

ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ

УДК 538.955:621.373

DOI: 10.34680/2076-8052.2025.1(139).123-134

Поступила в редакцию / Received 09.02.2025

ГРНТИ 29.19.37+45.29.31

Специальность ВАК 1.3.8.

Принята к публикации / Accepted 13.03.2025

Научная статья

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА

Мисилин В. А.¹, Кузьмин Е. В.², Петров Р. В.¹

¹ *Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого (Великий Новгород, Россия)*

² *АО «ОКБ-Планета» (Великий Новгород, Россия)*

Аннотация. Статья посвящена исследованию характеристик магнитоэлектрических элементов для магнитоэлектрического синхронного генератора. В рамках исследования были рассмотрены два типа магнитоэлектрических элементов с разными геометрическими размерами 70×12×0,54 мм и 30×10×0,54 мм. Рассматривается влияние размеров магнитоэлектрических элементов генератора на эффективность преобразования. Результаты измерений показывают возможность применения магнитоэлектрических элементов для создания генератора. В статье представлены характеристики элементов в резонансном режиме и нерезонансном режиме. Измерения показали, что на резонансной частоте выходная мощность может значительно увеличиваться. Так, выходная мощность на резонансной частоте около 51 кГц составила 0,9 мВт. Полученные результаты демонстрируют значительный потенциал для использования магнитоэлектрических элементов в генераторах энергии, а использование нескольких таких элементов в резонансном режиме позволит генерировать десятки ватт мощности, что делает такие устройства перспективными для питания энергонезависимых устройств.

Ключевые слова: *магнитоэлектрический генератор, магнитоэлектрические элементы, магнитоэлектрические устройства сбора энергии.*

Для цитирования: Мисилин В. А., Кузьмин Е. В., Петров Р. В. Исследование характеристик магнитоэлектрических элементов магнитоэлектрического синхронного генератора // Вестник НовГУ. 2025. 1 (139). 123–134. DOI: 10.34680/2076-8052.2025.1(139).123-134

Research Article

STUDY OF MAGNETOELECTRIC ELEMENTS CHARACTERISTICS FOR MAGNETOELECTRIC SYNCHRONOUS GENERATOR

Misilin V. A.¹, Kuzmin E. V.², Petrov R. V.¹

¹ *Yaroslav-the-Wise Novgorod State University (Veliky Novgorod, Russia)*

² *JSC "OKB-Planeta" (Veliky Novgorod, Russia)*

Abstract. The paper is devoted to the study of the characteristics of magnetoelectric elements for a magnetoelectric synchronous generator. Two types of ME elements with different geometric dimensions of 70×12×0,54 mm and 30×10×0,54 mm were considered in the framework of the study. The influence of the dimensions of the generator magnetoelectric elements on the conversion efficiency is considered. The measurement results show the possibility of using magnetoelectric elements to create a generator. The article presents the characteristics of the elements in the resonant mode and non-resonant mode. Measurements have shown that at the resonant frequency, the output power can increase significantly. Thus, the output power at the resonant frequency of about 51 kHz was 0,9 mW. The results obtained demonstrate significant potential for using ME elements in energy generators, and the use of several such elements in the resonant mode will allow generating tens of watts of power, which makes such devices promising for powering non-volatile devices.

Keywords: *magnetoelectric generator, magnetoelectric elements, magnetoelectric energy harvesting devices.*

For citation: Misilin V. A., Kuzmin E. V., Petrov R. V. Study of magnetoelectric elements characteristics for magnetoelectric synchronous generator // Vestnik NovSU. 2025. 1 (139). 123–134. DOI: 10.34680/2076-8052.2025.1(139).123-134

Введение

Современное развитие технологий требует создания новых высокоэффективных и компактных источников энергии. Одним из перспективных направлений исследований является использование магнитоэлектрических (МЭ) элементов в качестве ключевых компонентов для генераторов электроэнергии. МЭ элемент – это структура, преобразующая энергию за счет МЭ эффекта. МЭ эффект заключается в возникновении электрической поляризации при воздействии на материал внешнего магнитного поля или возникновении намагниченности при воздействии на материал внешнего электрического поля [1]. Такая структура может быть изготовлена из чередующихся слоев пьезоэлектрического и магнитострикционного материалов, например, с помощью склеивания. В работе рассматриваются характеристики МЭ элементов, которые могут быть применены для использования в МЭ синхронном генераторе.

Актуальность исследования характеристик МЭ элементов обусловлена их возможным использованием в компактных, энергоэффективных и экологически чистых устройствах. Сегодня устройства на основе МЭ эффекта имеют большую перспективу для внедрения [2]. Особый интерес представляют устройства для сбора и генерации энергии. В составе МЭ генератора в качестве основного генерирующего элемента используется МЭ элемент. Такой генератор может быть использован, например, в ветроэнергетических установках, гидрогенераторах, турбогенераторах и электрооборудовании, предназначенных для преобразования механической энергии в электрическую.

