

## РАДИОФИЗИКА

УДК 53.098:537.8

DOI: 10.34680/2076-8052.2023.1(130).186-191

ГРНТИ 29.19.37

Специальность ВАК 1.3.4

*Научная статья*

### МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ В ТОРОИДАЛЬНЫХ СТРУКТУРАХ METGLAS/PZT/METGLAS

Марков И. Ю., Ивашева Е. Е., Соколов О. В., Леонтьев В. С., Бичурин М. И.

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

**Аннотация** В статье проведено экспериментальное исследование магнитоэлектрического (МЭ) эффекта в композитных структурах с замкнутой геометрией в виде тороида. Экспериментальное исследование проводилось на основе магнитострикционно-пьезоэлектрических материалов Метглас (AMAG-225) и ЦТС-19. Обнаружено, что значение выходного напряжения возрастает за счёт увеличения объёмной доли магнитострикционной фазы до определённого количества слоёв. Представлены экспериментально полученные зависимости выходного напряжения от частоты подаваемого сигнала при постоянных значениях тока. Также показано, что при увеличении количества слоёв Метгласа в структуре наблюдается сдвиг резонансной частоты. Основным преимуществом данной структуры является равномерное распределение магнитного потока и независимость этого распределения от положения провода с постоянным током в пределах отверстия. Исследуемая в статье магнитострикционно-пьезоэлектрическая структура открывает широкие возможности проектирования различных магнитоэлектронных систем, например, бесконтактных датчиков больших токов с беспроводной передачей данных.

**Ключевые слова:** магнитоэлектрический эффект, мультиферроик, тороидальная структура, датчик тока, бесконтактный измеритель тока

**Для цитирования:** 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

*Research Article*

### MAGNETOELECTRIC EFFECT IN METGLAS/PZT/METGLAS TOROIDAL STRUCTURES

Markov I. Yu., Ivasheva E. E., Sokolov O. V., Leontiev V. S., Bichurin M. I.

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

**Abstract** The article presents an experimental study of the magnetoelectric (ME) effect in composite structures with closed geometry in the form of a toroid. The experimental study was carried out on the basis of magnetostrictive-piezoelectric Metglas (AMAG-225) and PZT-19 materials. It has been found that the value of the output voltage increases due to an increase in the volume fraction of the magnetostrictive phase to a certain number of layers. The experimentally obtained dependences of the output voltage on the frequency of the supplied signal at constant current values are presented. It is also shown that with an increase in the number of Metglas layers in the structure, a shift in the resonant frequency is observed. The main advantage of this structure is the uniform distribution of the magnetic flux and the independence of this distribution from the position of the direct current wire within the hole. The magnetostrictive-piezoelectric structure investigated in the article provides ample opportunities for designing various magnetoelectronic systems, for example, contactless high current sensors with wireless data transmission.

**Keywords:** magnetoelectric effect, multiferroic, toroidal structure, current sensor, non-contact current meter

**For citation:** Markov I. Yu., Ivasheva E. E., Sokolov O. V., Leontiev V. S., Bichurin M. I. Magnetoelectric effect in Metglas/PZT/Metglas toroidal structures // Vestnik NovSU. 2023. 1(130). 186-191. DOI: 10.34680/2076-8052.2023.1(130).186-191

### Введение

Материалы, в которых сосуществуют одновременно два и более типов «ферро» упорядочения (ферромагнитное, сегнетоэлектрическое и сегнетоупругое), называют мультиферроиками. Общепринятый термин «мультиферроидный» в основном применяется к материалам, которые сочетают сегнетоэлектричество и ферромагнетизм (или, в целом, магнетизм). В настоящее время мультиферроики могут функционировать при большем количестве внешних факторов и новых эффектов, среди которых есть прямой магнитоэлектрический (МЭ) эффект, представляющий собой реакцию электрической поляризации на приложенное магнитное поле. Этот эффект был использован при проектировании различных устройств, таких как датчики магнитного поля (переменного и (или) постоянного тока), преобразователи, фильтры, генераторы, фазовращатели, трансформаторы, гираторы, датчики тока, устройства преобразования мощности. Мультиферроидные материалы первоначально исследовались в качестве однофазных соединений, в настоящее же время применение их расширено и включает различные слоистые композиты, микро- и нанослоистые структуры [1-4].

МЭ композиты простой дисковой, квадратной или прямоугольной геометрии подходят только для измерения магнитных полей фиксированного направления. На практике вращающиеся или вихревые магнитные поля переменного тока встречаются часто. Донг с коллегами [5-7] обнаружили вихревое магнитное поле (или ток) с помощью тороидальной МЭ структуры. Они экспериментально показали наличие МЭ эффекта в структуре Терфенол-Д/ЦТС, значение МЭ коэффициента по напряжению составляло 5,5 В/(см·Э) на частоте 1 кГц. Хуонг и другие [8] провели исследование симметричных слоистых тороидальных структур Метглас/ЦТС разных размеров, обнаружив, что при увеличении средних диаметров колец их резонансная частота и выходное напряжение уменьшаются.

