

РАДИОФИЗИКА

УДК 681.586.783

DOI: 10.34680/2076-8052.2023.5(134).788-799

ГРНТИ 50.09.37

Специальность ВАК 1.3.4

Научная статья

МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ДАТЧИКИ ТОКА: ОБЗОР

Марков И. Ю.¹, Бурбах А. В.¹, Кондрашов А. Г.², Петров В. М.¹, Бичурин М. И.¹

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

²АО "НПО "КВАНТ" (Великий Новгород, Россия)

Аннотация В статье приведен обзор различных магнитоэлектрических композитов, которые исследовались в режиме измерения тока. В последнее время проводятся исследования со структурами как разомкнутого, так и замкнутого типов. Приводится сравнение существующих на данный момент МЭ датчиков тока. Исследование замкнутых МЭ структур позволит в будущем использовать их в качестве датчиков тока и реализовать на их основе бесконтактную систему измерения как больших, так и малых токов.

Ключевые слова: магнитоэлектрический эффект, магнитоэлектрический датчик, замкнутая структура, датчик тока, бесконтактный измеритель тока

Для цитирования: Марков И. Ю., Бурбах А. В., Кондрашов А. Г., Петров В. М., Бичурин М. И.. Магнитоэлектрические датчики тока: обзор // Вестник НовГУ. 2023. 5(134). 788-799. DOI: 10.34680/2076-8052.2023.5(134).788-799

Research Article

MAGNETOELECTRIC CURRENT SENSORS: A REVIEW

Markov I. Yu.¹, Burbakh A. V.¹, Kondrashov A. G.², Petrov V. M.¹, Bichurin M. I.¹

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

²AO Research and Production Association Kvant (Veliky Novgorod, Russia)

Abstract The article provides a review of various magnetoelectric composites that were studied in the current measurement mode. Recent studies have been conducted with both open- and closed-type structures. A comparison of the currently available ME current sensors is given. The study of closed ME structures will make it possible in the future to use them as current sensors and implement on their basis a contactless system for measuring both high and low currents.

Keywords: magnetoelectric effect, magnetoelectric sensor, closed structure, current sensor, contactless current meter

For citation: Markov I. Yu., Burbakh A. V., Kondrashov A. G., Petrov V. M., Bichurin M. I. Magnetoelectric current sensors: a review // Vestnik NovSU. 2023. 5(134). 788-799. DOI: 10.34680/2076-8052.2023.5(134).788-799

Введение

Магнитоэлектрические (МЭ) композиты сегодня привлекают особое внимание благодаря своей multifunctionality, которая открывает широкие возможности для их применения в разных устройствах, таких как датчики тока, датчики магнитного поля, трансформаторы, гираторы и др. [1]. Такой особенностью они обладают

благодаря тому, что данные материалы могут демонстрировать электрическую поляризацию, индуцированную приложенным магнитным полем, или, наоборот, намагниченность, индуцированную приложенным электрическим полем [2]. Поскольку МЭ эффект в однофазных материалах проявляется незначительно и при низких температурах, МЭ композиты привлекли больше внимания из-за их значительно более высокого МЭ коэффициента по напряжению [3].

Несмотря на то, что МЭ датчики тока имеют небольшие размеры, вес и высокую чувствительность, им уделялось относительно мало внимания в публикациях по сравнению с МЭ датчиками магнитного поля.

Перспективными задачами на данный момент является разработка бесконтактного датчика тока, способного измерять большие постоянные токи в диапазоне от 1 до 10 кА с погрешностью менее 1%, и системы, которая сможет осуществлять удаленное, беспроводное и надежное измерение тока. Для бесконтактного измерения больших токов сегодня используются устройства, базирующиеся на принципах электромагнитной индукции – измерительные трансформаторы тока, которые имеют свои недостатки из-за больших габаритных размеров, сложной структуры изоляции, высокой стоимости, риска обрыва вторичной цепи. Трансформаторы тока имеют классы точности в диапазоне от 0,1 до 5%. Предполагается, что МЭ датчики тока замкнутого типа позволят устранить недостатки измерения и будут иметь преимущества по сравнению с существующими способами измерения как больших, так и малых токов.

Магнитоэлектрические (МЭ) датчики тока

Оценить величину тока, протекающего в проводнике, можно путем измерения соответствующего магнитного поля, которое создается вокруг этого проводника. Обозреваемые датчики тока используют МЭ эффект в качестве основы для своих измерений. Отметим, что существующие МЭ датчики тока бывают разомкнутого и замкнутого типов, причем МЭ датчики тока разомкнутого типа в основном используют слоистые МЭ композиты и могут измерять переменный, постоянный и импульсный токи, а замкнутые обладают сильной защитой от помех и больше подходят для мониторинга сети энергосистем.

В статье Lu и др. [4] представлен датчик переменного тока, использующий несимметричный прямоугольный МЭ композит Metglas/PZT (рисунок 1). Было экспериментально исследовано влияние толщины Metglas на выходное напряжение в резонансе. Максимальное напряжение достигалось при 4-х слоях Metglas и составляло 223 мВ на частоте 190,2 Гц и при постоянном магнитном поле 16 Э. Резонансную частоту уменьшили с помощью груза до 50 Гц, где выходное напряжение составляло 211 мВ при таком же магнитном поле, а чувствительность к току была 114,2 мВ/А. Обладая высокой линейностью при измерении переменных

магнитных полей частотой 50 Гц, этот датчик подходит для измерения тока на линиях электропередач.

