

ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого
Президента России Б.Н. Ельцина»



На правах рукописи

АЛЬ-РУФАИ ФАИЗ МЕТАБ МУСА

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

2.4.5. Энергетические системы и комплексы
2.4.2. Электротехнические комплексы и системы

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Екатеринбург – 2025

Работа выполнена на кафедре «Энергетические системы и комплексы традиционных и возобновляемых источников» ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет».

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор,
Якимович Борис Анатольевич

Официальные оппоненты: **Слепцов Владимир Владимирович**, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)», заведующий кафедрой радиоэлектроники, телекоммуникаций и нанотехнологий;

Юферев Леонид Юрьевич, доктор технических наук, доцент, ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ», г. Москва, главный научный сотрудник отдела энергообеспечения АПК;

Муртазаев Эннан Рустамович, кандидат технических наук, ФГАОУ ВО «Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского», г. Симферополь, доцент кафедры электроэнергетики и электротехники Физико-технического института.

Защита диссертации состоится «10» июня 2025 г. в 14:30 ч на заседании диссертационного совета УрФУ 2.4.07.17 по адресу: 620062, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19, ауд. И-420 (зал Ученого совета).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина» <https://dissovet2.urfu.ru/mod/data/view.php?d=12&rid=7160>

Автореферат разослан «_____» _____ 2025 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Ташлыков Олег Леонидович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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 морских волн 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. Разработанная 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.

Научные специальности, которым соответствует диссертация. Тематика и содержание работы соответствуют паспорту специальности **2.4.5. Энергетические системы и комплексы.** Область исследования соответствует пункту 6 паспорта: «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»;

и специальности **2.4.2. Электротехнические комплексы и системы.** Область исследования соответствует пункту 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 статей международных научно-практических конференций и научных журналов.

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.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Введение. В данном разделе обоснована актуальность представленной диссертационной работы, сформулирована её цель и определены ключевые задачи исследования.

Первая глава посвящена анализу научных трудов, связанных с исследованием конструкций, принципов функционирования существующих типов волновых электростанций. Также представлен 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 показатели 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 выполнен анализ методов использования пьезоэлектрических преобразователей для преобразования энергии из волн. Особое внимание уделено краткому описанию проблемы энергосбережения в маломощном автономном морском оборудовании, которое использует аккумуляторы в качестве единственного источника питания, что существенно снижает сроки эксплуатации. Предложено решение данной проблематики путем создания системы преобразования энергии волн с использованием пьезоэлектрических элементов и их интерфейсных схем. Преимуществами предложенного решения стали – лёгкая интеграция пьезоэлементов в оборудование с низким энергопотреблением и компактные размеры.

Вторая глава посвящена генерации электроэнергии пьезоэлектрическими элементами (ПЭ) за счет морских волн. Были разработаны две модели: модель погруженного пьезоэлемента (ППЭ), взаимодействующего непосредственно с волнами, и модель непогруженного пьезоэлемента (НПЭ), с передачей колебаний через механический преобразователь. Моделирование взаимодействия жидкостного потока с пьезоэффектом выполнено в программной среде COMSOL Multiphysics, а полученные данные сопоставлены с результатами экспериментов для проверки их достоверности. Для оптимизации вычислительных ресурсов было принято решение использовать двухмерную модель, представленную на рисунке 1. В которой для корректного учета границ раздела сред, таких как поверхность пьезоэлемента, была использована сетка, состоящая из порядка 10000 элементов. В

ходе численного анализа скорость водяного потока варьировалась от 0 – до 2,8 м/с в течение временного интервала от 0 – до 0,38 секунды, затем плавно снижаясь до нулевого значения к моменту времени 0,6 секунды. Такая тенденция изменения скорости приводило к формированию максимального напряжения спустя 0,38 секунды, при этом величина выходной мощности пьезоэлемента менялась аналогичным образом.

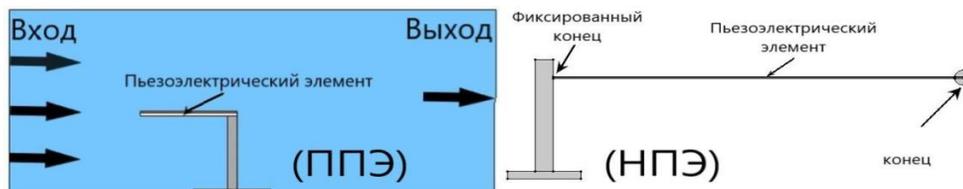


Рисунок 1 2D-Модели ПЭ, разработанная в COMSOL

Результаты моделирования ППЭ продемонстрировали, что изменение скорости потока воды формирует пик напряжения, достигающий уровня 5,2 В (рис. 2). При этом выходная мощность пьезоэлемента составляет 0,135 мВт.

