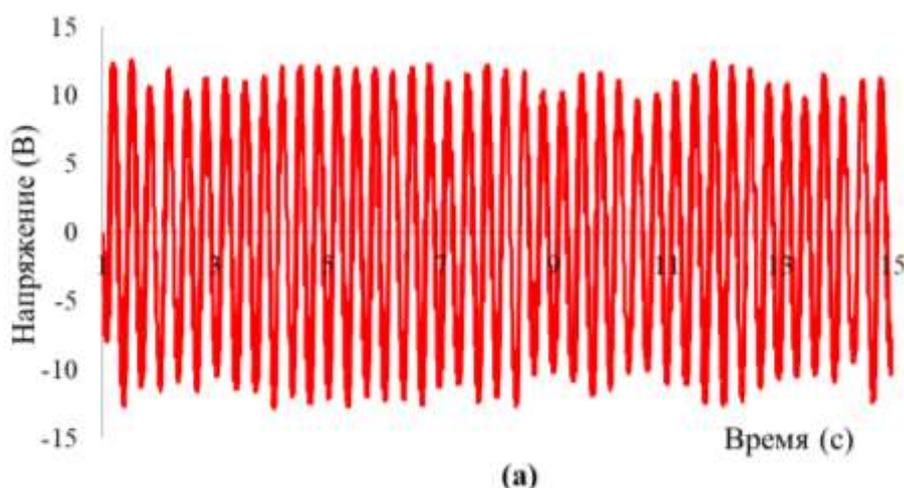
- ρ - плотность воды (1000 кг/м³ в пресноводном водоеме),
- H- высота волны,
- T - период энергии волны,
- g - гравитационное ускорение (9,81 м/с²).

Во время движения в волноводе буй подвергается действию множества сил, включая гравитационные, волновые и силы плавучести. Все эти взаимодействия оказывают влияние на перемещение пьезоэлектрической системы и её эффективность в преобразовании энергии волн в электрическую.

Под влиянием волн буй в волноводе движется главным образом в вертикальной плоскости. Теоретические расчеты показали, что минимальная и максимальная мощности волны составляют 36,5 Вт и 7,56 соответственно при различных частотах генератора волн (50 Гц и 10 Гц). Также было проведено систематическое изучение реакции напряжения при различных частотах

возбуждения в волновом канале. Частота затвора постепенно снижалась с 50 до 10 Гц, что позволило всесторонне оценить влияние волновых условий на эффективность сбора энергии. На рисунках 2.21 и 2.22 отображено выходное напряжение пьезоэлектрической системы при различных частотах генератора волн, демонстрирующее уменьшение уровня напряжения по мере снижения частоты затвора.

Система достигает максимальной мощности на частоте, равной 50 Гц. Как видно из таблицы 2.2, наивысшее зафиксированное напряжение составляло 12,7 В при частоте 50 Гц, а наименьшее измеренное напряжение — 4,3 В при частоте 10 Гц.



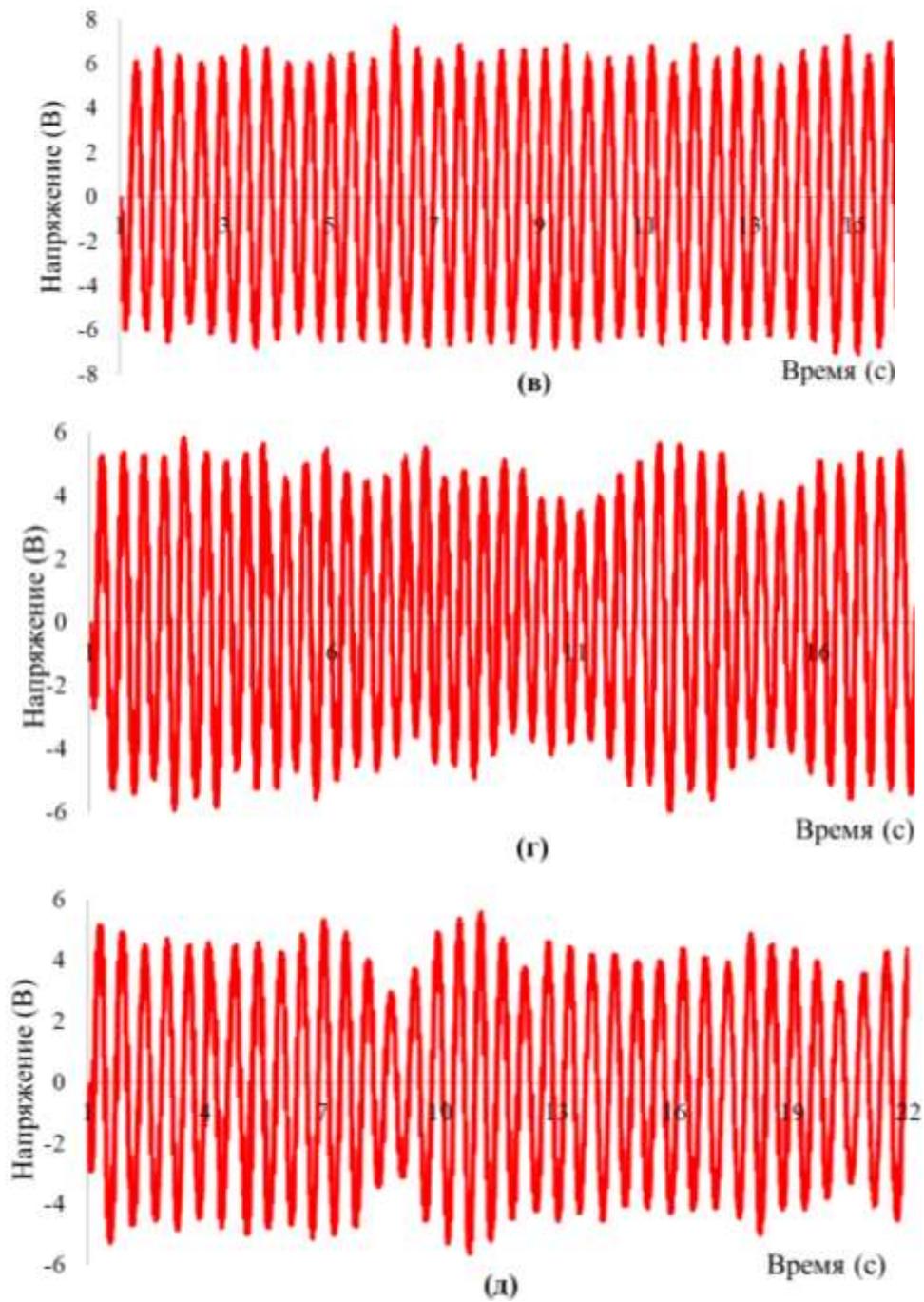


Рисунок 2.21 Выходное напряжение пьезоэлектрической системы при различных частотах генератора волн (а) 50 Гц (б) 40 Гц (в) 30 Гц (г) 20 Гц (д) 10 Гц

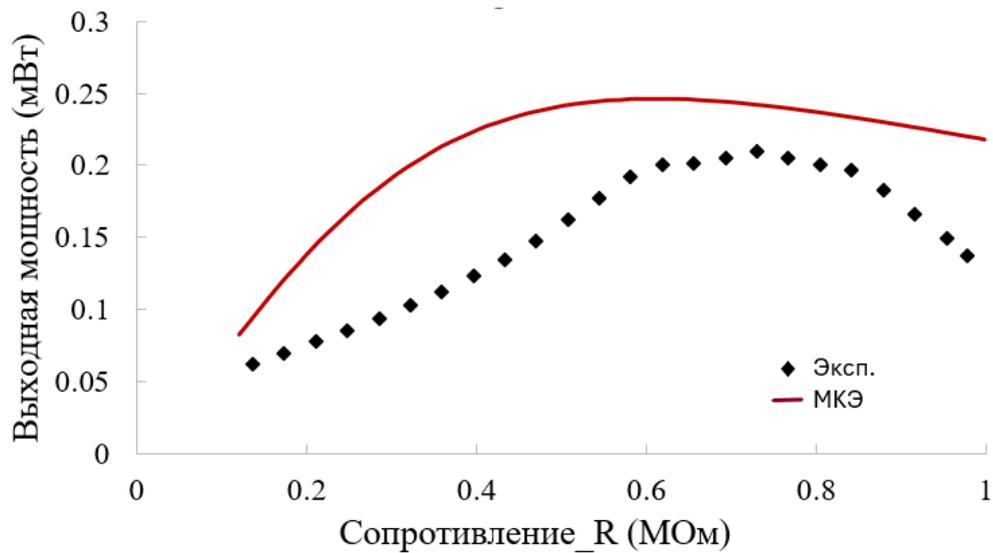


Рисунок 2.22 Изменение мощности в зависимости от нагрузки

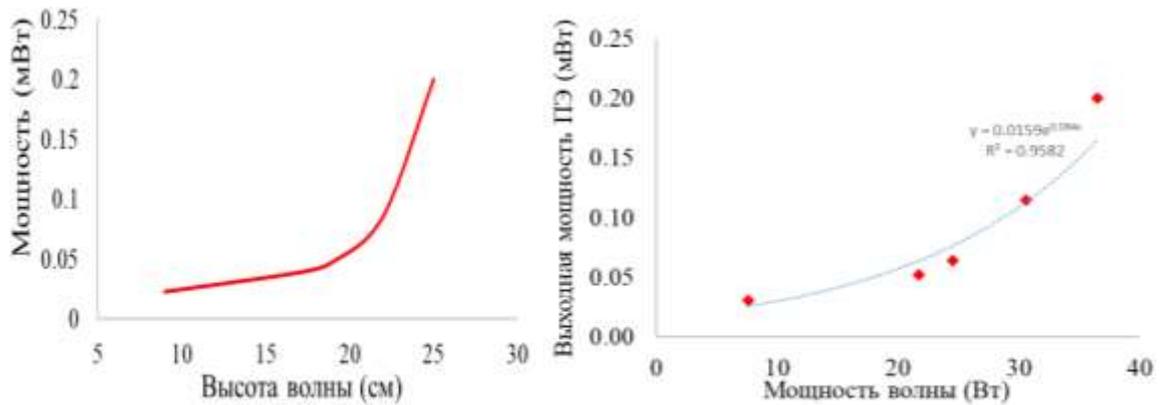


Рисунок 2.23 Отношение между выходной мощностью и характеристиками ВОЛНЫ

На рисунке 2.23 представлена зависимость выходной мощности от высоты волны подчеркивая прямую пропорциональность между высотой волн и выработкой энергии, где увеличение высота волн ведет к повышению генерации энергии.

Морская среда отличается нерегулярной волновой активностью, и её воздействие непосредственно влияет на ускорение и динамику движения буя. При изменении волновой активности ускорение буя меняется соответствующим образом. Для стабильного преобразования энергии в пьезоэлектрической системе используются высокоэффективный мостовой выпрямитель и регулятор

напряжения, которые стабилизируют переменное напряжение и выходную мощность.

2.5.3. Техничко-экономический анализ

Для сравнения экономических показателей двух конструкций микроэнергетических систем, работающих на энергии потока воды или волн с использованием пьезоэлектрических элементов, был проведен краткий и упрощенный технико-экономический анализ. Для практического внедрения таких устройств важно оценить затраты на производство и эксплуатацию, что и является основной задачей данного раздела. Из двух предложенных моделей НПЭ демонстрирует лучшие показатели по уровню вырабатываемой энергии по сравнению с ППЭ. Средние значения выходной мощности, генерируемой обоими вариантами, представлены на графике, рисунок 2.24.

Для питания морского буя был произведен расчёт, направленный на определение необходимого количества пьезоэлектрических элементов, необходимых для генерации мощности 10 мВт — уровня, достаточного для работы бортовых устройств.

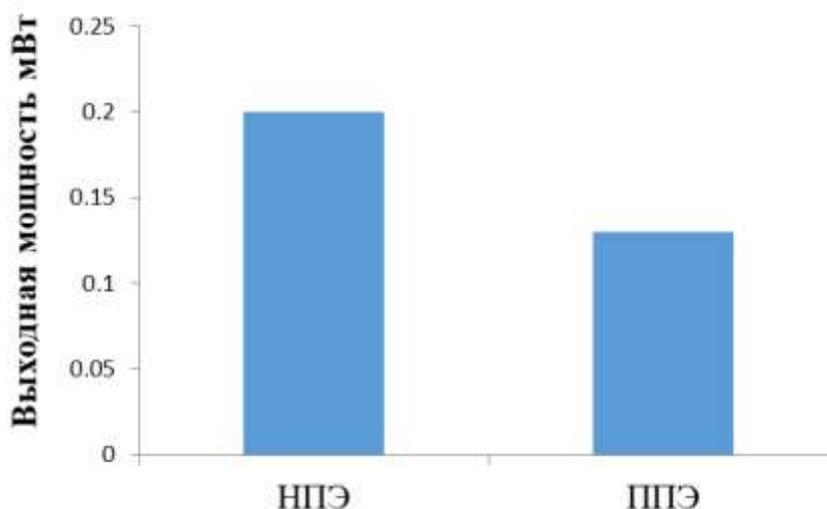


Рисунок 2.24 Расчетные значения для средней выработки мощности.

Выбор данного показателя обусловлен тем, что указанной мощности хватит для электропитания оборудования на бую. Из полученных результатов

видно, что погружная модель требует большего количества пьезоэлектрических элементов. На рисунке 2.25 показано, что для погружной модели ППЭ требуется большее число элементов для выработки мощности 10 мВт.

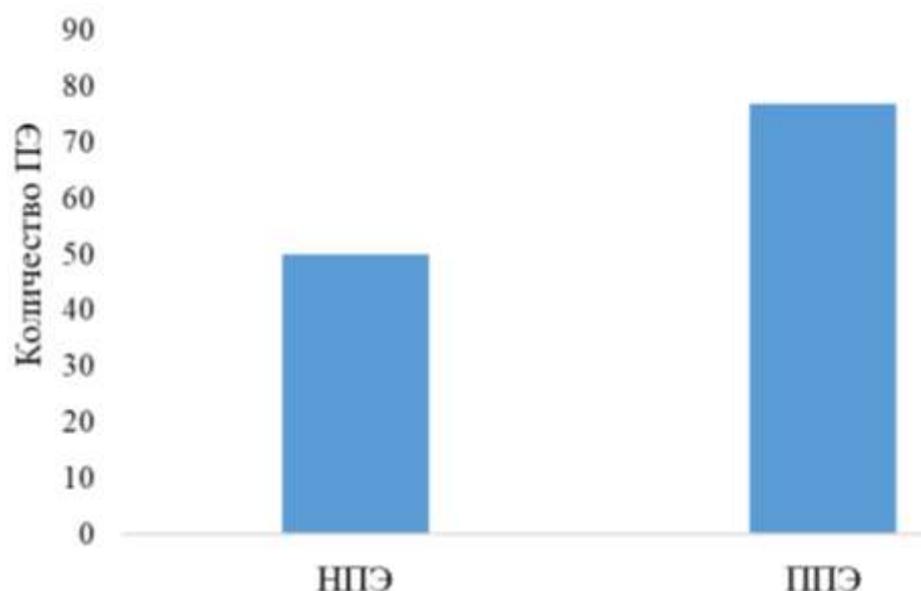


Рисунок 2.25 Количество ПЭ, необходимое для генерации 10 мВт.

Стоимость пьезоэлектрического преобразователя энергии в основном определяется ценой пьезоэлектрических элементов, которая составляет около 5 долларов США (при наличии на локальных рынках) за каждый элемент. Соответственно, система, требующая большого количества пьезоэлектрических компонентов, окажется более дорогой. На рисунке 2.26 видно, что модель НПЭ обладает более низкой себестоимостью, составляющей около 200 долларов. Стоимость возрастёт, если учесть расходы на монтаж, электронику и изоляцию устройства.

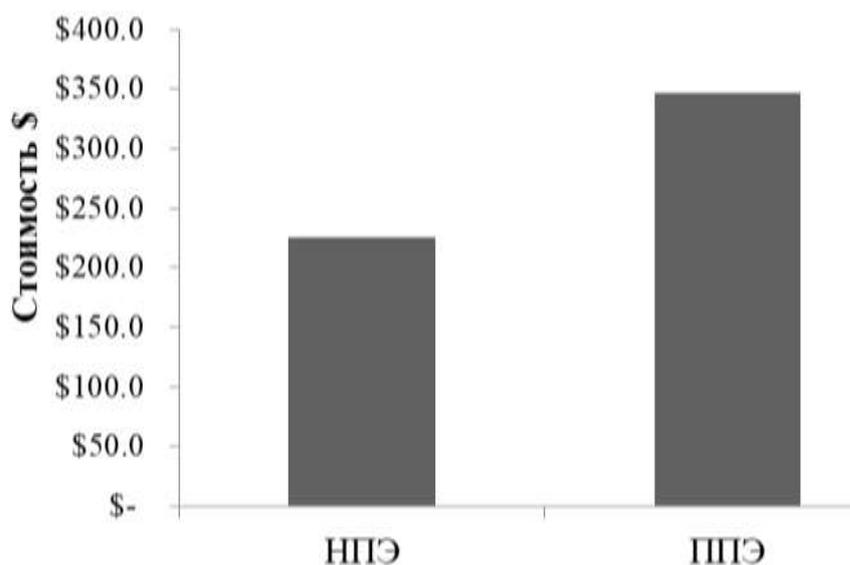


Рисунок 2.26 Расчетная стоимость ПЭ элементов, необходимых для генерации 10 мВт.

Исходя из результатов, в контексте заявленной темы, наиболее подходящим вариантом для выработки электроэнергии является - НПЭ вариант.

2.5 Выводы

1. В данной главе исследован потенциал использования пьезоэлектрических элементов из материала ПВДФ для получения энергии от движения воды и морских волн с целью питания маломощных устройств, таких как морские информационные буи.

2. Сравнительный анализ погружной и непогружной моделей показал, что вторая модель генерирует значительно большую мощность (0,2 мВт), чем первая (0,13 мВт) данный факт позволяет говорить о том, что плавающая версия лучше подходит для выработки энергии в контексте обсуждаемых задач.

3. Для стабильного преобразования энергии в пьезоэлектрической системе используются высокоэффективный мостовой выпрямитель и регулятор напряжения, которые стабилизируют переменное напряжение и выходную мощность.

В последующих разделах мы рассмотрим различные схемы интеграции пьезоэлектрической системы, чтобы оптимизировать её для работы с прибрежными и морскими буями.

Глава 3. Структурный синтез электрических схем для пьезоэлектрических систем

Разработка эффективной схемы пьезоэлектрического сбора энергии имеет решающее значение для максимального увеличения количества полезной энергии, извлекаемой из вибрации. Типичная схема пьезоэлектрического сбора энергии включает пьезоэлемент, выпрямитель, компоненты для накопления энергии, регулирования напряжения и управления нагрузкой. Интеграция и оптимизация этих компонентов определяют общую производительность системы сбора энергии [121].

Ранее было уделено ограниченное внимание теме сбора энергии на основе вибрации, но в этой главе речь пойдет о интерфейсных схемах, также известных как схемы управления питанием. Данные схемы в основном включают выпрямление напряжения, регулирование напряжения и согласование полного сопротивления.

Поскольку большинство электронных устройств работают от постоянного тока, преобразование вибраций окружающей среды в постоянный ток имеет решающее значение. Выпрямление является важнейшим компонентом интерфейсной схемы в системах малой мощности, поскольку вибрации окружающей среды часто нерегулярны и непредсказуемы. Выпрямитель преобразует нерегулярные сигналы переменного тока в стабильный постоянный, который затем регулируется для поддержания постоянного выходного напряжения [122, 123].

В выпрямительных схемах обычно используются полупроводниковые компоненты, такие как диоды, транзисторы и тиристоры, которые могут быть сконфигурированы в полуволновой или полномасштабной конфигурациях. Полуволновые выпрямители преобразуют только половину цикла переменного тока в постоянный, в то время как полуволновые выпрямители обрабатывают обе половины. Внесение нелинейных изменений в стандартные выпрямительные схемы может повысить эффективность электромеханического преобразования

энергии и увеличить количество потребляемой энергии. Согласно исследованию [124], все выпрямительные элементы в данном исследовании являются диодами. В этой статье будут дополнительно рассмотрены различные нелинейные методы и изучен эффект падения напряжения на диодах, который имеет решающее значение для работы устройств с полностью автономным питанием.

3.1 Полный мостовой выпрямитель (ПМВ)

Стандартный метод пьезоэлектрического преобразования энергии на постоянном токе предполагает использование преобразователя для преобразования механических колебаний в электрическую энергию, которая затем преобразуется в постоянный ток (DC) с помощью двухполупериодного выпрямителя и может быть сохранена или использована для питания внешней нагрузки [125, 126]. На рисунке 3.1 показана принципиальная схема стандартного процесса постоянного тока.

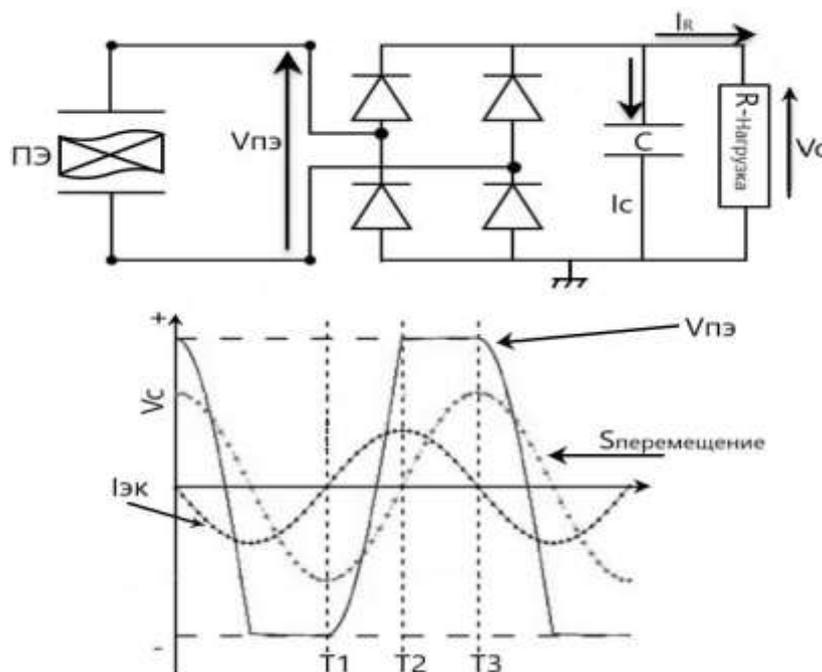


Рисунок 3.1 Принципиальная схема стандартного подхода к постоянному току

В пьезоэлектрических схемах сбора энергии соотношение между напряжением $V_{ПЭ}$ на пьезоэлектрическом элементе и накопленным напряжением в конденсаторе C_L играет решающую роль в определении эффективности передачи энергии. Поведение схемы меняется в зависимости от величины

пьезоэлектрического напряжения по отношению к напряжению на шине постоянного тока и от падения напряжения на диодах выпрямителя [127,128].

Состояние разомкнутой цепи ($|V_{\text{пэ}}| < V_{\text{DC}} + 2 \times 0,5\text{V}$): Когда абсолютное пьезоэлектрическое напряжение $|V_{\text{пэ}}|$ меньше суммы напряжения на шине постоянного тока и удвоенного падения напряжения на диоде ($2 \times 0,5\text{V}$), пьезоэлемент фактически находится в состоянии случая с разомкнутой цепью [129]:

- Напряжение, генерируемое пьезоэлектрическим элементом, недостаточно для преодоления порогового значения, установленного выпрямителем (включая падение прямого напряжения на диоде).
- В результате через выпрямитель не протекает ток и накопительный конденсатор C_{LC} не заряжается.
- В течение этого периода энергия, вырабатываемая пьезоэлектрическим элементом, не используется, что приводит к снижению потенциальной эффективности сбора энергии.

Поскольку пьезоэлектрическое напряжение $V_{\text{пэ}}$ зависит от механического смещения, то условие соответствует периодам, когда механическое возбуждение слишком слабое для создания достаточного уровня напряжения.

Условие передачи энергии ($|V_{\text{пэ}}| = V_{\text{DC}} + 2 \times 0,5\text{V}$): Когда абсолютное пьезоэлектрическое напряжение $|V_{\text{пэ}}|$ достигает порогового значения постоянного тока $+2 \times 0,5\text{V}$ [130]:

- Напряжение достаточно высокое для прямого смещения диодов в цепи выпрямителя;
- Передача энергии от пьезоэлектрического элемента к накопительному конденсатору C_{L} происходит как во время положительного, так и во время отрицательного полупериодов пьезоэлектрического напряжения;
- Вышеописанное условие позволяет току протекать через выпрямитель, заряжая накопительный конденсатор и делая собранную энергию доступной для использования.

Эффективность передачи энергии зависит от продолжительности и величины этого состояния в течение каждого цикла подачи пьезоэлектрического сигнала напряжения.

Электрический заряд (Q), генерируемый пьезоэлектрическим элементом в течение полупериода $(T/2) = (t_2 - t_1)$ [128-130], может быть выражен как:

$$\int_{t_1}^{t_2} I dt = \frac{V_c \cdot T}{2 \cdot R} \quad 3.1$$

где: I - ток, протекающий через выпрямитель и поступающий в накопительный конденсатор; V_c - пиковое напряжение пьезоэлемента в течение полупериода; R - эквивалентное сопротивление нагрузки; T - период сигнала переменного напряжения пьезоэлемента.

При пьезоэлектрическом сборе энергии напряжение, генерируемое пьезоэлементом ($V_{ПЭ}$), напрямую связано с механическим перемещением (s) элемента. Данная зависимость выражается математически, чтобы понять, как механические колебания или силы преобразуются в электрическую мощность. Уравнение, описывающее пьезоэлектрическое напряжение в терминах смещения, задается следующим образом [127-129]:

$$V_{ПЭ} = \frac{\alpha}{C_{ПЭ}} s + A \quad 3.2$$

где: $V_{ПЭ}$ - пьезоэлектрическое напряжение, генерируемое элементом; α - константа пропорциональности, которая зависит от свойств пьезоэлектрического материала и конфигурации пьезоэлемента; $C_{ПЭ}$ - емкость пьезоэлемента; s - механическое смещение пьезоэлемента вследствие приложенного механического напряжения (например, вибрации); A - это напряжение смещения, которое учитывает начальные условия или базовые уровни напряжения [130].

При крайних значениях, представленных на рис. 3.1, пьезоэлектрическое напряжение рассчитывается следующим образом [120-125]:

$$-V_c = -\frac{\alpha}{C_{ПЭ}} s_A + A \quad 3.3$$

$$A = -V_c + \frac{\alpha}{C_{ПЭ}} s_A \quad 3.4$$

из ур. 3.3 и 3.4

$$Vc = \frac{\alpha}{2C_{\text{ПЭ}}}(s_1 - s_A) \quad 3.5$$

Энергия (E), получаемая в течение одной фазы работы (например, за один полупериод вибрации), выражается так [121-124]:

$$E = \int_{t_1}^{t_2} P(t)dt = \int_{t_1}^{t_2} V(t) I(t)dt \quad 3.6$$

$$= \alpha V (s_A - s_1) \quad 3.7$$

Из уравнения 2.5 можно определить значение S1 и подставить его в уравнение 3.7.

$$E = 2V(\alpha s_A - C_{\text{ПЭ}}(V + 0,5)) \quad 3.8$$

И мощность, генерируемая пьезоэлектрической системой сбора энергии во время этого процесса, может быть выражена как [110-112]:

$$P = 2fE = 4fV(\alpha s_A - C_{\text{ПЭ}}(V + 2 \times 0,5)) \quad 3.9$$

Чтобы получить максимальную мощность, необходимо дифференцировать процесс, о котором идет речь:

$$\frac{\partial P(s)}{\partial V} = 0, \text{ и } V_{\text{опт}} = \frac{\alpha}{2C_{\text{ПЭ}}} s_A - 0,5 \quad 3.10$$

из ур. 3.10 и 3.9

$$\begin{aligned} P_A &= 4f \left(\frac{\alpha}{2C_{\text{ПЭ}}} s_A - 0,5 \right) \left(\alpha s_A - C_{\text{ПЭ}} \left(\frac{\alpha}{2C_{\text{ПЭ}}} s_A - 0,5 + 2 \times 0,5 \right) \right) \\ &= 4f \left(\frac{\alpha}{2C_{\text{ПЭ}}} s_A - 0,5 \right) \left(\alpha s_A - \frac{\alpha}{2} s_A - C_{\text{ПЭ}} \times 0,5 \right) \\ &= 4C_{\text{ПЭ}} f \left(\frac{\alpha}{2C_{\text{ПЭ}}} s_A - 0,5 \right) \left(\frac{\alpha}{2C_{\text{ПЭ}}} s_A - 0,5 \right) \\ &= C_{\text{ПЭ}} f \left(\frac{\alpha}{C_{\text{ПЭ}}} s_A - 2 \times 0,5 \right) \left(\frac{\alpha}{C_{\text{ПЭ}}} s_A - 2 \times 0,5 \right) \\ &= C_{\text{ПЭ}} \left(\frac{\alpha}{C_{\text{ПЭ}}} s_A - 2 \times 0,5 \right)^2 \quad 3.11 \end{aligned}$$

Напряжение $V_{\text{пэ}}$, генерируемое пьезоэлектрическим элементом, пропорционально амплитуде перемещения (s). Чтобы выразить выпрямленное

напряжение на нагрузке как функцию амплитуды перемещения пьезоэлектрического элемента, зависимость выводится как:

$$V_c = \frac{\alpha R}{C_{\text{ПЭ}}R\omega + \frac{\pi}{2}} \omega S_A \quad 3.12$$

Амплитуда смещения (s) пьезоэлектрической системы при резонансе может быть выражена как функция амплитуды силы, приложенной к системе.

$$S_A = \frac{F}{C\omega + \frac{2R\alpha^2\omega}{(C_{\text{ПЭ}}R\omega + \frac{\pi}{2})^2}} \quad 3.13$$

Выражение мощности (P), получаемой от пьезоэлектрического элемента, как функции амплитуды перемещения s, можно записать в виде:

$$P_{(s)} = \frac{\alpha^2 \omega^2 R}{(C_{\text{ПЭ}}\omega R + \frac{\pi}{2})^2} S_A^2 \quad 3.14$$

Коэффициент сопротивления нагрузки, обозначаемый κ_R , - это безразмерный параметр, который сравнивает сопротивление нагрузки R с характеристическим импедансом пьезоэлектрической системы. Он определяется как:

$$\kappa_R = \frac{2C_{\text{ПЭ}}\omega R}{\pi} \quad 3.15$$

из ур. 3.14 и 3.15

$$P_{(s)} = \frac{2\kappa_R \omega K_{cM}}{\pi(1+\kappa_R)^2} S_A^2 \omega^2, \quad \text{когда } \kappa_R = 1, R \text{ макс.} \quad 3.16$$

$$\text{Модифицированный коэффициент связи (Kс)} = \frac{K^2}{1+K^2} = \frac{\alpha^2}{K C_{\text{ПЭ}}} \quad 3.17$$

Таким образом, максимальная мощность, которая может быть собрана, составляет:

$$P_{(s),\text{макс}} = \frac{K_c^2}{2\pi} \omega M (\omega S_A)^2 \quad 3.18$$

где: угловая частота колебаний (ω); инерционная масса (M); амплитуда скорости (ωS_A).