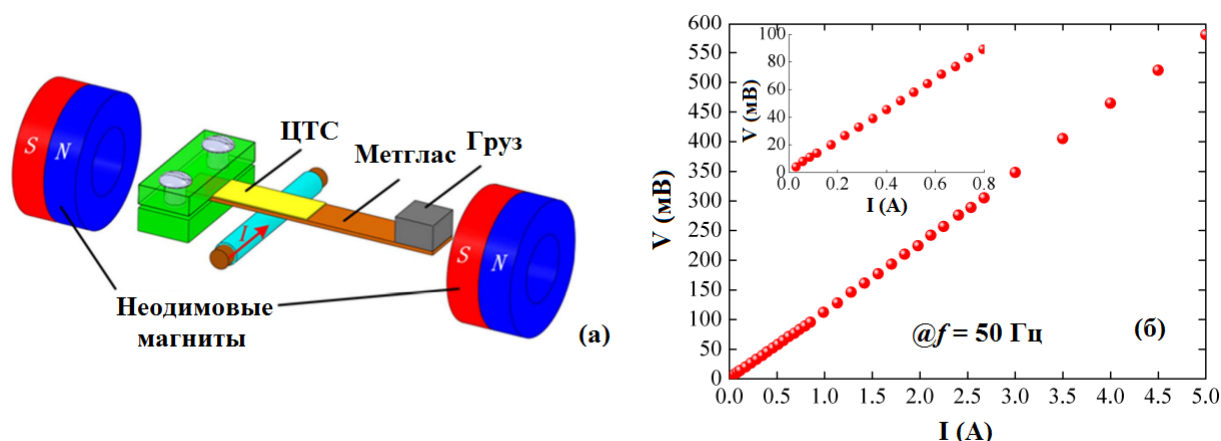


Рисунок 1. Иллюстрация МЭ датчика тока (а) и его выходные характеристики (б)

Похожая структура, только уже симметричная, использовалась в работе Bichurin и др. [5]. Были представлены два датчика тока с прямоугольным МЭ композитом Metglas/PZT/Metglas, работающие в резонансном и нерезонансном режимах и измеряющие постоянный ток. Датчики состояли из токовой и модулирующей катушек, постоянного магнита и МЭ композита (рисунок 2). Эксперименты показали, что нерезонансный датчик в рабочем диапазоне до 5 А имел чувствительность 0,34 В/А, а для резонансного датчика тока в том же рабочем диапазоне чувствительность составляла 0,53 В/А. Нелинейность зависимости выходного напряжения от измеряемого тока в обоих случаях была менее 1%.

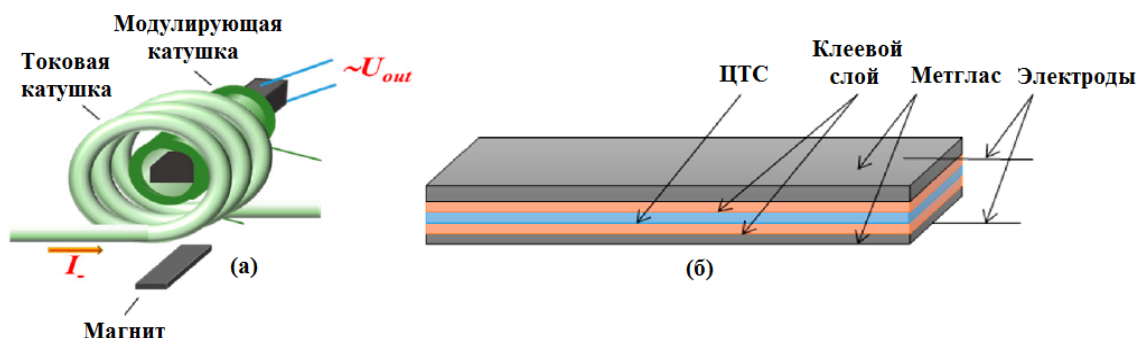


Рисунок 2. Иллюстрация МЭ датчика тока (а) и его прямоугольный МЭ элемент Metglas/PZT/Metglas (б)

Недостатком предыдущих датчиков является то, что для обеспечения высокой линейности необходимо было использовать поле подмагничивания, создаваемого с помощью постоянных магнитов. Представленный в статье [6] датчик постоянного тока работает по такому же принципу, что и ранее разработанный датчик тока, однако значительным отличием является чувствительный элемент устройства – магнитоstrictionно-пьезоэлектрическая структура, состоящая из бидоменного ниобата лития, никеля и Metglas (рисунок 3). Данная градиентная структура обладает внутренним полем подмагничивания и позволяет выйти на линейный участок без использования постоянного магнита. Датчик обладает довольно

хорошей линейностью 99,8% и способен измерять токи до 10 А и более. Чувствительность составила 0,9 В/А.

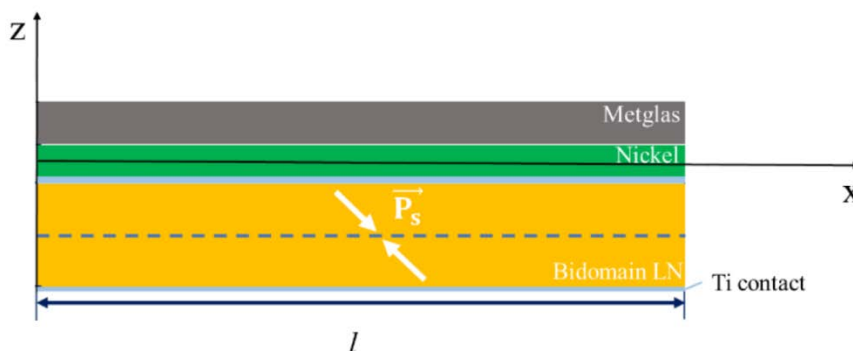


Рисунок 3. Схематичное изображение МЭ градиентной структуры

В работе Ou и др. [7] сообщалось о датчике переменного тока на основе градиентной структуры $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}/\text{FeCuNbSiB}/\text{PZT}$ (рисунок 4). Магнитотвердый материал $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$ с большим коэрцитивным полем создает внутреннее поле смещения магнитострикционных слоев FeCuNbSiB . За счет создания вихревого магнитного поля вокруг токоведущего кабеля предлагаемый МЭ датчик обладает большим выходным напряжением без дополнительных источников постоянного магнитного поля, чувствительностью 198,91 мВ/А, а выходная характеристика демонстрирует высокую линейность 99,9% для токов до 5 А частотой 50 Гц.