В данной статье экспериментально исследованы тороидальные МЭ структуры на основе магнитострикционно-пьезоэлектрических материалов Метглас и ЦТС-19, соответственно.

### Материалы и методы

В качестве магнитострикционных слоёв использовались ленты Метглас на основе железа-никеля (аморфный магнитомягкий сплав АМАГ225, ПАО «Мстатор», Россия), толщиной 21 мкм. Для создания опосредованной деформацией электрической поляризации использовались керамические кольца ЦТС-19 с поперечной поляризацией толщиной 1 мм. Образцы тороидального типа имеют одинаковые ширину стенки  $W = 2,5$  мм и средний диаметр  $D = 5,5$  мм. МЭ структуры получают путем склеивания с помощью клея БФ-2 от одного до пяти магнитострикционных слоёв Метгласа как сверху, так и снизу кольца ЦТС-19 для создания симметричной структуры. Подробная

информация о схематической иллюстрации исследуемых структур наглядно продемонстрирована на рисунке 1.

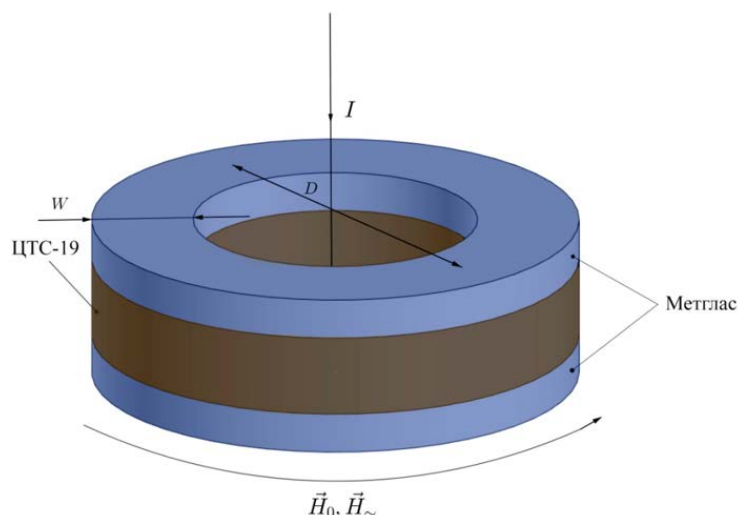


Рисунок 1. Тороидальная МЭ структура

Исследование проводилось с помощью синхронного усилителя MFLI Lock-in Amplifier (Zurich Instruments), который включает в себя генератор сигналов, для создания переменного магнитного поля в структуре и осциллограф для снятия выходного напряжения. Electrodes для снятия выходного напряжения были припаяны к верхней и нижней поверхностям Метгласа и подключены к синхронному усилителю вместе с выводами намотанной на МЭ структуру медной катушки. Через отверстие МЭ структуры проходит прямолинейный проводник с постоянным током. Катушка представляет собой 5 витков медной проволоки диаметром 0,15 мм, распределённых равномерно вдоль всего тороида. На рисунке 1 указаны направления постоянного магнитного поля  $\vec{H}_0$ , создаваемого проводником с током, переменного магнитного поля  $\vec{H}_\sim$ , создаваемого медной катушкой, намотанной на структуру, и тока  $I$ .

### Результаты и обсуждение

Зависимость выходного МЭ напряжения от частоты переменного магнитного поля, измеренная при фиксированном постоянном токе 1 А, представлена на рисунке 2 для исследуемых образцов с разным количеством слоев Метгласа сверху и снизу кольца ЦТС-19. Как можно видеть, в структурах наблюдается резонансное усиление сигнала. Кроме того, результаты показывают, что с увеличением числа слоёв Метгласа до трёх с каждой стороны, выходное напряжение увеличивается, однако, при числе слоев 4 и 5 с каждой стороны, выходное напряжение уменьшается.