3.2 Схема синхронизированного коммутатора с индуктором (СКИ)

Синхронизированный сбор энергии на индукторе СКИ это метод, используемый в системах сбора энергии, в частности, для более эффективного

преобразования механических колебаний в электрическую энергию. Предложенный метод используется в пьезоэлектрических системах сбора энергии, где энергия, генерируемая пьезоэлектрическими материалами в результате механического напряжения, оптимизируется с помощью усовершенствованной схемы [130-133].

СКИ предполагает более сложную схему по сравнению с традиционными пьезоэлектрическими методами сбора энергии, но преимущества в энергоэффективности делают его популярным выбором. Типы технологий СКИ [132,133]:

- Параллельный СКИ (П-СКИ):

в этой конфигурации индуктор и переключатель подключены параллельно пьезоэлектрическому элементу как показано на рисунке 3.2. Такая конструкция проще и подходит для приложений, где стоимость и пространство ограничены.

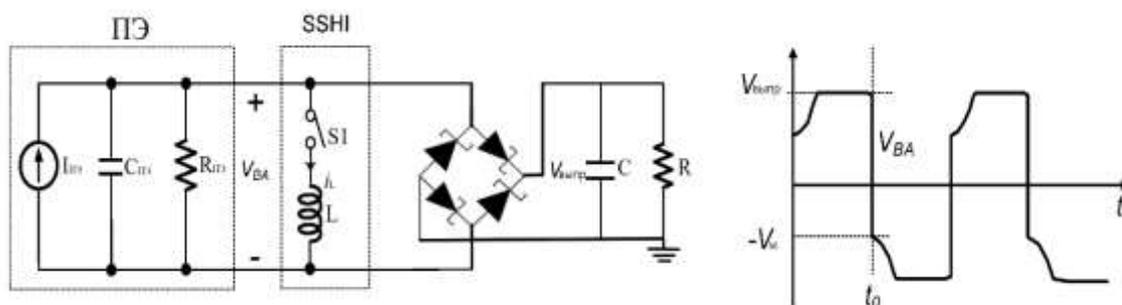


Рисунок 3.2 Принципиальная схема П-СКИ

- Последовательный СКИ (С-СКИ):

индуктор и переключатель последовательно соединяются с пьезоэлектрическим элементом как показано на рисунке 3.3. Данная конфигурация часто обеспечивает более высокую эффективность преобразования энергии благодаря улучшенной инверсии напряжения.

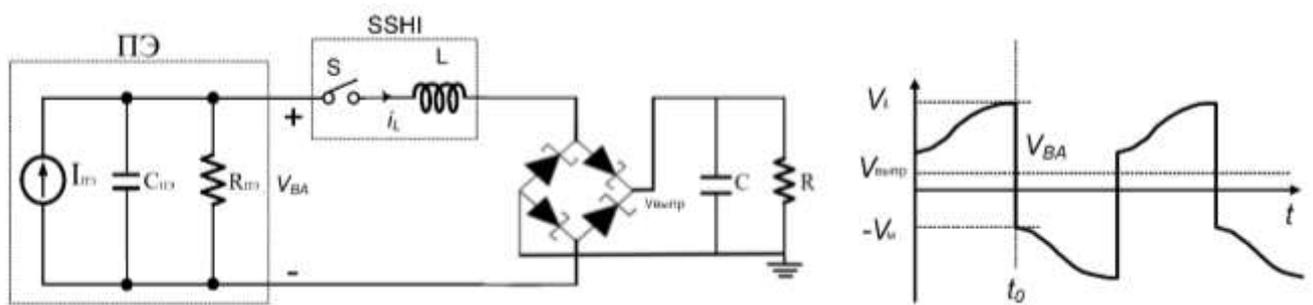


Рисунок 3.3 Принципиальная схема С-СКИ

Принцип работы заключается в следующем [130-133]:

1. Обнаружение пиков:
системы СКИ основаны на обнаружении пиков напряжения, генерируемого пьезоэлектрическим материалом во время механической деформации.
2. Синхронизированное переключение: в момент пика кратковременно активируется переключатель (часто MOSFET или аналогичный электронный переключатель), где переключатель включен последовательно с индуктором, образуя резонансный контур.
3. Инверсия напряжения: резонансный контур быстро инвертирует напряжение на пьезоэлектрическом элементе благодаря индуктору, вызывающему сдвиг фаз. Инверсия происходит почти мгновенно и в течение короткого промежутка времени, когда переключатель закрыт.
4. Передача энергии: магнитное поле индуктора временно накапливает энергию во время срабатывания переключателя и высвобождает ее таким образом, что увеличивает амплитуду напряжения, в результате повышая энергию, передаваемую на элемент хранения (обычно конденсатор или батарею).

Время инверсии напряжения (t_i) в синхронизированных на индукторе (СКИ) является важнейшим параметром, который напрямую влияет на эффективность сбора энергии. Время инверсии зависит от индуктивности (L) внешнего индуктора и емкости ($C_{ПЭ}$) пьезоэлектрического элемента. Следующие соотношения и уравнения описывают взаимодействие данных параметров [129-134]:

- Угловая частота (ω): $\omega^2 = 1/LC_{ПЭ}$

Данное уравнение определяет угловую частоту резонансного контура, образованного индуктором и емкостью пьезоэлектрического элемента.

- Частота (f): $2\pi f = 1/\sqrt{LC_{ПЭ}}$

Данное уравнение связывает угловую частоту со стандартной частотой (f) резонансного контура.

- Временной период (T): $2\pi/\omega = 1/\sqrt{LC_{ПЭ}}$

Данное выражение помогает определить связь между периодом колебаний и параметрами индуктивности-емкости.

- Время инверсии (t_i): $t_i = \pi\sqrt{LC_{ПЭ}}$

В данном уравнении время инверсии (t_i) - это половина периода электрических колебаний, на который напрямую влияют индуктивность (L) и емкость ($C_{ПЭ}$), которое определяет, насколько быстро происходит инверсия напряжения в процессе СКИ.

Из-за потерь в системе, часть энергии накопленной в конденсаторе, эффективно преобразуется. Подобные потери обусловлены несколькими факторами, включая: электрические потери при переключении, механические потери и присущую пьезоэлектрическому эффекту двунаправленную природу, когда механическая энергия преобразуется в электрическую и наоборот. Коэффициент качества (Q_i) контура S-L- $C_{ПЭ}$ — это показатель того, насколько эффективно система накапливает и передает энергию. Потери в системе снижают коэффициент качества, что приводит к снижению эффективности сбора энергии. Более низкий коэффициент качества указывает на более высокий уровень рассеивания энергии по отношению к энергии, запасенной в системе. Электрический заряд ($Q_{ПЭ}$), генерируемый ПЭ в процессе преобразования напряжения выражается следующим образом [133-135]:

$$Q_{ПЭ} = (V_{ВКЛ} - V_{ВЫКЛ}) C_{ПЭ} \quad 3.19$$

Соотношение между напряжением до ($V_{ВКЛ}$) и после ($V_{ВЫКЛ}$) инверсии в цепи СКИ зависит от потерь в системе и выводится так:

$$V_{\text{ВКЛ}} = -V_{\text{ВЫКЛ}} + 2s_A \frac{\alpha}{C_{\text{ПЭ}}} \quad 3.20$$

3.2.1 Последовательный СКИ (С-СКИ)

В схеме S-СКИ индуктор и переключатель соединены последовательно с пьезоэлектрическим элементом как показано на рисунке 3.3. Подобная конфигурация обеспечивает более высокую эффективность преобразования энергии благодаря улучшенной инверсии напряжения. Для последовательной конфигурации СКИ (S-СКИ) соотношение напряжений до ($V_{\text{ВКЛ}}$) и после ($V_{\text{ВЫКЛ}}$) инверсии описывается следующим образом [130-135]:

$$V_{\text{ВЫКЛ}} - V_{\text{ИСТ}} = -\gamma(V_{\text{ВКЛ}} - V_{\text{ИСТ}}) \quad 3.21$$

$$\frac{V_{\text{ВКЛ}} - V_{\text{ВЫКЛ}}}{V_{\text{ВКЛ}} + V_{\text{ВЫКЛ}} - 2V_{\text{ИСТ}}} = \frac{1 + \gamma}{1 - \gamma} \quad 3.22$$

$$V_{\text{ВКЛ}} - V_{\text{ВЫКЛ}} = \frac{1 + e^{-\frac{\pi}{2Q_i}}}{1 - e^{-\frac{\pi}{2Q_i}}} \left(2 \frac{\alpha}{C_{\text{ПЭ}}} s_A - 2V_{\text{ИСТ}} \right) \quad 3.23$$

γ : Коэффициент инверсии, $\gamma = e^{-\pi/2Q_i}$, количественно определяет эффективность процесса инверсии.

Общее выражение для собираемой мощности (P) в цепи С-СКИ описывается следующим образом:

$$P_{(s)} = \frac{2}{T} Q_{\text{ПЭ}} V_R \quad 3.24$$

$$= \frac{2}{T} (V_{\text{ВКЛ}} - V_{\text{ВЫКЛ}}) C_{\text{ПЭ}} V_{\text{ИСТ}} \quad 3.25$$

$$= 2 \left(\frac{\omega}{\pi} \right) \frac{1 + e^{-\frac{\pi}{2Q_i}}}{1 - e^{-\frac{\pi}{2Q_i}}} (\alpha s_A - C_{\text{ПЭ}} V_{\text{ИСТ}}) V_{\text{ИСТ}} \quad 3.26$$

В случае С-СКИ мощность в зависимости от перемещения составляет [119,120]:

$$P_{(s)} = \frac{4 \alpha^2 R (1 + \gamma)^2}{(2 C_{\text{ПЭ}} R \omega (1 + \gamma) + \pi (1 - \gamma))^2} \omega^2 s_A^2 \quad 3.27$$

Оптимальное сопротивление нагрузки R для системы С-СКИ [135]:

$$R_{\text{опт}} = \frac{\pi (1 - \gamma)}{2 \omega C_{\text{ПЭ}} (1 + \gamma)} \quad 3.28$$

Напряжение на оптимальной нагрузке в С-СКИ выражается функцией амплитуды перемещения s_A :

$$V_{R_{\text{опт}}}^{C\text{-СКИ}} = \frac{\alpha}{2 C_{\text{ПЭ}}} s_A \quad 3.29$$

Максимальная мощность для С-СКИ при работе с оптимальной нагрузкой и с учетом амплитуды смещения [130-135]:

$$P_{(s)\text{макс}}^{(C\text{-СКИ})} = \left(\frac{\omega}{2\pi}\right) \frac{\left(1 + e^{-\frac{\pi}{2Q_i}}\right)}{\left(1 - e^{-\frac{\pi}{2Q_i}}\right)} \frac{\alpha^2}{C_{\text{ПЭ}}} s_A^2 \quad 3.30$$

$$P_{(s)\text{макс}}^{C\text{-СКИ}} = \frac{1+\gamma}{1-\gamma} P_{(s)\text{макс}} \quad 3.31$$

Для последовательного синхронизированного коммутатора с индуктором (С-СКИ) выпрямленное напряжение V выводится следующим образом:

$$V = \frac{2 \alpha R(1+\gamma)}{2 \omega C_{\text{ПЭ}} R(1+\gamma) + \pi(1-\gamma)} \omega s_A = \sqrt{R P_{(s)}^{C\text{СКИ}}} \quad 3.32$$

Тогда напряжения $V_{\text{вкл}}$ и $V_{\text{выкл}}$ можно записать в виде:

$$V_{\text{вкл}} = \frac{1}{1-\gamma} \left(\frac{2\alpha s_A}{C_{\text{ПЭ}}} - (1+\gamma) \sqrt{R P_{(s)}^{C\text{СКИ}}} \right) \quad 3.33$$

$$V_{\text{выкл}} = \frac{1}{1-\gamma} \left(\frac{2\gamma\alpha s_A}{C_{\text{ПЭ}}} - (1+\gamma) \sqrt{R P_{(s)}^{C\text{СКИ}}} \right) \quad 3.34$$

3.2.2 Параллельный СКИ (П-СКИ)

Цепь П-СКИ (Параллельная синхронизированная коммутация на индукторе) — тип цепи сбора энергии, используемый в основном в системах сбора энергии с помощью пьезоэлектрических элементов, для повышения эффективности преобразования энергии за счет использования методов синхронизированного переключения. Соотношение 3.20 можно переписать в виде [130-135]

$$V_{\text{выкл}} = -V_{\text{вкл}} e^{-\frac{\pi}{2Q_i}} \quad 3.35$$

Мощность (Р- собранная) в цепи П-СКИ в зависимости от амплитуды смещения:

$$P_{(s)} = \frac{2}{T} Q_{\text{ПЭ}} V_R = \frac{\omega}{\pi} \left(2\alpha s_A - C_{\text{ПЭ}} V_{\text{ист}} \left(1 - e^{-\frac{\pi}{2Q_i}} \right) \right) V_{\text{ист}} \quad 3.36$$

Для П-СКИ максимальные значения P и напряжения при оптимальной нагрузке:

$$P_{(s)}^{\text{макс}} = \left(\frac{\omega}{\pi} \right) \frac{\alpha^2}{C_{\text{ПЭ}} \left(1 - e^{-\frac{\pi}{2Q_i}} \right)} s_A^2 \quad 3.37$$

$$V_{R\text{опт}} = \frac{\alpha}{C_{\text{ПЭ}} \left(1 - e^{-\frac{\pi}{2Q_i}} \right)} s_A \quad 3.38$$

При сравнении С-СКИ и П-СКИ основные различия заключаются в характеристиках, связанных с коэффициентом качества Q_i пьезоэлектрического комбайна и механизмах передачи энергии:

- При низких значениях Q_i П-СКИ обеспечивает вдвое большую мощность по сравнению с С-СКИ, что объясняется процессом передачи энергии Р-СКИ, который является более эффективным благодаря параллельной конфигурации. Описанная особенность результативно повышает эффективность переключения напряжения.
- При высоких значениях Q_i производительность как С-СКИ, так и П-СКИ становится одинаковой. При высоких значениях Q_i обе схемы приближаются к максимальной эффективности, поскольку потери энергии в конфигурациях систем сводятся к минимуму, что приводит к одинаковой выходной мощности.

3.3 Схема синхронного извлечения электрического заряда (СИЭЗ)

Синхронная схема извлечения электрического заряда (СИЭЗ) состоит из индуктора и переключателя, расположенных последовательно с выпрямителем (см. рис 3.4). Основная функция этой схемы — извлечение накопленного электрического заряда и передача его в нагрузку, когда заряд достигает своего пика. В отличие от схем СКИ, где максимальная мощность зависит от нагрузки, схемы СИЭЗ особенно выгодны для широкополосных приложений и приложений со случайными колебаниями, поскольку они устраняют

необходимость согласования импеданса нагрузки, не требуя дополнительного интерфейса адаптации. Подобная конструкция значительно снижает зависимость собираемой мощности от колебаний нагрузки. В электрических цепях СИЭЗ выключатель замыкается кратковременно, причем длительность замыкания определяется колебательным контуром r_1 - L - $C_{ПЭ}$, где r_1 — резистивные и магнитные потери. Управляющее дифференциальное уравнение для этой системы имеет вид [135-140]:

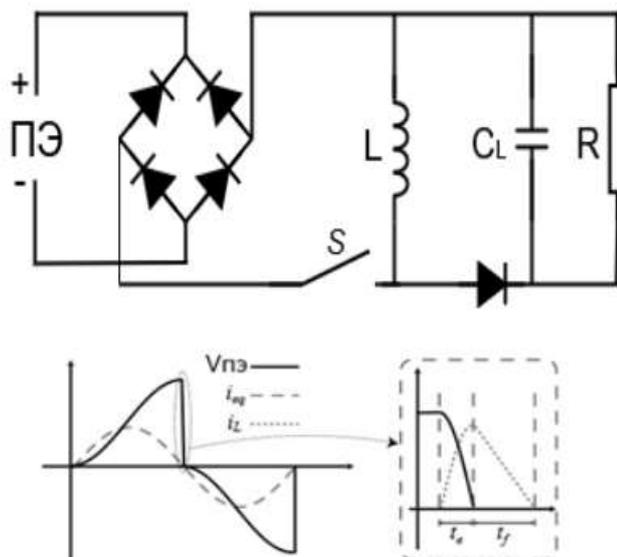


Рисунок 3.4 Принципиальная схема (СИЭЗ)

$$L_i Q_o + r_1 Q_o + \frac{Q_o}{C_{ПЭ}} = 0 \quad 3.39$$

где $Q_0 = C_{ПЭ} V_A$ - накопленный заряд, а $Q_0(0) = 0$ при замыкании выключателя. Во время замыкания выключателя напряжение на пьезоэлектрическом элементе равно напряжению и току через первичный индуктор и описывается [135-140]:

$$V_{инд} = L_i Q_o = \frac{V_M}{\sqrt{1 - \left(\frac{1}{2Q_i}\right)^2}} \cos \left(\sqrt{1 - \left(\frac{1}{2Q_i}\right)^2} \omega_i t + \arcsin \left(\frac{1}{2Q_i} \right) \right) e^{-\frac{\omega_i t}{2Q_i}} \quad 3.40$$

$$I_{инд} = Q_o = C_{ПЭ} V_M \frac{\omega_i}{\sqrt{1 - \left(\frac{1}{2Q_i}\right)^2}} \sin \left(\sqrt{1 - \left(\frac{1}{2Q_i}\right)^2} \omega_i t \right) e^{-\frac{\omega_i t}{2Q_i}} \quad 3.41$$

Для обеспечения минимальных электромагнитных потерь Q_i должно быть как можно больше. При таких условиях разность фаз между напряжением и

током приближается к $(\pi/2)$, что приводит к следующим приближениям для тока и напряжения через первичный индуктор [135-140]:

$$I_{\text{инд}} = V_A \sqrt{\frac{C_{\text{ПЭ}}}{L_i}} \sin(\omega_i t) e^{-\frac{\omega_i t}{2Q_i}} \quad (3.42)$$

$$V_{\text{инд}} = V_A \sin\left(\omega_i t - \frac{\pi}{2}\right) e^{-\frac{\omega_i t}{2Q_i}} \text{ и } \omega_i = \frac{1}{\sqrt{L_i C_{\text{ПЭ}}}}, \quad Q_i = \frac{1}{r_1} \sqrt{\frac{L_i}{C_{\text{ПЭ}}}} \quad (3.43)$$

В момент, когда напряжение на пьезоэлектрическом элементе падает до нуля, он снова открывается. Период электрических колебаний СИЭЗ равен $T = \pi/2\omega_i$. Максимальный ток, протекающий через L_i в этот момент, равен:

$$I_{\text{инд}} = I_A = V_A \sqrt{\frac{C_{\text{ПЭ}}}{L_i}} e^{-\frac{\omega_i t}{2Q_i}} \quad (3.44)$$

На этапе извлечения заряда, когда выключатель замыкается, электрический заряд, накопленный на пьезоэлектрическом элементе, передается первичному индуктору L_i , за исключением потерь в эквивалентном сопротивлении r_1 . Энергия, накопленная в индукторе L_i , может быть записана следующим образом [135-140]:

$$E_{\text{инд}} = \frac{1}{2} L_i I_{\text{инд}}^2 = \frac{1}{2} C_{\text{ПЭ}} V_A^2 e^{-\frac{\pi}{2Q_i}} \quad (3.45)$$

Затем данная энергия полностью разряжается в цепь нагрузки (CrR). Связь между максимальным напряжением V_A и максимальной амплитудой смещения S_A задается интегрированием уравнения $I = \alpha s - C_V$ за период времени от t_0 до $t_0 + T_2$.

Для структур со слабой связью или возбуждаемых вдали от резонанса, постоянная амплитуда колебаний приводит к появлению напряжения и мощности как функций перемещения:

$$V_A = 2 \frac{\alpha S_A}{C_{\text{ПЭ}}} \quad (3.46)$$

$$P_{(A)} = \frac{2\omega\alpha^2}{\pi C_{\text{ПЭ}}} e^{-\frac{\pi}{2Q_i}} S_A^2 \quad (3.47)$$

Когда система возбуждается в резонансе постоянной синусоидальной силой, амплитуда смещения (s_A) зависит от коэффициента электромеханической связи, и получаемая мощность выражается как функция от амплитуды силы (F) [141-145]:

$$P_{(F)} = \gamma_C \frac{2\alpha^2}{\pi\omega C_o} \frac{F^2}{\left(C + \frac{4\alpha^2}{\pi\omega C_o}\right)^2} \quad (3.48)$$

В обоих сценариях СИЭЗ имеет преимущество благодаря независимости от нагрузки, что делает его идеальным для широкополосных приложений. Однако остаются проблемы в виде чувствительных стратегий управления переключателями, коротких и точных временных требований для Т-СИЭЗ, а также необходимости оптимизации извлечения заряда для предотвращения потерь энергии. Предлагаемый метод оптимизированного синхронного извлечения электрического заряда (СИЭЗопт) был разработан для преодоления некоторых ограничений стандартного подхода СИЭЗ. СИЭЗопт использует две первичные индукторы и один вторичный, что устраняет необходимость в мостовом выпрямителе, как показано на рис. 3.5, приведенная оптимизированная конфигурация повышает эффективность передачи энергии за счет идеальной магнитной связи между первичной и вторичной индукторами и минимизирует потери, обычно связанные с переключателями и диодами в традиционных конфигурациях.

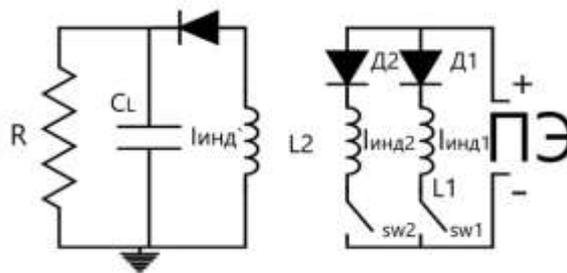


Рисунок 3.5 СИЭЗопт

Основной принцип работы СИЭЗопт основан на эффективной передаче энергии между пьезоэлектрическим элементом и нагрузкой. Когда смещение пьезоэлектрической структуры достигает максимума, соответствующее пьезоэлектрическое напряжение $V_{пэ}$ также достигает своего пика. В этот момент диод D1 проводит, а переключатель S1 замыкается, позволяя первому первичному индуктору L1 соединиться с пьезоэлектрическим элементом. После система, в течение короткого периода времени, работает как колебательный

контур, при этом ток $I_{инд1}$ и напряжение $V_{инд1}$ на первом первичном индукторе определяются как [141-145]:

$$I_{инд1} = \sqrt{\frac{C_{ПЭ}}{L_1}} V_A \sin(\omega_i t) e^{-\frac{\omega_i t}{2Q_i}} \quad (3.49)$$

$$V_{инд1} = V_A \cos(\omega_i t) e^{-\frac{\omega_i t}{2Q_i}} \quad (3.50)$$

где $\omega_i = 1/(L_{инд1} C_{ПЭ})^{0.5}$ - собственная частота колебательной системы, а $Q_i = (1/r_1)(L_{инд1} C_{ПЭ})^{0.5}$ - коэффициент качества цепи, показывающий, насколько эффективно она может накапливать и передавать энергию [144].

Напряжение вторичного индуктора связано с напряжением первичном индуктором коэффициентом трансформации (m), который выражается как:

$$V_{инд2} = -m V_{инд1} \quad (3.51)$$

Во время данного энергия, накопленная в первичном индукторе L_1 , постепенно передается в нагрузку, пока напряжение на вторичном индукторе не достигнет желаемого выходного напряжения V_{DC} при $t=t_A$. Энергия, накопленная в трансформаторе может быть извлечена и передана в нагрузку при условии $\frac{\pi}{2} < \omega_i t_M < \pi$, описывается [146,147]:

$$E_{extr} = \frac{1}{2} L_{инд1} I_A^2 = \frac{1}{2} C_{ПЭ} V_A^2 \sin^2(\omega_i t_A) e^{-\frac{\omega_i t}{2Q_i}} \quad (3.52)$$

В заключении данного этапа энергия полностью передается нагрузке и пьезоэлектрический элемент эффективно перезагружается для следующего цикла сбора энергии, в которых процесс передачи энергии берет на себя второй первичный индуктор L_2 , обеспечивая непрерывное и эффективное извлечение доступной энергии. Связь между напряжением пьезоэлектрического элемента после отбора энергии $V_{пос}$ и максимальным напряжением до отбора V_A находится следующим образом:

$$V_A = V_{пос} + \frac{2\alpha}{C_{ПЭ}} s_A \quad 3.50$$

$$V_{пос} = -\frac{2\alpha s_A \cos(\omega_i t_A) e^{-\frac{\omega_i t_A}{2Q_i}}}{C_{ПЭ} (1 + \cos(\omega_i t_A) e^{-\frac{\omega_i t_A}{2Q_i}})} \quad 3.51$$

Мощность, собранная в СИЭЗопт, как функция амплитуды перемещения, максимальна, когда пьезоэлектрическое напряжение достигает своего пика и переключатель работает эффективно. Выходная мощность для заданной амплитуды смещения s_A определяется следующим образом:

$$P_{(s)} = \frac{2\omega \alpha^2}{\pi C_{ПЭ}} \frac{\sin^2(\omega_i t_A) e^{-\frac{\omega_i t_A}{2Q_i}}}{\left(1 + \cos(\omega_i t_A) e^{-\frac{\omega_i t_A}{2Q_i}}\right)^2} s_A^2 \quad 3.52$$

В СИЭЗопт сопротивление нагрузки R и коэффициент трансформации m играют решающую роль в определении производительности системы. Высокий коэффициент трансформации позволяет использовать более широкий диапазон сопротивлений нагрузки, обеспечивая эффективную передачу энергии. Кроме того, оптимизированная конфигурация снижает потребность в большом количестве пьезоэлектрического материала, минимизируя размер и стоимость устройства сбора энергии. Использование нелинейных схем экстракции СИЭЗопт позволяет увеличить собираемую мощность по сравнению с обычными схемами СИЭЗ [145]. Теоретический прирост мощности обусловлен уменьшением падения напряжения на диодах и более эффективной передачей энергии от пьезоэлектрического элемента к нагрузке, при этом практическая реализация сталкивается с такими проблемами, как потери энергии в диодах, сопротивления в обмотках и неэффективность трансформатора. Результаты экспериментов показали высокую стабильную мощность системы СИЭЗопт, чем у стандартных систем СИЭЗ, особенно при низких значениях коэффициента электромеханической связи $k_m^2 Q_A$, что делает СИЭЗопт привлекательным решением для приложений сбора пьезоэлектрической энергии.

3.4 Методы переключения с самопитанием

Эффективная работа нелинейных технологий сбора энергии зависит от точного управления переключателями в зависимости от времени переключатель срабатывает при достижении экстремумов смещения. Для точной реализации данной задачи необходимы эффективные стратегии обнаружения пиковых

смещений и управления переключателями. Традиционные методы часто используют датчики смещения с внешним питанием и цифровые контроллеры для выполнения подобных задач, что не позволяет системе функционировать автономно. Использование внешнего источника питания для управления переключателями подрывает цель создания самодостаточных систем сбора пьезоэлектрической энергии. Для решения подобной проблемы были разработаны технологии самопитания, позволяющие активировать выключатель без использования внешнего источника энергии. Сердцем таких систем является электронный прерыватель, критически важный компонент в нелинейных цепях с самопитанием. В СКИ (синхронизированный коммутатор на индукторе) для обнаружения максимумов и минимумов в каждом цикле требуется два таких прерывателя, в то время как в СИЭЗ (синхронное извлечение электрического заряда) с их размещением коммутатора после выпрямителя требуется только один прерыватель благодаря выпрямленной природе сигнала $V_{пэ}$ [138].

Электронный выключатель состоит из трех основных элементов: детектора огибающей, компаратора и переключателя. Детектор огибающей состоит из резистора, диода и конденсатора. Конденсатор накапливает напряжение от пьезоэлектрического элемента, заряжаясь до значения чуть ниже пиковой амплитуды V_p за счет присущего диоду падения напряжения. Во время фазы которой компаратор, чаще PNP-транзистор, остается неактивным. При уменьшении $V_{пэ}$ от своего пика и выполняется условие $V_C - V_A > V_{th}$, когда компаратор активизируется то конденсатор разряжается через компаратор, вызывая замыкание переключателя [139].