Рисунок 4. МЭ композит $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}/\text{FeCuNbSiB}/\text{PZT}$

В работе Castro и др. [8] представлен бесконтактный датчик постоянного тока на основе прямоугольного МЭ композита, состоящего из поливинилденфторида (PVDF) с β -фазной структурой и аморфного сплава Metglas. Датчик демонстрировал максимальный МЭ коэффициент по напряжению, равный 34,48 В/(см \cdot Э), линейность 99,7% и чувствительность 6,7 мВ/А. С помощью усилителя, преобразователя и микроконтроллера удалось увеличить выходное напряжение максимум до 2320 мВ, повысить чувствительность до 476,5 мВ/А и сохранить линейность.

Все эти результаты обеспечивают значительный прогресс в применении слоистых МЭ композитов для мониторинга линий электропередач. Однако необходимо тем или иным способом закрепить эти композиты на токоведущем кабеле так, чтобы магнитный поток равномерно распределялся в магнитострикционной фазе МЭ композита и относительное положение кабеля и МЭ

элемента мало влияло на результаты измерений. Одним из таких решений стало реализация МЭ датчиков с замкнутым контуром.

В статье Lou и др. [9] представлен замкнутый МЭ датчик постоянного тока, состоящий из С-образного магнитопровода, изготовленного из ферритового материала с высокой проницаемостью, обмотанной вокруг магнитопровода катушки, пропускающей небольшой переменный ток, пары неодимовых магнитов и дискового МЭ композита (рисунок 5 а). Провод с измеряемым постоянным током проходит через центр магнитопровода. В статье приводится трехмерное моделирование распределения плотности магнитного потока в программе COMSOL Multiphysics (рисунок 5 б) и делаются следующие выводы: 1) магнитный поток, создаваемый измеряемым током и магнитами, почти полностью концентрируется в МЭ композите из-за высокой магнитной проницаемости магнитопровода, обеспечивая стабильное поле смещения; 2) изменение положения проводящего провода не оказывает влияния на плотность магнитного потока в магнитопроводе, что обеспечивает практичность датчика в реальных условиях. Экспериментальная установка и выходная зависимость показаны на рисунке 5 в, г. Результаты экспериментов показали, что на резонансной частоте чувствительность по току составляет 2,38 мВ/А в диапазоне токов от 0 до 500 А, а линейность – 99,6%. Датчик

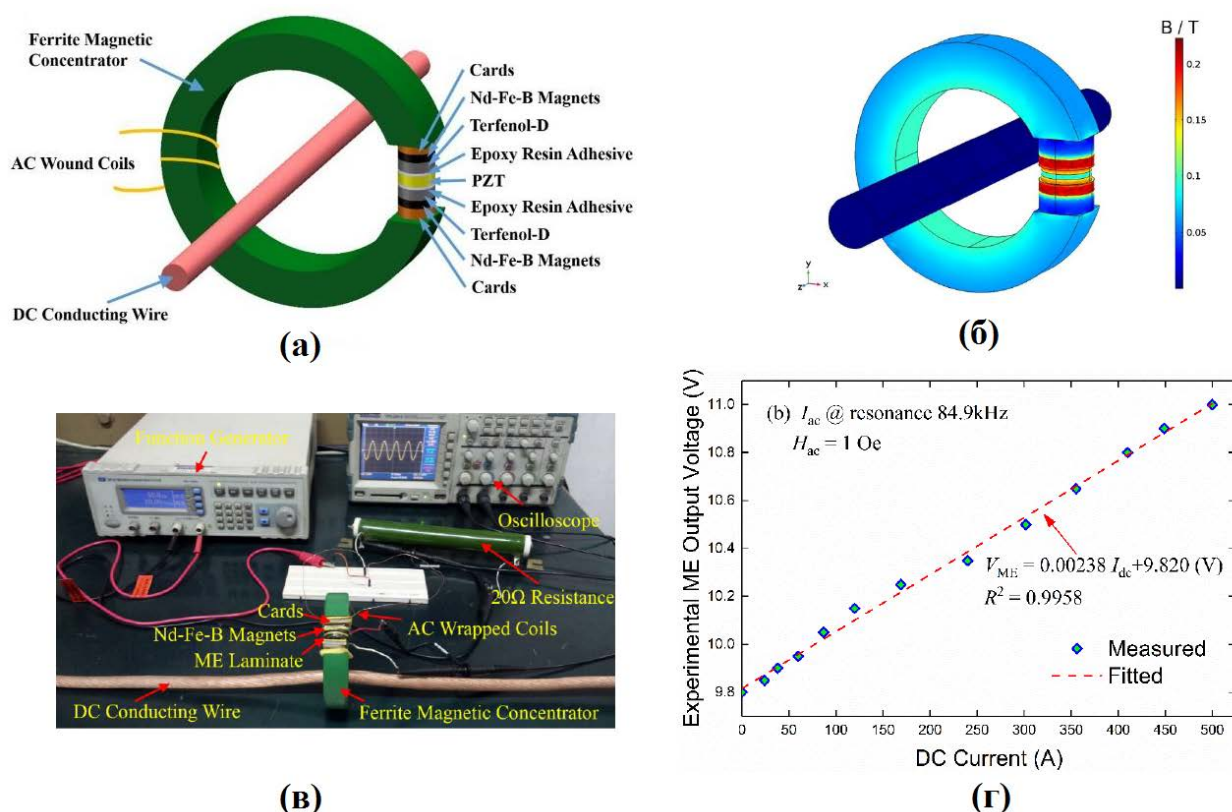


Рисунок 5. (а) Структура замкнутого МЭ датчика постоянного тока; (б) Трехмерное моделирование распределения плотности магнитного потока; (в) Экспериментальная установка для измерения постоянного тока; (г) Выходная характеристика датчика при работе на резонансной частоте 84,9 кГц и переменном магнитном поле 1 Э в диапазоне от 0 до 500