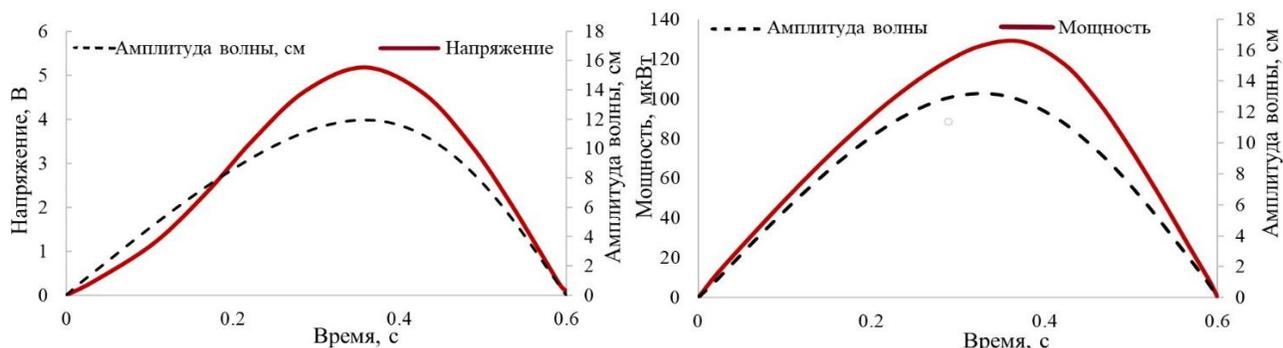


Рисунок 2 Изменение напряжения и выходной мощности за время одной волны

На рисунке 3 представлены графики выходных параметров напряжения и мощности для НПЭ.

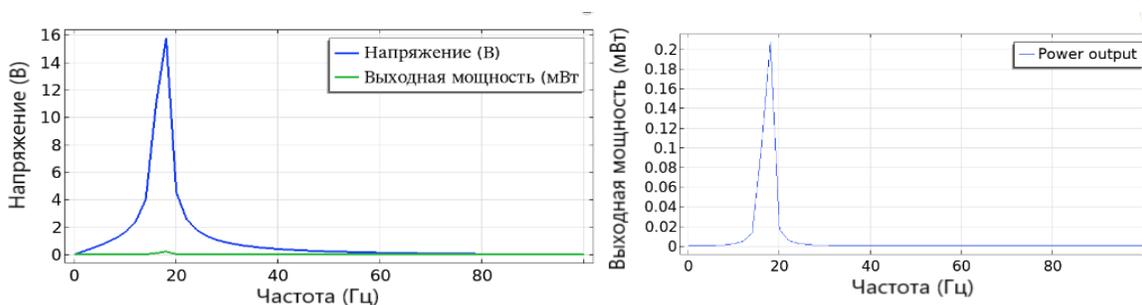


Рисунок 3 Напряжение и выходная мощность НПЭ

Согласно данным, представленным на рисунке 3, максимальная величина напряжения и выходной мощности составили 15,8 В и 0,25 мВт соответственно.

Для изучения процесса преобразования энергии морских волн использовался экспериментальный волновой канал. Экспериментальная установка включала следующие ключевые компоненты:

- 1- Волновой канал размером 90×90×300 см для испытаний (рис. 4).
- 2- Пьезоэлектрический элемент ПВДФ (рис. 5).
- 3- Сферический буй с диаметром 30 см.
- 4- Блок измерений, состоящий из ноутбука, датчиков и регистратора данных.



Рисунок 4 Принципиальная схема экспериментальной установки

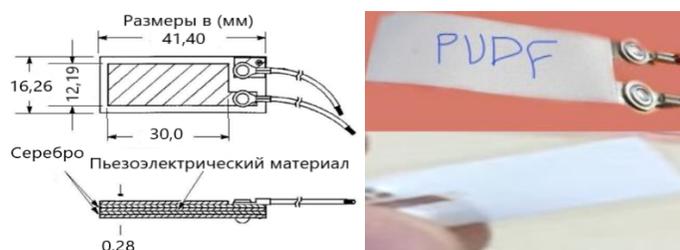


Рисунок 5 Пьезоэлектрический элемент (ПВДФ), используемый в исследовании

Экспериментальные результаты для ППЭ, фиксирующие напряжение пьезоэлектрического элемента равному 4,9 В и 0,13 мВт, как показано на рисунке 6.

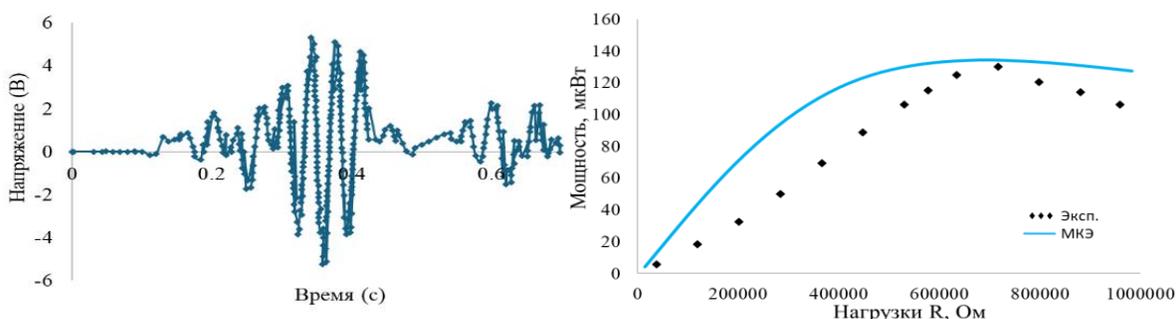


Рисунок 6 Изменение выходной мощности в зависимости от сопротивления

В процессе проведения эксперимента для НПЭ исследовались пять частот работы затвора (10, 20, 30, 40, 50 Гц). Анализировались такие параметры, как высота волны (H), её период (T) и длина (L), при этом предполагалось, что высота волны существенно меньше длины волны и глубины воды. Данные, представленные в таблице 1 и на рис. 7, фиксируют тенденцию, когда более высокие частоты волн соответствуют более коротким длинам волн, которые, в свою очередь, усиливают движение элемента, что приводит к увеличению механического воздействия на пьезоэлемент, а впоследствии – к повышению эффективности генерации энергии.