Авторы [134] предложили схему с самопитанием С-СКИ (синхронизированное переключение сбора на индукторе), разработанную для минимизации потерь энергии, вызванных падением напряжения и улучшения автономного сбора энергии. Диоды в модификациях вносят значительный вклад в потери напряжения, а замена переключателей для обнаружения пиков приводит к улучшению сбора энергии. Падение напряжения на диодах становится более проблематичным в низковольтных выходах (несколько вольт),

где фазовые задержки между экстремумами и активацией переключателя также критичны. Введение Лиангом [135] комплементарных транзисторов в сочетании со второй инверсией напряжения обеспечивает более эффективную стратегию управления фазой. Вторая инверсия, происходящая в локальном экстремуме, замедляет общий процесс, данную инверсию можно смягчить, уменьшив емкость эмиттер-коллектора транзисторных переключателей, но полному устранению не подлежит. Управляющие сигналы для переключателей, таких как ВТ (транзистор с биполярным переходом) или MOSFET (полевой транзистор металл-оксид-полупроводник), должны быть точно управляемыми, поскольку всегда существует фазовый сдвиг между пиком напряжения и фактическим временем переключения возникающий из-за падения порогового напряжения диодов и ВТ.

На рисунках 3.6, 3.7 и 3.8 показаны схемы с самопитанием и электронными прерывателями для СКИ, СИЭЗ и СИЭЗопт. Рабочий цикл системы с самопитанием, такой как СИЭЗопт-с (оптимизированный СИЭЗ с самопитанием), включает три этапа, начиная с максимального напряжения. По мере того, как $V_{пэ}$ заряжает конденсатор $C_{пэ}$, накопленное напряжение остается немного ниже $V_{пэ}$ из-за порога диода. В это время активен детектор огибающей, постоянная времени которого приблизительно равна $R_{пэ}C_{пэ}$, что намного меньше периода колебаний. Часть исходящего заряда от пьезоэлектрического элемента, пропорциональная $C_{пэ}V_{m, макс}$, используется для заряда $C_{пэ}$. Огибающая детектора потребляет около 6 % от общей электростатической энергии.

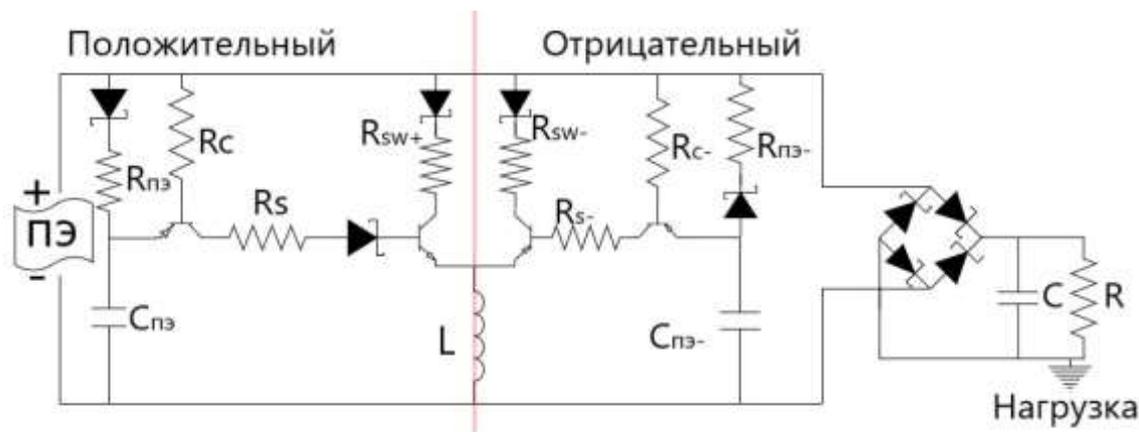


Рисунок 3.6 Электрическая схема СКИ с самопитанием

На следующем этапе, когда $V_{пэ}$ начинает падать от своего пика, диод в детекторе огибающей становится обратно смещенным, и $V_{снэ}$ остается постоянным. Этот этап заканчивается, когда $V_{пэ}$ достигает V_A , и максимальное напряжение $V_{m-макс}$ выражается как:

$$V_{m-макс} = V_A + \frac{\alpha}{C_э} s_A (1 - \cos \phi) \quad 3.53$$

где $C_э$ составляет примерно 3% от $C_{пэ}$ [123]. Заключительный этап начинается, когда срабатывает компаратор, и переключатель включается, обеспечивая напряжение на затворе равное $V_{сэ}$. Переключатель остается замкнутым до тех пор, пока V_c превышает пороговое напряжение ВЛТ. В этот момент энергия, накопленная в индукторе L , передается в нагрузку.

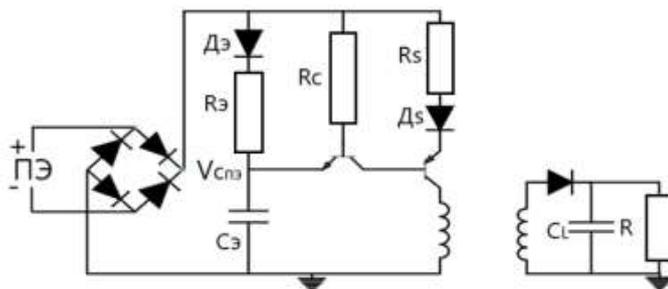


Рисунок 3.7 Электрическая схема СИЭЗ с самопитанием

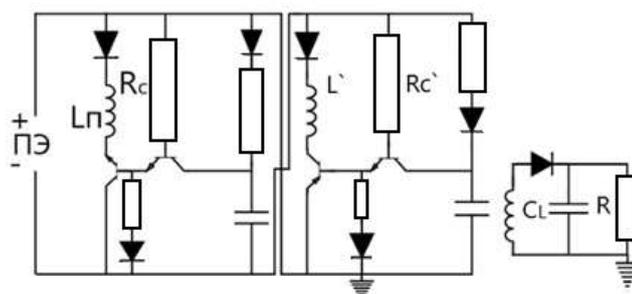


Рисунок 3.8 Электрическая схема СИЭЗопт с самопитанием

После фазы отбора энергии напряжение на пьезоэлектрическом элементе изменяется на противоположное, и заряды в конденсаторе рассеиваются через сопротивление ВЛТ. Часть имеющейся энергии теряется из-за того, что система больше не находится в разомкнутой цепи, хотя она и не поступает обратно в пьезоэлектрический элемент. Потери энергии при обнаружении оценивается по формуле:

$$E_{\Pi} = \left(2 + \frac{C_{\text{э}}}{C_{\text{ПЭ}}}\right) \frac{1}{2} C_{\text{э}} V_{m-\text{макс}}^2 \quad 3.54$$

Нелинейные методы устраняют ограничение на отбор мощности, при которых необходимо учитывать потери энергии, связанные с коэффициентом добротности Q_i колебательного контура и потреблением схемы с самопитанием. В системах СИЭЗопт с самопитанием трудно достичь фазовых сдвигов менее 30 градусов. Оптимизация возможна за счет увеличения напряжения разомкнутой цепи пьезоэлектрика, а максимальная потребляемая мощность систем СИЭЗопт может превышать 1,9 мВт. Несмотря на то, что схемы с самопитанием потребляют малую часть собранной энергии, они все равно обеспечивают чистый положительный выход энергии, при оптимальных условиях до 45% извлеченной энергии передается в нагрузку [139].

3.5 Моделирование пьезоэлектрических цепей

Энергетический контур является ключевым элементом в процессе пьезоэлектрического сбора энергии. Он включает три этапа: преобразование пьезоэлектрического сигнала (выпрямление напряжения), стабилизацию выходного сигнала (регуляцию напряжения) и оптимизацию передачи энергии (согласование импедансов). На первом этапе осуществляется выпрямление переменного напряжения, генерируемого пьезоэлектрическим материалом, в постоянное напряжение. Этот процесс направлен на повышение эффективности использования энергии, извлекаемой из механических колебаний. Наиболее распространёнными методами выпрямления являются полуволновой и полноволновой режимы. В последние годы активно внедрялись нелинейные методы, направленные на снижение потерь при переключениях и увеличение КПД преобразования механической энергии в электрическую.

Данное исследование посвящено анализу различных схем сбора пьезоэлектрической энергии посредством компьютерного моделирования. Моделируемый вход воспроизводит сигнал от морских волн. Входной сигнал имитирует колебания, вызванные морскими волнами. Исследование начинается с описания моделируемого источника напряжения, создающего данный сигнал.

Далее рассматриваются пять типов схем с кратким описанием принципа функционирования каждой из них. Эти схемы включают разнообразные электронные компоненты, влияние которых на среднюю выходную мощность также рассматривается. В качестве пьезоэлектрического элемента использована лента из поливинилиденфторида (ПВДФ), которая была подробно изучена в предыдущей главе. Компьютерное моделирование позволяет оценить реакцию каждой схемы на волновой сигнал и выявить наиболее эффективные решения.

Разработка энергоэффективных электрических схем для интеграции с пьезоэлектрическими элементами в системах сбора энергии и датчиков требует применения систематического подхода к выбору и оптимизации компонентов. В данном алгоритме представлен метод сравнительной оценки различных электрических схем, разработанных для преобразования энергии от волны в электрическую (см. рис. 3.9). Алгоритм поэтапно настраивает параметры компонентов для каждой схемы и выбирает конфигурацию с наивысшей эффективностью преобразования. Этапы выполнения алгоритма:

1. Инициализация параметров и генерация входного сигнала:
происходит с определения входного сигнала, который моделирует механические вибрации, возникающие под воздействием волн. Сигнал характеризуется определённой частотой, соответствующей реальным условиям эксплуатации.

2. Выбор типа схемы:
определяются и последовательно тестируются различные типы электрических схем среди которых стандартный полный мостовой выпрямитель (Ст-ПМВ), синхронная коммутация на индуктивности (СКИ), синхронное извлечение электрического заряда (СИЭЗ) и другие.

3. Определение диапазона значений компонентов:
для каждой схемы устанавливаются диапазоны значений основных компонентов (сопротивление (R), ёмкость (C) и индуктор (L)).

4. Оптимизация значений компонентов:

проводятся итерации по установленному диапазону значений компонентов, анализируя эффективность каждой комбинации, измеряемый по выходной мощности, полученным при заданной конфигурации и нагрузке.

5. Сравнительный анализ производительности схем:

для каждой схемы вычисляется производительность, сравниваются их промежуточные результаты для выбора оптимальной конфигурации.

6. Выбор лучшей схемы:

в конце каждой итерации сравниваются текущие результаты с предыдущими, и сохраняется схема с наибольшей эффективностью. При наличии схемы тестирования, алгоритм возвращается к выбору следующей схемы и повторяет процесс снова и снова. Максимальная эффективность сохраняется при коечном этапе тестирования всех схем.

Системный подход в сравнительной оценке схем для преобразования энергии пьезоэлектрических элементов позволяет находить оптимальные значения компонентов для каждой схемы. Результаты дают исследователям возможность выбрать схему для обеспечения максимальной эффективности преобразования энергии в конкретных условиях любых волн.

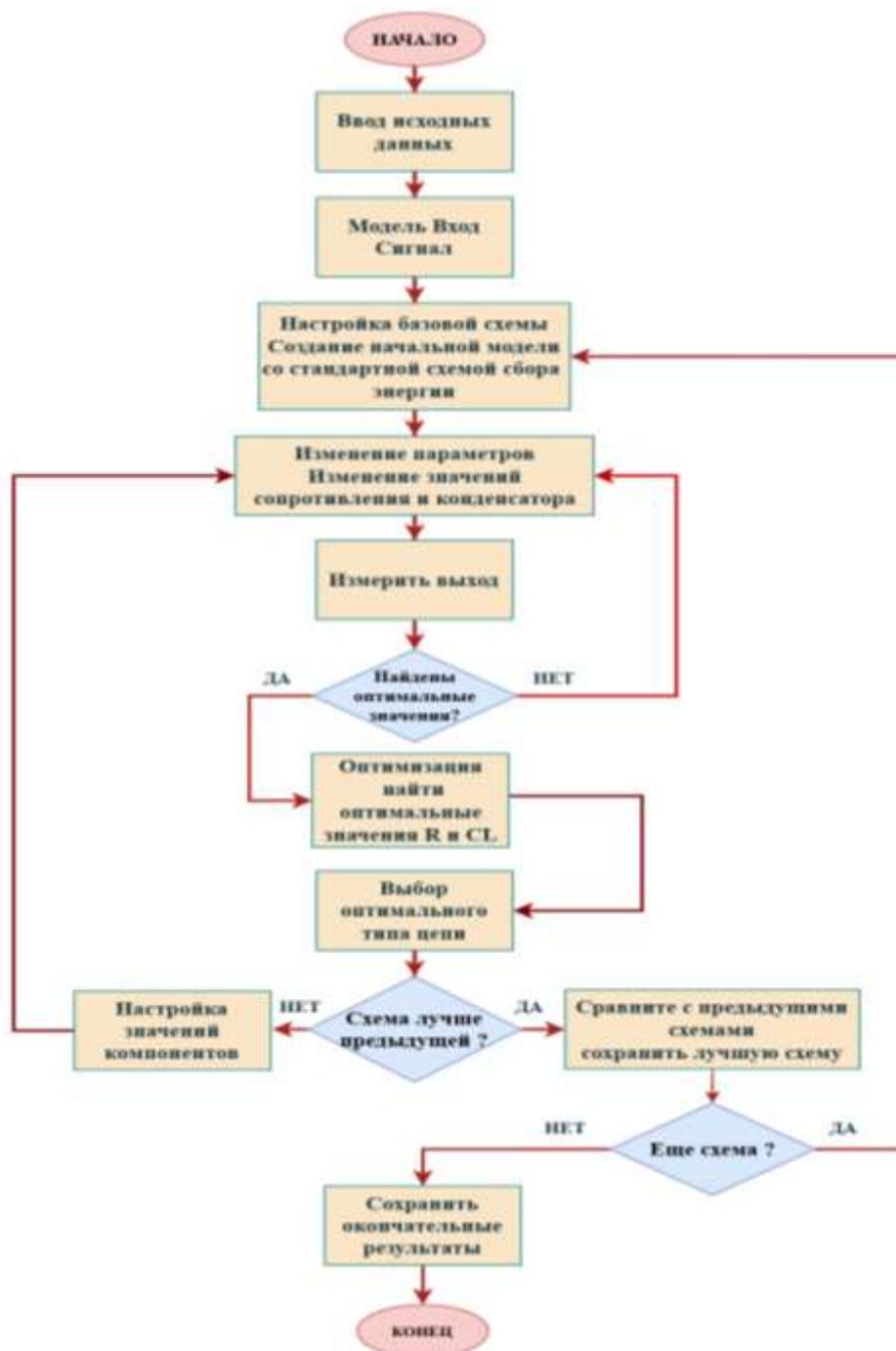


Рисунок 3.9 Алгоритм оценки мощности электрических схем для пьезоэлектрического преобразования энергии.

Исследование пьезоэлектрических схем сбора энергии часто проводится с использованием симметричных синусоидальных сигналов с частотой, повышающую резонансную частоту системы. Морские волны генерируют сигнал с частотой от 0 до 100 Гц [79]. Для моделирования данных частот был разработан источник напряжения, генерирующий аналогичные сигналы, как показано на рисунке 3.10. Сигнал формируется двумя последовательными

экспоненциальными источниками напряжения, имитирующие морские волны путем регулировки определенных параметров экспоненциальной функции – это воспроизводит различные виды волн, весьма схожих с реальными сигналами, зафиксированными ранее.

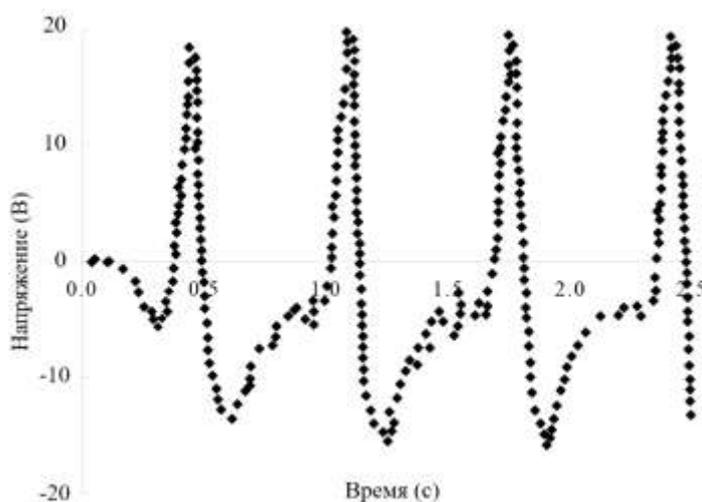


Рис. 3.10 Источник напряжения, генерирующий аналогичный сигнал

Эквивалентные электрические модели (ПЭ-ПВДФ) показаны на рисунке 3.11. Напряжение $V_{пэ}$, генерируемое волнами, подается на эти цепи, компоненты которых описаны в таблице 3.1.

Таблица 3.1 компоненты

Элемент	Тип
ПЭ	ПВДФ
диод	B140BQ-13-F
Транзистор 1 NPN	ZVN2110GTA
Транзистор 2 PNP	IRFL9110TRPBF
Индикатор ^{1,2}	TG05-2004NCRL

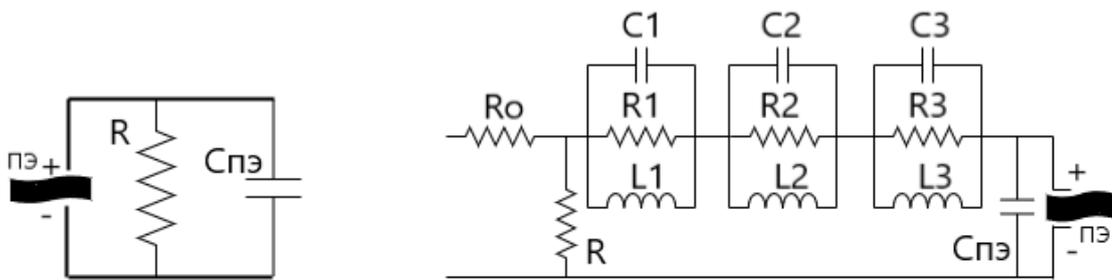


Рисунок 3.11 Схема эквивалентная электрическая ПЭ-ПВДФ

3.5.1 Цепь полного мостового выпрямителя

Полный мостовой выпрямитель — один из самых распространенных и широко используемых схем выпрямления состоящий из четырех диодов или транзисторов, обычно расположенных в конфигурации моста Витстоуна. На выходе подключены фильтрующий конденсатор (C) и нагрузочное сопротивление (R) (рис. 3.12). Конденсатор фильтра необходим для сглаживания колебаний напряжения и обеспечения стабильного постоянного тока на выходе. В данном исследовании рассматриваются два типа полных мостовых выпрямителей: первый на основе диодов, а второй — на комплементарных МОП-транзисторах (КМОП).

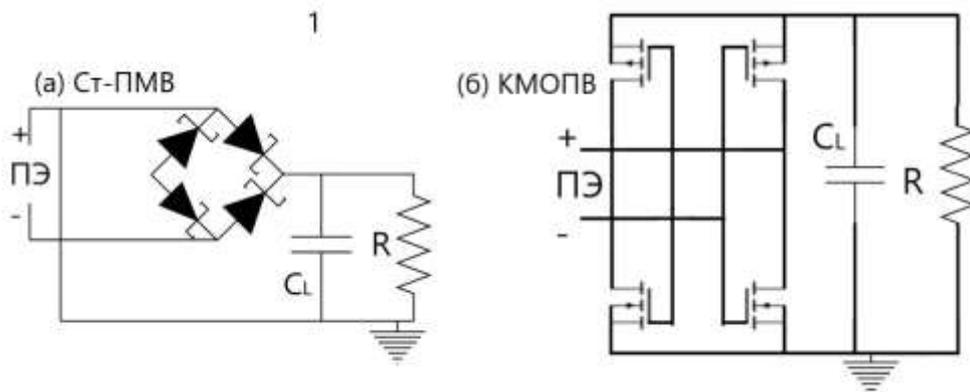


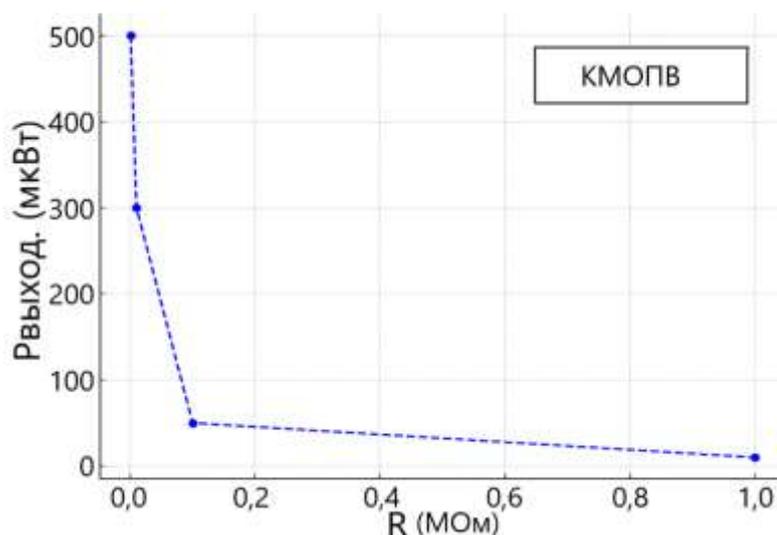
Рисунок 3.12 Электрическая схема ПМВ

Схема выпрямителя на основе диодов проста и удобна в изготовлении. Однако падение прямого напряжения на диодах может привести к значительным потерям мощности, особенно при низком входном напряжении. Прямое падение напряжения на диодах может приводить к существенным потерям мощности, особенно при низких уровнях входного напряжения. Поэтому в данном

моделировании применяются диоды Шоттки, обладающие меньшим прямым падением напряжения по сравнению с обычными кремниевыми диодами [127].

Комплементарный металл-оксид-полупроводниковый выпрямитель (КМОПВ) для выпрямления используют МОП-транзисторы вместо диодов, что производит меньшее прямое падение напряжения и снижает потери проводимости, повышая энергоэффективность. И только верный подбор МОП-транзисторов способен обеспечить эффективное выпрямление.

Эффективность работы выпрямительных схем на базе диодов и КМОПВ зависит от величины сопротивления и ёмкости нагрузки, что демонстрирует рисунок 3.13. При уменьшении сопротивления нагрузки обе схемы демонстрируют рост выходной мощности, однако стабильность выходного напряжения обеспечивается лишь при более высоких значениях сопротивления и ёмкости нагрузки. Ввиду зависимости показателей нагрузки были разработаны альтернативные нелинейные схемы сбора пьезоэлектрической энергии.



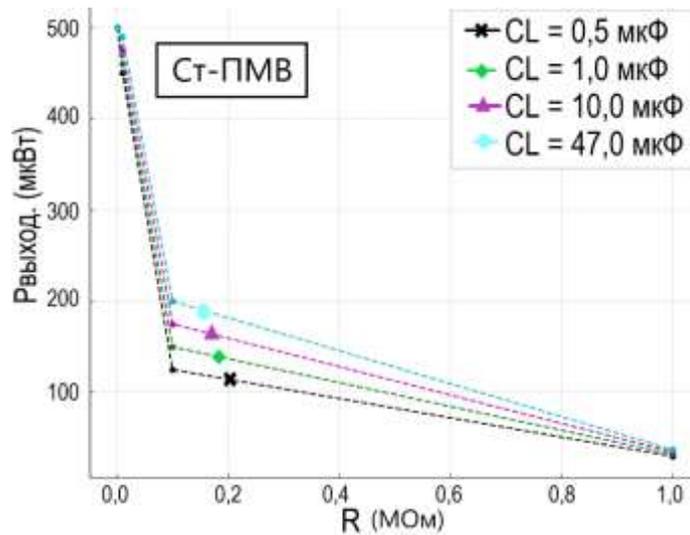


Рис. Рисунок Влияние нагрузки на цепь полного мостового выпрямителя

На рисунках 3.14 и 3.15 представлено сравнение выходных напряжений схем СТ-ПМВ и КМОПВ при различных значениях емкости фильтра. Схема КМОПВ требует большей емкости нагрузочного конденсатора для стабилизации выходного напряжения по сравнению со схемой СТ-ПМВ. Даная разница объясняется наличием паразитной емкости перехода, характерной для МОП-транзисторов, оказывающей влияние на общее время зарядки и эффективность схемы.

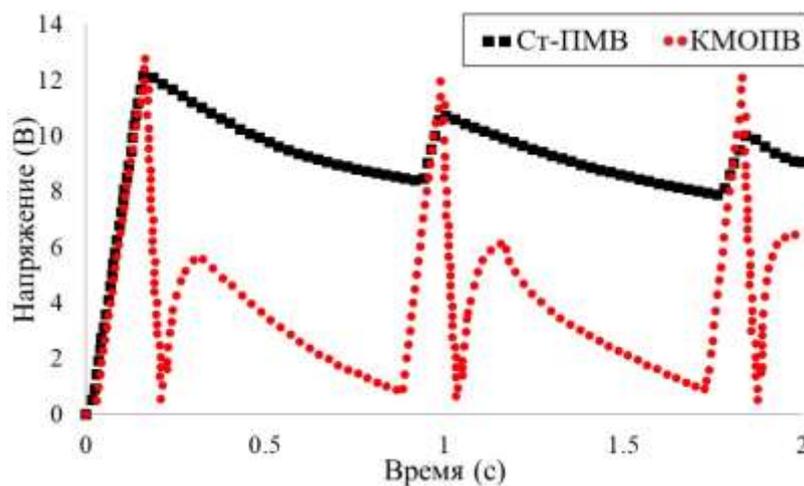


Рисунок 3.14 Выходное напряжение при 5 мкФ и 0,25 МОм

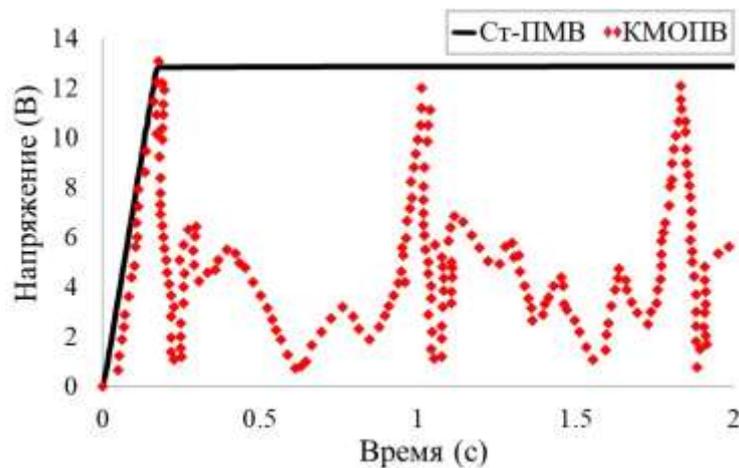


Рисунок 3.15 Выходное напряжение при 1 мФ и 0,25 МОм

Результаты моделирования показывают, что для достижения стабильного выходного напряжения необходимо использовать высокое значение C_L .

3.5.2 Цепь СИЭЗ с самопитанием (СИЭЗс)

Схема СИЭЗс — нелинейная технология по сбору пьезоэлектрической энергии отличается от самопитания (П-СКИ) тем, что для передачи энергии от пьезоэлектрического элемента к нагрузке используется трансформатор. Преимущество схемы СИЭЗ не зависит от нагрузки, что делает ее более универсальным вариантом для различных приложений (см. рис. 3.16). В данной схеме пьезоэлектрический элемент заряжается до пикового значения, а затем включается переключатель, передавая энергию на конденсатор нагрузки через L- C_L -C резонанс. Подобно П-СКИ в схеме используется детектор огибающей и компаратор для включения переключателя, но для нее требуется меньше компонентов, чем для П-СКИ.

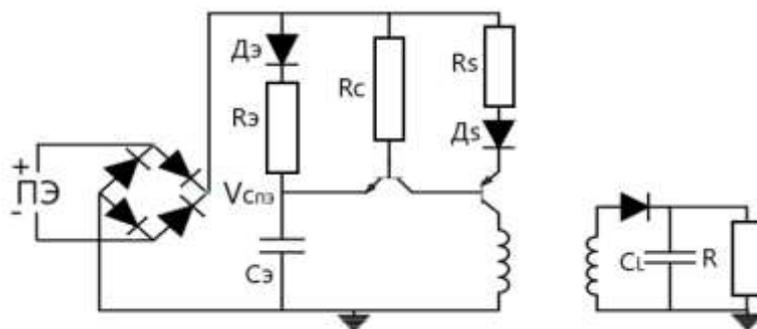


Рисунок 3.16 Принципиальная схема электрической цепи СИЭЗс.

Как следует из результатов моделирования, представленных на рисунке 3.17, средняя выходная мощность снижается с увеличением емкости обкладки, что обусловлено задержкой переключения, связанной с большими значениями конденсаторов. Оптимальная работа схемы СИЭЗс наблюдается при малых значениях сопротивления и емкости обкладки.