В [9] была исследована резонансная мода электромеханических колебаний в тороидальной пьезоэлектрической структуре и приведена соответствующая математическая модель. Мы адаптировали этот расчёт для исследования МЭ

эффекта в нашей МЭ структуре и получили следующее выражение для выходного напряжения

$$U = \frac{m_v q_{11} d_{31} p_{c^D} p_t}{\varepsilon_{33} \varepsilon_0 m_{s11} (c - \rho R^2 \omega^2)} h_1, \quad (1)$$

где продольный коэффициент жёсткости пьезоэлектрика при постоянной электрической индукции

$$p_{c^D} = \frac{1}{p_{s11} - \frac{d_{31}^2}{\varepsilon_{33} \varepsilon_0}}, \quad (2)$$

эффективный коэффициент жёсткости композита

$$c = p_v p_{c^D} + \frac{m_v}{m_{s11}} \quad (3)$$

и средняя плотность

$$\rho = \frac{m_v m_{\rho} + p_v p_{\rho}}{m_v + p_v}. \quad (4)$$

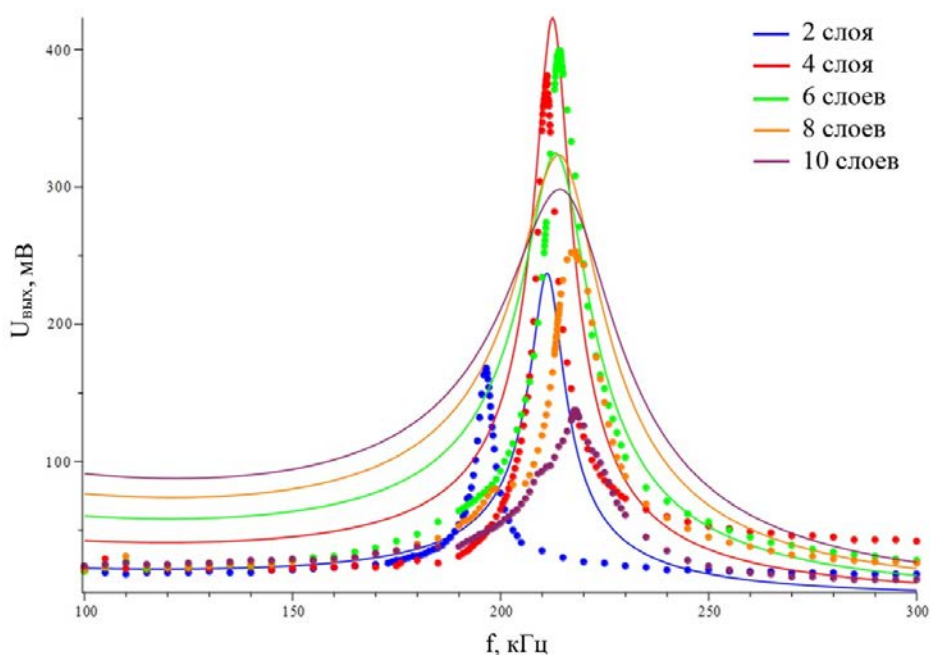


Рисунок 2. Экспериментальные (обозначены точками) и теоретические (обозначены сплошными линиями) результаты. Зависимость выходного напряжения композитной торoidalной структуры Метглас/ЦТС-19 от частоты

На рисунке 2 представлены экспериментальные результаты (обозначены точками), а также расчётные резонансные кривые (обозначены сплошными линиями), полученные по формуле (1).

Изменение наблюдаемой резонансной частоты ( $f_p$ ) может быть описано излучающей резонансной модой [9]:

$$f_P = \frac{1}{\pi D} \sqrt{\frac{1}{\rho s_{11}}} \quad (5)$$

где  $\rho$  – средняя плотность, рассчитанная по данным Метгласа и ЦТС-19, а  $s_{11}$  – эквивалентная упругая податливость.

Таблица 1. Значения резонансных частот и выходных напряжений в зависимости от суммарного числа слоев Метгласа

Количество слоев Метгласа	2	4	6	8	10
Расчетная резонансная частота $f_p$ , кГц	211,2	212,5	213,2	214,0	214,2
Экспериментальная резонансная частота $f_p$ , кГц	196,6	211,2	214,3	218,1	218,2
Выходное напряжение $U_{\text{вых}}$ , мВ	168	381	399	253	137

В таблице 1 приведены числовые значения, полученные в ходе экспериментального исследования МЭ структур и теоретического расчета.

### Выводы

В результате исследование показывает, что резонансной частотой можно управлять, изменяя объёмную долю магнитострикционного материала в композитной структуре. Максимальное выходное напряжение наблюдается при трёх слоях Метгласа как сверху, так и снизу кольца ЦТС-19.

Благодаря замкнутой геометрии тороидальной структуры появляется возможность измерять большие токи с малой относительной погрешностью, поэтому исследование данных структур позволит в будущем проектировать бесконтактные датчики малых и больших постоянных токов на основе МЭ эффекта.