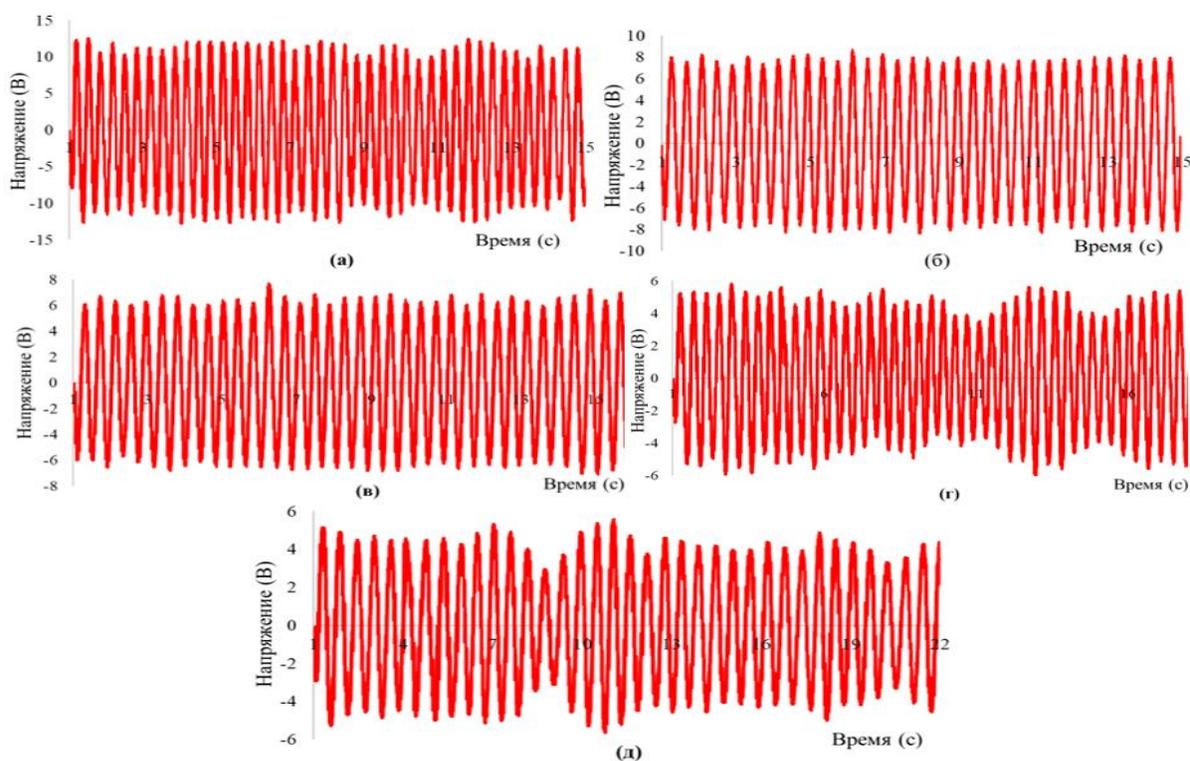


Рисунок 7 Выходное напряжение пьезоэлектрической системы при различных частотах генератора волн (а) 50 Гц (б) 40 Гц (в) 30 Гц (г) 20 Гц (д) 10 Гц

Таблица 1 Влияние частоты затвора 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

Полученные экспериментальные результаты для НПЭ, как показано на рисунке 8, показали максимальную выходную мощность порядка 0,2 мВт.

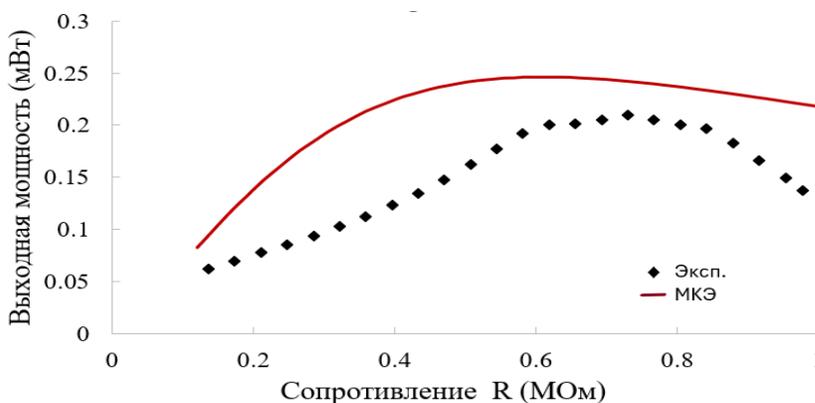


Рисунок 8 Изменение выходной мощности в зависимости от сопротивления

При воздействии волн, буй в волновом канале совершает движения преимущественно в вертикальной плоскости. Теоретические расчеты показали, что минимальная и максимальная мощности волны составляют 36,5 Вт и 7,56 Вт соответственно при разных частотах затвора (50 Гц и 10 Гц). Экспериментально было установлено, что система достигает максимальной выходной мощности 0,2 мВт при мощности волны 36,5 Вт на частоте 50 Гц.

Интеграция пьезоэлементов в конструкции морских буйев является эффективным решением, представляющим значительный потенциал для

использования в качестве источника энергии для питания буёв и датчиков в отдалённых морских районах.