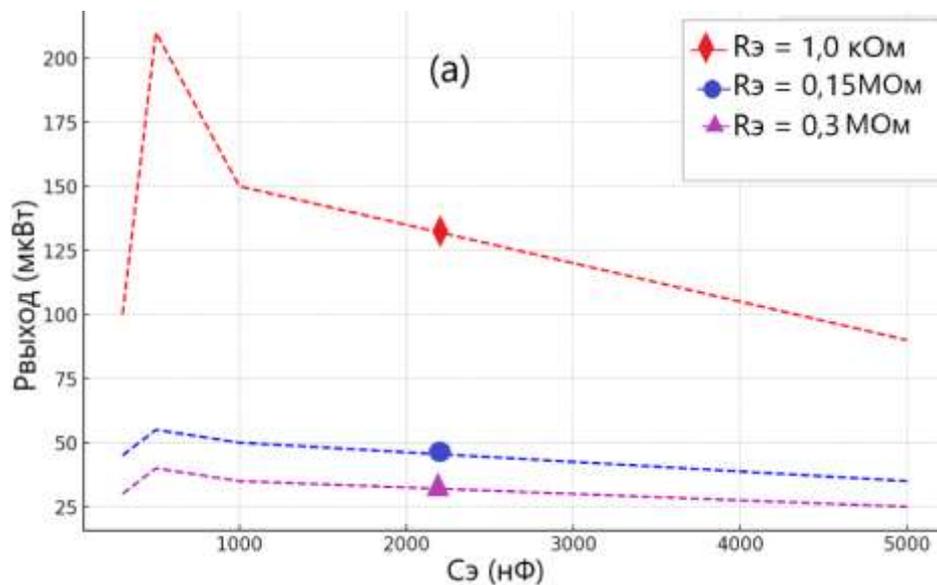


Рисунок 3.17 Выходная мощность в зависимости от различных значений $R_{э}$ при $R = 1,1 \text{ Мом}$ и $C_L = 10 \text{ мкФ}$

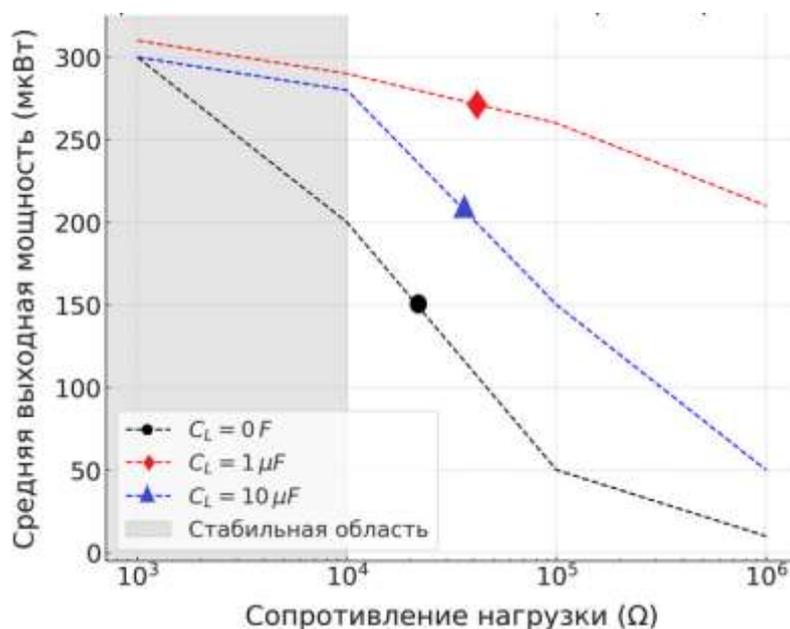


Рисунок 3.18 Выходная мощность в зависимости от различных значений (R, C_L) при $R_{э} = 0 \text{ Ом}$ и $C_{э} = 300 \text{ нФ}$

На рисунке 3.18 продемонстрировано изменение средней выходной мощности при варьировании параметров компонентов нагрузки. Схема

демонстрирует наилучшую работу при малой емкости нагрузки и сохраняет стабильность в широком диапазоне нагрузок.

3.5.3 Цепь СИЭЗопт с самопитанием (СИЭЗопт-с)

Схема СИЭЗопт-с представляет собой дальнейшее развитие схемы СИЭЗс, направленное на оптимизацию процессов выпрямления и извлечения заряда. В данной схеме применяется мультиплексирование, что позволяет уменьшить количество необходимых компонентов, повышая таким образом эффективность и снижая потери мощности (см. рисунок 3.19).

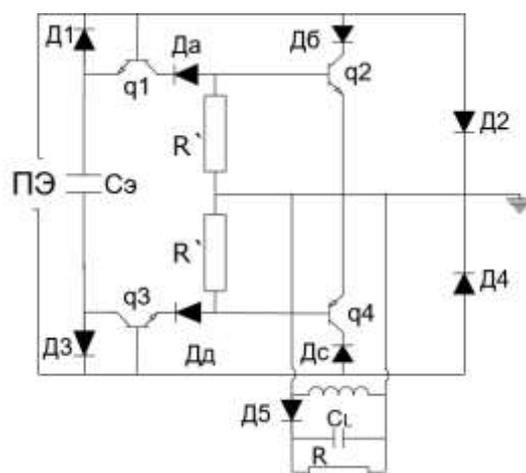


Рисунок 3.19 Принципиальная схема электрической цепи СИЭЗопт-с

Отсутствие трансформатора в схеме СИЭЗопт-с приводит к снижению индуктивных потерь при передаче энергии. Данная схема демонстрирует самый высокий уровень средней выходной мощности среди всех рассматриваемых схем. На рисунке 3.20 показано, как различные значения сопротивления и емкости обкладки влияют на выходную мощность, а на рисунке 3.21 представлены выходные характеристики для различных компонентов нагрузки. Схема способна поддерживать стабильную выходную мощность в широком диапазоне сопротивлений и емкостей нагрузки, что делает её идеальным выбором для практических применений.

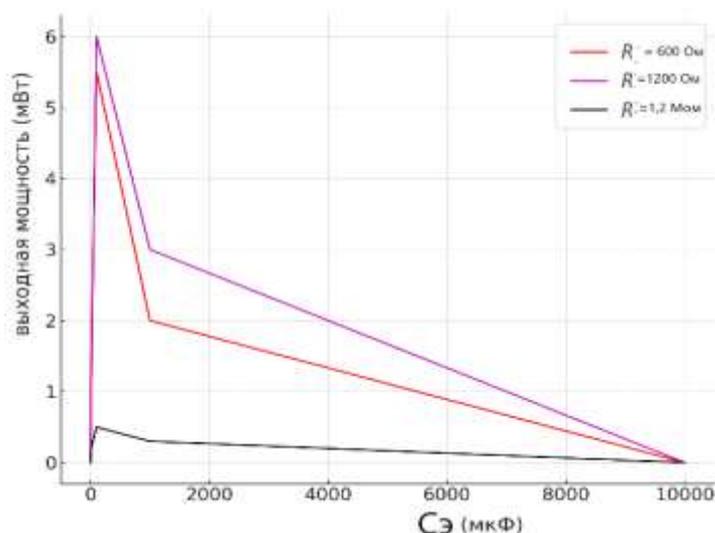


Рисунок 3.20 Выходная мощность в зависимости от различных значений (R_o , C_p) при $R = 8 \text{ M}\Omega$ и $C_L = 25 \text{ мкФ}$

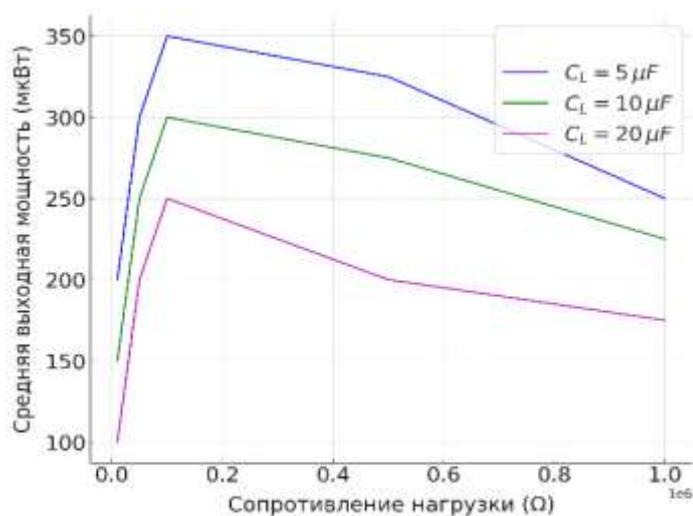


Рисунок 3.21 Выходная мощность в зависимости от различных значений (R_L , C_L)

В таблице 2.2 представлено сравнительное исследование различных схем сбора пьезоэлектрической энергии, что позволяет определить наиболее подходящую схему в зависимости от требований к мощности, напряжению и условиям нагрузки.

Таблица 2.2 Результаты сравнения различных схем применяемых в исследовании

Параметр	СИЭЗс	SECEопт-с	Ст-ПМВ
----------	-------	-----------	--------

Тип схемы	Самопитание синхронное извлечение заряда	Оптимизированное синхронное извлечение заряда с самопитанием	Стандартный полномостовой выпрямитель
Принцип работы	Переключение при пиковом напряжении	Умножение заряда на пиковом напряжении	Выпрямление с помощью схемы полного моста
Ключевые компоненты	Конденсаторы, резисторы, индуктор, компараторы	Конденсаторы, резисторы, индуктор, транзисторы	Конденсаторы, резисторы, диоды или MOSFET
Сопротивление нагрузки (R)	$< 40 \text{ к}\Omega$	$> 500 \text{ к}\Omega$	$>100 \text{ к}\Omega$
Сопротивление огибающей ($R_{\text{э}}$)	$1,0 \text{ к}\Omega$	$1200 \text{ к}\Omega$	/
Емкость нагрузки (CL)	$1 \text{ }\mu\text{Ф}$	$5 \text{ }\mu\text{Ф}$	$47 \text{ }\mu\text{Ф}$
Емкость огибающей ($C_{\text{э}}$)	300 нФ	$100 \text{ }\mu\text{Ф}$	/
Выходная мощность	$0,05 - 0,22 \text{ мВт}$	$0,15 - 0,35 \text{ мВт}$	$0,05 - 0,2 \text{ мВт}$
Влияние нагрузки	Стабильная мощность при низком CL и R	Стабильная при низком CL	Стабильная при высокие R

В третьей главе представлено всесторонне исследование моделирования различных пьезоэлектрических схем сбора энергии, включая: стандартный полный мостовой выпрямитель (СТ-ПМВ), синхронное извлечение

электрического заряда с самопитанием (СИЭЗс) и оптимизированное синхронное извлечение электрического заряда с самопитанием (СИЭЗопт-с). Имитационные модели подвергались воздействию низкочастотных сигналов, аналогичных морской волне, для оценки их эффективности в сборе энергии. Производительность каждой схемы оценивалась по выходной мощности, стабильности и зависимости от нагрузки.

Схема СТ-ПМВ с простой конструкцией оказалась сильно зависим от сопротивления нагрузки. Данная схема демонстрировала лучшие показатели при более низких сопротивлениях, однако при повышении сопротивления наблюдалось значительное снижение эффективности. Продемонстрировав независимость от сопротивления нагрузок для определенных диапазонов емкостей, обеспечивает более стабильную выходную мощность. СИЭЗопт-с имеет наилучшую общую производительность благодаря применению мультиплексирования, обеспечивающее оптимизацию извлечения энергии, более высокую выходную мощность и стабильность в сравнении с другими схемами.

3.6 Выводы

1. В результате проведенного моделирования установлено, что исследуемые схемы могут быть использованы для сбора пьезоэлектрической энергии, а схема СИЭЗопт-с обеспечивает наиболее эффективное преобразование энергии и стабильный выходной сигнал.

2. Схема СИЭЗопт-с наиболее перспективная для низкочастотных приложений, таких как морские волны, благодаря своей повышенной эффективности сбора энергии и минимальному числу компонентов.

3. Результаты моделирования показали, что нелинейные техники сбора энергии СИЭЗс и SECEопт-с значительно превосходят по эффективности традиционные схемы, такие как СТ-ПМВ.

Основные выводы заключаются в следующих аспектах:

- Эффективность: схемы СИЭЗс и СИЭЗопт-с увеличивают собираемую энергию в сравнении другими стандартными схемами (в частности

СТ-ПМВ), повышая эффективность сбора энергии от нерегулярных и динамически изменяющихся сигналов, возникающих при морских волнах.

- Генерация энергии: схема СИЭЗопт-с обеспечила наибольшую среднюю мощность, что делает ее наиболее подходящей для питания маломощных устройств.

Глава 4 Экспериментальное исследование цепей, используемых в пьезоэлектрических системах

Пьезоэлектрические элементы, встроенные в стратегически важные части буя, позволяют преобразовывать механические колебания, вызванные морскими волнами, в электрическую энергию. Четвертая глава посвящена изучению ключевых компонентов системной архитектуры, анализу характеристик схем энергоснабжения на базе пьезоэлектриков и оценке их способности стабильного питания основных узлов буя, разных систем связи и комплектаций датчиков.

Для проведения эксперимента было создано специальное оборудование, включающее пьезоэлектрический элемент ПВДФ, закрепленный на вибростенде для моделирования воздействия вибраций. Система управления реального времени dSpace применялась для записи данных от дифференциального вибromетра и акселерометра с контролем работы усилителя мощности, подававшего сигнал на электромагнитный шейкер. Замкнутый контур управления поддерживал постоянную амплитуду колебаний, обеспечивая стабильность синусоидальных воздействий на протяжении всего эксперимента. Пьезоэлектрический элемент присоединялся к схеме на входе, а на выходе подключался программируемый резистор для изменения сопротивлений в процессе испытаний, данные которых фиксировались устройством DAQ (NI 9229).



Рисунок 4.1 Принципиальная схема экспериментальной установки

Транзисторы MOSFET, диоды и индуктор образуют электронный коммутатор, компоненты которого подробно описаны в таблице 4.1.

Таблица 4.1 Компоненты электронного коммутатора

Элемент	Тип
ПЭ	ПВФД
Диод	B140BQ-13-F
Транзистор 1 NPN	ZVN2110GTA
Транзистор 2 PNP	IRFL9110TRPBF
Индикатор1,2	TG05-2004NCRL

Основная цель главы заключается в поиске оптимальных значений компонентов для увеличения эффективности генерации электрической энергии. В ходе исследования рассматривались три различные схемы для определения влияния параметров компонентов на величину выходной мощности – выбор схемы является критическим шагом для достижения максимальной производительности.

4.1 Цепь полного мостового выпрямителя

На рисунке 4.2 представлены две разновидности схем выпрямителей: (а) диодный выпрямитель СТ-ПМВ, (б) выпрямитель на основе КМОПВ. Экспериментальное сравнение выходных напряжений для СТ-ПМВ (на основе диода) и КМОПВ (на основе КМОПВ) выпрямителей представлено на рисунках

4.3 и 4.4. Полученные результаты наглядно демонстрируют фильтрующий конденсатор C_L , который играет важную роль в стабилизации выходного напряжения в обеих схемах. Увеличение емкости C_L способствует повышению стабильности выходного сигнала, несмотря на идентичную конфигурацию схем, выпрямитель СТ-ПМВ обеспечивает стабильное выходное напряжение до 12 В, тогда как у КМОПВ-системы оно составляет лишь около 4,5 В.

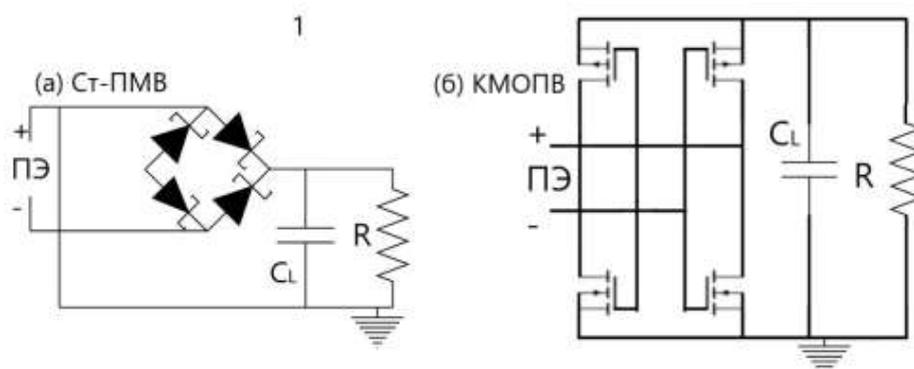


Рисунок 4.2 Принципиальная электрическая схема ПМВ

Несоответствие транзисторов емкостям в КМОПВ влияет на скорость их зарядки из-за быстрой скорости потока волновых сигналов. Для достижения их стабильного выпрямления более эффективной является схема СТ-ПМВ, на основе одного диода.

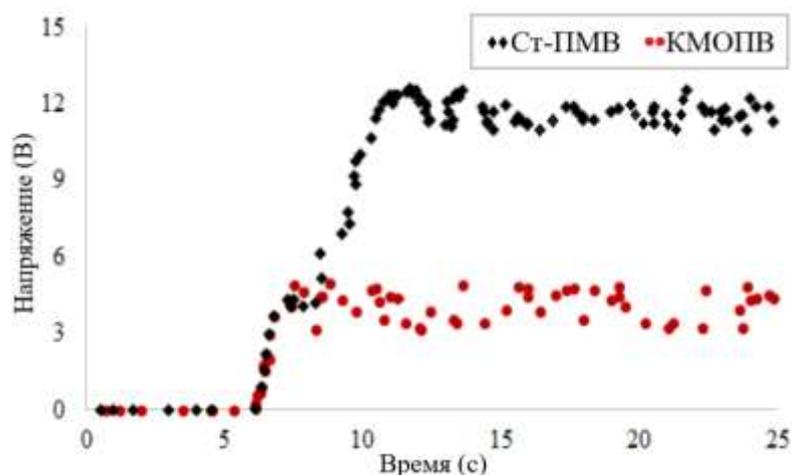


Рисунок 4.3 Выход СТ-ПМВ и КМОПВ с нагрузкой C_L 150 нФ и $R = 1,1$ МΩ

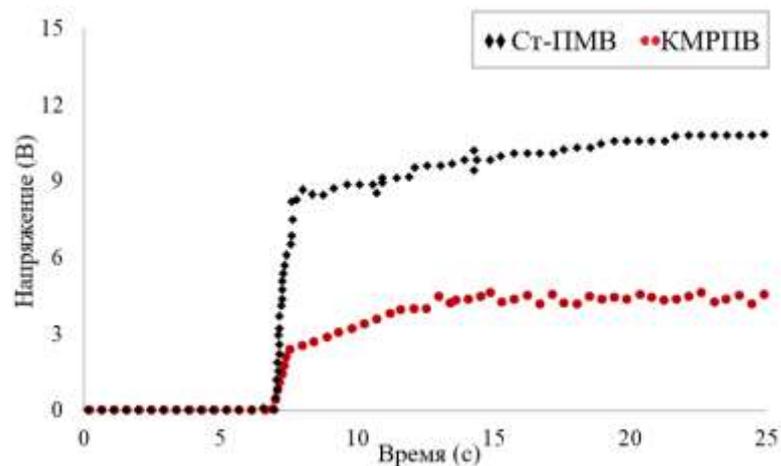


Рисунок 4.4 Выход СТ-ПМВ и КМОПВ с нагрузкой C_L 350 нФ и $R = 1,1$ МΩ

4.2 Цепь СИЭЗ с самопитанием

Принцип работы цепи синхронного извлечения электрического заряда с автономным питанием (СИЭЗс) основан на управлении зарядом и разрядом конденсаторных элементов через синхронизированные переключения. Принципиальная схема синхронного извлечения электрического заряда автономным питанием (СИЭЗс) представлена на рисунке 4.5, выходная мощность которой зависит от значений огибающих компонентов. На рисунке 4.6 показано изменение средней выходной мощности в зависимости от значений огибающих конденсаторов и резисторов. Полученные результаты подтверждают оптимальные значения для огибающей конденсатора и огибающей резистора являются $R_{э}=1$ кОм и $C_{э}=300$ нФ, совпадающие с результатами моделирования, эти же данные использованы в последующих исследованиях.

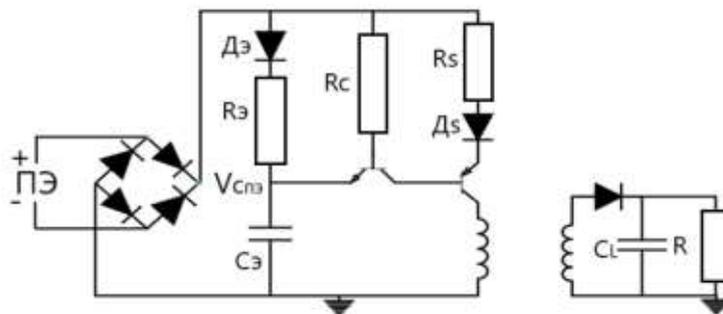


Рисунок 4.5 Принципиальная схема электрической цепи СИЭЗс

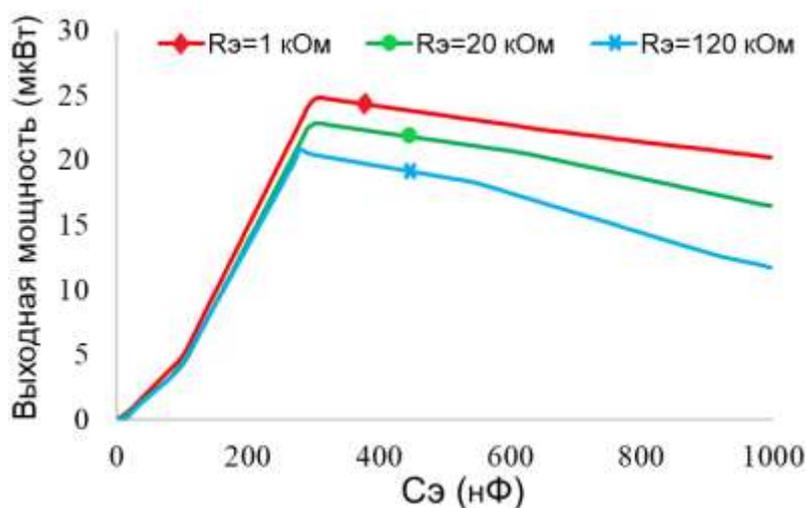


Рисунок 4.6 Изменение выходной мощности СИЭЗс, в зависимости от значений C_s и R_s

На рисунке 4.7 показана средняя выходная мощность в зависимости от сопротивления нагрузки для различных значений конденсатора нагрузки (C_L). Можно заметить, что средняя выходная мощность сильно зависит от компонентов нагрузки. При меньших значениях C_L средняя выходная мощность больше. Однако при больших значениях C_L выходная мощность становится менее стабильной.

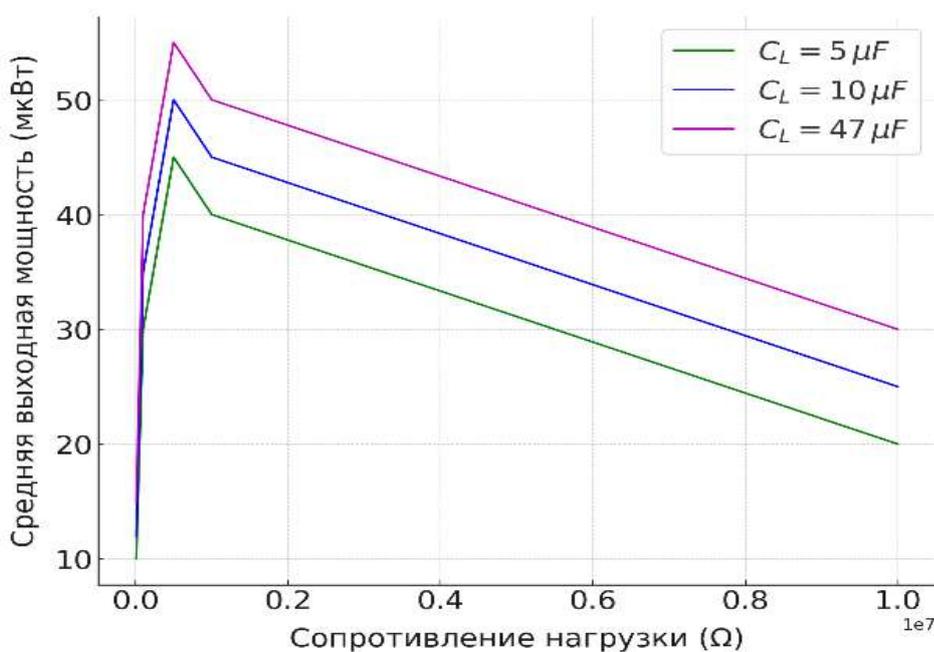


Рисунок 4.7 Изменение выходной мощности в зависимости от значений C_L и R

Экспериментальные измерения максимальной выходной мощности составляет менее 60 мкВт, что существенно отличается от данных, полученных в результате моделирования. Основная причина такого различия вероятнее связана с потерями в трансформаторе.

4.3 Цепь СИЭЗопт-с

В целях улучшения эффективности работы системы был проведен анализ модифицированной версии цепи СИЭЗ, обозначенной как СИЭЗопт-с. Принципиальная схема представлена на рисунке 4.8. Аналогично моделированию, экспериментальные результаты были получены при фиксированных значениях индуктивности нагрузки $L=20$ мГн, емкости нагрузки $C_L=20$ мкФ и сопротивления нагрузки $R=8$ МΩ. Для оптимизации выходных характеристик варьировались комбинации подтягивающих резисторов R' и огибающих конденсаторов $C_э$.

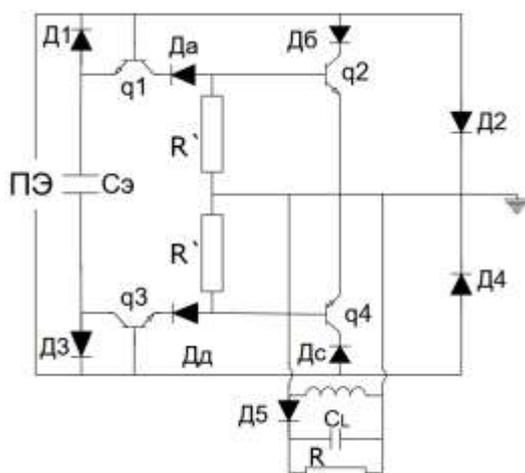


Рисунок 4.8 Принципиальная схема электрической цепи СИЭЗопт-с

Результаты эксперимента представлены на рисунке 4.9, свидетельствуют о том, что для каждого значения R' выходная мощность возрастает при увеличении уровня $C_э$, после чего начинает снижаться. Оптимальный режим работы достигается при $C_э=100$ нФ и $R'=1200$ кОм. В таком режиме обеспечивается стабильность выходной мощности, а также достаточное время для зарядки и разрядки емкостей переходных процессов транзисторов. Полученные результаты хорошо коррелируют с данными моделирования.

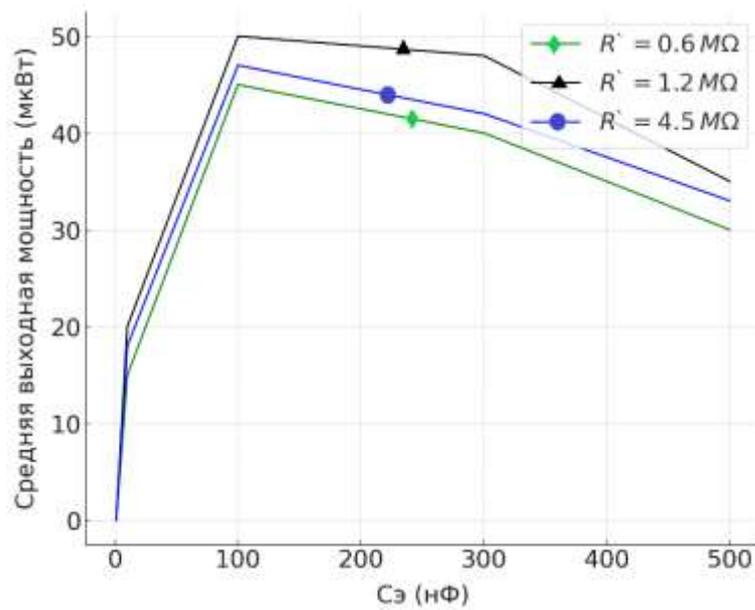


Рисунок 4.9 Изменение выходной мощности в зависимости от значений $C_{\text{э}}$ и R'

На рисунке 4.10 отображена зависимость от сопротивления нагрузки для различных значений C_{L} . Установлено, что стабильная выходная мощность наблюдается при сопротивлении нагрузки R больше $0,1 \text{ M}\Omega$, а максимальная стабильная выходная мощность 210 мкВт достигается при $C_{\text{L}}=5 \text{ мкФ}$ и $R=0,4 \text{ M}\Omega$.

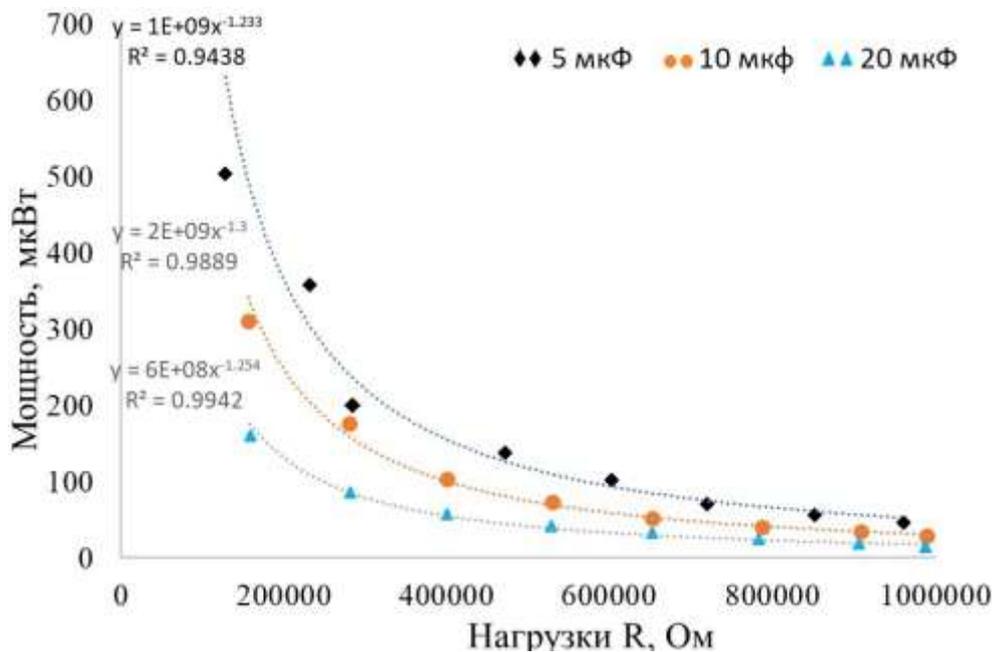


Рисунок 4.10 Изменение выходной мощности в зависимости от значений C_{L} и R

Полученные экспериментальные данные хорошо согласуются с результатами моделирования, несмотря на то, что значение $C_э$ в экспериментах оказалось меньшим, предполагалось изначально.