В отличие от других устройств сбора энергии предлагаемое устройство имеет ряд преимуществ. Например, по сравнению с солнечными батареями устройство имеет более компактные размеры и не требует для работы энергию солнца и большой площади для размещения. Электромагнитные генераторы характеризуются большим весом и материалоемкостью, в отличие от них МЭ генераторы имеют меньший вес и не имеют в своём составе медных обмоток.

Конструкция МЭ генератора рассмотрена в работе [3], а в устройстве [4] использованы восемь МЭ элементов, изготовленных из пьезоэлектрика ЦТС и аморфного магнитомягкого сплава метглас. Устройство состоит из двух дисков. МЭ элементы закреплены на одном, неподвижном, а магниты закреплены на втором, вращающемся диске. При вращении диска с магнитами на диске с МЭ элементами создается переменное магнитное поле. При частоте переменного магнитного поля около 38 Гц устройство выдает постоянное напряжение около 1,12 В

и ток 3,8 мкА. Общая генерируемая мощность такого устройства составила 4,2 мкВт. Разработанное устройство может быть использовано в конструкциях ветроэлектрогенераторных установок, гидрогенераторов, турбогенераторов и другого электрогенерирующего оборудования.

Работа [5] посвящена разработке МЭ системы, способной вырабатывать электроэнергию из потока воды. Разработанная система представляет собой миниатюрный переносной генератор, использующий механическое воздействие капель воды для выработки электроэнергии. Система состоит из супергидрофобной поверхности с проводящей катушкой, жидкости и супергидрофобной основы из магнитных порошков. При попадании капель на систему магнитный поток в катушке изменяется, что приводит к генерации электроэнергии.

Работа [6] посвящена преобразованию тепловой энергии за счет использования МЭ материалов, обеспечивая быстрый градиент температуры при нагревании, то есть преобразуя солнечную энергию в электрическую. С использованием этих пленок можно создавать генераторы на основе пьезоэлектрического эффекта.

Исследование [7] показало, что при комнатной температуре образцы керамического композита демонстрируют хорошие магнитные и электрические свойства. Сильная МЭ связь была продемонстрирована [8, 9] в различных МЭ системах, включая однофазные объемные или тонкопленочные материалы и объемные или тонкопленочные композиты, такие как пьезоэлектрические / магнитострикционные гетероструктуры.

Статья [10] рассматривает достижения в области магнитострикционных вибрационных энергоустановок, особенно на основе материалов, таких как Terfenol-D и Galfenol, которые обеспечивают высокую плотность энергии по сравнению с другими типами устройств, например, пьезоэлектрическими. Материалы с магнитострикцией, такие как Galfenol и Metglas, могут быть интегрированы в MEMS, что делает их перспективными для будущих исследований. В обзоре представлены различные типы вибрационных устройств: аксиальные, требующие большой силы возбуждения, и изгибные, которые могут работать на вибрирующих поверхностях с меньшим выходом мощности. Ключевые проблемы включают узкую полосу рабочих частот и необходимость защиты от повреждений, например, в Terfenol-D. Также обсуждаются методы расширения рабочего диапазона частот и проблемы с производительностью, так как устройства генерируют полезную мощность только вблизи резонанса. Статья подчеркивает необходимость создания универсальных метрик для сравнения различных устройств и представляет достижения в моделировании магнитострикционных харвестеров, предлагая эффективные численные модели для разработки новых устройств автономного питания.

Статья [11] посвящена разработке нового типа МЭ сенсора, который способен точно измерять слабые магнитные поля и электрические токи в широком диапазоне.

В современных МЭ сенсорах есть проблема: чем точнее они измеряют, тем уже их диапазон измерений. Использование аморфного магнитного сплава метглас в таких сенсорах помогает улучшить точность, но при этом сужается диапазон измеряемых магнитных полей. Для решения этой проблемы был предложен многослойный МЭ сенсор (MLMS), который включает три слоя пьезоэлектрического материала и четыре слоя метглас. Эксперименты показали, что MLMS работает в диапазоне от 20 пТ до 2 мТ, и уровень магнитного шума в нем значительно ниже, чем в обычных сенсорах. В рамках исследования были протестированы три типа сенсоров: однослойный, двухслойный и трехслойный. MLMS также использовался для измерения электрического тока. Для малых токов точность была очень высокой (ошибка всего 0,05%), а для больших токов точность была немного ниже из-за расстояния между сенсором и проводником. Авторы отмечают, что MLMS может быть полезен для умных энергосетей, так как он имеет широкий диапазон измерений, низкий уровень шума и высокую точность. В будущем планируется улучшить сенсор, чтобы он мог измерять еще большие токи, до 10 кА.