Анализ полученных данных демонстрирует, что модель НПЭ обеспечивает выходную мощность примерно в 1,5 раза больше, чем модель ППЭ. Наблюдаемая разница в производительности указывает на важность конструктивных особенностей установки для повышения эффективности работы пьезоэлектрических элементов, выделяя непогружную конфигурацию как более предпочтительный и перспективный вариант для дальнейшего применения.

Третья глава данной диссертационной работы посвящена разработке и исследованию моделей схем преобразования энергии с использованием пьезоэлектрических элементов, предназначенных для сбора энергии от морских волн. Для выполнения моделирования использовалась специализированная программа имитационного моделирования, которая позволила проанализировать различные типы схем преобразования энергии, представленных на рисунке 9.

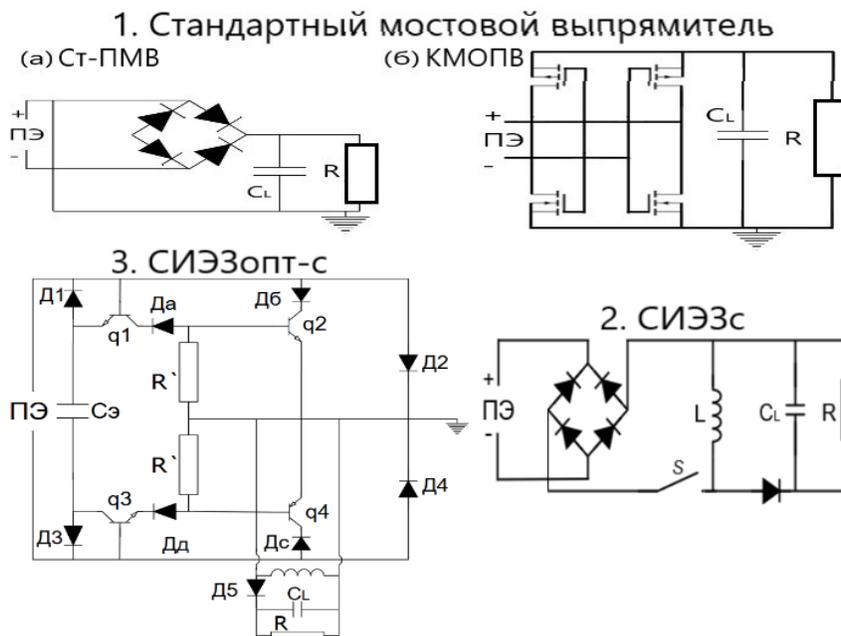


Рисунок 9 Принципиальные электрические схемы, используемые в исследовании

Основная цель заключалась в выборе оптимальной схемы для увеличения эффективности процесса сбора энергии от вибрационных воздействий.

Рассматривались стандартные схемы выпрямления (Ст-ПМВ), синхронное извлечение электрического заряда (СИЭЗ), а также их усовершенствованные модификации, направленные на снижение энергетических потерь и повышение эффективности электромеханического преобразования. Исследование пьезоэлектрических схем сбора и преобразования энергии часто проводится с использованием симметричных синусоидальных сигналов с частотой, превышающей резонансную частоту системы. В среднем морская волна генерирует сигнал с частотой от 0 до 10 Гц. Для моделирования данного диапазона был создан специальный источник напряжения, генерирующий аналогичные сигналы. В таблице 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. Результаты сравнения различных схем применяемых в исследовании

Параметр	СИЭЗс	SECE _{опт-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 кΩ	> 500 кΩ	>100 кΩ
Сопротивление огибающей ($R_{\text{э}}$)	1,0 кΩ	1200 кΩ	/
Емкость нагрузки (CL)	1 μФ	5 μФ	47 μФ
Емкость огибающей ($C_{\text{э}}$)	300 нФ	100 μФ	/
Выходная мощность	0,05 – 0,22 мВт	0,15 – 0,35 мВт	0,05 – 0,2 мВт
Влияние нагрузки	Стабильная мощность при низком CL и R	Стабильная при низком CL	Стабильная при высокие R

В результате моделирования был сделан вывод, что хотя все схемы могут быть использованы для преобразования энергии волн с применением пьезоэлектрических систем, схема СИЭЗопт-с обеспечивает наиболее эффективное преобразование энергии и стабильный выходной сигнал. Таким образом, данная схема является наиболее перспективной для маломощного морского оборудования, таких, как – морские буи, благодаря повышенной эффективности сбора энергии и меньшего количества компонентов.

Четвёртая глава посвящена экспериментальному исследованию системы, предназначенной для получения и накопления энергии с использованием пьезоэлектрических элементов в морских буях. Данная глава начинается с экспериментального анализа различных схем преобразования энергии на базе пьезоэлектрических элементов. В ходе экспериментов исследовались три основных типа схем преобразования энергии: стандартная схема полного мостового выпрямителя (Ст-ПМВ), схема синхронного извлечения электрического заряда с автопитанием (СИЭЗс) и оптимизированная схема синхронного извлечения электрического заряда с автопитанием (СИЭЗопт-с). Целью анализа являлось изучение влияния параметров компонентов на выходную мощность и определение их оптимальных значений для достижения максимального уровня энергопроизводительности.

На рисунке 10 представлена экспериментальная установка, включающая пьезоэлектрический элемент из поливинилиденфторида (ПВДФ), закрепленный на вибростенде для воспроизведения вибрационных воздействий. Пьезоэлектрический элемент был подключен к схеме на входе, а на выходе схемы устанавливался программируемый резистор для варьирования значений сопротивления в процессах испытаний. Все измеряемые данные регистрировались устройством DAQ (NI 9229). Электронный коммутатор состоял из транзисторов MOSFET, диодов и индуктора, характеристики которых приведены в таблице 2.