4.4 Исследование электрических цепей с использованием нескольких ПЭ

Было рассмотрено влияние отдельных электронных компонентов на выходную мощность одного пьезоэлектрического элемента ПЭ. Основываясь на полученных данных о компонентах и их оптимальных значениях, данный раздел посвящен исследованию влияния расположения нескольких ПЭ на выходные характеристики системы. Конфигурация соединения ПЭ играет ключевую роль в достижении увеличенной выходной мощности. Поэтому после выпрямления используется соединение нескольких элементов. Для последующего исследования рассматривались два типа соединений: параллельное и последовательное. Последующий анализ был ограничен схемой синхронного переключения на максимуме напряжения (СТ-ПМВ) и улучшенной схемой с самопитанием (СИЭЗопт), показавшие наилучшие результаты в предыдущих экспериментах. Схема синхронного переключения на минимуме напряжения (СКИ) не была включена из-за ее сложной топологии, а схема СИЭЗ была исключена из-за ее меньшей выходной мощности.

4.4.1 Цепь полного мостового выпрямителя

Схема с 5 ПЭ и СТ-ПМВ цепями (а — параллельно, б — последовательно) показана на рисунке 4.11. Каждый контур в такой схеме функционирует независимо, поэтому фаза сигналов между различными контурами не оказывает существенного влияния на суммарный выходной сигнал. При параллельном соединении увеличивается ток, тогда как напряжение остаётся неизменным.

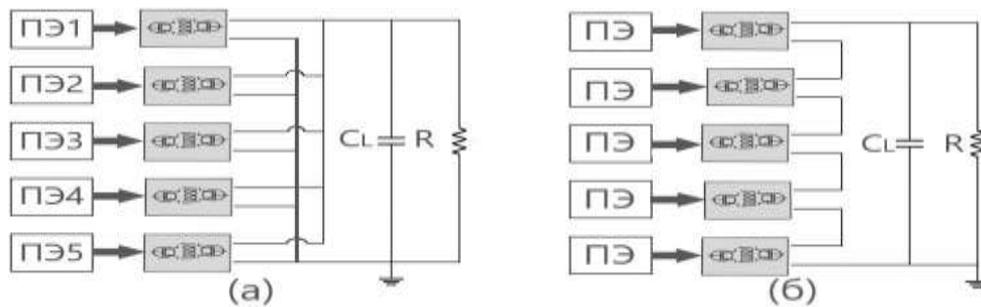


Рисунок 4.11 Принципиальная схема пяти ПЭ с цепями СТ-ПМВ
(а - Параллельная, б - Последовательная)

На рисунке 4.12 сравнивается выходная мощность для этих конфигураций. Согласно полученным результатам, последовательное соединение обеспечивает меньшую выходную мощность (0,23 мВт) по сравнению с параллельным (0,41 мВт).

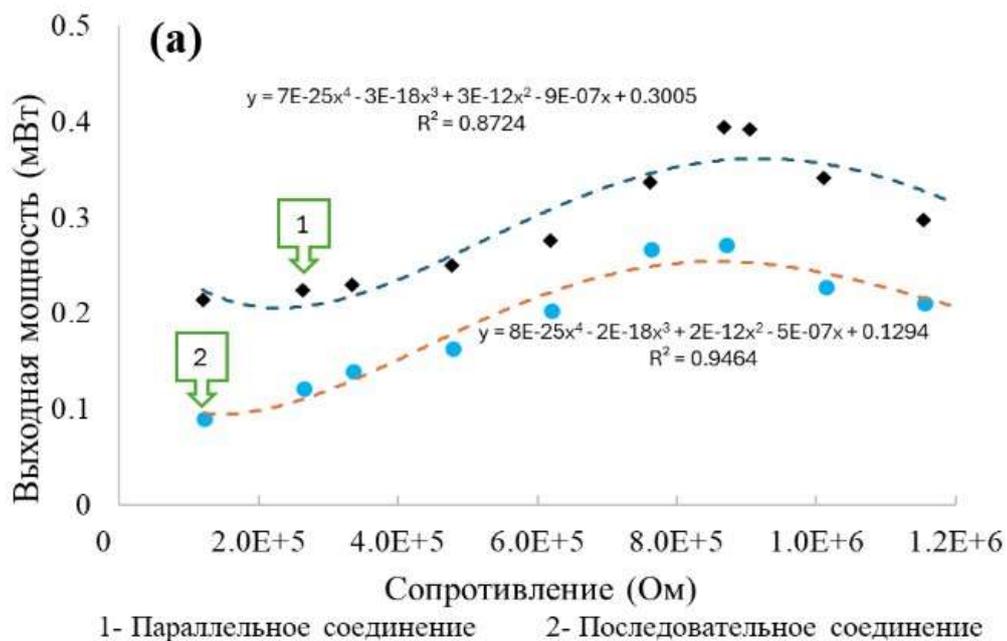


Рисунок 4.12 Изменение выходной мощности в зависимости от типа соединения цепей

Это объясняется тем, что пьезоэлектрические элементы обычно характеризуются высоким напряжением и низким током. Таким образом, параллельное соединение, увеличивающее ток, подаваемый на нагрузку, способствует повышению общей выходной мощности.

4.4.2 Цепь СИЭЗопт-с

Конфигурации для параллельного подключения пяти схем СИЭЗопт-с представлены на рисунке 4.13. Следует отметить, что индуктивные компоненты имеют паразитное сопротивление, которое приводит к потерям мощности. Использование меньшего числа индукторов позволяет снизить эти потери, повышая итоговую выходную мощность. Исходя из вышесказанного, в последующих исследованиях диссертационной работы была выбрана параллельная конфигурация с одним индуктором, помимо снижения потерь, уменьшение количества индукторов также сокращает размеры печатной платы, облегчая интеграцию системы в компактные устройства, такие как буйковые конструкции.

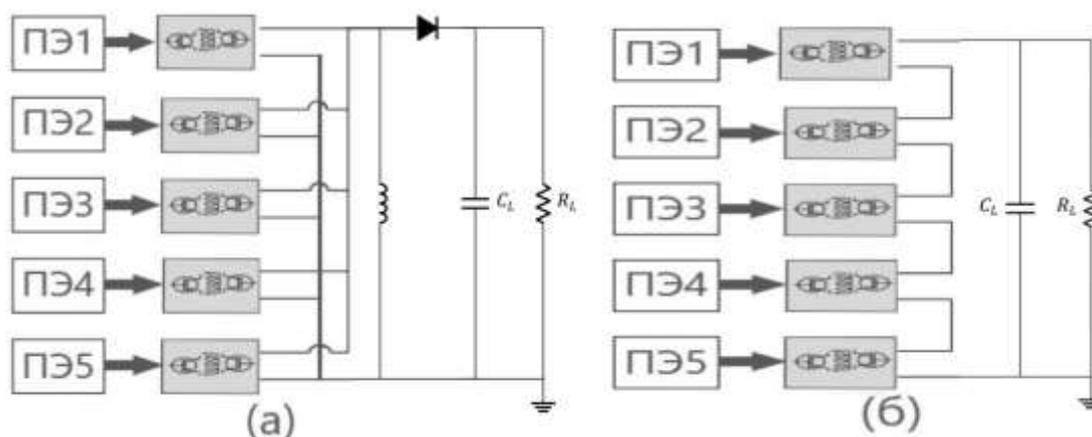


Рисунок 4.13 Принципиальная схема пяти ПЭ с цепями ЕСЕопт-с
(а - Параллельная, б - Последовательная)

Стабилизация выходной мощности возможна лишь при высоких сопротивлениях нагрузки. Результаты, приведенные на рисунке 4.14, сравнивают выходные мощности пяти ПЭ с цепями самопитания СИЭЗопт, соединенных последовательной и параллельно для двух разных емкостей нагрузкой 5 мкФ. На рисунке видно, что при малых нагрузочных сопротивлениях параллельная конфигурация демонстрирует более высокие показатели выходной мощности по сравнению с последовательной.

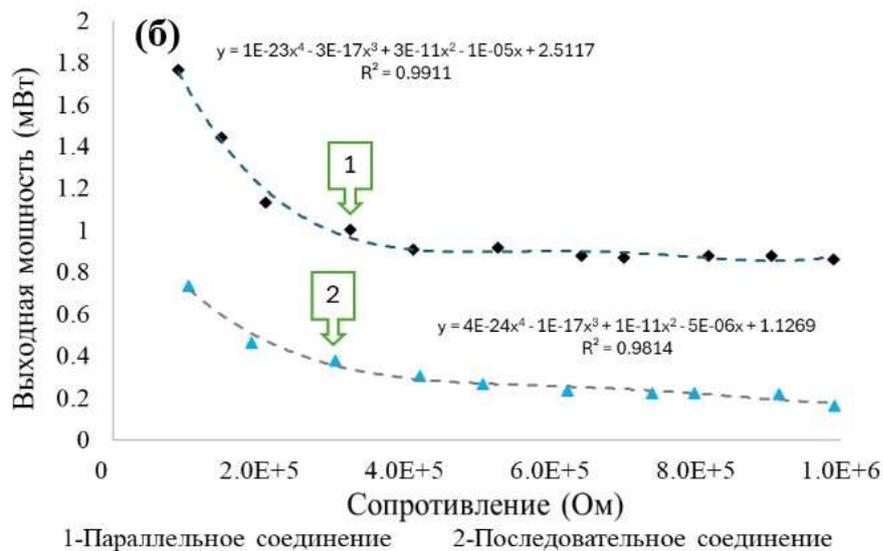


Рисунок 4.14 Изменение выходной мощности в зависимости от значений C_L и R

Однако с увеличением сопротивления нагрузки разница в выходной мощности между двумя конфигурациями уменьшается. В случае емкости нагрузки 5 мкФ максимальная стабильная выходная мощность для последовательной схемы составляет 0,4 мВт, в то время как параллельная схема достигает более высокой стабильной выходной мощности 0,95 мВт.

Разница в производительности между двумя конфигурациями объясняется характеристиками распределения тока и напряжения, присущими каждой схеме. При параллельном расположении каждая цепь работает независимо, что приводит к увеличению общего тока, поступающего в нагрузку, что приводит к увеличению выходной мощности, особенно при низких сопротивлениях. В случае с последовательным соединением ток проходит через каждую цепь последовательно, что приводит к повышению напряжения, но снижению тока из-за потерь в цепях. Следовательно, выходная мощность в последовательной конфигурации обычно ниже, особенно при низких сопротивлениях нагрузки. При более высоком сопротивлении разница в распределении тока и напряжения между двумя конфигурациями снижается, при низком уровне сопротивления параллельная конфигурация стабильно демонстрирует более высокую выходную мощность во всём диапазоне сопротивлений, что делает её предпочтительным выбором для эффективного извлечения энергии в практических приложениях.

Полученные данные свидетельствуют о том, что параллельные конфигурации оказываются наиболее подходящими для ситуаций, где требуется максимальный сбор энергии от пьезоэлектрических систем.

В заключение следует отметить, что в данной главе был проведен экспериментальный анализ различных схем оптимизации сбора энергии с пьезоэлектрических элементов на основе сигналов морских волн. Три схемы — (СТ-ПМВ), (СИЭЗс) и (СИЭЗопт-с) — прошли тестирование и оценку по определению оптимальных значений и расположения компонентов. Исследование показало, что параллельное расположение цепей неизменно превосходило последовательное последовательное по величине выходной мощности. Это объясняется тем, что при параллельном расположении ток течет непосредственно к нагрузке, не подвергаясь влиянию других цепей, в то время как при последовательном расположении ток теряется при прохождении через другие цепи, что снижает общую эффективность. Среди протестированных схем наилучшие показатели продемонстрировали СТ-ПМВ и СИЭЗопт-с, а параллельные конфигурации обеспечили более высокую выходную мощность и стабильность работы. В результате сделан вывод о эффективности параллельных схем для повышения эффективности сбора энергии от пьезоэлектрических элементов в энергетических системах.

4.5 Структурная схема разработанной системы

Предлагаемая система по сбор энергии с буя, предназначена для интеграции датчиков и устройств сбора энергии, при которой основной акцент сделан на сборе энергии от морских волн посредством пьезоэлектрических элементов. Архитектура системы, представленная на рисунках 4.15 и 4.16 иллюстрирует поток энергии от пьезоэлектрического элемента к остальным компонентам и подсистемам буя. Механическая энергия, получаемая от механических колебаний морских волн, преобразуется в электрическую, которая затем регулируется системой управления напряжением для обеспечения корректной работы буя.

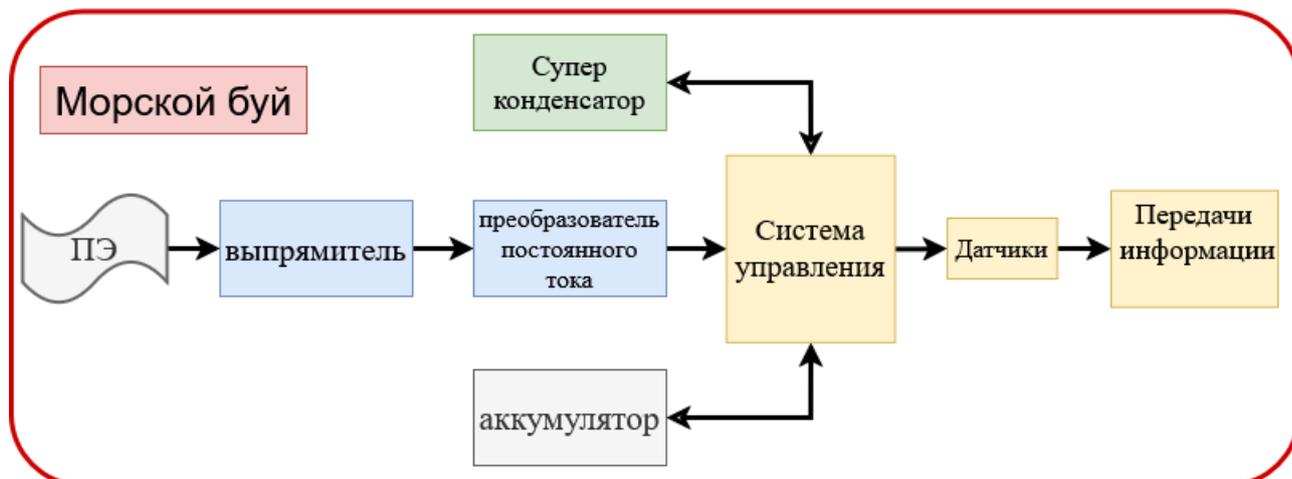


Рисунок 4.15 Схема предлагаемой системы

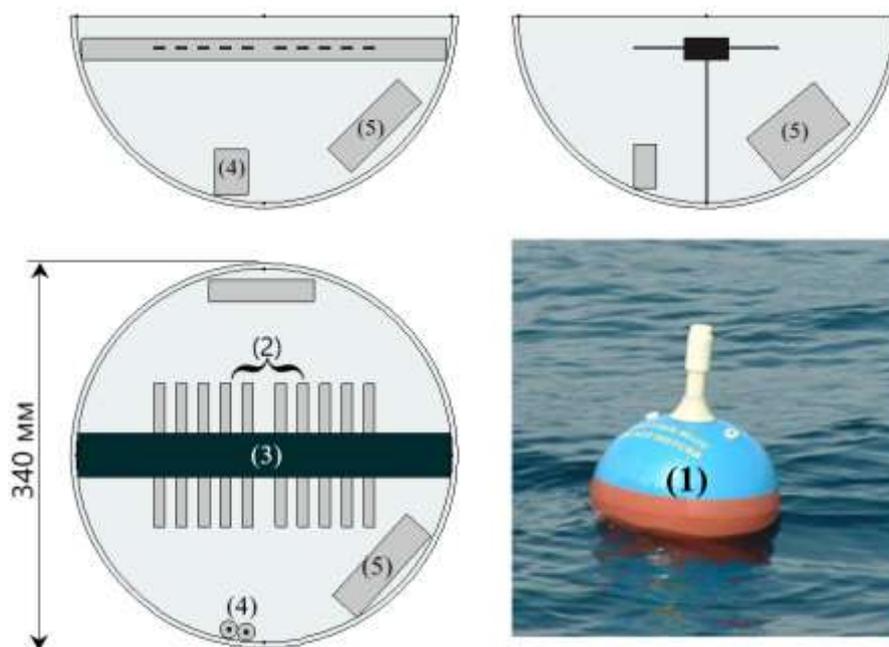


Рисунок 4.16 Схема буя на ПЭС основе

(1) Морской буй (Сферическая форма, диаметр = 340 мм), (2) Пьезоэлементы (ПВДФ), (3) Кабельный лоток, (4) Аккумулятор, (5) электрические компоненты

Вырабатываемая ПЭ энергия по своей природе переменчива из-за колебаний морских волн. В связи с этим, для эффективного накопления, хранения и последующего использования генерируемой энергии электронными

компонентами буя необходима схема стабилизации напряжения. По данной причине для стабилизации выходного напряжения в системе используется DC/DC преобразователь типа buck-boost, например LTC-3331, способный функционировать в широком диапазоне входных напряжений и обеспечивающий стабильное питание для систем буя, включая модули связи, датчики и управляющие схемы. В автономных системах энергоснабжения, таких как буй, использующий вибрационную энергию от морских волн, эффективное управление источников энергии является критически важным аспектом для бесперебойной работы датчиков и прочих компонентов

В представленной работе предлагается алгоритм перераспределения энергии между пьезоэлементами, суперконденсатором и аккумулятором с целью оптимизации их работы и минимизации потерь (рис. 4.17). Разработанный алгоритм обеспечивает непрерывность процесса сбора энергии и возможность хранения избыточной энергии в суперконденсаторе и аккумуляторе, в периоды повышенного уровня волновой активности. В условиях недостатка волновой энергии накопленные ресурсы используются для поддержания питания буя, гарантируя его непрерывную эксплуатацию.

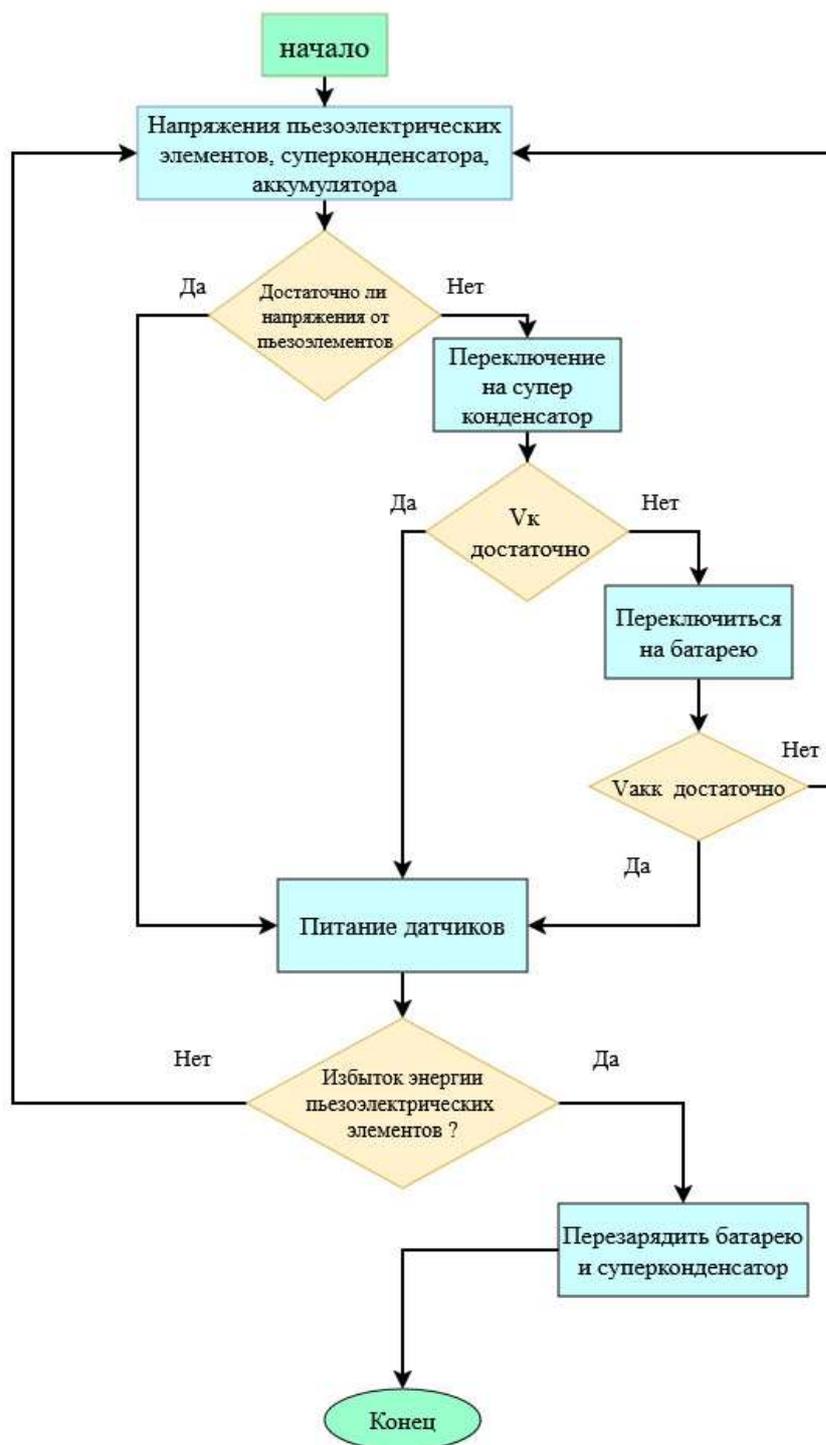


Рисунок 4.17 Предлагаемый алгоритм управления системой перераспределения энергии в устройстве с пьезоэлектрическими элементами

Система включает следующие основные компоненты:

1. **Пьезоэлектрические элементы** — основной источник энергии, преобразующий механические вибрации в электрический ток.

2. **Суперконденсатор** — устройство для временного хранения энергии, обеспечивающее высокую скорость зарядки/разрядки.
3. **Аккумулятор** — долговременный источник питания для обеспечения стабильной работы системы при низком уровне энергии от других источников.
4. **Микроконтроллер** — центральный элемент управления, отвечающий за перераспределение энергии между источниками.

Алгоритм управления системой включает следующие этапы:

1. **Сбор данных о состоянии источников энергии**

- Измерение напряжения на пьезоэлектрических элементах ($V_{пэ}$).
- Измерение напряжения на суперконденсаторе ($V_{к}$).
- Измерение напряжения на аккумуляторе ($V_{акк}$).

2. **Проверка наличия достаточной энергии от пьезоэлектрических элементов**

- $V_{пэ} > V_{мин}$ – при минимальном напряжении питания датчиков энергия направляется на питание датчиков, при избытке энергия используется для зарядки суперконденсатора или аккумулятора.

3. **Зарядка суперконденсатора**

- При максимальном напряжении суперконденсатора $V_{к} < V_{к_макс}$ осуществляется его зарядка.
- В противном случае энергия перенаправляется на аккумулятор.

4. **Зарядка аккумулятора**

- $V_{акк} < V_{акк_макс}$ – при максимальном напряжении аккумулятора энергия направляется на его зарядку.
- При достижении максимального заряда аккумулятора избыточная энергия используется для прямого питания датчиков или рассеивания через нагрузку.

5. **Питание датчиков**

- $V_{пэ} < V_{мин}$ – когда энергия от пьезоэлементов недостаточна, система переключается на суперконденсатор.

- $V_k < V_{\text{мин}}$ – когда напряжения на суперконденсаторе недостаточно, активируется питание от аккумулятора.

6. Защита от перезаряда

- При достижении $V_k = V_{k_макс}$ или $V_{пэ} = V_{пэ_макс}$ зарядка соответствующего компонента прекращается.

Предложенный алгоритм управления энергией в системе с пьезоэлектрическими элементами и несколькими источниками хранения обеспечивает:

- Оптимальное использование доступной энергии.
- Увеличение срока службы компонентов.
- Стабильное питание датчиков от основного источника, при переменных уровнях энергии.
- Эффективное перераспределение энергии может увеличить время автономной работы системы на 50% по сравнению с системами без алгоритма управления.
- Использование суперконденсатора в качестве буфера сокращает циклы зарядки/разрядки аккумулятора, увеличивая срок его службы.

Компания «Марлин Юг», специализирующаяся на производстве дрейфующих буев, использует аккумуляторные батареи ёмкостью 100 А·ч в качестве основного источника энергии для обеспечения автономной работы своих устройств. Номинальное энергопотребление буя составляет 10 мА при напряжении 10 В, что обеспечивает его автономную работу в течение не менее одного года.

Для удовлетворения повышенных требований к мощности, возникающих при передаче данных, в систему электропитания дополнительно интегрирован суперконденсатор, отличающийся более высоким уровнем энергопотребления по сравнению с остальными компонентами системы.

Проведён анализ эффективности пьезоэлектрических систем, предназначенных для энергоснабжения автономных устройств, функционирующих в условиях дрейфовых технологий. Рассмотрены два сценария генерации энергии:

1. Генерация энергии пьезоэлектрической системой (ПЭС) составляет 1,5 Вт·ч.

2. Генерация энергии ПЭС увеличивается до 5,6 Вт·ч при использовании пяти пьезоэлектрических преобразователей.

На рисунке 4.15 представлены основные компоненты предлагаемой системы, включая пьезоэлектрический генератор, блок управления, аккумулятор, суперконденсатор и устройства потребления энергии. Общее ежедневное потребление энергии рассчитывается следующим образом:

$$E_{\text{потреб}} = 10 \text{ мА} \times 10 \text{ В} \times 24 = 2,4 \text{ Вт}\cdot\text{ч}$$

Модуль передачи данных: Энергия на одну передачу составляет:

$$E_{\text{передачи данных}} = 2 \text{ А} \times 10 \text{ В} \times 0,5 \text{ сек} = 10 \text{ Дж} = 0,00278 \text{ Вт}\cdot\text{ч}$$

Предполагается одна передача в день. Энергия на передачу подается исключительно от суперконденсатора, а остальные устройства питаются от аккумулятора.

Указанные сценарии были смоделированы в среде MATLAB (см. Приложение В). Как видно из рисунка 4.18, при выходной энергии 5,6 Вт·ч напряжение на суперконденсаторе достигает 10 В за относительно короткий промежуток времени (11,6 секунд). Однако при уменьшении выходной энергии до 1,5 Вт·ч время, необходимое для накопления напряжения в том же диапазоне (до 10 В), значительно увеличивается и составляет 44,6 секунды.

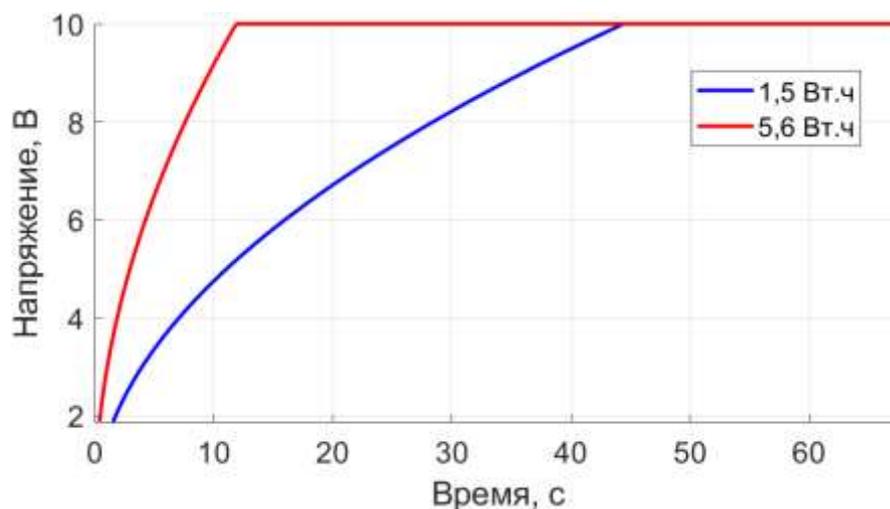


Рисунок 4.18 Время зарядки суперконденсатора при различной выходной энергии

На рисунке 4.19 представлена зависимость времени зарядки аккумулятора от уровня зарядной энергии. Аккумулятор характеризуется существенно более продолжительным временем зарядки по сравнению с суперконденсатором, что обусловлено его значительно большей энергоемкостью. При энергии зарядки 5,6 Вт·ч длительность полного цикла зарядки составляет приблизительно 2,8 часа, тогда как при снижении энергии до 1,5 Вт·ч время зарядки увеличивается до 10,6 часов..