Статья [12] посвящена солнечным батареям на основе перовскитов, которые привлекли значительное внимание благодаря простоте изготовления и высокой эффективности. Фотоэлементы на основе перовскитных материалов обладают уникальными оптоэлектронными свойствами, включая широкий диапазон поглощения света, низкую энергию переноса заряда и устойчивость к различным условиям эксплуатации. Авторы рассматривают различные материалы, используемые в солнечных батареях на основе перовскитных материалов, включая металлоорганические соединения, а также альтернативные гибридные материалы, направленные на улучшение стабильности устройств. В статье также обсуждаются достижения в области низкотемпературных методов синтеза и улучшенных контактных и электродных компонентов, которые позволили достичь КПД выше 25%. Кроме того, исследование охватывает различные типы солнечных элементов, включая металлические, неметаллические и полимерные варианты. Металлоорганические перовскиты, такие как MAPbI_3 , остаются наиболее популярными, однако альтернативные структуры набирают популярность благодаря повышенной стабильности и оптимизированным оптическим свойствам. Важное внимание уделяется влиянию структуры фотоэлемента на его производительность, в том числе роли слоев переноса электронов и дырок, прозрачных оксидов и металлических контактов. Авторы анализируют влияние различных методов синтеза и обработки пленок на качество покрытий и эффективность фотоэлементов. В заключительной части статьи рассматриваются ключевые вызовы, связанные с коммерциализацией солнечных элементов на основе перовскитных материалов, включая проблемы долговременной стабильности и экологичности. Исследователи отмечают, что замена свинца в структуре перовскита остается одной из главных задач, а перспективными альтернативами являются соединения на основе олова

и других малотоксичных элементов. Также рассматриваются методы улучшения устойчивости к влаге и температурным колебаниям, а также инновационные стратегии масштабирования производства. В целом статья предоставляет всесторонний обзор текущего состояния технологий солнечных батарей и перспектив их развития.

Статья [13] посвящена разработке и оптимизации беспроводной передачи энергии с использованием магнитоэлектрических композитов. Основное внимание уделено улучшению передачи мощности с помощью многокомпонентных устройств, включающих пьезоэлектрические и магнитострикционные материалы. Экспериментально и теоретически исследуются геометрия элементов, ориентация устройств, частотные условия, магнитные поля и нагрузочные сопротивления. Модель демонстрирует важность вибрационных смещений и коэффициента передачи энергии между элементами, а также показывает зависимость мощности от различных факторов, таких как геометрия, ориентация и интерфейс между компонентами. В результате была предложена конфигурация устройства с оптимизированными характеристиками для достижения высокой эффективности передачи энергии. В статье также рассматривается влияние разных факторов на эффективность передачи энергии, включая геометрию элементов, ориентацию и характеристики материалов. Применение многослойной конструкции с пьезоэлектрическими и магнитострикционными слоями позволяет достичь значительных улучшений в передаче мощности, с увеличением выходной мощности на 370% по сравнению с устройствами, использующими однослойную конструкцию. Таким образом, исследование подтверждает перспективность использования магнитоэлектрических композитов в беспроводных системах передачи энергии, которые могут быть использованы в различных приложениях, включая системы обмена энергией и передачи энергии на большие расстояния.

Статья [14] исследует влияние формы наночастиц на их магнитоэлектрическое поведение, с акцентом на структуры с ядром-оболочкой. В работе рассматриваются наночастицы с разными геометрическими формами (например, сферические и более вытянутые), чтобы определить, как форма влияет на их МЭ поведение, выражающееся в МЭ коэффициенте (максимальный 2,5 В / (см· Э). Моделирование, проведенное с использованием как статического, так и переменного магнитных полей, показало, что более вытянутые наночастицы демонстрируют лучшие характеристики по сравнению со сферическими частицами того же объема. Это связано с большим размером поверхности, где взаимодействуют магнитостриктивная и пьезоэлектрическая фазы, а также с ориентацией наночастиц вдоль магнитного поля. Результаты работы также показывают, что для увеличения МЕ эффекта при низкочастотном переменном магнитном поле (50 Гц) можно использовать эффект памяти магнитного материала, когда частицы предварительно намагничены постоянным магнитным полем. Это открывает новые возможности для использования таких материалов в биомедицинских приложениях, таких как безвредная стимуляция тканей с помощью

внешнего магнитного поля низкой интенсивности. Статья подчеркивает важность геометрии наночастиц для оптимизации их электрических характеристик и дальнейшего использования в биотехнологиях и нано-термоаналитике.

Статья [15] исследует, как содержание Terfenol-D влияет на структуру и свойства композитов, состоящих из материала PZT и Terfenol-D. Использовался метод спекания для создания композита, комбинирующего две фазы: пьезоэлектрическую (PZT) и магнитострикционную (Terfenol-D). Были подготовлены композиты с разным содержанием этих двух компонентов: 90% PZT / 10% Terfenol-D, 70% PZT / 30% Terfenol-D и 50% PZT / 50% Terfenol-D. Исследования показали, что при создании таких композитов происходил распад материала, в результате которого образовывались новые фазы с редкоземельными элементами и железом. Микроструктурные исследования показали, что композит сохраняет хорошие свойства при комнатной температуре, несмотря на распад. Наибольшую стабильность показали композиты с 90% PZT, которые имели высокую диэлектрическую проницаемость и низкие потери энергии. Когда содержание Terfenol-D увеличивалось, ухудшались некоторые свойства: повышались потери энергии и проводимость, снижалась проницаемость. В то же время магнитные свойства композитов сохранялись, и при увеличении Terfenol-D намагниченность возрастала, а коэрцитивное поле уменьшалось.