Таблица 2 Компоненты электронного коммутатора

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

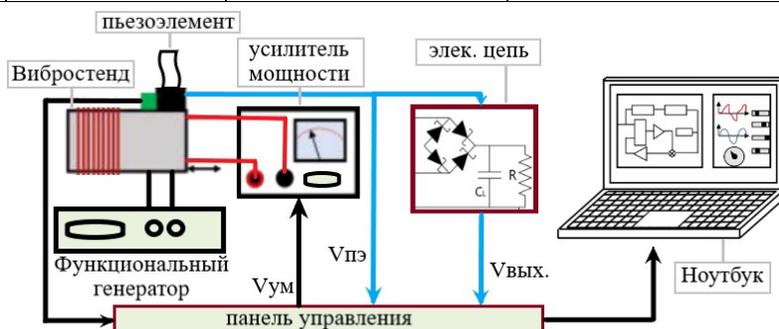


Рисунок 10 Принципиальная схема экспериментальной установки

Аналогично данным моделирования, экспериментальные результаты были получены при использовании индуктивности нагрузки $L=20$ мГн, емкости нагрузки $C_L=25$ мкФ и сопротивления нагрузки $R=8$ МΩ. Для оптимизации характеристик были протестированы различные комбинации подтягивающих резисторов R' и огибающих конденсаторов $Cэ$. Результаты эксперимента, представлены на рисунке (11), свидетельствуют о том, что для каждого значения R' выходная мощность первоначально возрастает с увеличением $Cэ$, а затем снижается. Оптимальный режим достигается при $Cэ=100$ нФ и $R'=1200$ кΩ, при котором выходная мощность остается стабильной, а емкость переходов транзисторов получает достаточное время для зарядки и разрядки. Полученные результаты совпадают с прогнозируемыми данными моделирования.

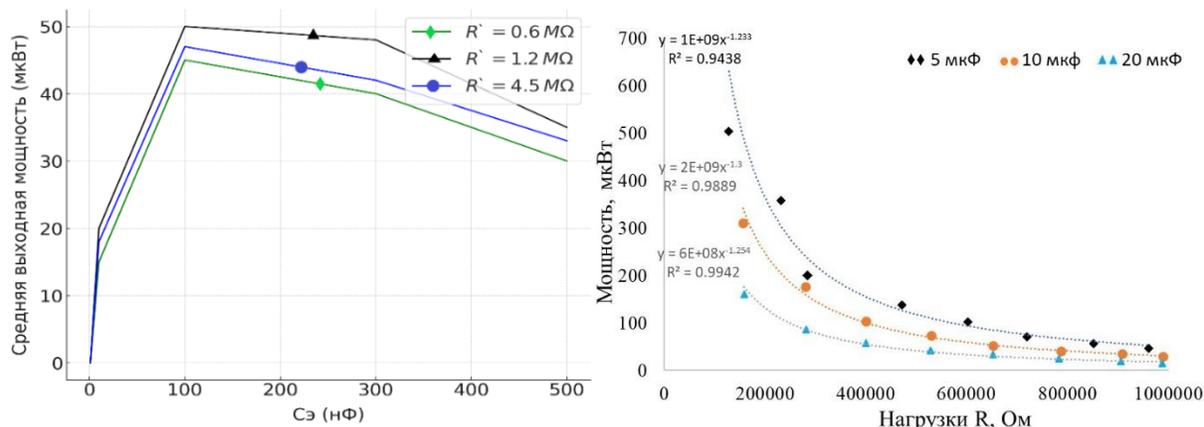


Рисунок 11 Изменение выходной мощности СИЭЗоптс

(а) в зависимости от параметров $C_э$ и R' (б) в зависимости от параметров C_L и R

Исследование влияния отдельных электронных компонентов на выходную мощность единичного пьезоэлектрического элемента показало важность конфигурации множества таких элементов для повышения общей выходной мощности (см. рисунок 12).

Подключались несколько пьезоэлектрических элементов согласно двум вариантам соединения: параллельном и последовательном. Анализ ограничивался системами Ст-ПМВ и СИЭЗопт-с, которые ранее продемонстрировали хорошие показатели. Для каждой из схем были проведены испытания, направленные на определение выходной мощности при различных значениях сопротивления нагрузки, что представлено на рисунке 12.

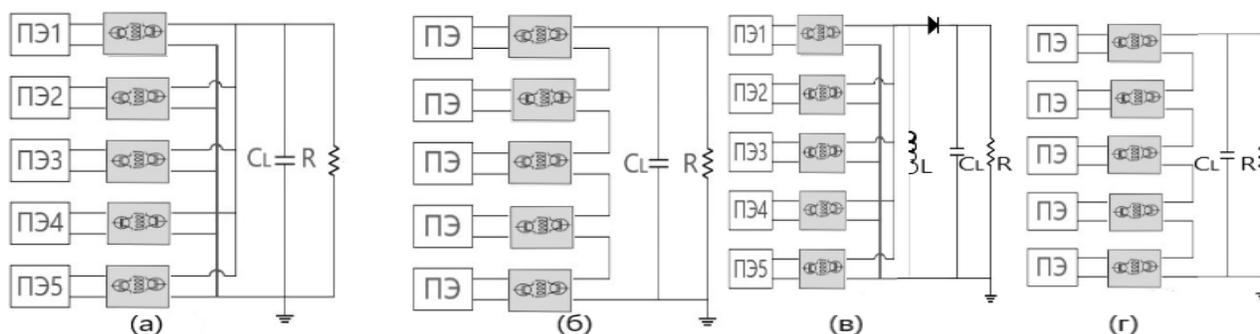


Рисунок 12 Принципиальная схема пяти ПЭ с цепями: (а) Параллельная Ст-ПМВ, (б) Последовательная Ст-ПМВ, (в) Параллельная СИЭЗопт-с, (г) Последовательная СИЭЗопт-с.