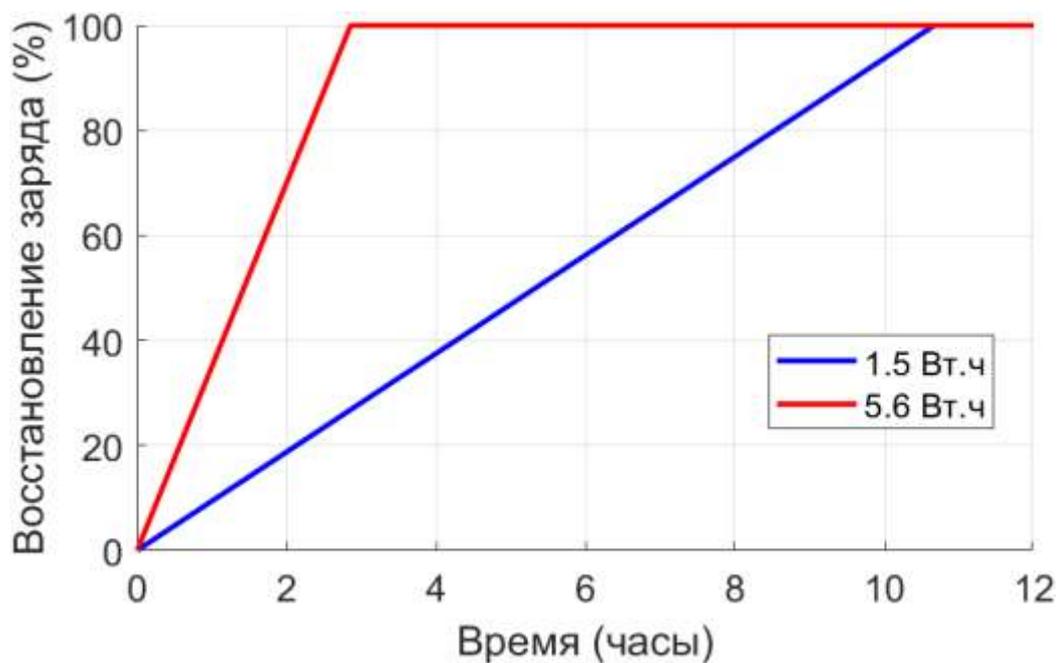


Рисунок 4.19 Зависимость времени зарядки аккумулятора от величины выходной энергии

Одним из ключевых аспектов проектирования автономных систем, таких как дрейфующие буи, является оптимизация использования энергии. Проанализированы причины и эффективность замены аккумулятора на меньшую емкость (с 100 А·ч до 20 А·ч) в системе питания дрейфующего буя. Учтено влияние пьезоэлектрического генератора и суперконденсатора на энергоэффективность системы. Современные компоненты, такие как микроконтроллер MSP430FR2433 и температурный датчик TMP102, характеризуются сверхнизким энергопотреблением, что снижает общее потребление энергии системой. Использование суперконденсатора для управления пиковыми нагрузками передатчика ARGOS позволяет исключить

необходимость использования аккумулятора для этих целей. Также использование пьезоэлектрических преобразователей значительно снижает зависимость системы от аккумулятора. Аккумулятор характеризуется значительно более длительным временем зарядки по сравнению с суперконденсатором, что обусловлено его существенно большей энергоёмкостью. При энергии зарядки 5,6 Вт·ч полное время зарядки составляет приблизительно 216,8 ч для аккумулятора ёмкостью 100 А·ч и 43,5 ч для аккумулятора ёмкостью 20 А·ч. При снижении энергии зарядки до 1,5 Вт·ч время зарядки увеличивается до 800 ч для аккумулятора на 100 А·ч и до 161,7 ч для аккумулятора на 20 А·ч, как показано на рисунке 4.20. Время полной зарядки устройства от 0% до 100% в значительной степени определяется двумя ключевыми факторами: ёмкостью накопителя энергии и доступной мощностью зарядного устройства. Согласно полученным данным, суперконденсатор характеризуется значительно более коротким временем зарядки (от нескольких минут до часа), тогда как аккумуляторная батарея требует существенно больше времени для полной зарядки (от нескольких часов до нескольких суток).

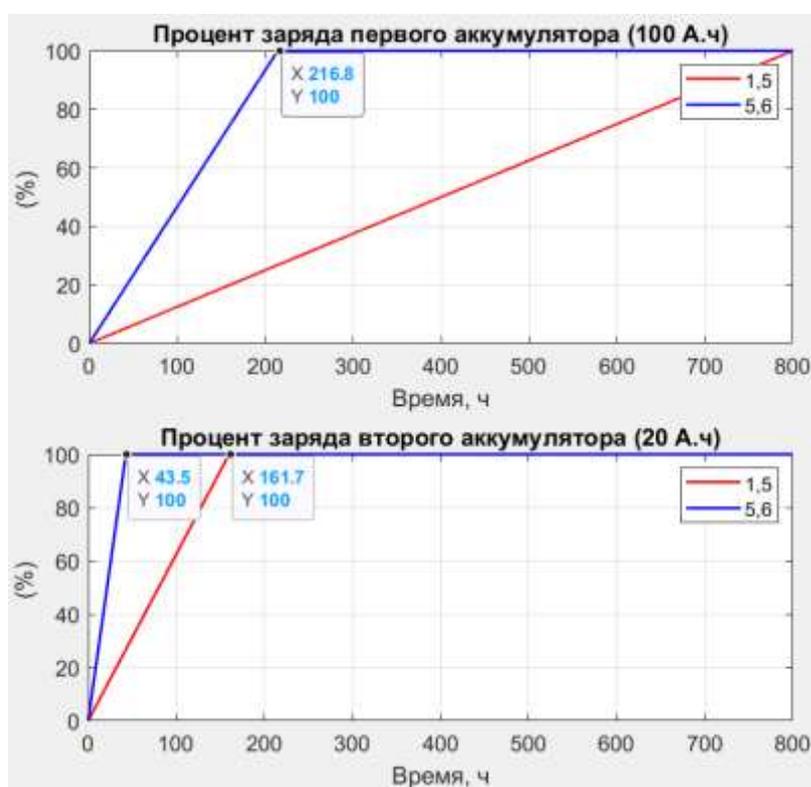


Рисунок 4.20 Зависимость времени полной зарядки аккумулятора (от 0% до 100%) от величины выходной энергии

Замена аккумулятора на меньшую ёмкость (со 100 А·ч до 20 А·ч) является успешным и эффективным решением за счёт следующих факторов:

- Сравнение сроков службы аккумуляторов и Автономность системы::

Аккумулятор (100 А·ч): $T_{\text{срок служб}} = 1000 \text{ Вт}\cdot\text{ч} / 2,4 \text{ Вт}\cdot\text{ч} = 416,6$ дней.

Новый аккумулятор (20 А·ч): $T_{\text{срок служб}} = 200 \text{ Вт}\cdot\text{ч} / 2,4 \text{ Вт}\cdot\text{ч} = 83,3$ дней.

Интеграция пьезоэлектрического генератора и суперконденсатора, позволяющих компенсировать сокращение ёмкости аккумулятора за счёт эффективного накопления и использования энергии. При максимальной выработке энергии (5,6 Вт·ч) система становится полностью автономной независимо от емкости аккумулятора.

- Экономическая и экологическая эффективность: Замена аккумулятора на меньшую емкость снижает затраты на производство и транспортировку системы. Меньший аккумулятор требует меньше ресурсов для изготовления, что положительно влияет на экологию.

- Гибкость системы: Новый аккумулятор (20 А·ч) достаточно легкий и компактный, что упрощает установку и обслуживание буя. При использовании пьезоэлектрического генератора система остается автономной даже с аккумулятором меньшей емкости.

- Увеличение срока службы аккумулятора: Использование суперконденсатора для управления пиковыми нагрузками снижает стресс на аккумулятор, увеличивая его срок службы.

- Оптимизация затрат: Замена аккумулятора на меньшую емкость снижает стоимость системы без ущерба для ее функциональности.

Анализ показывает, что обеспечение достаточного уровня генерируемой мощности является критически важным условием для минимизации времени простоя системы и поддержания непрерывной работы маломощных автономных устройств, таких как дрейфующие буи. Предложенная пьезоэлектрическая система с комбинированным использованием суперконденсатора и аккумуляторной батареи демонстрирует высокую степень автономности благодаря четко определенной стратегии распределения энергии и наличию

резервной системы накопления. Таким образом, аккумулятор на 20 А·ч способен обеспечить до 83 суток автономной работы без подзарядки, что полностью удовлетворяет требованиям надежной и непрерывной работы при наличии ежедневной генерации энергии. Замена аккумулятора снижает массу и габариты буя, уменьшает затраты на систему и увеличивает ее энергоэффективность и автономность.

4.5.1 Оценка цепей ПЭ

В данном разделе исследуются характеристики различных схем сбора энергии, интегрируемых в систему, предназначенную для питания буя за счет энергии, извлекаемой из морских волн с использованием пьезоэлектрических элементов, в частности поливинилиденфторида (ПВДФ). Учитывая динамичный и непредсказуемый характер движения волн, выбор схемы сбора энергии имеет решающее значение для обеспечения эффективного преобразования и регулирования энергии, улавливаемой элементом ПВДФ, для непрерывной работы буя. Цель данного блока исследований состояла в оценке эффективности различных схем по оптимизации сбора, хранения и использования энергии для питания основных компонентов буя, таких как устройства связи и датчики мониторинга. Электроэнергия, преобразуемая из волновой в электрическую с помощью пьезоэлектрических элементов, требует соответствующей обработки для поддержания стабильности и надежности всей системы. В данном блоке исследований рассматриваются различные конфигурации схем, включающие выпрямительные блоки, регуляторы напряжения и системы управления энергией, с целью определения оптимальной конструкции для применения в бую.

Первоначально энергия, получаемая от элемента ПВДФ, представляет собой переменный ток (АС) из-за колебательных свойств волновых движений, для использования которой в электронных системах буя необходимо преобразовать в постоянный ток (DC). В четвертой главе тестируются следующие типы выпрямительных схем на предмет их способности оптимизировать процесс преобразования переменного тока:

1. Стандартный полномостовой выпрямитель (СТ-ПМВ):

базовая конструкция выпрямителя преобразующая переменный ток в постоянный, позволяет накапливать энергию в конденсаторе или батарее. Несмотря на простоту и эффективность, его производительность в условиях динамических волн переменчива, поскольку подвергается потерям энергии в процессе преобразования.

2. Оптимизированная синхронная схема извлечения электрического заряда (СИЭЗопт-с): усовершенствованная версия схемы СИЭЗ с самопитанием обеспечивает более высокую эффективность благодаря более совершенному механизму переключения, который обеспечивает минимальное рассеивание энергии в процессе преобразования. Предлагаемая конфигурация обеспечивает превосходную производительность при различной интенсивности волн. Для каждого компонента схемы выбирались следующие параметры – $R' = 1200$ кОм, $Cз = 100$ нФ.

Энергия, получаемая от волн, сначала преобразуется в постоянный ток, после чего либо направляется непосредственно к системам морского буя, либо аккумулируется в батарее. Регулирование выходного напряжения осуществляется посредством повышающего DC/DC-преобразователя, что позволяет поддерживать стабильное питание буя вне зависимости от уровня волновой активности. Избыточная энергия, генерируемая в периоды интенсивных волн, запасается в аккумуляторе и расходуется в моменты снижения волновой активности, поддерживая непрерывную работу устройства.

Система управления энергопотреблением включает в себя механизмы распределения энергии, направленные на обеспечение баланса между её накоплением и использованием, что гарантирует работоспособность буя даже в продолжительный период слабых волн. Таким образом, данная система способствует оптимизации функционирования морского буя за счет эффективного накопления и рационального потребления энергии.

В результате проведенных исследований было установлено, что схема синхронного извлечения электрического заряда (СИЭЗопт-с) обладает наибольшей эффективностью в процессе генерации электроэнергии из волн с

помощью элемента ПВДФ. Высокая способность данной схемы адаптироваться к изменениям условий волновой активности и обеспечивать стабильное электропитание делает её предпочтительным решением для применения в системах морских буёв. Особенности конструкции СИЭЗопт-с обеспечивают надёжное функционирование в сложных условиях морской среды, где основным источником энергии являются волны.

Генерируемая энергия используется как для обеспечения работы самого буя, так и для подзарядки резервной батареи. Система мониторинга параметров включает контроль ключевых показателей, таких как напряжение на выходе ПВДФ-элемента, стабилизированное напряжение после DC/DC-преобразования и состояние заряда аккумулятора, что позволяет отслеживать и корректировать работу трёх различных типов электрических цепей.

4.5.2 Стандартный полномостовой выпрямитель (СТ-ПМВ)

На рисунках 4.21–4.23 представлены данные о работе системы, включающей в себя пьезоэлектрический элемент, выпрямитель и систему стабилизации напряжения. Энергия, поступающая от волн, преобразуется в электрический сигнал, который затем распределяется между системой питания буя и аккумулятором.

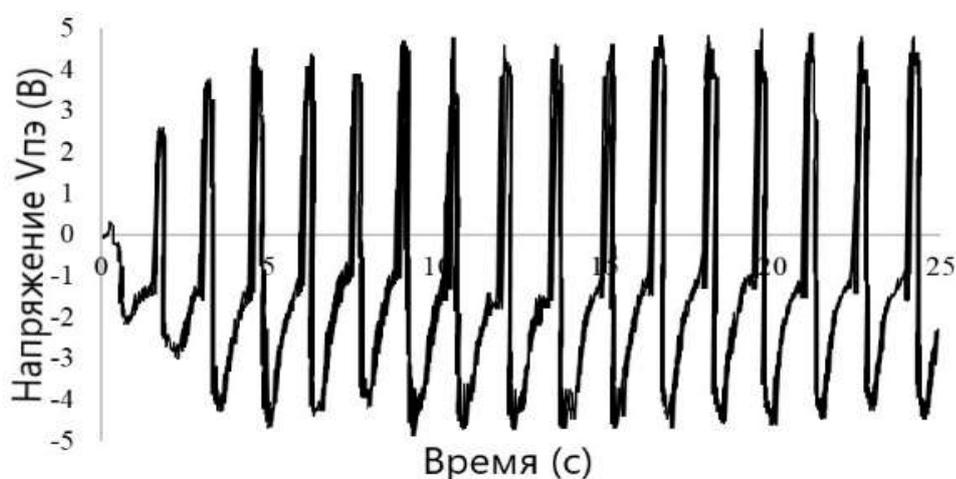


Рисунок 4.21 Напряжение ПЭ ($V_{пэ}$) с электрической цепью СТ-ПМВ

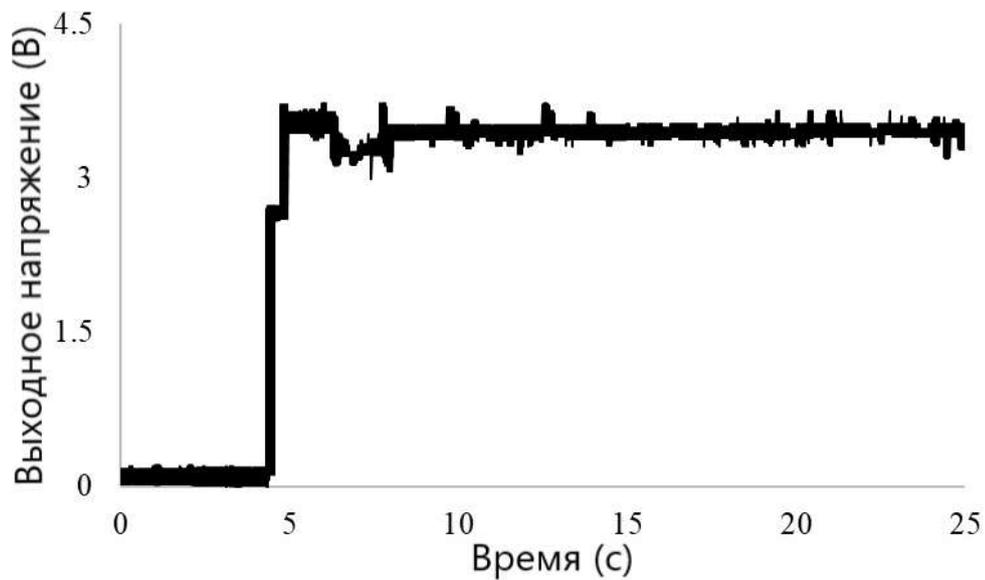


Рисунок 4.22 Выходное напряжение ($V_{\text{выход}}$) с электрической цепью СТ-ПМВ

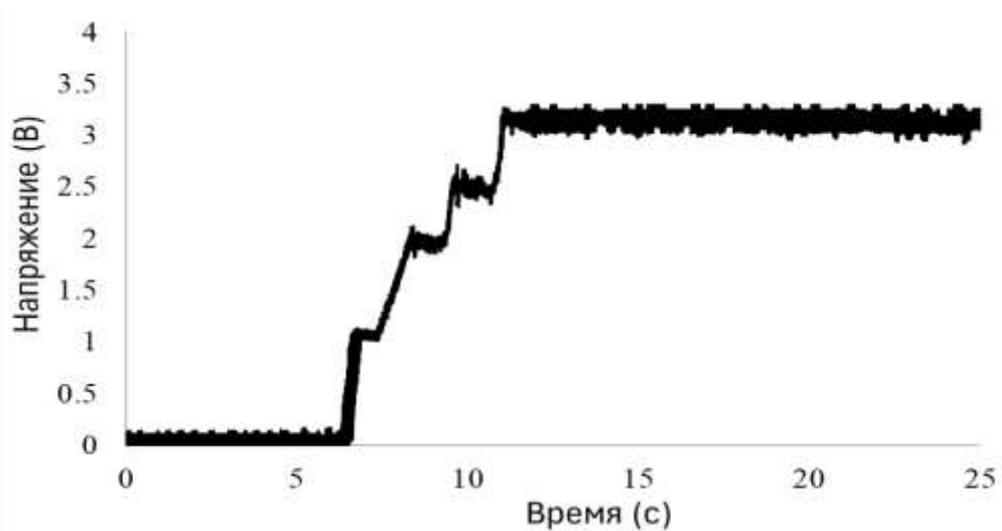


Рисунок 4.23 Выходное напряжение аккумулятора ($V_{\text{акк}}$) с электрической цепью СТ-ПМВ

4.5.3 Самопитание синхронное извлечение электрического заряда (СИЭЗс)

На рисунках 4.24-4.26 оценивается работа схемы СИЭЗс для сбора энергии от волн.

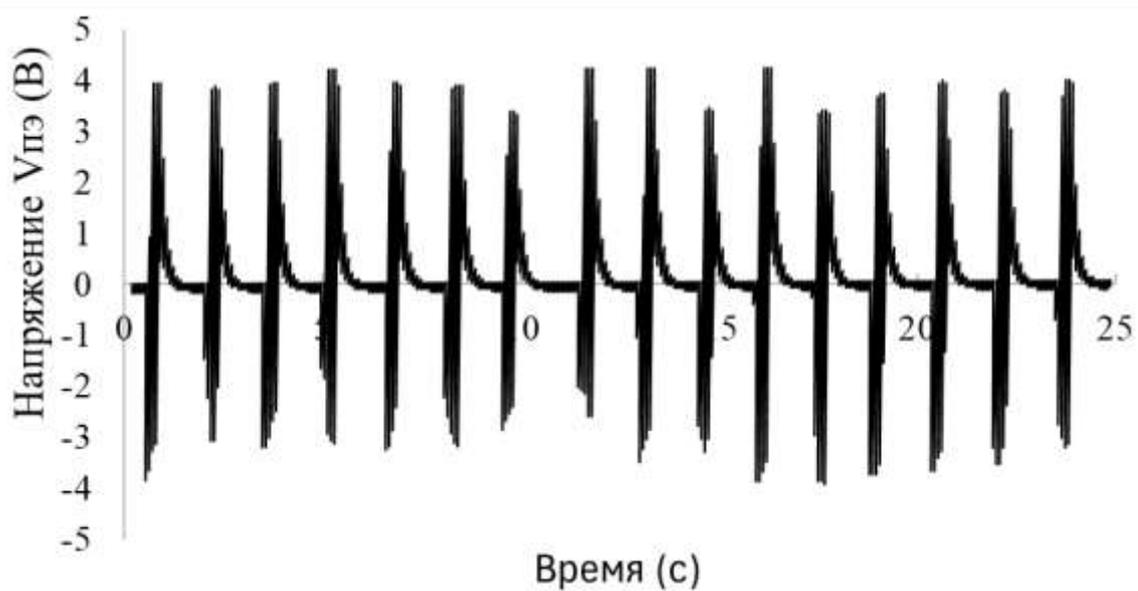


Рисунок 4.24 Выходное напряжение ПЭ ($U_{пэ}$) с электрической цепью самопитания СИЭЗ

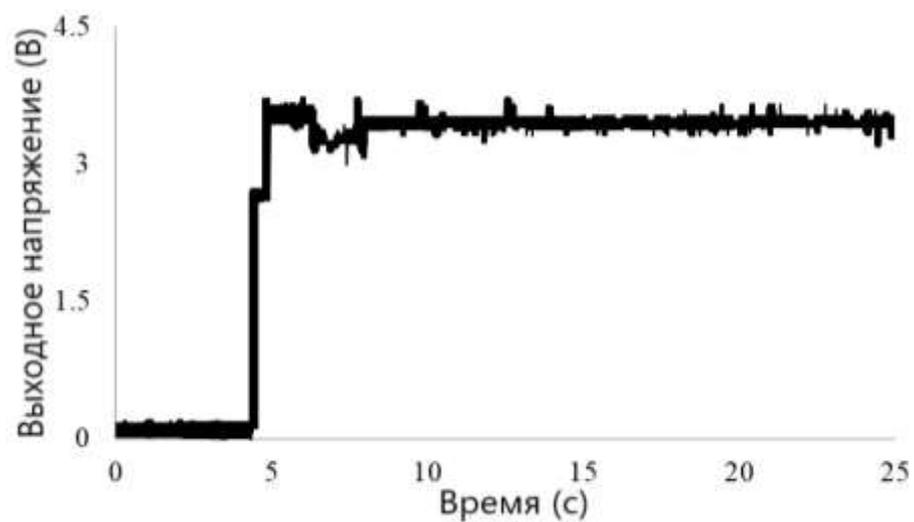


Рисунок 4.25 Выходное напряжение ($V_{выход}$) с электрической цепью самопитания СИЭЗ

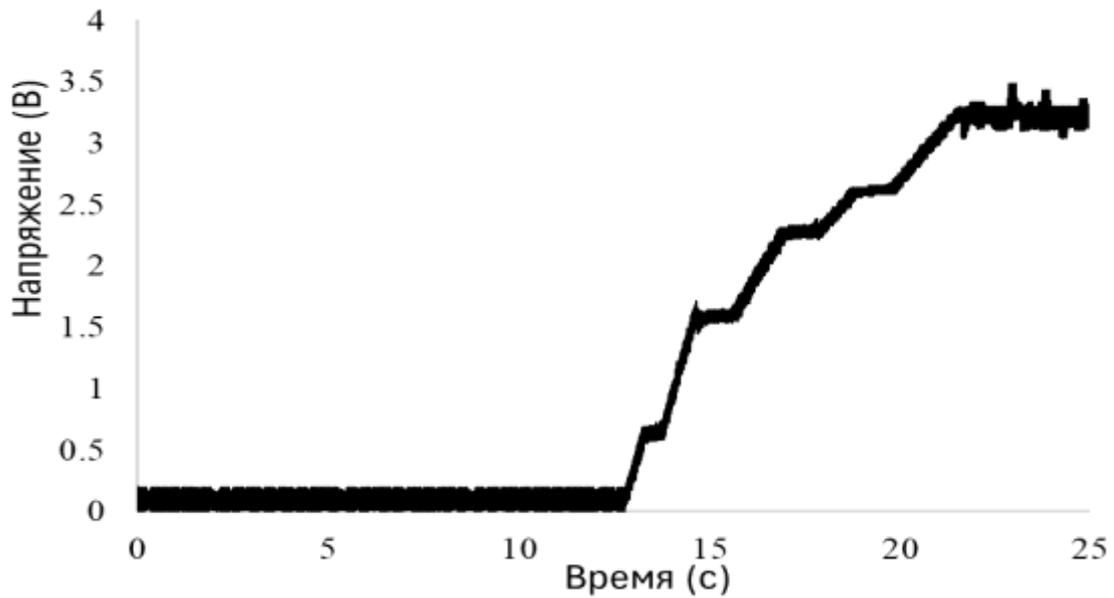


Рисунок 4.26 Выходное напряжение аккумулятора ($V_{акк}$) с электрической цепью СИЭЗс

4.5.4 Синхронное извлечение электрического заряда (СИЭЗопт-с)

На рисунках 4.27–4.29 продемонстрированы результаты испытаний цепи СИЭЗопт-с по сбору энергии от волн. Цепь СИЭЗопт-с была специально разработана дальнейшего повышения эффективности процесса сбора энергии обеспечивая более высокие показатели стабильности напряжения и скорости зарядки аккумулятора.

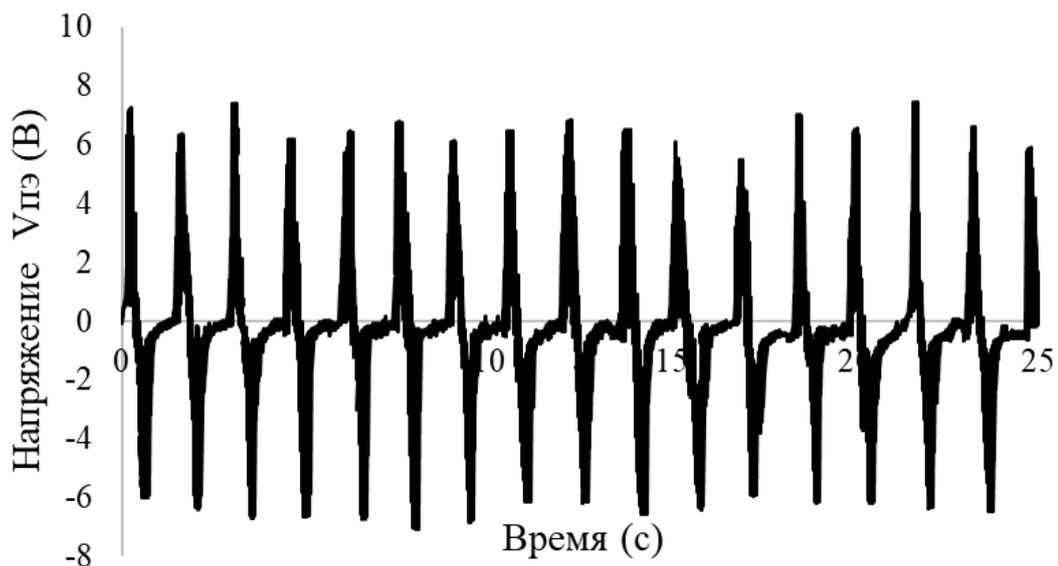


Рисунок 4.27 Выходное напряжение ПЭ ($V_{пэ}$) с электрической цепью СИЭЗопт-с

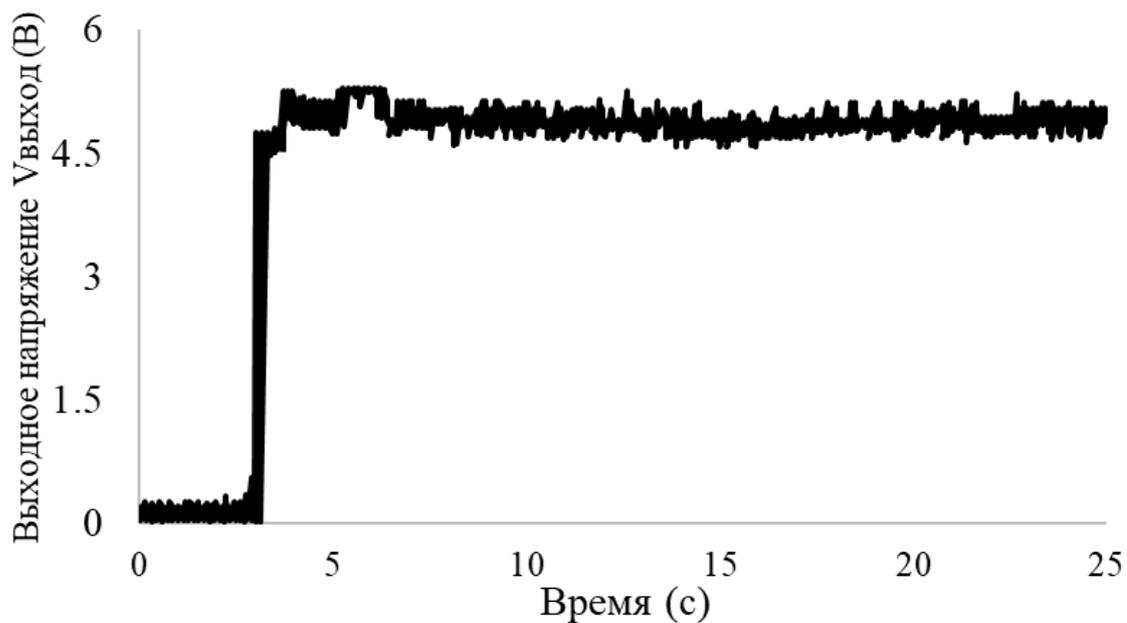


Рисунок 4.28 Выходное напряжение ($V_{\text{выход}}$) с электрической цепью СИЭЗопт-с

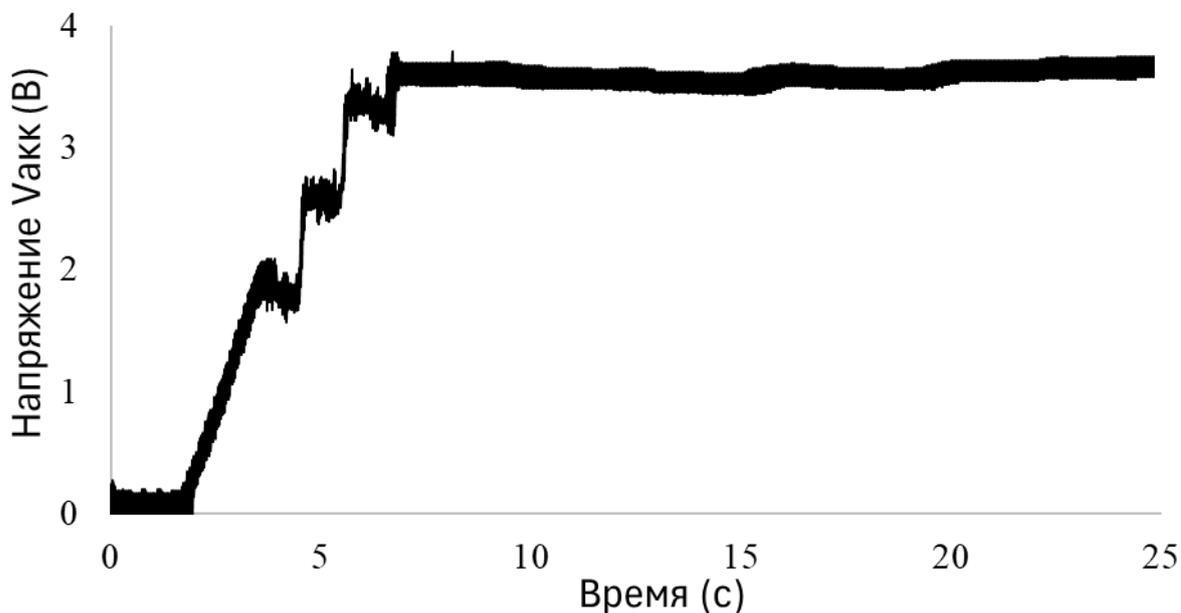


Рисунок 4.29 Выходное напряжение аккумулятора ($V_{\text{акк}}$) с электрической цепью СИЭЗопт-с

Схема СИЭЗопт-с продемонстрировала лучшие результаты среди всех исследованных вариантов, обеспечивая максимальную эффективность сбора

энергии, стабильность напряжения и ускоренную зарядку аккумулятора. Оптимизация механизма синхронного извлечения заряда позволила максимально использовать потенциал волнового движения пьезоэлектрического элемента.