Статья [16] посвящена теории обратного МЭ эффекта для различных режимов резонанса (поперечный, изгиб, продольно-сдвиговый и крутильный) и его квазистатического режима. В отличие от прямого МЭ эффекта, который уже достаточно хорошо изучен, обратный МЭ эффект изучен менее подробно, особенно в низкочастотной области. В работе представлены расчеты и примеры для различных структур на основе метгласа и пьезоэлектрических материалов, таких как PZT и GaAs. Также рассмотрены методы идентификации крутильного режима и предложены эксперименты для его изучения. Особое внимание уделено ограничениям теоретических расчетов, таким как идеализация механического взаимодействия между магнитострикционной и пьезоэлектрической фазами. В статье обсуждается сложность наблюдения крутильного режима обратного МЭ на фоне других режимов, таких как продольно-сдвиговый, и предлагаются способы улучшения эксперимента, например, использование биморфной структуры на основе ниобата лития (LiNbO_3) для устранения продольно-сдвигового режима. В заключении подчеркиваются основные ограничения теории обратного МЭ эффекта, такие как недостаточная механическая связь фаз и присутствие переменного магнитного поля внутри магнитострикционной фазы. Также, даются рекомендации по проведению экспериментов для изучения крутильного режима в биморфных структурах и предложено использование численных методов, таких как Comsol Multiphysics, для более точных расчетов.

Целью данной работы является изучение физических параметров МЭ материалов, их взаимодействия с магнитными полями, а также их потенциала для повышения эффективности МЭ генераторов. В рамках исследования проведен анализ МЭ слоистых структур, в том числе композитных МЭ структур с высокими эксплуатационными характеристиками. В работе представлены экспериментальные данные по МЭ эффекту в слоистых структурах, предназначенных для разработки МЭ синхронного генератора.

Магнитоэлектрический элемент

Были исследованы два типоразмера МЭ структур, по два элемента каждого типоразмера. МЭ элемент – это структура, состоящая из склеенных вместе пластины пьезоэлектрика ЦТС-19М (производитель ООО «Аврора-ЭЛМА», РФ) и ленты аморфного магнитомягкого сплава метглас А324 (производитель ПАО «Мстатор», РФ). Условное изображение МЭ элемента показано на рисунке 1.

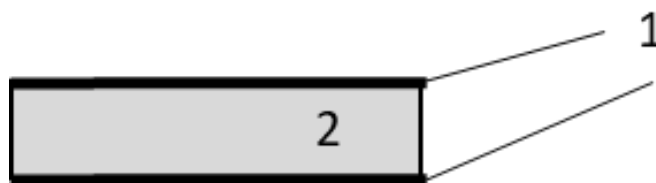


Рисунок 1. Условное изображение МЭ элемента:
1 – слои аморфного магнитомягкого сплава метглас,
2 – пьезоэлемент ЦТС-19М

Элемент 1 – геометрические размеры ЦТС-19М 70×12×0,5 мм, размеры каждого слоя ленты метглас 70×12×0,02 мм; элемент 2 – геометрические размеры ЦТС-19М 70×12×0,5 мм, размеры каждого слоя ленты метглас 70×12×0,02 мм; элемент 3 – геометрические размеры ЦТС-19М 30×10×0,5 мм, размеры каждого слоя ленты метглас 30×10×0,02 мм; элемент 4 – геометрические размеры ЦТС-19М 30×10×0,5 мм, размеры каждого слоя ленты метглас 30×10×0,02 мм.

Измерительный стенд

Измерительный стенд разработан для измерения характеристик МЭ элементов. Структурная схема стенда представлена на рисунке 2.

Стенд разработан в составе: генератора сигналов GW Instek SFG-71003, цифрового запоминающего осциллографа ADS-2072, 6 ½-разрядного прецизионного мультиметра НМ 8112-3, соленоида, МЭ элемента, постоянного магнита. Данный стенд позволяет измерять следующие параметры МЭ элементов: МЭ коэффициент, а также выходное напряжение и ток в диапазоне частот от 100 Гц до 100 кГц. Переменное магнитное поле в центре соленоида на частоте 1 кГц составляет 1 Э, постоянное магнитное поле – около 60 Э.

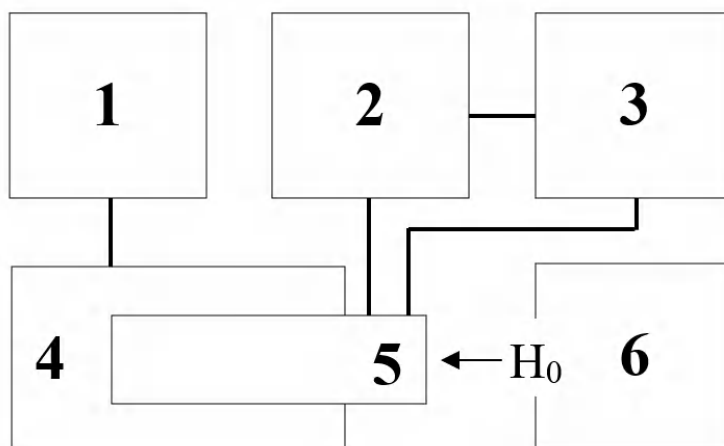


Рисунок 2. Структурная схема стенда: 1 – генератор сигналов, 2 – осциллограф, 3 – мультиметр, 4 – соленоид, 5 – МЭ элемент, 6 – постоянный магнит