обеспечивает широкодиапазонное измерение постоянного тока. Для измерения меньшего тока датчик должен работать на резонансной частоте для получения высокого выходного напряжения, в то время как для измерения большего тока его можно переключить на работу в надлежащей рабочей точке при нерезонансной частоте для получения приемлемой выходной мощности.

Однако предложенный МЭ датчик с замкнутым контуром невозможно установить на работающую линию электропередачи, так как его конструкция является неразборной. Кроме того, текущий сигнал, измеренный датчиком, нельзя контролировать дистанционно. В работе [10] был предложен МЭ датчик переменного тока с разборным магнитопроводом, состоящий из симметричного прямоугольного композита Terfenol-D/PZT/Terfenol-D, 3 магнитных сердечника, пары постоянных магнитов и упаковочной оболочки. МЭ композит и три магнитных сердечника соединены последовательно, образуя замкнутое магнитное кольцо (рисунок 6). В практическом применении датчик может крепиться на токоведущий кабель и сниматься. Эксперимент показал, что чувствительность обнаружения достигла 52,79 мВ/А при линейности 99,88% в диапазоне от 10 А до 1 кА при частоте тока 50 Гц. Этот результат указывает на то, что датчик можно использовать для реального измерения больших токов до 1 кА. Также для реализации беспроводного и автономного измерения тока в этой работе предложена беспроводная система измерения тока, объединяющая МЭ датчик тока, модуль обнаружения RMS, модуль 4G-RTU, сборщик энергии с трансформатором тока и платформу мониторинга. Система не ограничена дальностью передачи и энергоснабжением и может осуществлять надежный онлайн-мониторинг тока. В пределах допустимого диапазона погрешностей предлагаемая измерительная система может осуществлять беспроводное измерение тока частотой 50 Гц.

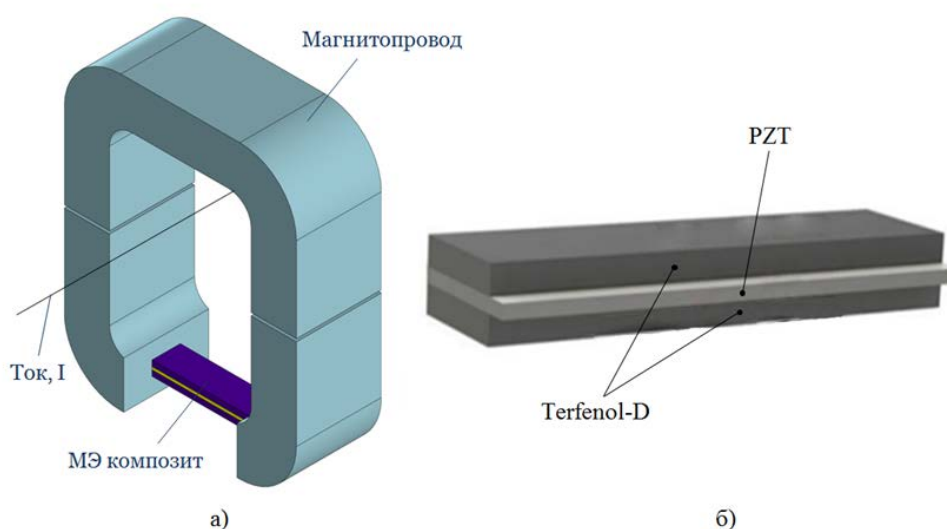


Рисунок 6. (а) Структура МЭ датчика тока с разборным магнитопроводом и (б) прямоугольный МЭ композит Terfenol-D/PZT/Terfenol-D

Кольцевые (тороидальные) МЭ композиты представляют собой замкнутые структуры, которые способны концентрировать в себе весь магнитный поток без использования отдельных магнитных сердечников. Так, Leung и др. в своей статье [11] представляют замкнутый МЭ датчик переменного тока на основе композита кольцевого типа, предназначенный для обнаружения вихревых магнитных полей токоведущих кабелей или проводников. На рисунке 7 показана структура этого датчика. Аксиально поляризованное пьезоэлектрическое кольцо PZT расположено между двумя намагниченными по окружности, скрепленными эпоксидной смолой кольцами Terfenol-D/NdFeB. Встроенные неодимовые магниты устранили необходимость во внешнем источнике постоянного магнитного поля смещения.