На рисунке 13(а) показано, что параллельная схема СТ-ПМВ обладает большей выходной мощностью по сравнению с последовательной, что обусловлено увеличением тока через нагрузку в параллельном соединении.

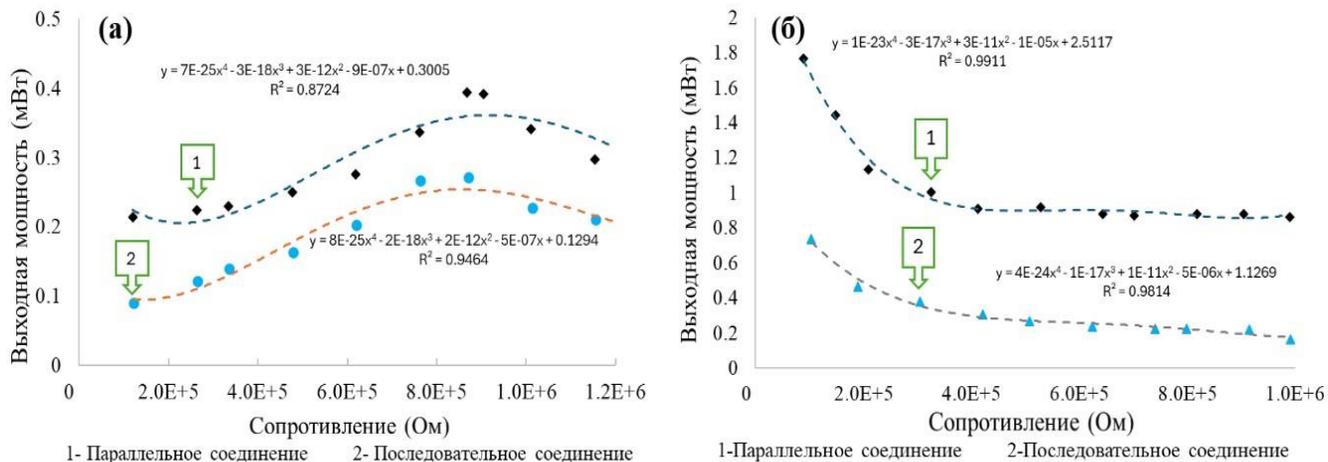


Рисунок 13 Изменение выходной мощности в зависимости от типа соединения цепей (а) Ст-ПМВ (б) СИЭЗопт-с

Результаты, представленные на рисунке 13(б), выявили выходные характеристики пяти пьезоэлектрических элементов с системой СИЭЗопт-с расположенных как в последовательной, так и в параллельной конфигурациях. Видно, что при малых нагрузочных сопротивлениях параллельная конфигурация обеспечивала большую выходную мощность. При емкости нагрузки 5 мкФ максимальная устойчивая выходная мощность последовательной схемы составила 400 мкВт, тогда как параллельная схема достигла устойчивого значения 950 мкВт.

Предлагаемая система сбора энергии для морского буя ориентирована на интеграцию сенсоров и энергозаборных устройств, где основной акцент сделан на использование энергии морских волн посредством пьезоэлектрических элементов. Архитектурная схема, представленная на рисунке 14, отображает путь передачи энергии от пьезоэлектрического элемента к остальным компонентам системы буя. Механическая энергия волн преобразуется в электричество, которое затем регулируется блоком управления напряжением для поддержания нормальной работы буя. Конструктивная схема предложенного буя на базе пьезоэлектрической системы представлена на рисунке 15.



Рисунок 14 Принципиальная схема предлагаемой системы

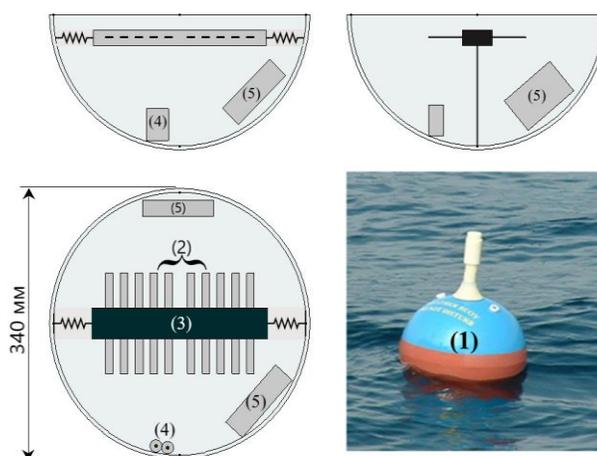


Рисунок 15 Схема буя на ПЭС основе

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

Сравнительный анализ (рис. 16) схем Ст-ПМВ, СИЭЗс и СИЭЗопт-с показал, что схема СИЭЗопт-с обладает наилучшими общими характеристиками с точки зрения уровня выходного напряжения, стабильности регулируемых напряжений и эффективности зарядки аккумуляторов. Несмотря на простоту и экономичность схемы Ст-ПМВ её низкая эффективность сбора энергии и замедленная реакция делают модель менее пригодной для применения в системах, требующих постоянное питание. Схема СИЭЗс является усовершенствованным аналогом, значительно превосходящим Ст-ПМВ, но при этом СИЭЗопт-с демонстрирует более высокие эксплуатационные качества, что делает её оптимальным выбором для морских буёв, работающих на волновой энергии.