Результаты измерений

Характеристики МЭ элементов измерялись на измерительном стенде для двух типов МЭ элементов. Результаты измерений представлены на рисунках 3, 4 и 5. Постоянное магнитное поле соответствовало максимальному МЭ коэффициенту. Измерялась зависимость выходного напряжения и тока МЭ элемента в диапазоне частот. Переменное магнитное поле внутри соленоида составляло 1 Э. Поле подмагничивания, создаваемое постоянными магнитами в области МЭ элемента, составляло около 60 Э. Выходное напряжение на резонансной частоте около 22 кГц на элементе 1 достигало 11,3 В, а максимальный выходной ток – 0,08 мА. Выходное напряжение на резонансной частоте около 51 кГц у 3 элемента достигало 6,8 В, а максимальный выходной ток – 0,04 мА. Так, выходная мощность на резонансной частоте около 51 кГц для элемента 1 составила 0,9 мВт, а на элементе 3 около 0,27 мВт.

МЭ коэффициент был измерен в зависимости от частоты, результат измерений представлен на рисунке 3.

На резонансной частоте около 22 кГц коэффициент составил 226 В / (см·Э) для элемента 1. Для элемента 3 на резонансной частоте около 51 кГц коэффициент составил 36 В/(см·Э). Выходная мощность МЭ элемента может быть на несколько порядков выше на резонансной частоте, чем вне резонанса.

Для конструкции устройства генерации энергии выходная мощность может быть увеличена за счет увеличения плотности заполнения пространства генератора МЭ элементами. Генерируемая мощность может достигать единиц Вт при использовании нескольких МЭ элементов в генераторе и работе в резонансном режиме на частоте ЭМР. В этом случае МЭ генератор уже может быть использован как эффективное устройство для выработки энергии для энергонезависимых устройств.

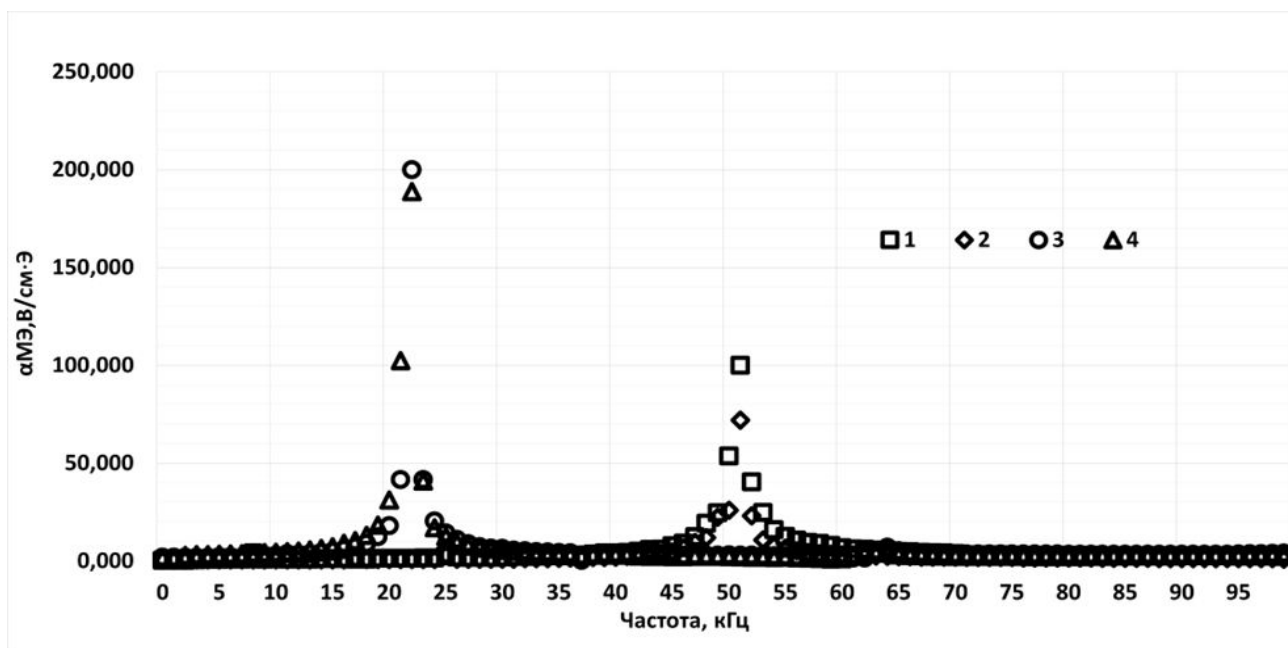


Рисунок 3. Зависимость МЭ коэффициента от частоты для МЭ элементов: 1, 2 – размер элементов 30×10×0,5 мм; 3, 4 – размер элементов 70×12×0,5 мм