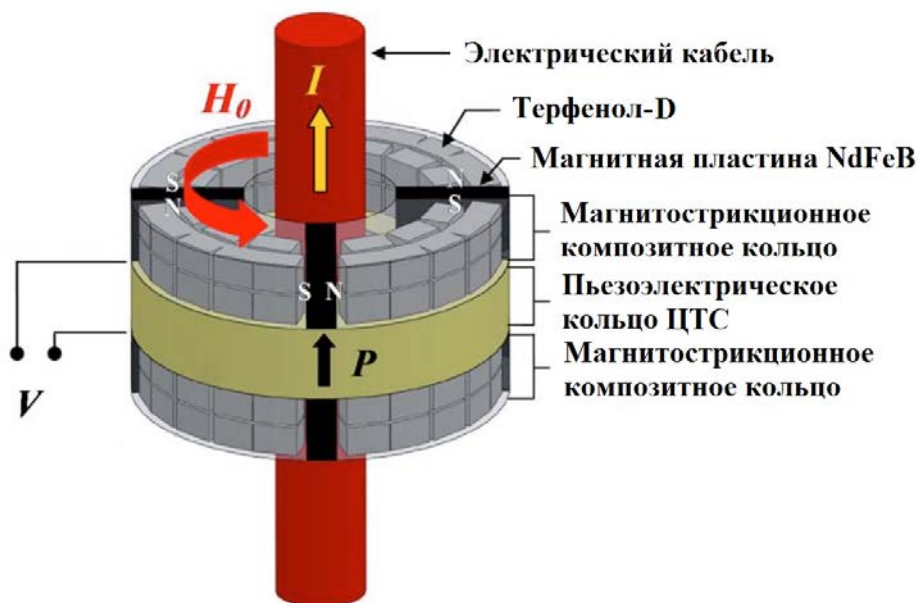


Рисунок 7. Структура кольцевого МЭ датчика переменного тока Terfenol-D/PZT/ Terfenol-D

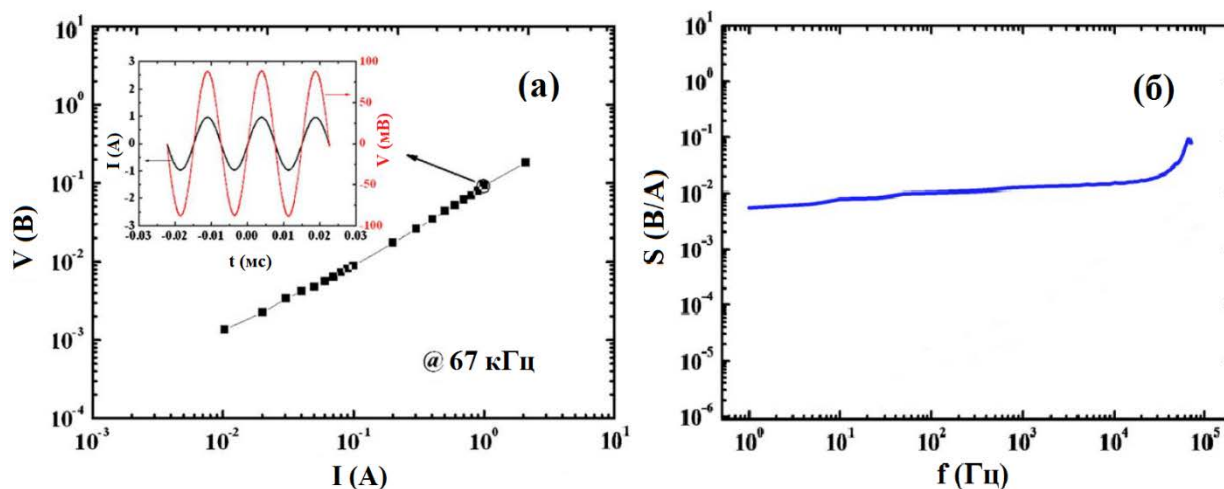


Рисунок 8. Экспериментальные зависимости (а) выходного напряжения от тока на резонансной частоте 67 кГц и (б) чувствительности от частоты переменного тока в кабеле

На рисунке 8 показаны полученные экспериментальные зависимости (а) амплитуды выходного напряжения от амплитуды тока, подаваемого на электрический кабель, на частоте 1 кГц, и (б) чувствительности S датчика от частоты переменного электрического тока амплитудой 1 А. Видно, что выходное напряжение обладает высокой линейностью, а чувствительность датчика остается постоянной в диапазоне от 1 Гц до 30 кГц. Полученные в работе результаты продемонстрировали наличие в датчике нерезонансной чувствительности – 12,6 мВ/А в диапазоне частот от 1 Гц до 30 кГц и резонансной чувствительности – 92,2 мВ/А при частоте 67 кГц.

Giang и др. [12] исследовали кольцевые композиты (О-типа) на основе Metglas и PZT. Параллельно также рассматривался соответствующий прямоугольный датчик (I-типа). Образцы О-типа имели одинаковую ширину стенки 1,5 мм и различные средние диаметры D в диапазоне от 6 мм до 22 мм. МЭ композиты получали путем склеивания одного (single sandwich — SS) или двух (double sandwich — DS) слоев Metglas как на верхней, так и на нижней поверхностях кольца PZT (рисунок 9).