Способность схемы СИЭЗопт-с быстро стабилизировать выходное напряжение и эффективно заряжать аккумулятор позволило обеспечить надёжную работу системы даже в изменчивых условиях морской среды, что делает её наиболее эффективным решением для долговременного использования в устройствах сбора морской энергии. Применение данной схемы в конструкции буя обеспечивает повышенную эффективность благодаря ускоренному извлечению накопленного заряда и активации функциональных модулей системы, что в результате, делает её оптимальной для применения морских буев.

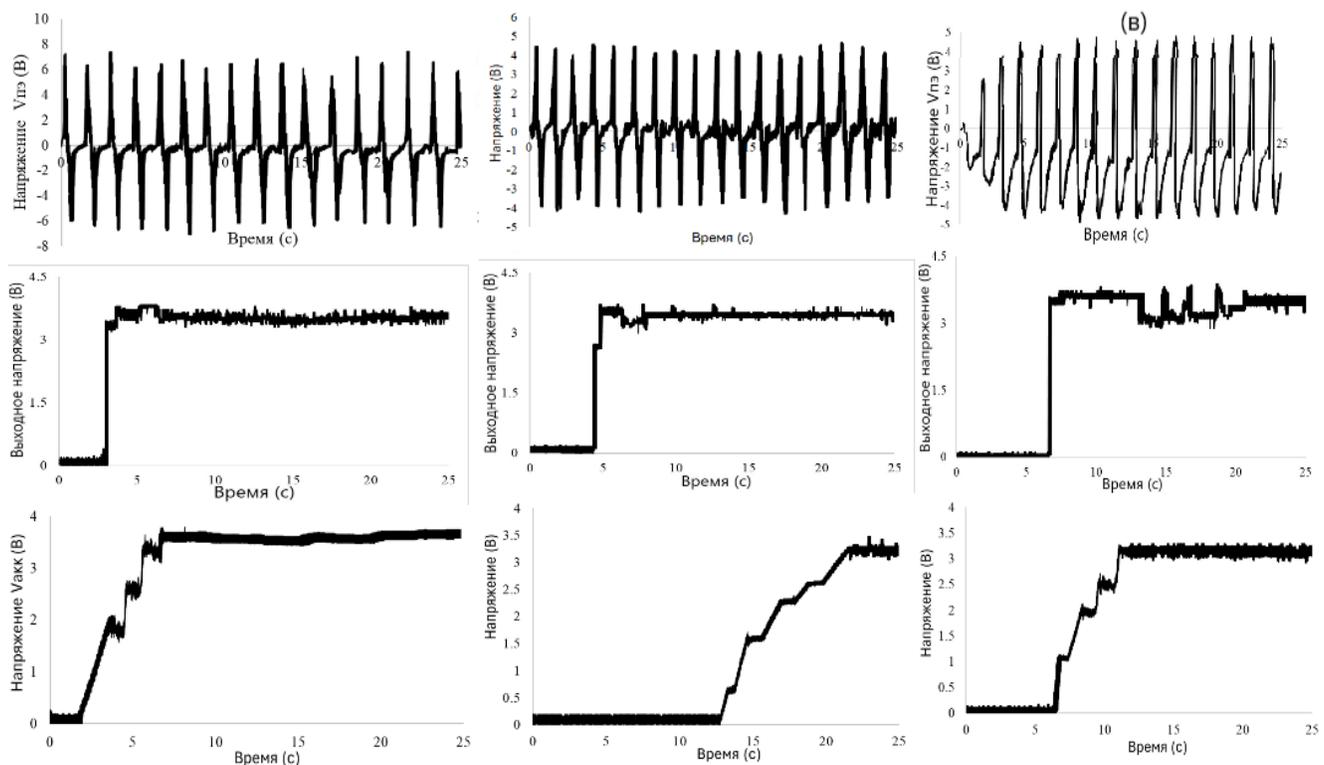


Рисунок 16 Сравнительный анализ цепей (а) СИЭЗопт-с, (б) СИЭЗс и (в) Ст-ПМВ

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Был проведен анализ научных трудов, связанных с исследованием конструкций, принципов функционирования существующих типов волновых электростанций. Выполнен обзор и разработана классификация существующих типов преобразователей энергии волн, определены перспективные проекты их использования. Также были проанализированы гидродинамические параметры

волн у побережья Севастополя. 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.

Основные выводы

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 исследование 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 буях 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 РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи, опубликованные в рецензируемых научных журналах, определенных ВАК РФ и Аттестационным советом УрФУ

1. **Аль-Руфай Фаиз Метаб Муса.** Использование пьезоэлектрических элементов для питания маломощных морских устройств / **Аль-Руфай Фаиз Метаб Муса**, Якимович Б.А., Муровский С.П., Кувшинов В.В., Косий А.Г. // Транспорт Азиатско-Тихоокеанского региона, 2024. № 2(39). С. 5–12. 0,82 п.л./0,33 п.л.; К3.