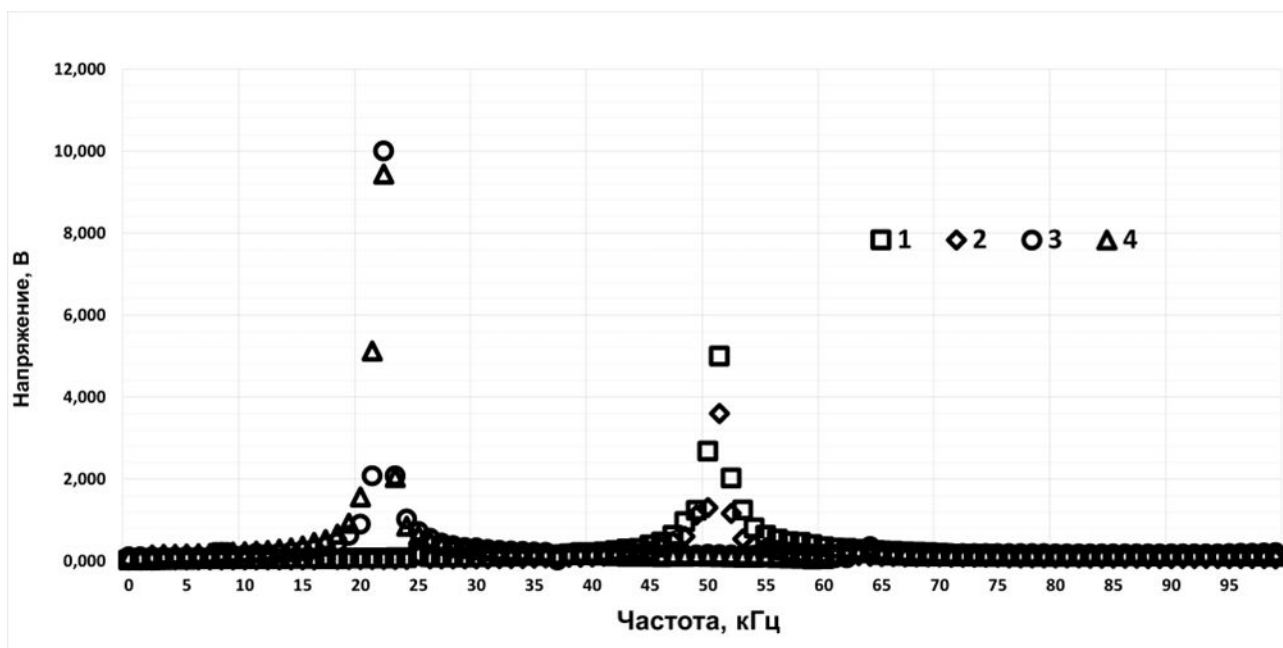


Рисунок 4. Зависимость выходного напряжения от частоты для МЭ элементов: 1, 2 – размер элементов 30×10×0,5 мм; 3, 4 – размер элементов 70×12×0,5 мм

На рисунках 4 и 5 показаны зависимости выходного тока и напряжения от частоты для МЭ элементов на основе слоистых композиционных МЭ слоистых структур.