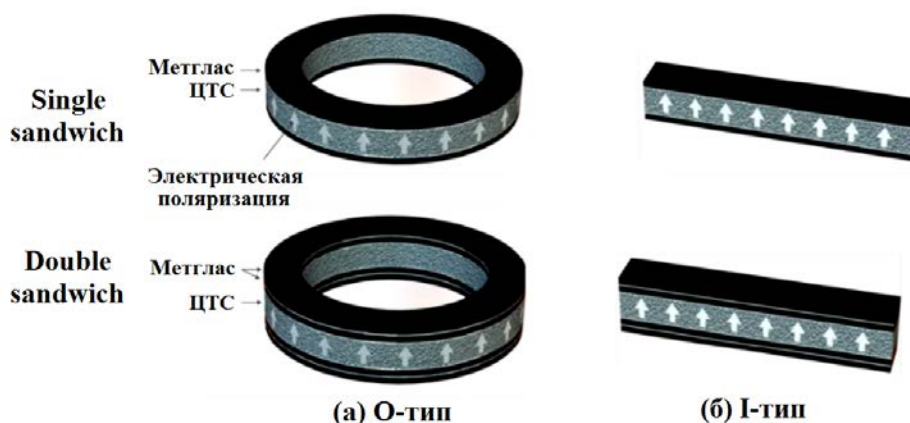


Рисунок 9. DS и SS МЭ композиты (а) О-типа и (б) I-типа

Полученные частотные зависимости выходного напряжения для композитов О-типа представлены на рисунке 10 а. Видно, что для композитов меньшего диаметра резонансная частота примерно на 5% выше, чем у композитов большего диаметра. При переходе от SS к DS выходное напряжение увеличилось почти вдвое для образцов $D = 10$ и 14 мм, соответственно, что объясняется увеличением объемной доли магнитострикционной фазы. Частотная зависимость выходного напряжения для SS и DS композитов I-типа с размерами $L \times W = 15 \text{ мм} \times 1,5 \text{ мм}$ представлена на рисунке 10 (б). Между этими двумя резонансными линиями существует небольшое различие: резонансная частота и сигнал при резонансе слегка сдвинуты с 103 кГц до 108 кГц и с 2,45 мВ до 2,24 мВ для структур SS и DS соответственно. Можно сделать вывод, что преимуществом использования в качестве датчика тока кольцевых композитов перед прямоугольными является увеличение выходного напряжения вместе с увеличением объемной доли

магнитострикционной фазы, а резонансной частотой можно управлять при помощи изменения среднего диаметра композита.

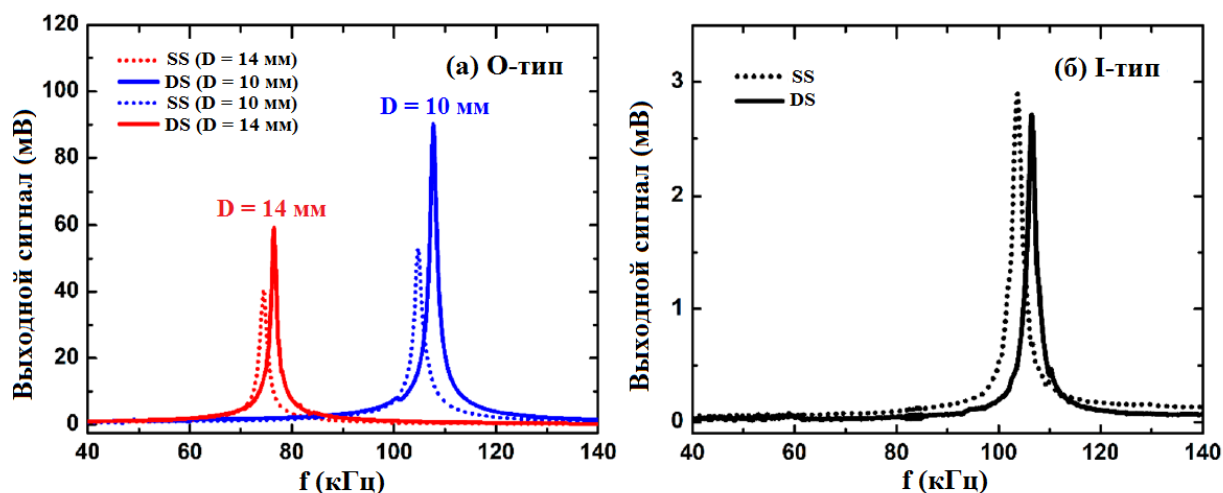


Рисунок 10. Частотная зависимость выходного напряжения для композитов SS и DS (а) О-типа и (б) I-типа

Полученные вольт-амперные характеристики в резонансном режиме представлены на рисунке 11 для МЭ датчиков на основе SS и DS О-типа. Как видно из рисунка, полученный сигнал датчика демонстрирует линейное поведение в исследуемом диапазоне токов. Чувствительность датчиков на основе SS и DS О-типов достигает 2,940 В/А и 5,426 В/А, соответственно. Эти чувствительности в десятки раз выше, чем у ранее рассмотренных датчиков.

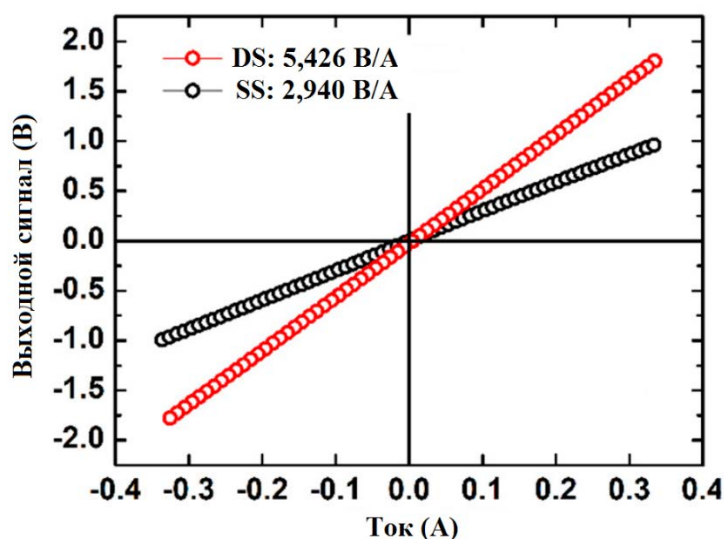


Рисунок 11. Выходные характеристики изготовленных датчиков на основе SS и DS О-типа

При изготовлении данных композитов использовалась клеевая технология. МЭ эффект в магнитострикционно-пьезоэлектрических структурах, где используется клей, зависит и от толщины клеевой прослойки: с увеличением ее толщины наблюдается уменьшение МЭ эффекта [13]. Если в дальнейшем увеличивать в кольцевой структуре количество слоев Metglas, как показано в статье Маркова и

др. [14], можно наблюдать уменьшение выходного напряжения из-за увеличения объемной доли клея в структуре. Максимальное выходное напряжение наблюдалось при трёх слоях Metglas как на верхней, так и на нижней поверхностях кольца PZT. При дальнейшем увеличении слоев выходное напряжение уменьшалось.