### Список литературы

1. Bichurin M. I., Viehland D. *Magnetoelectricity in Composites*. New York, CRC Press: Boca Raton, 2011. 270 p.
2. Kambale R. C., Jeong D.-Y., Ryu J. Current Status of Magnetoelectric Composite Thin/Thick Films // *Advances in Condensed Matter Physics*. 2012. 1687-1693. DOI: 10.1155/2012/824643
3. Fuentes-Cobas L. E., Matutes-Aquino J. A., Fuentes-Montero M. E. *Handbook of Magnetic Materials*. Vol. 19. Ed. H. J. K. Buschow., Amsterdam, Elsevier, 2011. 129 p.
4. Duc N. H., Huong Giang D. T. Multiferroic magneto-electrostrictive composites and applications // *Advanced Magnetism and Magnetic Materials*. Vol. 2: Aspects of magneto-electrostrictive materials and applications. 2015. P. 141-271.
5. Dong S. X., Li J. F., Viehland D. Voltage gain effect in a ring-type magneto-electric laminate // *Applied Physics Letterst.* 2004. 84. 4188-4190. DOI: 10.1063/1.1756676
6. Dong S., Li J. F., Viehland D. A strong magnetoelectric voltage gain effect in magnetostrictive-piezoelectric composite // *Applied Physics Letterst.* 2004. 85. 3534-3536. DOI: 10.1063/1.1786631
7. Dong S. X., Bai J. G., Zhai G. Y., Li J. F., Lu G. Q., Viehland D., Zhang S. J., Shrou T. R. Circumferential-mode, quasi-ring-type, magnetoelectric laminate composite-a highly sensitive electric current and/or vortex magnetic field sensor // *Applied Physics Letterst.* 2005. 86. 182506. DOI: 10.1063/1.1923184

8. Huong Giang, D. T., Tam, H. A., Ngoc Khanh, V. T., Vinh N.T., Anh Tuan P., Van Tuan N., Thi Ngoc N., Duc N. H. Magnetolectric Vortex Magnetic Field Sensors Based on the Metglas/PZT Laminates // Sensors. 2020. 20(10). 2810. DOI: 10.3390/s20102810
9. Evan M., John K., George N., Stephen V., James K. Determination of resonant frequency of a piezoelectric ring for generation of ultrasonic waves // Innovative Systems Design and Engineering. 2011. 2(4). 103-110.

### References

1. Bichurin M. I., Viehland D. Magnetolectricity in Composites. New York, CRC Press: Boca Raton, 2011. 270 p.
2. Kambale R. C., Jeong D.-Y., Ryu J. Current Status of Magnetolectric Composite Thin/Thick Films // Advances in Condensed Matter Physics. 2012. 1687-1693. DOI: 10.1155/2012/824643
3. Fuentes-Cobas L. E., Matutes-Aquino J. A., Fuentes-Montero M. E. Handbook of Magnetic Materials. Vol. 19. Ed. H. J. K. Buschow., Amsterdam, Elsevier, 2011. 129 p.
4. Duc N. H., Huong Giang D. T. Multiferroic magneto-electrostrictive composites and applications // Advanced Magnetism and Magnetic Materials. Vol. 2: Aspects of magneto-electrostrictive materials and applications. 2015. P. 141-271.
5. Dong S. X., Li J. F., Viehland D. Voltage gain effect in a ring-type magnetolectric laminate // Applied Physics Letterst. 2004. 84. 4188-4190. DOI: 10.1063/1.1756676
6. Dong S., Li J. F., Viehland D. A strong magnetolectric voltage gain effect in magnetostrictive-piezoelectric composite // Applied Physics Letterst. 2004. 85. 3534-3536. DOI: 10.1063/1.1786631
7. Dong S. X., Bai J. G., Zhai G. Y., Li J. F., Lu G. Q., Viehland D., Zhang S. J., Shrou T. R. Circumferential-mode, quasi-ring-type, magnetolectric laminate composite-a highly sensitive electric current and/or vortex magnetic field sensor // Applied Physics Letterst. 2005. 86. 182506. DOI: 10.1063/1.1923184
8. Huong Giang, D. T., Tam, H. A., Ngoc Khanh, V. T., Vinh N.T., Anh Tuan P., Van Tuan N., Thi Ngoc N., Duc N. H. Magnetolectric Vortex Magnetic Field Sensors Based on the Metglas/PZT Laminates // Sensors. 2020. 20(10). 2810. DOI: 10.3390/s20102810
9. Evan M., John K., George N., Stephen V., James K. Determination of resonant frequency of a piezoelectric ring for generation of ultrasonic waves // Innovative Systems Design and Engineering. 2011. 2(4). 103-110.

### 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

*Ивашева Елена Евгеньевна* – лаборант, Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого (Великий Новгород, Россия), ORCID: 0009-0009-4492-4137, s246709@std.novsu.ru

*Соколов Олег Владимирович* – кандидат физико-математических наук, инженер-исследователь, Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого (Великий Новгород, Россия), ORCID: 0000-0002-3041-9537, Oleg.Sokolov@novsu.ru

*Леонтьев Виктор Сергеевич* – заведующий лабораторией, Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого (Великий Новгород, Россия), ORCID: 0000-0003-1313-1715, Viktor.Leontev@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