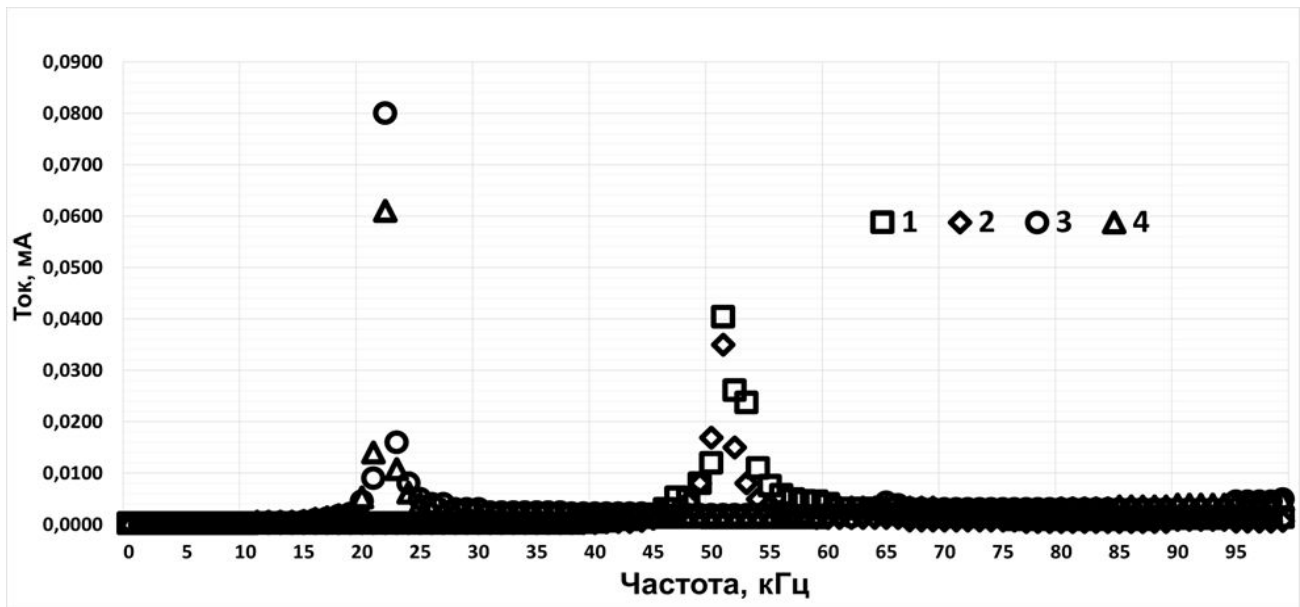


Рисунок 5. Зависимость выходного тока от частоты для МЭ элементов: 1, 2 – элементы размером $30 \times 10 \times 0,5$ мм; 3, 4 – элементы размером $70 \times 12 \times 0,5$ мм

Заключение

Работа посвящена исследованию характеристик МЭ элементов для МЭ синхронного генератора. Для оптимальной работы генератора предполагается использование МЭ элемента в резонансном режиме работы. Исследованы характеристики МЭ элементов в диапазоне частот от 100 Гц до 100 кГц, в том числе МЭ коэффициент. Получены удовлетворительные результаты экспериментов, позволяющие предположить дальнейшую перспективность проводимых исследований. Так, выходная мощность на резонансной частоте около 51 кГц для элемента $70 \times 12 \times 0,5$ мм составила 0,9 мВт, а на элементе $30 \times 10 \times 0,5$ мм около 0,27 мВт. Результаты исследования будут использованы для создания прототипов новых МЭ генераторных систем.

Список литературы

1. Bichurin M. I., Petrov V. M., Petrov R. V., Tatarenko A. S. *Magnetoelectric Composites*. Singapore: Pan Stanford Publishing Pte. Ltd, 2019. 296 p.
2. Nan C. W., Bichurin M. I., Dong S., Viehland D., Srinivasan G. Multiferroic magnetoelectric composites: Historical perspective, status, and future directions // *Journal of Applied Physics*. 2008. 103. 031101. DOI: 10.1063/1.2836410
3. Petrov R. V., Kolesnikov N. A., Bichurin M. I. Magnetoelectric alternator // *Energy Harvesting and Systems*. 2016. 3 (2). 173–180. DOI: 10.1515/ehs-2015-0024
4. Петров Р. В., Колесников Н. А., Бичурин М. И. Устройство сбора энергии с применением магнитоэлектрических элементов // *Фундаментальные исследования*. 2015. 7-4. 712–717.

5. Ma Z., Ai J., Shi Y., Wang K., B Su. A superhydrophobic droplet - based magnetoelectric hybrid system to generate electricity and collect water simultaneously // *Advanced Materials*. 2020. 32 (50). 2006839.
6. Prahadan S., Deshmukh P., Jha S. N., Satapathy S., Majumder S. Solar energy harvesting in magnetoelectric coupled manganese ferrite nanoparticles incorporated nanocomposite polymer films // *arXiv:2211.01007*. 2022. DOI: 10.48550/arXiv.2211.01007
7. Bochenek D., Niemiec P., Chrobak A. Effect of chemical composition on magnetic and electrical properties of ferroelectromagnetic ceramic composites // *Materials*. 2021. 14 (10). 2488. DOI: 10.3390/ma14102488
8. Li P., Wen Y., Bian L. Enhanced magnetoelectric effects in composite of piezoelectric ceramics, rare-earth iron alloys, and ultrasonic horn // *Applied Physics Letters*. 2007. 90. 022503. DOI: 10.1063/1.2431469
9. Saha O., Truong B. D. Roundy S. A review of wireless power transfer using magnetoelectric structures // *Smart Materials and Structures*. 2022. 31. 113001.
10. Deng Zh., Dapino M. Review of magnetostrictive vibration energy harvesters // *Smart Materials and Structures*. 2017. 26 (10). 103001. DOI: 10.1088/1361-665X/aa8347
11. Chu Zh., Cui J., Wang Y., Du Z., Pourhosseini A. M. J., Li N., Dan W., Gao X., Liang X. Multilayered magnetoelectric composites for precise and wide-range current sensing // *Applied Physics Letters*. 2024. 124. 252907. DOI: 10.1063/5.0217772
12. Muhammad S., Arooj F., Aneeza K., Ayesha R., Sana M. Perovskite solar cells and their types // *Kashf Journal of Multidisciplinary Research*. 2025. 2 (1). 45–90. DOI: 10.71146/kjmr202
13. Kumar A., Newacheck S., Youssef G. Cumulative optimization of magnetoelectric composite-based wireless energy transfer // *Engineering Research Express*. 2024. 6 (4). 04LT01. DOI: 10.1088/2631-8695/ad81b0
14. Marrella A., Suarato G., Fiocchi S., Chiaramello E., Bonato M., Parazzini M., Ravazzani P. (2023). Magnetoelectric nanoparticles shape modulates their electrical output // *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*. 2023. 11. 1219777. DOI: 10.3389/fbioe.2023.1219777
15. Bochenek D., Chrobak A., Dercz G., Niemiec P., Brzezińska D., Czaja P. The influence of Terfenol-D content on the structure and properties of multiferroic composites obtained based on PZT-type material and Terfenol-D // *Materials*. 2025. 18. 235. DOI: 10.3390/ma18020235
16. Bichurin M., Sokolov O., Ivanov S., Leontiev V., Lobekin V., Semenov G., Wang Y. Modeling the converse magnetoelectric effect in the low-frequency range // *Sensors*. 2023. 24 (1). 151. DOI: 10.3390/s24010151