Заключение

Анализируя характеристики рассмотренных МЭ датчиков тока, приведенных в таблице 1, можно сделать выводы, что датчик [10] обладает самым большим диапазоном измеряемых токов, кольцевой датчик [12] имеет рекордную чувствительность к току, а самой высокой линейностью обладает датчик [7].

Таблица 1. Сравнение характеристик МЭ датчиков тока

МЭ датчики (композиты)	Диапазон измерения, А	Чувствительность, В/А	Линейность, %	Статья
Metglas/PZT (прямоугольный)	0 – 5	0,114	–	[4]
Metglas/PZT/Metglas (прямоугольный)	0 – 5	0,53	–	[5]
LiNbO ₃ /Ni/Metglas (прямоугольный)	0 – 10	0,9	99,8	[6]
SrFe ₁₂ O ₁₉ /FeCuNbSiB/PZT (прямоугольный)	0 – 5	0,2	99,9	[7]
Metglas/PVDF (прямоугольный)	0 – 5	0,48	99,7	[8]
Terfenol-D/PZT/ Terfenol-D (дисковой)	0 – 500	0,0024	99,6	[9]
Terfenol-D/PZT/Terfenol-D (прямоугольный)	10 – 1000	0,053	99,88	[10]
Terfenol-D/PZT/ Terfenol-D (кольцевой)	–	0,092	–	[11]
Metglas/PZT/Metglas (кольцевой)	0 – 5	5,426	–	[12]

Малое энергопотребление или его отсутствие, высокая чувствительность и широкий диапазон измеряемых токов делают МЭ датчики тока перспективными для мониторинга электрических токов в токоведущих кабелях в режиме реального времени.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (№ 22-29-00950).

Список литературы

1. Liang X., Chen H., Sun N. Magnetoelectric materials and devices // APL Materials. 2021. 9(4). 041114. DOI: 10.1063/5.0044532
2. Wang Y., Li J., Viehland D. Magnetoelectrics for magnetic sensor applications: status, challenges and perspectives // Materials Today. 2014. 17(6). 269-275. DOI: 10.1016/j.mattod.2014.05.004

3. Zhai J., Xing Z., Dong S., Li J., Viehland D. Magnetolectric Laminate Composites: An Overview // *Journal of the American Ceramic Society*. 2008. 91(2). 351-358. DOI: 10.1111/j.1551-2916.2008.02259.x
4. Lu C., Li P., Wen Y., Yang A., Yang C., Wang D., He W., Zhang J. Magnetolectric Composite Metglas/PZT-Based Current Sensor // *IEEE Transactions on Magnetics*. 2014. 50(11). 1-4. DOI: 10.1109/TMAG.2014.2326193
5. Bichurin M., Petrov R., Leontiev V., Semenov G., Sokolov O. Magnetolectric Current Sensors // *Sensors*. 2017. 17(6). 1271. DOI: 10.3390/s17061271
6. Bichurin M., Petrov R., Leontiev V., Sokolov O., Turutin A., Kuts V., Kubasov I., Kislyuk A., Temirov A., Malinkovich M., Parkhomenko Y. Self-Biased Bidomain LiNbO₃/Ni/Metglas Magnetolectric Current Sensor // *Sensors*. 2020. 20(24). 7142. DOI: 10.3390/s20247142
7. Ou Z., Lu C., Yang A., Zhou H., Cao Z., Zhu R., Gao H. Self-biased magnetolectric current sensor based on SrFe₁₂O₁₉/FeCuNbSiB/PZT composite // *Sensors and Actuators A Physical*. 2019. 290(6). 8-13. DOI: 10.1016/j.sna.2019.03.008
8. Castro N., Reis S., Silva M. P., Correia V., Lanceros-Mendez S., Martins P. Development of a contactless DC current sensor with high linearity and sensitivity based on the magnetolectric effect // *Smart Materials and Structures*. 2018. 27(6). 065012. DOI: 10.1088/1361-665X/aab969
9. Lou G., Yu X., Ban R. A wide-range DC current sensing method based on disk-type magnetolectric laminate composite and magnetic concentrator // *Sensors and Actuators A Physical*. 2018. 280. 535-542. DOI: 10.1016/j.sna.2018.08.029
10. Lu C., Zhou H., Li L., Yang A., Xu C., Ou Z., Wang J., Wang X., Xin M. Split-core magnetolectric current sensor and wireless current measurement application // *Measurement*. 2021. 188(4). DOI: 10.1016/j.measurement.2021.110527
11. Leung C. M., Or S. W., Zhang S., Ho S. L. Ring-type electric current sensor based on ring-shaped magnetolectric laminate of epoxy-bonded Tb_{0.3}Dy_{0.7}Fe_{1.92} short-fiber/NdFeB magnet magnetostrictive composite and Pb(Zr, Ti)O₃ piezoelectric ceramic // *Journal of Applied Physics*. 2010. 107(9). 09D918. DOI: 10.1063/1.3360349
12. Giang D. T. H., Tam H. A., Khanh V. T. N., Vinh N. T., Tuan P. A., Tuan N. V., Ngoc N. T., Duc N. H. Magnetolectric Vortex Magnetic Field Sensors Based on the Metglas/PZT Laminates // *Sensors*. 2020. 20(10). P. 2810. DOI: 10.3390/s20102810
13. Ивашева Е. Е., Леонтьев В. С., Коваленко Д. В., Бичурин М. И. Методы увеличения магнитоэлектрического эффекта в композитных структурах: обзор // *Вестник НовГУ*. 2023. 3(132). 462-469. DOI: 10.34680/2076-8052.2023.3(132).462-469
14. Марков И. Ю., Ивашева Е. Е., Соколов О. В., Леонтьев В. С., Бичурин М. И. Магнитоэлектрический эффект в тороидальных структурах Metglas/PZT/Metglas // *Вестник НовГУ*. 2023. 1(130). 186-191. DOI: 10.34680/2076-8052.2023.1(130).186-191