4.6 Сравнение цепей СТ-ПМВ, СИЭЗс и СИЭЗопт-с

На рисунках 4.21 до 4.29 показаны результаты работы пьезоэлектрической системы, включающей электрические цепи, в том числе выходное напряжение пьезоэлектрического компонента ($V_{пэ}$), регулируемое выходное напряжение ($V_{выход}$) и напряжение батареи ($V_{акк}$). Подобные данные позволили провести сравнительную оценку эффективности сбора энергии всех трех цепей.

4.6.1 Выходное напряжение ПЭ ($V_{пэ}$)

Напряжение на выходе элемента ПЭ, представленное значением $V_{пэ}$, демонстрирует явные различия в трех схемах:

- СТ-ПМВ: схема СТ-ПМВ продемонстрировала наименьшие пиковые значения напряжения, при этом амплитуда колебаний значительно выше. Такие изменения обусловлены отсутствием синхронизации процессов в СТ-ПМВ, что затрудняет оптимальное использование механической энергии волн. В результате происходит непостоянная передача энергии, снижая общую эффективность схемы.
- СИЭЗс: схема работает лучше, чем СТ-ПМВ, демонстрируя более высокие пиковые значения напряжения и лучшую стабильность по сравнению с СТ-ПМВ. Улучшение связано с наличием синхронизированного механизма сбора энергии, соответствующие движению пьезоэлементов, что повысило эффективность захвата энергии в каждом цикле волны. Однако, несмотря на это, определенные энергетические потери всё ещё остаются, особенно в условиях нестабильности волн.
- СИЭЗопт-с: схема продемонстрировала самое наивысшее и наиболее стабильное выходное напряжение с элемента ПВДФ. Оптимизированный метод синхронного отбора заряда минимизирует потери энергии, что

приводит к устойчивым пикам напряжения, точно соответствующим механической энергии, создаваемой волнами. Подобная стабильность свидетельствует о высокой эффективности преобразования энергии, делая СИЭЗопт-с наиболее подходящей схемой для использования энергии волн.

4.6.2 Выходное регулируемое напряжение ($V_{\text{выход}}$)

Регулируемое выходное напряжение – $V_{\text{выход}}$, является критической мерой того, насколько хорошо каждая схема справляется с преобразованием собранной энергии в полезную электрическую мощность для систем буя:

- СТ-ПМВ: схема СТ-ПМВ достигает рабочих значений напряжения медленнее остальных, требуя большего числа волновых циклов для стабилизации $V_{\text{выход}}$. Наблюдаемые колебания указывают на трудности схемы в поддержании постоянного напряжения, особенно в условиях низкокинетичных волн. Медленный рост рабочего напряжения снижает общую эффективность системы питания буя при использовании СТ-ПМВ.
- СИЭЗс: в отличие от предыдущей схемы, СИЭЗс достигает более быстрых и стабильных значений $V_{\text{выход}}$, что подчеркивает её улучшенную способность управлять энергией. Синхронизация процессов сбора энергии с динамикой волн позволяет быстрее достичь рабочего напряжения, обеспечивая более надежную подачу питания для систем буя, хотя временные флуктуации всё же сохраняются.
- СИЭЗопт-с: схема обеспечивает самый быстрый подъем стабильного напряжения $V_{\text{выход}}$, демонстрируя наилучшую производительность в плане регулировки напряжения. Оптимизированный процесс синхронного извлечения энергии обеспечивает преобразование собранной энергии в стабильно постоянное выходное напряжение, что позволяет бую функционировать без перебоев даже в условиях переменных волн. Быстрое достижение устойчивого напряжения делает СИЭЗопт-с оптимальным решением для морских применений, требующих непрерывного питания.

4.6.3 Напряжение аккумулятора ($V_{акк}$)

Эффективность накопления энергии в аккумуляторе отражена в параметре $V_{акк}$, который позволяет проводить оценку успешности работы каждой схемы по сбору и сохранению энергии:

- СТ-ПМВ: схема СТ-ПМВ способствует более замедленному увеличению $V_{акк}$, что указывает на ее сравнительно низкую эффективность сбора энергии. Постепенное увеличение напряжения аккумулятора приводит к большему времени его зарядки, особенно в периоды низкой волновой активности. Это накладывает ограничения на применение схемы СТ-ПМВ в ситуациях длительного развёртывания.
- СИЭЗс: схема демонстрирует более быстрое увеличение $V_{акк}$, свидетельствуя об улучшенной передаче энергии в аккумулятор. Благодаря синхронизированному процессу извлечения энергии, батарея заряжается эффективнее, однако уровень тока заряда остаётся ниже, чем у следующей схемы СИЭЗопт-с.
- СИЭЗопт-с: отличается самой высокой скоростью зарядки аккумулятора, при этом $V_{акк}$ стабильно и равномерно увеличивается. Подобный сценарий эффективной передачи энергии гарантирует, что буй сможет накопить достаточное количество энергии в периоды повышенной волновой активности, что делает систему более надёжной в условиях продолжительной эксплуатации. Высокий уровень заряда тока достигается использованием схемы СИЭЗопт-с, обеспечивая резерв энергии даже в условиях низкого волнения моря..

Такая высокая эффективность делает систему СИЭЗопт с самопитанием особенно привлекательной в ситуациях, когда требуется быстрое накопление энергии для буюв, работающих в режиме непрерывного функционирования в условиях переменного волнения.

На основании представленных данных диссертационной работы установлено, что мощность, извлекаемая из пьезоэлектрических элементов, составляет 950 мкВт при напряжении 3.7 В. Данные параметры учитывались при

проектировании энергосистемы с целью долговременной автономной работы без необходимости частой перезарядки аккумулятора.

4.7 Выводы

1- Сравнительный анализ цепей СТ-ПМВ, СИЭЗс и СИЭЗопт-с показал, что схема СИЭЗопт-с обладает оптимальными характеристиками в отношении выходного напряжения, стабильности регулируемого напряжения и эффективности зарядки аккумулятора.

2- Несмотря на простоту и экономичность схемы СТ-ПМВ с низкой эффективностью сбора энергии и длительным временем реакции, оказалась менее подходящей для приложений, требующих непрерывного питания.

3- Схема СИЭЗс представляет собой значительное усовершенствование по сравнению с СТ-ПМВ, но при этом СИЭЗопт-с продемонстрировала более высокие эксплуатационные характеристики при трансформации энергии морских волн, что сделало ее наиболее подходящим вариантом для морских буев. Способность схемы СИЭЗопт-с быстро стабилизировать выходное напряжение и эффективно заряжать аккумулятор обеспечивало бесперебойную работу даже в нестабильных морских условиях, что сделало её самым надёжным решением для долгосрочной эксплуатации в системах сбора морской энергии

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведен анализ научных трудов, связанных с исследованием конструкций, принципов функционирования существующих типов волновых электростанций. Кроме того, выполнен обзор и классификация существующих типов преобразователей энергии волн и перспективных проектов их использования. Также были проанализированы гидродинамические параметры волн у побережья Севастополя. Для оценки энергетического потенциала волновых процессов использованы такие показатели, как длина и скорость волны. В акватории Черного моря расстояния между гребнями волн составляют 20–40 метров, высота волн достигает одного метра, скорость колеблется в пределах 120–160 км/ч, а период волн варьируется от 3 – до 4 секунд.

Был проведён анализ методов использования пьезоэлектрических преобразователей для преобразования энергии из морских волн. Позиционируемые как перспективное направление развития в области чистой возобновляемой энергетики, пьезоэлементы находят применение в многофункциональных электронных устройствах компактного размера.

Моделирование показало, что каждая исследованная схема способна собирать пьезоэлектрическую энергию, однако самой эффективной оказалась схема СИЭЗопт-с которая обеспечила наиболее эффективное преобразование энергии и стабильный выходной сигнал. В итоге, разработанная схема СИЭЗопт-с представляется наиболее перспективной для низкочастотных приложений, таких как морские волны, благодаря повышенной эффективности сбора энергии и меньшему количеству компонентов.

Сравнительный анализ схем СТ-ПМВ, СИЭЗс и СИЭЗопт-с подтвердил, что схема СИЭЗопт-с обладает оптимальными общими характеристиками с точки зрения выходного напряжения, стабильности регулируемого напряжения и эффективности зарядки аккумулятора. Несмотря на относительную простоту и экономичность схемы СТ-ПМВ, её недостаточная эффективность сбора энергии и медленная реакция сделали её менее подходящей для приложений, требующих

непрерывного питания. Схема СИЭЗс представляет собой значительное улучшение по сравнению с СТ-ПМВ, однако именно СИЭЗопт-с продемонстрировала более высокие эксплуатационные характеристики, что сделало её наиболее подходящим вариантом для морских буев, питающихся от энергии волн. Способность схемы СИЭЗопт-с быстро стабилизировать выходное напряжение и эффективно заряжать аккумулятор обеспечивала бесперебойную работу даже в нестабильных морских условиях, что сделало её наиболее надёжным решением для долгосрочного сбора морской энергии.

Анализ исследования пьезоэлементов показывает возможность их разнообразного применения в различных отраслях промышленности с использованием как натуральных, так и синтетических материалов. С ростом внимания к энергосбережению и автономным источникам энергии расширяется сфера применения пьезоэлементов, использующих механическую энергию движущихся транспортных средств, людей, волн и др. Позиционируемые как перспективный путь развития чистой энергии, пьезоэлементы нашли применение и в автономных маломощных устройствах.

Основные выводы включают:

1. Сравнение характеристик, предложенных автором схем-погружной элемент (ППЭ) и непогружной элемент (НПЭ) моделей пьезоэлектрических элементов показало, что НПЭ генерировала на 50% больше энергии, по сравнению с погружной моделью ППЭ.

2. Моделирование подтвердило, что каждая исследуемая схема способна собирать пьезоэлектрическую энергию, а наиболее эффективное преобразование энергии и стабильный выходной сигнал лучше всего обеспечивала схема (СИЭЗопт-с), оптимальное синхронное извлечение электрического заряда составило 210 мкВт для одного пьезоэлемента.

3. Результаты численного моделирования свидетельствуют о том, что пьезоэлектрические системы, такие как оптимальное синхронное извлечение электрического заряда СИЭЗопт-с, существенно превосходят, более чем 2 раза

по показателям энергоэффективности, традиционные схемы (полный мостовой выпрямитель Ст-ПМВ).

4. Экспериментальные исследования подтвердили, что схема СИЭЗопт-с генерировала мощность 950 мкВт, а схема Ст-ПМВ - 400 мкВт, что делает ее наиболее подходящей для питания маломощных устройств.

5. Проведенные эксперименты подтвердили возможность использования пьезоэлектрических элементов в качестве источников энергии для питания маломощных устройств и зарядки аккумуляторов в морских бухтах и другом аналогичном оборудовании.

Рекомендации по использованию материалов исследования.

Предложенный метод создания энергетических систем может найти применение при проектировании новых типов буев, а также, в процессе модернизации уже существующих и в образовательном процессе.

Перспективы дальнейшей разработки темы исследования.

Дальнейшая разработка темы включает оптимизацию схем для более эффективного преобразования энергии, исследование новых пьезоэлектрических материалов для увеличения мощности элементов. А также создание гибридных систем, объединяющих различные источники энергии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Безруких П.П. Состояние и перспективы развития возобновляемой энергетики // Электрика. 2008. №9. С. 3-10.
2. Васильев Ю. С., Елистратов В. В. Возобновляемая электроэнергетика и энергетическая безопасность//Академия энергетики. 2007. №2(16). С. 14-19.
3. Wimalaratna, Y.P.; Hassan, A.; Afrouzi, H.N.; Mehrazamir, K.; Ahmed, J.; Siddique, B.M.; Liew, S.C. Comprehensive review on the feasibility of developing wave energy as a renewable energy resource in Australia. Clean Energy Syst. 2022, 3, 100021
4. Numerical Modelling of Wave Energy Converters. IEA-OES (2024), Available online: www.ocean-energy-systems.org.
5. Sheng, W. Wave energy conversion and hydrodynamics modelling technologies: A review. Renew. Sustain. Energy Rev. 2019, vol. 109, pp. 482–498.
6. An Overview of Ocean Energy Activities in 2023. Annual Report: IEA-OES (2024), Available online: <https://www.ocean-energy-systems.org/publications/oes-annual-reports/document/oes-annual-report-2023/>
7. Innovation outlook: Ocean energy technologies, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi, IRENA (2020), available online: https://www.irena.org//media/Files/IRENA/Agency/Publication/2020/Dec/IRENA_Innovation_Outlook_Ocean_Energy_2020.pdf
8. Аванесов А. Д. Обзор вариантов преобразователей морских волн и их сравнительная оценка / А. Д. Аванесов , Д.С. Болобошко, Е.Б. Ланин, Г. К. Огурцов // Научные исследования, 2017, № 1(12). с. 92-94.
9. Amiruddin, Ribal A., Khaeruddin, Thamrin, S.A. A 10-year wave energy resource assessment and trends of Indonesia based on satellite observations. Acta Oceanol. Sin., 2019, vol. 38, pp. 86–93.
10. Zheng C. Global oceanic wave energy resource dataset-With the Maritime Silk Road as a case study. Renew. Energy, 2021, vol. 169, pp. 843–854.
11. Безруких. П.П., Соловьев Д.А. Взгляд на энергетику 2020 г. в свете устойчивого развития России // Малая энергетика. 2014. №1/2. С. 3-9.

12. Васильев Ю.С. Безруких П.П. Елистратов В.В. Сидоренко Г.И. Оценки ресурсов возобновляемых источников энергии в России: учебно справочное пособие. СПб. : Изд-во Политех. ун-та, 2008. 251 с.

13. Al Rahman A., Khan K.A. The Present Situation of the Wave Energy in Some Different Countries of the World. COPYRIGHT, 2011. pp. 89-95.

14. Yemm, R.; Pizer, D.; Retzler, C.; Henderson, R. Pelamis: Experience from concept to connection. Philos. Trans. R. Soc. A 2012, 370, 365–380.

15. Елисеев А.В., Велькин В.И., Щеклеин С.Е. Разработка отечественной поплавково-волновой гидроэлектростанции // Сб. трудов Всероссийской НПК «Развитие Арктики и приполярных регионов». Екатеринбург : УрФУ, 2014. С. 211-213.

16. Елисеев А.В., Велькин В.И., Щеклеин С.Е. Разработка исследовательского волнового буя для мониторинга акватории мира // Сб. трудов Всероссийской НПК «Развитие Арктики и приполярных регионов». Екатеринбург : УрФУ, 2014. С. 214-216.

17. I. Hossain et al. Structural Design Development of a Float Type Wave Micro Power Plant. 2019 IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 481 012007

18. Bozzi S., Besio G., Passoni G. Wave power technologies for the Mediterranean offshore: Scaling and performance analysis. Coast. Eng. 2018, vol. 136, pp. 130–146.

19. Rusu, L.; Onea, F. Assessment of the performances of various wave energy converters along the European continental coasts. Energy, 2015, vol. 82, pp. 889-904.

20. Alcorn Raymond, Beattie W.C. Power quality assessment from a wave-power station. IEE Conf. Pub. No. 482, 2001, vol.43, 5 pp.

21. J.P. Sierra and et al. Wave energy resource assessment in Lanzarote (Spain). Renew. Energy, 2013, vol. 55, pp. 480-489.

22. Amarasekara Kanchana and et al. A prefeasibility study on ocean wave power generation for the southern coast of Sri Lanka: Electrical feasibility. International journal of distributed energy resources and smart grids, 2014, vol. 10, pp. 79-93.

23. Guillou N. and Chapalain G. Annual and seasonal variabilities in the performances of wave energy converters. *Energy*, 2018, vol. 165, pp. 812-823.
24. Kaldellis John and Chrysikos Theodoris. Wave energy exploitation in the Ionian Sea Hellenic coasts: spatial planning of potential wave power stations. *International Journal of Sustainable Energy*, 2018, vol. 38. pp. 1-21.
25. Hajjaj S.S.H., Nazri A.F.B.A. Simulated Analysis and Review of Ocean Wave Power Generators. *IJET*, 2018, vol. 7, no. 4.35, pp.1-4.
26. Lavidas, G., Venugopal V. Application of Numerical Wave Models at European Coastlines: A Review. *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 2018, vol. 92, pp. 489–500.
27. Сеньков А.П., Колмыков А.Н., Сеньков А.А. Волновая электрическая установка. Патент на полезную модель РФ. RU 158924 U1, 20.01.2016, Заявка № 2015119268/06 от 2015.05.21
28. Беллендир Е.Н., Петрашкевич А.В., Петрашкевич В.В., Собкалов П.Ф., Собкалов Ф.П. Поплавковая волновая электростанция плавучего завода сжижения природного газа (СПГ). Патент на изобретение RU 2578615 С1, 27.03.2016. Заявка № 2015108722/06 от 12.03.2015.
29. Сеньков А.П., Сеньков А.А., Макин П.В. Поплавковая волновая электростанция. Патент РФ. RU 2692187 С1, 21.06.2019, Заявка № 2018108069 от 05.03.2018.
30. Farkas A., Degiuli N., Martić I. Assessment of offshore wave energy potential in the Croatian part of the Adriatic Sea and comparison with wind energy potential., *Energies*, 2019, vol. 12, pp. 23-57.
31. Martić I., Degiuli N., Grlj C.G. Scaling of wave energy converters for optimum performance in the Adriatic Sea. *Energy* 2024, 294, 130922.
32. Eugen Rusu, Florin Onea. A review of the technologies for wave energy extraction, *Clean Energy*, Volume 2, Issue 1, June 2018, pp. 10–19.
33. Ahamed R., McKee, K. and Howard I. Advancements of wave energy converters based on power take off (PTO) systems: A review. *Ocean Engineering*, 2020, vol. 204, 107248.

34. Guo Bingyong and Ringwood John. A review of wave energy technology from a research and commercial perspective. *Renewable Power Generation*, 2021, vol. 15, pp. 3065-3090
35. Bouhrim H., El Marjani A., Nechad R., Hajjout I. Ocean Wave Energy Conversion: A Review. *J. Mar. Sci. Eng.* 2024, vol. 12(11), 1922.
36. Использование волновой энергии : учебное пособие / В.И. Виссарионов, В.В. Волшаник, Л.А. Золотов ; – Москва : Издательский дом МЭИ, 2002. – 144 с.
37. Соболев В.Ю., Городничев Р.М. Волновые электрические станции // *Малая энергетика*. 2014. №1/2. С. 20-31
38. Елистратов В.В., Сидоренко Г.И. Экономика установок нетрадиционных и возобновляемых источников энергии. Технико-экономический анализ. Учебное пособие. СПб. :Изд-во СПбГПУ, 2009. 248 с.
39. Fairley I. and et al. A classification system for global wave energy resources based on multivariate clustering, 2020, *Applied Energy*, vol. 262, 114515.
40. Chenari B., Saadatian S., and A. Ferreira A. Wave energy systems: An overview of different wave energy converters and recommendation for future improvements, *INTED Proceedings, IATED*, 2014, pp. 6266–6272.
41. Ning D., Ding B. *Modelling and Optimization of Wave Energy Converters* (1st ed.). CRC Press., 2022, P. 428.
42. Бальзанников М.И., Елистратов В.В. Возобновляемые источники энергии. Аспекты комплексного использования. Самара: ООО «Офорт», СамГАСУ, 2008. 331 с.
43. Margheritini L., Vicinanza D., Frigaard P. SSG wave energy converter: Design, reliability and hydraulic performance of an innovative overtopping device, 2009, *Renewable Energy*, vol. 34, pp. 1371-1380.
44. L. Margheritini, P. Frigaard, and G. Iglesias. Technological and commercial comparison of OWC and SSG wave energy converters built into breakwaters. In *Developments in Renewable Energies Offshore*, CRC Press, 2020, pp. 167–178.

45. G. Dalton, R. Alcorn, and T. Lewis. Case study feasibility analysis of the Pelamis wave energy convertor in Ireland, Portugal and North America. *Renewable Energy*, 2010, vol 35(2), pp. 443–455.

46. E. Rusu and C. G. Soares. Coastal impact induced by a Pelamis wave farm operating in the Portuguese nearshore. *Renewable Energy*, 2013, vol. 58, pp. 34–49.

47. Mann L. D. Application of ocean observations & analysis: The CETO wave energy project. In *Operational Oceanography in the 21st Century*, Springer, 2011, pp 721–729.

48. Koley S. and Trivedi K. Mathematical modeling of Oyster wave energy converter device. In *Proceedings of the AIP Conference Proceedings*, 2020, vol. 2277, 130014.

49. O’Boyle L., Doherty K., Van’t Hoff J. and Skelton J. The value of full-scale prototype data-testing Oyster 800 at EMEC, Orkney. In *Proceedings of the 11th European Wave and Tidal Energy Conference (EWTEC)*, France, 2015, pp. 6–11.

50. Whittaker Trevor, et. al. The development of Oyster–A shallow water surging wave energy converter. *Proceedings of 7th European Wave Tidal Energy Conference*. 2007, p. 7.

51. Wave Energy Converters (WECs). James R Joubert. Johannes L van Niekerk. Josh Reinecke. Imke Meyer. Centre for Renewable and Sustainable Energy Studies, 2013, 96 p. Available online: https://www.crses.sun.ac.za/files/technologies/ocean/WECs_2013_list.pdf

52. Guanghua He and et. al. Power absorption and dynamic response analysis of a hybrid system with a semi-submersible wind turbine and a Salter's duck wave energy converter array, *Energy*, 2024, Vol. 305, 132210.

53. Dongeun Kim, et. al. Numerical and Experimental Study on Linear Behavior of Salter's Duck Wave Energy Converter, *J. Ocean Eng. Technol.*, 2019, vol. 33(2), pp. 116-122.

54. A. F. Falcão and J. C. Henriques. Oscillating-water-column wave energy converters and air turbines: A review, *Renewable Energy*, 2016, vol. 85, pp.1391–1424.

55. Washio Y., Osawa H. and Ogata T. The open sea tests of the offshore floating type wave power device (Mighty Whale)-characteristics of wave energy absorption and power generation, in MTS/IEEE Oceans 2001. An Ocean Odyssey. Conference Proceedings IEEE, vol. 1, Honolulu, USA, 2001, pp. 579–585.

56. Folley M. and Whittaker T. Identification of non-linear flow characteristics of the LIMPET shoreline OWC, 12th International Conference on Ocean and Polar Engineering, ISOPE-Japan, 2002, pp. 1-1.

57. Kshma Trivedi and et al. Hydrodynamics of LIMPET type OWC device under Stokes second-order waves, Ocean Engineering, vol 286, Part 2, 2023, 115605.

58. C. Liu and et al. Latching control of a raft-type wave energy converter with a hydraulic power take-off system. Ocean Engineering, 2021, vol. 236, pp. 109512.

59. S. Zheng. Study on Hydrodynamic Characteristics of the Raft-type Wave-Powered Desalination Device, Springer Singapore, Singapore, 2018, p. 183.

60. J. Dong, J. Gao, L. Tao, and P. Zheng. Research status of wave energy conversion (WEC) device of raft structure. AIP Conference Proceedings, 2017, vol1890(1), 030005.

61. Гуш Ю.В. Волновая энергетика – перспективный сектор возобновляемых источников энергии // Строительство уникальных зданий и сооружений, 2016, 2 (41), с. 30-44.

62. N. V. Viet, Q. Wang, and A. Carpinteri, Development of an ocean wave energy harvester with a built-in frequency conversion function // Int. J. Energy Res., vol. 42, no. 2, pp. 684– 695, 2018.

63. Tanay Sıdkı Uyar, Nader Javani. Renewable Energy Based Solutions. Springer Cham, 2022, 767 P.

64. LiVecchi, A., A. Copping, D. Jenne, A. Gorton, R. Preus, G. Gill, R. Robichaud, R. Green, S. Geerlofs, S. Gore, D. Hume, W. McShane, C. Schmaus, H. Spence. Powering the Blue Economy; Exploring Opportunities for Marine Renewable Energy in Maritime Markets. U.S. Department of Energy, Office of Energy Efficiency and Renewable Energy. Washington, D.C., 2019, 170 P.

65. Бекиров Э. А. Потенциал использования преобразователей энергии волн черного и Азовского морей / Э. А. Бекиров, М. М. Асанов, Э. Р. Муртазаев, Р. А. Амерханов // Энергосбережение и водоподготовка. – 2022. – № 1(135). – С. 32-35.

66. Матушевский, Г.В. Теоретические и прикладные аспекты применения спектральных моделей ветрового волнения / Г.В. Матушевский, И.М.Кабатченко // Метеорология и гидрология. – 2003. – № 3. – С. 47-54.

67. Бекиров Э. А. Схемные решения электроснабжения потребителей от электроустановок возобновляемой энергетики / Э. А. Бекиров, С. Н. Воскресенская, Э. Р. Муртазаев, Р. А. Амерханов // Энергосбережение и водоподготовка. – 2022. – № 1(135). – С. 50-54.

68. Бекиров, Э. А. Оценка надежности электроснабжения сельскохозяйственных потребителей при питании от преобразователя энергии волн / Э. А. Бекиров, М. М. Асанов, Э. Р. Муртазаев // Вестник аграрной науки Дона. – 2022. – № 1(57). – С. 4-13.

69. Бекиров, Э. А. Колебание поплавка энергоагрегата на поверхности волн / Э. А. Бекиров, Д. В. Каркач, Э. Р. Муртазаев // Строительство и техногенная безопасность. – 2021. – № 21(73). – С. 91-96.

70. Bekirov, E. A., Voskresenskaya, S. N., Asanov, M. M., & Murtazaev, E. R. Analysis of the Sea Waves Energy Characteristics in the Black Sea Region. In 2020 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon) (pp. 1-4). IEEE.

71. Alqataa A. M., Bekirov E. A., Murtazaev E. R. Development of a Device for Measuring Parameters of the Sea Wave //Journal of engineering research and technology. 2019. Т.6.№. 2.

72. Электронный ресурс: Альтернативные источники энергии: морские волны и течения. <https://www.mining-portal.ru/publish/alternativnyie-istochniki-energii--morskie-volnyi-i-techeniya/>

73. Сичкарев В.И., Шпак А.С. Анализ и классификация технических средств преобразования волновой энергии // Использование энергии приливных и ветровых волн в океане. – Владивосток: ДВНЦ АН СССР, 1984. С. 33-40
74. Min K. B., Tanaka S. and Esashi M. Fabrication of novel MEMS-based polymer electrolyte fuel cell architectures with catalytic electrodes supported on porous SiO₂, *J. Micromech. Microeng*, 2006, vol. 16, pp 505–511.
75. Lee C. Y., Wu G. W. and Hsieh C. L. In situ diagnosis of micrometallic proton exchange membrane fuel cells using microsensors, *J. Power Sources*, 2007, 172 363–7
76. Mahidur R. et al. Review of piezoelectric energy harvesting system and application of optimization techniques to enhance the performance of the harvesting system, *Sensors and Actuators A: Physical*, 2019, Vol. 300, 111634.
77. Chen M., Lu S. S. and Liao B. On the figure of merit of thermoelectric generators *Trans// ASME J. Energy Resources Technol*, 2005, vol. 127, pp 37–41.
78. Datta U., Dessouky S., Papagiannakis A. Harvesting thermoelectric energy from asphalt pavements. *J. Transport Res Board*, 2017, Vol. 2628 (1), 12–22.
79. Moure A, et al. Feasible integration in asphalt of piezoelectric cymbals for vibration energy harvesting, *Energy Convers Manag*, 2016, vol. 112, 246–253.
80. Freescale-semiconductor. Datasheet of MMA7260Q, 2010. Available online: http://www.freescale.com/files/sensors/doc/fact_sheet/MMA7260QFS.pdf. (accessed on 25 December 2013).
81. Gems. Datasheet of 2200 and 2600-series, 2010. Available online: <http://www.gemssensors.com/Products/Pressure/Pressure-Transducers/CVD//media/GemsNA/CatalogPages/2200-and-2600-series-cat.ashx> (accessed on 25 December 2013).
82. Intersil. Datasheet of ISL29002, 2010. Available online: <http://www.intersil.com/data/fn/fn7465.pdf> (accessed on 25 December 2013).
83. Honeywell. Datasheet of CP18 series, 2012. Available online: http://content.honeywell.com/sensing/prodinfo/sds/installation/p80008_1.pdf (accessed on 25 December 2013).