2. **Аль-Руфай Фаиз Метаб Муса.** Оценка эффективности преобразования энергии морского волнения с использованием пьезоэлектрических элементов / **Аль-Руфай Фаиз Метаб Муса**, Якимович Борис Анатольевич // Международный технический журнал, 2025, №. 1(95). С. 28-36, 0,54 п.л./0,41 п.л.; К2.

3. **Аль-Руфай Ф.М.** Исследование пьезоэлектрических генераторов с использованием схемы синхронизированного извлечения электрического заряда для преобразования энергии / **Аль-Руфай Ф.М.**, Якимович Б.А., Кувшинов В.В., Касницкий А. Д. // Промышленная энергетика, 2025, № 2, С. 10-18. 0,71 п.л./0,36 п.л.; К2.

4. **Фаиз Метаб Муса Аль-Руфай** Анализ схем сбора энергии пьезоэлектрических элементов // Международный технический журнал. 2024. № 5 (93). С. 45–52. 0,41 п.л.; К2.

5. **Аль-Руфай Ф.М.** Разработка и анализ комбинированной энергетической системы на основе пьезоэлектрических элементов / **Аль-Руфай Ф.М.**, Якимович Б.А., Кувшинов В.В., Смирнов В.В. // Промышленная энергетика, 2024, № 3. С. 31-40. 0,67 п.л./0,27 п.л.; К2.

6. **Аль-Руфай Ф.М.** Использование пьезоэлектрических материалов для выработки электроэнергии от механических нагрузок на дорожное покрытие / **Аль-Руфай Ф.М.**, Якимович Б.А., Муровский С.П., Кувшинов В.В., Косий А.Г. //

Транспорт Азиатско-Тихоокеанского региона, 2024, №1(38). С. 5-12. 0,55 п.л./0,28 п.л.; КЗ.

7. Guryev, V. V. The Development of the Optimal Model of Energy Resources Management in Energy Systems of the Republic of Crimea and the Middle East / V. V. Guryev, B. A. Yakimovich, **F.M. Al-Rufae** // Applied Solar Energy. – 2019. – Vol. 55, No. 3. – P. 189-194. 0,33 п.л./0,11 п.л. (Scopus).

8. **Al-Rufae F.M.** Comparative circuit analysis for piezoelectric generators in low-power applications/ **F.M. Al-Rufae**, B.A. Yakimovich, V. V. Kuvshinov//E3S Web Conf., 2024, vol 592, 03010. 0,29 п.л./0,22 п.л. (Scopus)

Публикации в других изданиях

9. **Аль-Руфай Ф.М.** Волновая энергетическая установка на основе пьезоэлектрических преобразователей для питания морских буев» авторов **Ф.М. Аль-Руфай**, Б.А. Якимович, В.В. Кувшинов, В.В. Шаповаленко, А.И. Рыбонька // Энергетические установки и технологии. 2025. Т.11 (1). С. 18-23. 0,36 п.л./0,14 п.л.

10. **Аль-Руфай Ф.М.** Разработка системы преобразования энергии волн для питания морских буев с помощью пьезоэлектрических элементов / **Ф.М. Аль-Руфай**, Б.А. Якимович, В.В. Кувшинов // Инженерный вестник Дона, 2025, №4, 9 с. 0,31 п.л./0,19 п.л.

11. **Al-Rufae Faez Metab Mousa.** Harnessing wave energy for low-power autonomous systems / Материалы Международной научно-практической конференции (Research forum 2025), г. Петрозаводск, февраль, 2025, С. 120 - 125. 0,24 п.л.

12. **Аль-Руфай, Ф.М.** Проектирование и моделирование пьезоэлектрических элементов с помощью COMSOL / **Ф.М. Аль-Руфай**, В.В. Кувшинов, Б.А. Якимович // Сборник статей по материалам международной научно-практической конференции, г. Севастополь, сентября 2023. С. 421-425. 0,23 п.л./0,12 п.л.

13. **Аль-Руфай, Ф.М.** Моделирование пьезоэлектрического элемента для генерации электрической энергии / **Ф.М. Аль-Руфай**, Б.А. Якимович, В.В. Кувшинов // Энергетические установки и технологии. 2023. Т. 9(2). С. 70-74. 0,4 п.л./0,2 п.л.

14. **Аль-Руфай Ф.М.** Разработка методики автоматизированного выбора пьезоэлементов / **Ф.М. Аль-Руфай**, Б. А. Якимович, В. В. Кувшинов // Интеллектуальные системы в производстве. – 2023. – Т. 21, № 2. – С. 93-101. 0,75 п.л./0,45 п.л.

15. **Аль-Руфай, Ф.М.** Исследование технических характеристик пьезоэлемента с помощью программы Matlab / **Ф.М. Аль-Руфай** // Инженерный вестник Дона. – 2023. № 1(97). С. 223-236. 0,37 п.л.

16. **Аль-Руфай Ф.М.М.** Основные положения методики оценки эффективности пьезопреобразователей / **Ф.М.М. Аль-Руфай**, Б. А. Якимович, В. В. Кувшинов // Вестник ИжГТУ имени М.Т. Калашникова. 2023. Т. 26, № 1. С. 28-34. 0,66 п.л./0,40 п.л.

17. **Аль-Руфай Ф.М.** Основные аспекты и перспективы использования пьезоэлектрических устройств / **Ф.М. Аль-Руфай**, В.В. Кувшинов // **Материалы Международной научно–практической конференции «Перспективные технологии и материалы»**, г. Севастополь, сентября 2022, с 384-388. 0,23 п.л./0,14 п.л.