References

1. Bichurin M. I., Petrov V. M., Petrov R. V., Tatarenko A. S. *Magnetoelectric Composites*. Singapore: Pan Stanford Publishing Pte. Ltd, 2019. 296 p.
2. Nan C. W., Bichurin M. I., Dong S., Viehland D., Srinivasan G. Multiferroic magnetoelectric composites: Historical perspective, status, and future directions // *Journal of Applied Physics*. 2008. 103. 031101. DOI: 10.1063/1.2836410
3. Petrov R. V., Kolesnikov N. A., Bichurin M. I. Magnetoelectric alternator // *Energy Harvesting and Systems*. 2016. 3 (2). 173–180. DOI: 10.1515/ehs-2015-0024
4. Petrov R. V., Kolesnikov N. A., Bichurin M. I. Energy harvesting device based on magnetoelectric elements // *Fundamental research*. 2015. 7-4. 712–717. (In Russian).

5. Ma Z., Ai J., Shi Y., Wang K., B Su. A superhydrophobic droplet - based magnetoelectric hybrid system to generate electricity and collect water simultaneously // *Advanced Materials*. 2020. 32 (50). 2006839.
6. Prahadan S., Deshmukh P., Jha S. N., Satapathy S., Majumder S. Solar energy harvesting in magnetoelectric coupled manganese ferrite nanoparticles incorporated nanocomposite polymer films // *arXiv:2211.01007*. 2022. DOI: 10.48550/arXiv.2211.01007
7. Bochenek D., Niemiec P., Chrobak A. Effect of chemical composition on magnetic and electrical properties of ferroelectromagnetic ceramic composites // *Materials*. 2021. 14 (10). 2488. DOI: 10.3390/ma14102488
8. Li P., Wen Y., Bian L. Enhanced magnetoelectric effects in composite of piezoelectric ceramics, rare-earth iron alloys, and ultrasonic horn // *Applied Physics Letters*. 2007. 90. 022503. DOI: 10.1063/1.2431469
9. Saha O., Truong B. D. Roundy S. A review of wireless power transfer using magnetoelectric structures // *Smart Materials and Structures*. 2022. 31. 113001.
10. Deng Zh., Dapino M. Review of magnetostrictive vibration energy harvesters // *Smart Materials and Structures*. 2017. 26 (10). 103001. DOI: 10.1088/1361-665X/aa8347
11. Chu Zh., Cui J., Wang Y., Du Z., Pourhosseini A. M. J., Li N., Dan W., Gao X., Liang X. Multilayered magnetoelectric composites for precise and wide-range current sensing // *Applied Physics Letters*. 2024. 124. 252907. DOI: 10.1063/5.0217772
12. Muhammad S., Arooj F., Aneesa K., Ayesha R., Sana M. Perovskite solar cells and their types // *Kashf Journal of Multidisciplinary Research*. 2025. 2 (1). 45–90. DOI: 10.71146/kjmr202
13. Kumar A., Newacheck S., Youssef G. Cumulative optimization of magnetoelectric composite-based wireless energy transfer // *Engineering Research Express*. 2024. 6 (4). 04LT01. DOI: 10.1088/2631-8695/ad81b0
14. Marrella A., Suarato G., Fiocchi S., Chiaramello E., Bonato M., Parazzini M., Ravazzani P. (2023). Magnetoelectric nanoparticles shape modulates their electrical output // *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*. 2023. 11. 1219777. DOI: 10.3389/fbioe.2023.1219777
15. Bochenek D., Chrobak A., Dercz G., Niemiec P., Brzezińska D., Czaja P. The influence of Terfenol-D content on the structure and properties of multiferroic composites obtained based on PZT-type material and Terfenol-D // *Materials*. 2025. 18. 235. DOI: 10.3390/ma18020235
16. Bichurin M., Sokolov O., Ivanov S., Leontiev V., Lobekin V., Semenov G., Wang Y. Modeling the converse magnetoelectric effect in the low-frequency range // *Sensors*. 2023. 24 (1). 151. DOI: 10.3390/s24010151

Информация об авторах

Мисилин Василий Александрович – аспирант, инженер-исследователь, Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого (Великий Новгород, Россия), ORCID: 0000-0001-5044-5831, marsbasil@yandex.ru

Кузьмин Евгений Валентинович – инженер-технолог I категории, АО «ОКБ-Планета» (Великий Новгород, Россия), ORCID: 0000-0001-7348-290X, 7777744444@mail.ru

Петров Роман Валерьевич – доктор физико-математических наук, доцент, профессор, Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого (Великий Новгород, Россия), ORCID: 0000-0002-9751-116X, roman.petrov@novsu.ru