84. Sensirion. Datasheet of SHT1x, 2010. Available online: <http://datasheet.octopart.com/SHT11-Sensirion-datasheet-5323722.pdf> (accessed on 25 December 2013).

85. PEPPERL+FUCHS. Datasheet of LUC-M10, 2010. Available online: http://files.pepperlfuchs.com/selector_files/navi/productInfo/edb/t47783_eng.pdf (accessed on 25 December 2013).

86. Datasheet of MiCS-5521, 2011. Available online: http://www.e2v.com/assets/media/files/sensors_datasheets/Metal_Oxide/mics-5521.pdf (accessed on 25 December 2013).

87. GE. Datasheet of GE/Telaire 6004, 2011. Available online: http://www.veronics.com/products/infrared_gas_sensing/6004_CO2_Module.pdf (accessed on 25 December 2013).

88. Meindl A. Guide to moored bouys and other ocean data acquisition systems, Intergovernmental Oceanographic Commission of UNESCO, Paris, 1996, pp 21–22.

89. Liu X, Yue S, Lu L et al Investigation of the dust scaling behaviour on solar photovoltaic panels, J. Clean Prod, 2021, 295(126):391

90. McArthur S, Brekken TKA (2010) Ocean wave power data generation for grid integration studies, In: Proceedings of IEEE power and energy society general meeting, Minneapolis, USA, pp 1–6.

91. <https://www.aanderaa.com/> Accessed 1 May 2018.

92. <http://www.revrobotics.com/content/docs/REV-11-1107-DS/> Accessed 1 May 2018.

93. <http://www.stevenswater.com/resources/datasheets/dts-12datasheet/> Accessed 1 May 2018.

94. https://www.ayyeka.com/img/kits/SE00017_Turbidity-and-Temperature-Sensor_Ponsel_NEPHELOMETRIC_Datasheet/ Accessed 1 May 2018.

95. https://www.ablicinc.com/en/doc/datasheet/temperature_sensor/S5851A_E/ Accessed 1 May 2018.

96. Abo-Zahhad M., Farrag M., Ali A., Amin O. An energy consumption model for wireless sensor networks, in: 5th international conference on energy aware computing systems&applications. IEEE; 2015. p. 1–4.

97. Состояние и перспективы развития пьезоэлектрических генераторов. / Гриценко А, Никифоров В., Щеголева Т. // Журнал «Компоненты и технологии», №9, 2012. С. 63 – 68..

98. Projected costs of generating electricity. France: International Energy Agency and Nuclear Energy Agency, 2021.

99. Применение пьезоэлементов для генерации энергии на объектах железнодорожной инфраструктуры / Косолапкин Р.В., Неклюдова А.С., Савченков Д.В. // Наука и образование транспорту, 2019. С. 386 – 388.

100. Микроструктура и свойства пьезокерамики ЦТС, консолидированной из нанопорошка / Приседский В.В., Погибко В.М. // Ученые записки Таврического национального университета им. В. И. Вернадского Серия «Биология, химия». Том 26 (65). 2013. № 3. С. 301-312

101. Lee, H.J.; Sherrit, S.; Tosi, L.P.; Walkemeyer, P.; Colonius, T. Piezoelectric energy harvesting in internal fluid flow. *Sensors* 2015, 15, 26039–26062.

102. Song, R.; Shan, X.; Lv, F.; Xie, T. A study of vortex-induced energy harvesting from water using PZT piezoelectric cantilever with cylindrical extension. *Ceram. Int.* 2015, vol. 41, pp. 768–773.

103. Song, R.; Hou, C.; Yang, C.; Yang, X.; Guo, Q.; Shan, X. Modeling, validation, and performance of two tandem cylinder piezoelectric energy harvesters in water flow. *Micromachines* 2021, vol. 12(8):872.

104. Hassan, M.M.; Hossain, M.Y.; Mazumder, R.; Rahman, R.; Rahman, M.A. Vibration energy harvesting in a small channel fluid flow using piezoelectric transducer. *AIP Conf. Proc.* 2016, 1754, pp. 050041-1– 050041-7.

105. Taylor, G.W.; Burns, J.R.; Kammann, S.A.; Powers, W.B.; Welsh, T.R. The Energy Harvesting EEL: A small subsurface ocean/river power generator. *IEEE J. Ocean. Eng.* 2001, 26, 539–547.

106. Wang, D.-A.; Ko, H.-H. Piezoelectric energy harvesting from flow-induced vibration. *J. Micromech. Microeng.* 2010, 20, 25019.
107. Tam Nguyen, H.-D.; Pham, H.-T.; Wang, D.-A. A miniature pneumatic energy generator using Kármán vortex street. *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.* 2013, 116, 40–48.
108. Koyvanich, K.; Smithmaitrie, P.; Muensit, N. Perspective microscale piezoelectric harvester for converting flow energy in water way. *Adv. Mater. Lett.* 2015, 6, 538–543.
109. Lin Zheng , Zhang Yongliang. (2015). Dynamics of a mechanical frequency up-converted device for wave energy harvesting. *Journal of Sound and Vibration.* Vol. 367, 2016, 170-184.
110. Ali, A.; Asim Pasha, R.; Abdullah Sheeraz, M.; Butt, Z.; Elahi, H.; Ahmed Khan, A. Investigation of Electrical Properties for Cantilever-Based Piezoelectric Energy Harvester. *Adv. Sci. Technol. Res. J.* 2019, 13, 76–85.
111. Murray R and Rastegar J 2009 Novel two-stage piezoelectricbased ocean wave energy harvesters for moored or unmoored buoys SPIE Smart Structures and Materials Nondestructive Evaluation and Health Monitoring 7288 (SPIE) 72880E.
112. Kargar SM, Hao G. An Atlas of Piezoelectric Energy Harvesters in Oceanic Applications. *Sensors (Basel).* 2022 Mar 2;22(5):1949.
113. Murray, R.; Rastegar, J. Novel two-stage piezoelectric-based ocean wave energy harvesters for moored or unmoored buoys. In *Active and Passive Smart Structures and Integrated Systems 2009*; SPIE: Bellingham, WA, USA, 2009; Volume 7288, pp. 184–195.
114. Priya, S.; Chen, C.-T.; Fye, D.; Zahnd, J. Piezoelectric Windmill: A Novel Solution to Remote Sensing. *Jpn. J. Appl. Phys.* 2004, 44, L104–L107.
115. Zhang, Y. & Lin, Z. Advances in ocean wave energy converters using piezoelectric materials. *Shuili Fadian Xuebao/Journal of Hydroelectric Engineering.* (2011), 30. 145-148.
116. ООО"Марлин-Юг", https://marlinyug.com/assets/files/pdf_ru/marlinyug_product_catalog_ru.pdf

117. Vinolo Carlos, Toma Daniel, Lazaro Antonio, del Rio Joaquin. An ocean kinetic energy converter for low-power applications using piezoelectric disk elements. *The European Physical Journal Special Topics*, (2013), Vol. 222. 1685-1698.
118. N. V. Viet, Q. Wang, and A. Carpinteri, Development of an ocean wave energy harvester with a built-in frequency conversion function // *Int. J. Energy Res.*, vol. 42, no. 2, pp. 684– 695, 2018.
119. I. López, J. Andreu, S. Ceballos, I. Martínez De Alegría, and I. Kortabarria, Review of wave energy technologies and the necessary power-equipment, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 27, pp. 413–434, 2013.
120. Z. Andreas and R. Srivathsan, Strongly coupled modeling and analysis of energy harvesting devices // *Appl. Math. Mech.* 16 (2016), 505-506.
121. Y.Y. Chen, D. Vasic, F. Costa, W.J. Wu, C.K. Lee. A self-powered switching circuit for piezoelectric energy harvesting with velocity control. *European Physical Journal: Applied Physics*, 2012, vol 57 (3),101051
122. Chen C., Zhao B. and Liang j. Revisit of synchronized electric charge extraction (SECE) in piezoelectric energy harvesting by using impedance modeling, *Smart Mater. Struct.*, 2019, vol. 28, no. 10, p. 105053.
123. Do X., Nguyen H., Han S. and Lee S. A rectifier for piezoelectric energy harvesting system with series synchronized switch harvesting inductor,” in 2013 IEEE Asian Solid-State Circuits Conference (ASSCC). ieeexplore.ieee.org, Nov. 2013, pp. 269–272.
124. L. Suganthi, S. Iniyan, A.A. Samuel, Applications of fuzzy logic in renewable energy systems – a review, *Renewable Sustainable Energy Rev.* 48 (2015) 585–607.
125. G. Zhang, S. Gao, H. Liu, A utility piezoelectric energy harvester with low frequency and high-output voltage: theoretical model, experimental verification and energy storage, *AIP Adv.* 6 (2016), 095208.
126. T. Oh, S.K. Islam, G. To, M. Mahfouz, Powering wearable sensors with a low-power CMOS piezoelectric energy harvesting circuit, 2017 IEEE Int. Symp. Med. Meas. Appl. (2017) 308–313.

127. Nielsen-Lönn, M.; Harikumar, P.; Wikner, J.J.; Alvandpour, A. Design of efficient CMOS rectifiers for integrated piezo-MEMS energy-harvesting power management systems. In Proceedings of the 2015 European Conference on Circuit Theory and Design (ECCTD), Trondheim, Norway, August 2015; pp. 1–4.
128. Sezer, N.; Koç, M. A comprehensive review on the state-of-the-art of piezoelectric energy harvesting. *Nano Energy* 2021, 80, 105567.
129. S. P. Beeby, R. N. Torah, and et al. “A micro electromagnetic generator for vibration energy harvesting,” *J. Microm. Microeng.*, 2007, vol. 17, no. 7, pp. 1257–1265.
130. Lallart M., Garbuio L., Petit L., Richard C. and Guyomar D. Double synchronized switch harvesting (DSSH): A new energy harvesting scheme for efficient energy extraction. *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control*, 2008, vol 55, pp. 2119–2130.
131. Badr A.O., Lou E., Tsui Y.Y. and Moussa W.A. A high efficiency AC/DC NVC-PSSHI electrical interface for vibration-based energy harvesters. *IEEE Trans. Circuits Syst. I Regul. Pap.*, 2019, vol 67, pp. 346–355.
132. D’hulst, R., Sterken T., Puers R., Deconinck G. and Driesen J. Power processing circuits for piezoelectric vibration-based energy harvesters. *IEEE Trans. Ind. Electron.*, 2010, vol 57, pp. 4170–4177.
133. Wu L., Do X.D., Lee S.G. and Ha, D.S. A self-powered and optimal SSHI circuit integrated with an active rectifier for piezoelectric energy harvesting. *IEEE Trans. Circuits Syst. I Regul. Pap.*, 2016, vol 64, pp. 537–549.
134. Mair D. and et al. Numerical Optimization of a Fully Cross-Coupled Rectifier Circuit for Wireless Passive Ultra Low Power Sensor Nodes. *Sensors*, 2019, vol 19, 4527.
135. Liu Y. and et al. Piezoelectric energy harvesting for self-powered wearable upper limb applications. *Nano Select*, 2021, vol 2, pp. 1459–1479.
136. Wang X. and et al. Self-Powered piezoelectric and thermoelectric energy simultaneous extraction interface circuit based on double stack resonance, *IEEE Trans. Ind. Electron.*, 2020, vol. 67, no. 6, pp. 4567–4577.

137. Y.C. Hsieh, J.J. Chen, H.S. Chen, W.J. Wu, An integrated circuit design of high efficiency Parallel-SSHI rectifier for piezoelectric energy harvesting, *J. Phys. Conf. Ser.* 773 (2016), 012029.

138. C.-H. Chen, H.-C. Chen, Y.-S. Huang, P.-H. Hsieh, P.-H. Wu, Y.-C. Shu, A series-SSHI- ϕ interface circuit for piezoelectric energy harvesting with 163% improvement in extracted power at off-resonance, 2016 IEEE Asian Solid-State Circuits Conf., IEEE (2016) 29–32.

139. A. Badel and et al. Nonlinear Conditioning Circuits for Piezoelectric Energy Harvesters, in: E. Blokhina, A.E. Aroudi, E. Alarcon, D. Galayko (Eds.), *Nonlinearity Energy Harvest. Syst.*, Springer International Publishing, 2016, pp. 321–359.

140. Emmanuelle Arroyo and Adrien Badel. Electromagnetic vibration energy harvesting device optimization by synchronous energy extraction. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2011, vol 171(2), pp.266–273.

141. Alexis Brenes, Elie Lefeuvre, Seonho Seok, and Chan-Sei Yoo. Tunable unipolar synchronized electric charge extraction strategy for piezoelectric energy harvesting. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2019, vol 30(11), pp.1629–1638.

142. Giulia Lombardi and Mickaël Null Lallart. Synchronous electric charge and induced current extraction (SECICE): a unified nonlinear technique combining piezoelectric and electromagnetic harvesting., *Smart Materials and Structures*, 2021, vol 30 (2), pp.25-29.

143. Linglong Gao and et al A Self-Sensing Synchronous Electric Charge Extraction (SECE) Solution for Piezoelectric Energy Harvesting Enhancement, *EEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*, 2021, pp.1393-1397.

144. E Lefeuvre, A Badel, A Brenes, S Seok, M Woytasik, and CS Yoo. Analysis of piezoelectric energy harvesting system with tunable SECE interface. *Smart Materials and Structures*, 2017, vol 26(3), pp.35-65.

145. Elie Lefeuvre, Adrien Badel, Claude Richard, and Daniel Guyomar. Piezoelectric energy harvesting device optimization by synchronous electric charge

extraction. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2005, vol 16(10), pp. 865–876.

Акт внедрения



ООО «Марлин-Юг»
 Российская Федерация, 299053, г. Севастополь,
 ул. Ванюленчука, зд. 33Т, ком. 404
 ИНН 9204016654 | КПП 920001001 | Тел.: +7 978 563 43 35
 E-mail: marlin@marlin-yug.com http://www.marlin-yug.com

Исх. № 03/24-90 от 07.03.2024

АКТ

О применении результатов диссертационной работы Аль-Руфан Фаиз Метаб Муса «Автономные источники питания пьезоэлектрического типа с прямым преобразованием энергии волн в электричество»

Настоящий акт составлен в том, что тема диссертационной работы Аль-Руфан Фаиз Метаб Муса «Автономные источники питания пьезоэлектрического типа с прямым преобразованием энергии волн в электричество» является актуальной для развития современных технологий автономного долговременного мониторинга окружающей среды, а полученные в работе результаты представляют практический интерес и могут быть использованы в научно-производственной деятельности ООО «Марлин-Юг».

Компания «Марлин-Юг» занимается разработкой и производством автономных морских наблюдательных буйев, предназначенных для научно-исследовательского и прикладного мониторинга морской среды и прибрежной атмосферы. Разработанный автором способ создания энергетических систем на основе пьезоэлектрических элементов может быть использован в морских дрейфующих и якорных буйах для реализации источников электропитания, использующих энергию волновых колебаний поплавка буйа на морской поверхности. Эта энергия может быть задействована для питания как отдельных компонентов буйа (датчиков, логгеров, контроллеров, приемо-передающих модемов), так и буйа в целом. Разработанный способ создания энергетических систем может быть использован в процессе проектирования новых типов буйев или же в процессе модернизации уже существующих.

Данный документ подтверждает успешное внедрение результатов исследований, направленных на разработку автономных систем питания для сенсоров и датчиков, работающих в морской среде. В рамках исследования были разработаны передовые пьезоэлектрические схемы, которые эффективно преобразуют механические колебания от волн в электрическую энергию. Это позволяет значительно увеличить автономность систем мониторинга, снизить зависимость от традиционных химических источников электропитания, уменьшить экологическую нагрузку на окружающую среду.

С уважением,
 зам. директора ООО «Марлин-Юг», к.т.н.



Е.Г. Лунев



ALSAKHAA COMPANY
For General Contracting Ltd

شركة السخاء
للمقاولات العامة المحدودة

No.: 114

Data: 21.02.2025

ACT OF IMPLEMENTATION

This act confirms the implementation of the results of Al-Rufae F.M. PhD thesis work titled "AUTONOMOUS POWER SUPPLIES OF PIEZOELECTRIC TYPE FOR DIRECT CONVERSION OF WAVE ENERGY INTO ELECTRICITY".

This document certifies the successful implementation of research outcomes from the PhD thesis titled "Autonomous power supplies of piezoelectric type for direct conversion of wave energy into electricity" by Dr. Al-Rufae Faez Metab Mousa. The research has pioneered advanced piezoelectric circuits engineered to convert mechanical energy from ocean waves into sustainable electrical power, enabling self-sustaining operation of marine sensors and transducers. By eliminating reliance on conventional batteries, this innovation significantly extends the autonomy of marine monitoring systems, reduces maintenance costs, and minimizes environmental impact. The work aligns with global sustainability goals, advancing renewable energy solutions for offshore and underwater applications.



Munther Mohammed abbas

+964 - 780 918 7250 / +964 - 780 448 47399

ceo@alsakhaagroup.com / info@alsakhaagroup.com

Main Office : Baghdad - Alwathiq Sq.

www.alsakhaagroup.com



HANDIEST AL MODN AL ARABIA
FOR GENERAL CONTRACTING CO.,LTD

شركة هندسة المدن العربية
للمقاولات العامة المحدودة

No.: 304

Data: 03.03.2025

ACT

This act confirms the implementation of the results of Al-Rufae Faez Metab Mousa PhD thesis work titled "AUTONOMOUS POWER SUPPLIES OF PIEZOELECTRIC TYPE FOR DIRECT CONVERSION OF WAVE ENERGY INTO ELECTRICITY".

This document confirms the successful application of research findings focused on developing self-sustaining power systems for sensors and transducers operating in marine environments. The research has led to the creation of advanced piezoelectric circuits that effectively convert mechanical energy from ocean waves into electrical power. This innovation substantially enhances the autonomy of marine monitoring systems and reduces reliance on conventional batteries.



Authorized manager

Canaan Al Shamry

العراق / بغداد - ساحه الواثق
IRAQ / Baghdad- Alwathiq Sq.
+964 - 780 914 5598 / +964 - 773 225 0594
handiestalmodon@gmail.com

No.:134

Data: 08.03.2025

ACT

This document certifies the successful implementation of research outcomes from the PhD thesis titled "AUTONOMOUS POWER SUPPLIES OF PIEZOELECTRIC TYPE FOR DIRECT CONVERSION OF WAVE ENERGY INTO ELECTRICITY" by Al-Rufae F.M. The research has developed advanced piezoelectric circuits that convert ocean wave energy into sustainable electrical power, enabling long-term, autonomous operation of environmental sensors and transducers in marine environments. By eliminating reliance on conventional batteries, this innovation enhances the reliability of environmental monitoring systems, reduces maintenance costs, and supports scalable integration into scientific and industrial workflows. The results are of direct practical interest to modernizing autonomous monitoring technologies and align with our company's goals for sustainable, efficient offshore and underwater operations.



Khaled Hadi Hussain

E-mail : tolocompany17@gmail.com

+9647821666900

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

- ВИЭ – возобновляемых источников энергии
- ВлЭ – Волновая энергия
- ПЭВ – Преобразования энергии волн
- ПЭ – Пьезоэлектрический элемент
- ПЭС – Пьезоэлектрические системы
- ПВДФ – Поливинилиденфторид
- ППЭ – Погружной пьезоэлектрический элемент
- НПЭ – Непогружной пьезоэлектрический элемент
- ПМВ – Полный мостовой выпрямитель
- Ст-ПМВ – Стандартный полный мостовой выпрямитель
- КМОПВ – Комплементарный металл-оксид-полупроводниковый выпрямитель
- СКИ – Схема синхронизированного коммутатор с индуктором
- П-СКИ – Параллельная схема синхронизированного коммутатор с индуктором
- С-СКИ – Последовательная схема синхронизированного коммутатор с индуктором
- СИЭЗ – Схема синхронного извлечения электрического заряда
- СИЭЗопт – Оптимальная схема синхронного извлечения электрического заряда
- СИЭЗс – Схема синхронного извлечения электрического заряда с самопитанием
- СИЭЗопт-с – Оптимальная схема синхронного извлечения электрического заряда с самопитанием

Код Matlab

```

% MATLAB Code to plot supercapacitor and battery charging vs time (partial recovery only)
% Supercapacitor Parameters:
C = 0.05; % Capacitance in Farads (50 mF)
Vmax = 10; % Max voltage in Volts
eta = 0.9; % Charging efficiency
% Supercapacitor Energy needed to fully charge:
E_sc_required = 0.5 * C * Vmax^2; % in Joules
% Power sources in Wh/day
power_wh = [1.5, 5.6];
labels = {'1.5 Wh/day', '5.6 Wh/day'};
colors = ['b', 'r'];
% Time vector for supercapacitor (seconds)
t_sc = linspace(0, 200, 1000); % up to 200 seconds
figure;
subplot(3,1,1);
hold on;
for i = 1:length(power_wh)
    E_day = power_wh(i) * 3600; % Convert Wh to J
    P_input = (E_day / 86400) * eta; % Average power in W
    E = P_input * t_sc;
    V = sqrt(2 * E / C);
    V(V > Vmax) = Vmax;
    plot(t_sc, V, 'Color', colors(i), 'LineWidth', 2, 'DisplayName', labels{i});
end
xlabel('Time (s)'); ylabel('Voltage (V)');
title('Supercapacitor Charging vs Time');
grid on; legend; hold off;
% Battery Parameters:
% Параметры
eta = 0.9; % КПД зарядки
E_daily_Wh = 2.4; % Суточная потеря батареи (Вт·ч)
E_daily_J = E_daily_Wh * 3600; % В Джоулях
% Источники энергии
sources_Wh = [1.5, 5.6];
labels = {'1.5 Wh/day', '5.6 Wh/day'};
colors = ['b', 'r'];
% Время (часы)
t = linspace(0, 12, 1000); % до 12 часов
% Построение графика
figure;
hold on;
for i = 1:length(sources_Wh)
    E_source_J = sources_Wh(i) * 3600 * eta;
    P_available = E_source_J / (6 * 3600); % Вт
    E_rec = P_available * (t * 3600); % Накопленная энергия (Дж)
    E_rec(E_rec > E_daily_J) = E_daily_J; % Ограничиваем до суточной потребности

```

```

percent = (E_rec / E_daily_J) * 100;
plot(t, percent, 'Color', colors(i), 'LineWidth', 2, 'DisplayName', labels{i});
end
xlabel('Время (часы)');
ylabel('Восстановление заряда (%)');
title('Восстановление заряда аккумулятора (ежедневное потребление)');
grid on;
legend('show');

```

%Evaluation of Charging Efficiency for 100Ah and 20Ah Batteries

```

% Inputs
battery1_capacity = 100; % Battery 1 capacity (Ampere-hour)
battery2_capacity = 20; % Battery 2 capacity (Ampere-hour)
voltage_battery1 = 12; % Voltage of battery 1
voltage_battery2 = 12; % Voltage of battery 2
% Calculate energy required to fully charge each battery (Watt-hour)
energy_battery1 = voltage_battery1 * battery1_capacity; % Energy for battery 1
energy_battery2 = voltage_battery2 * battery2_capacity; % Energy for battery 2
% Energy sources data (in Watt-hour)
source1_energy = 1.5; % Energy from source 1 (Watt-hour)
source2_energy = 5.6; % Energy from source 2 (Watt-hour)
% Charging rate for each source (Watt)
source1_power = 1.5; % Power of source 1 (W)
source2_power = 5.6; % Power of source 2 (W)
% Time required to charge each battery using each source
time_source1_battery1 = energy_battery1 / source1_power; % Charging time using source 1 for
battery 1
time_source2_battery1 = energy_battery1 / source2_power; % Charging time using source 2 for
battery 1
time_source1_battery2 = energy_battery2 / source1_power; % Charging time using source 1 for
battery 2
time_source2_battery2 = energy_battery2 / source2_power; % Charging time using source 2 for
battery 2
% Time required when using both sources simultaneously
combined_power = source1_power + source2_power; % Total power when both sources are used
time_combined_battery1 = energy_battery1 / combined_power; % Charging time for battery 1
using both sources
time_combined_battery2 = energy_battery2 / combined_power; % Charging time for battery 2
using both sources
% Time range for plotting
max_time = max([time_source1_battery1, time_source2_battery1, time_combined_battery1, ...
               time_source1_battery2, time_source2_battery2, time_combined_battery2]); % Maximum
time
time = 0:0.1:max_time; % Time vector (hours)
% Charging profiles for battery 1
charge_source1_battery1 = min(source1_power * time, energy_battery1);
charge_source2_battery1 = min(source2_power * time, energy_battery1);
charge_combined_battery1 = min(combined_power * time, energy_battery1);

```

```

% Charging profiles for battery 2
charge_source1_battery2 = min(source1_power * time, energy_battery2);
charge_source2_battery2 = min(source2_power * time, energy_battery2);
charge_combined_battery2 = min(combined_power * time, energy_battery2);
% Percentage charge for battery 1
percent_charge_source1_battery1 = (charge_source1_battery1 / energy_battery1) * 100;
percent_charge_source2_battery1 = (charge_source2_battery1 / energy_battery1) * 100;
percent_charge_combined_battery1 = (charge_combined_battery1 / energy_battery1) * 100;
% Percentage charge for battery 2
percent_charge_source1_battery2 = (charge_source1_battery2 / energy_battery2) * 100;
percent_charge_source2_battery2 = (charge_source2_battery2 / energy_battery2) * 100;
percent_charge_combined_battery2 = (charge_combined_battery2 / energy_battery2) * 100;
% Plotting
figure;
% Plot for Battery 1 - Energy
subplot(3, 2, 1);
plot(time, charge_source1_battery1, 'r', 'LineWidth', 1.5); hold on;
plot(time, charge_source2_battery1, 'b', 'LineWidth', 1.5);
plot(time, charge_combined_battery1, 'g', 'LineWidth', 1.5);
xlabel('Time (hours)');
ylabel('Charged Energy (Wh)');
title('Charging Time vs Energy for Battery 1');
legend('Source 1 (1.5 W)', 'Source 2 (5.6 W)', 'Both Sources');
grid on;
% Plot for Battery 1 - Percentage
subplot(3, 2, 3);
plot(time, percent_charge_source1_battery1, 'r', 'LineWidth', 1.5); hold on;
plot(time, percent_charge_source2_battery1, 'b', 'LineWidth', 1.5);
plot(time, percent_charge_combined_battery1, 'g', 'LineWidth', 1.5);
xlabel('Time (hours)');
ylabel('Charge Percentage (%)');
title('Percentage Charge for Battery 1');
legend('Source 1 (1.5 W)', 'Source 2 (5.6 W)', 'Both Sources');
grid on;
% Plot for Battery 2 - Energy
subplot(3, 2, 2);
plot(time, charge_source1_battery2, 'r', 'LineWidth', 1.5); hold on;
plot(time, charge_source2_battery2, 'b', 'LineWidth', 1.5);
plot(time, charge_combined_battery2, 'g', 'LineWidth', 1.5);
xlabel('Time (hours)');
ylabel('Charged Energy (Wh)');
title('Charging Time vs Energy for Battery 2');
legend('Source 1 (1.5 W)', 'Source 2 (5.6 W)', 'Both Sources');
grid on;
% Plot for Battery 2 - Percentage
subplot(3, 2, 4);
plot(time, percent_charge_source1_battery2, 'r', 'LineWidth', 1.5); hold on;
plot(time, percent_charge_source2_battery2, 'b', 'LineWidth', 1.5);
plot(time, percent_charge_combined_battery2, 'g', 'LineWidth', 1.5);

```

```
xlabel('Time (hours)');
ylabel('Charge Percentage (%)');
title('Percentage Charge for Battery 2');
legend('Source 1 (1.5 W)', 'Source 2 (5.6 W)', 'Both Sources');
grid on;
% Output results to Command Window
fprintf('Energy required to charge Battery 1: %.2f Wh\n', energy_battery1);
fprintf('Energy required to charge Battery 2: %.2f Wh\n', energy_battery2);
fprintf('Time to charge Battery 1 with Source 1 only: %.2f hours\n', time_source1_battery1);
fprintf('Time to charge Battery 1 with Source 2 only: %.2f hours\n', time_source2_battery1);
fprintf('Time to charge Battery 1 with both sources: %.2f hours\n', time_combined_battery1);
fprintf('Time to charge Battery 2 with Source 1 only: %.2f hours\n', time_source1_battery2);
fprintf('Time to charge Battery 2 with Source 2 only: %.2f hours\n', time_source2_battery2);
fprintf('Time to charge Battery 2 with both sources: %.2f hours\n', time_combined_battery2);
```