References

1. Liang X., Chen H., Sun N. Magnetolectric materials and devices // *APL Materials*. 2021. 9(4). 041114. DOI: 10.1063/5.0044532
2. Wang Y., Li J., Viehland D. Magnetolectrics for magnetic sensor applications: status, challenges and perspectives // *Materials Today*. 2014. 17(6). 269-275. DOI: 10.1016/j.mattod.2014.05.004
3. Zhai J., Xing Z., Dong S., Li J., Viehland D. Magnetolectric Laminate Composites: An Overview // *Journal of the American Ceramic Society*. 2008. 91(2). 351-358. DOI: 10.1111/j.1551-2916.2008.02259.x
4. Lu C., Li P., Wen Y., Yang A., Yang C., Wang D., He W., Zhang J. Magnetolectric Composite Metglas/PZT-Based Current Sensor // *IEEE Transactions on Magnetics*. 2014. 50(11). 1-4. DOI: 10.1109/TMAG.2014.2326193

5. Bichurin M., Petrov R., Leontiev V., Semenov G., Sokolov O. Magnetolectric Current Sensors // *Sensors*. 2017. 17(6). 1271. DOI: 10.3390/s17061271
6. Bichurin M., Petrov R., Leontiev V., Sokolov O., Turutin A., Kuts V., Kubasov I., Kislyuk A., Temirov A., Malinkovich M., Parkhomenko Y. Self-Biased Bidomain LiNbO₃/Ni/Metglas Magnetolectric Current Sensor // *Sensors*. 2020. 20(24). 7142. DOI: 10.3390/s20247142
7. Ou Z., Lu C., Yang A., Zhou H., Cao Z., Zhu R., Gao H. Self-biased magnetolectric current sensor based on SrFe₁₂O₁₉/FeCuNbSiB/PZT composite // *Sensors and Actuators A Physical*. 2019. 290(6). 8-13. DOI: 10.1016/j.sna.2019.03.008
8. Castro N., Reis S., Silva M. P., Correia V., Lanceros-Mendez S., Martins P. Development of a contactless DC current sensor with high linearity and sensitivity based on the magnetolectric effect // *Smart Materials and Structures*. 2018. 27(6). 065012. DOI: 10.1088/1361-665X/aab969
9. Lou G., Yu X., Ban R. A wide-range DC current sensing method based on disk-type magnetolectric laminate composite and magnetic concentrator // *Sensors and Actuators A Physical*. 2018. 280. 535-542. DOI: 10.1016/j.sna.2018.08.029
10. Lu C., Zhou H., Li L., Yang A., Xu C., Ou Z., Wang J., Wang X., Xin M. Split-core magnetolectric current sensor and wireless current measurement application // *Measurement*. 2021. 188(4). DOI: 10.1016/j.measurement.2021.110527
11. Leung C. M., Or S. W., Zhang S., Ho S. L. Ring-type electric current sensor based on ring-shaped magnetolectric laminate of epoxy-bonded Tb_{0.3}Dy_{0.7}Fe_{1.92} short-fiber/NdFeB magnet magnetostrictive composite and Pb(Zr, Ti)O₃ piezoelectric ceramic // *Journal of Applied Physics*. 2010. 107(9). 09D918. DOI: 10.1063/1.3360349
12. Giang D. T. H., Tam H. A., Khanh V. T. N., Vinh N. T., Tuan P. A., Tuan N. V., Ngoc N. T., Duc N. H. Magnetolectric Vortex Magnetic Field Sensors Based on the Metglas/PZT Laminates // *Sensors*. 2020. 20(10). 2810. DOI: 10.3390/s20102810
13. Ivasheva E. E., Leontiev V. S., Kovalenko D. V., Bichurin M. I. Metody uvelicheniia magnitoelektricheskogo effekta v kompozitnykh strukturakh: obzor [Methods for increasing the magnetolectric effect in composite structures: a review] // *Vestnik NovSU*. 2023. 3(132). 462-469. DOI: 10.34680/2076-8052.2023.3(132).462-469
14. Markov I. Yu., Ivasheva E. E., Sokolov O. V., Leontiev V. S., Bichurin M. I. Magnitoelektricheskii effekt v toroidal'nykh strukturakh Metglas/PZT/Metglas [Magnetolectric effect in Metglas/PZT/Metglas toroidal structures] // *Vestnik NovSU*. 2023. 1(130). 186-191. DOI: 10.34680/2076-8052.2023.1(130).186-191

Информация об авторах

Марков Иван Юрьевич – лаборант, Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого (Великий Новгород, Россия). ORCID: 0009-0006-0918-5023, s247011@std.novsu.ru

Бурбах Андрей Витальевич – аспирант, Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого (Великий Новгород, Россия). ORCID: 0009-0004-2061-8876, Andrej-burbakh@yandex.ru

Кондрашов Андрей Геннадьевич – генеральный директор АО "НПО "КВАНТ" (Великий Новгород, Россия), ORCID: 0000-0001-9846-2489, kondrashovag@mail.ru

Петров Владимир Михайлович – доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник, Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого (Великий Новгород, Россия). ORCID: 0000-0002-7733-1030, Vladimir.Petrov@novsu.ru.

Бичурин Мирза Имамович – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой, Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого (Великий Новгород, Россия). ORCID: 0000-0003-0650-4712, Mirza.Bichurin@novsu.ru