

Научная статья
УДК 621.317.3/4
<https://doi.org/10.35266/1999-7604-2025-4-6>



Моделирование частотных свойств магнитоэлектрических структур

Алексей Валерьевич Метёлкин, Иван Андреевич Поликарпов✉
МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, Россия

Аннотация. Настоящее исследование посвящено исследованию частотных свойств магнитоэлектрических структур. Основная проблема, решаемая в ходе исследования, заключается в построении частотной модели прямого магнитоэлектрического эффекта на основе экспериментальных исследований, полученных для двухслойного композитного образца цирконат-титанат свинца – MetGlass в магнитном поле, созданном катушками Гельмгольца. Результатом исследования является обобщенная схема замещения двухслойных магнитоэлектрических структур и подход к методике расчета ее параметров. Полученные результаты могут быть использованы как при применении двухслойных структур в составе электротехнических устройств (фильтров, магнитоэлектрических трансформаторов), так и, в дальнейшем, при разработке новых видов композитных материалов.

Ключевые слова: магнитоэлектрический эффект, двухслойная структура, магнитное поле, катушка Гельмгольца, схема замещения, частотная характеристика, электрический фильтр

Для цитирования: Метёлкин А. В., Поликарпов И. А. Моделирование частотных свойств магнитоэлектрических структур // Вестник кибернетики. 2025. Т. 24, № 4. С. 50–57. <https://doi.org/10.35266/1999-7604-2025-4-6>.

Original article

Frequency properties modeling of magnetoelectric structures

Aleksey V. Metelkin, Ivan A. Polikarpov✉
MIREA – Russian Technological University, Moscow, Russia

Abstract. The paper examines the frequency properties of magnetoelectric structures. The main task of the work is the construction of a frequency model of the direct magnetoelectric effect. This model is based on the experimental research conducted on a two-layer composite sample of lead zirconate titanate (PZT) – MetGlass in a magnetic field created using Helmholtz coils. The study results are the creation of a generalized equivalent circuit of two-layer magnetoelectric structures and the development of a method for calculating its characteristics. The findings are applicable to the utilization of two-layer structures in the design of electrical devices (filters, magnetoelectric transformers) and, subsequently, to the creation of novel composite materials.

Keywords: magnetoelectric effect, two-layer structure, magnetic field, Helmholtz coil, equivalent circuit, frequency response, electronic filter

For citation: Metelkin A. V., Polikarpov I. A. Frequency properties modeling of magnetoelectric structures. *Proceedings in Cybernetics*. 2025;24(4):50–57. <https://doi.org/10.35266/1999-7604-2025-4-6>.

ВВЕДЕНИЕ

Настоящий этап развития научно-технического прогресса в области электротехники связан с неуклонной миниатюризацией создаваемых устройств. Данное направление немислимо без разработки новых электро-

технических и конструкционных материалов. На данном этапе развития металлургии дальнейшая миниатюризация устройств на основе полупроводниковых материалов затруднена в связи с приближением к технологическому пределу [1], в связи с чем внимание как отече-

ственных, так и зарубежных исследователей привлекают методы нелинейного преобразования, основанные на не применимых ранее в интегральных сборках магнитоэлектрическом и электромагнитном эффектах – изменении электро- и магнитоэлектрических свойств материалов под действием дуального (магнитного или электростатического поля) [2]. Ряд работ, в частности [3], посвящен применению подобных материалов в микроэлектромеханических преобразователях (MEMS) за счет совместного использования магнитоэлектрического и прямого пьезоэффекта. Тем не менее возможное применение таких материалов значительно шире и их использование ограничено на настоящий момент недостаточной исследованностью конкретных композитов, что не позволяет построить достаточно полную математическую модель. Ряд исследований посвящен моделированию статических характеристик (взаимосвязи напряженностей полей) и показывает их нелинейность [4]. Данное исследование направлено в первую очередь на многослойные структуры, которые могут в первом приближении считаться нелинейными. Поскольку на настоящий момент композитные материалы находят свое применение в основном в электромеханике, большинство существующих исследований не рассматривает частотные свойства композитов, особенно в области высоких частот. В то же время значительный интерес представляет применение подобных материалов в электронных устройствах в качестве частотно-избирательных элементов. Это направление и является основной темой проводимого автором настоящей статьи исследования. Цель исследования заключается в разработке схемы замещения двухслойной (в первом приближении) композитной структуры, что позволит применять полученную модель в классических пакетах схемотехнического моделирования. В основе исследования во многом лежат материалы, полученные авторами исследования [5], рассматривающего эффект «дрейфа электростатического поля» на частотные характеристики трехслойной резонансной структуры, и рассмотренные в ис-

следовании [6] тепловые эффекты, вызывающие дрейф частотных характеристик за счет смещения частоты механического резонанса.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для проведения исследования разработана лабораторная установка, общий вид и структурная схема которой показаны на рис. 1. Образец композитного материала, состоящий из пластины ЦТС, на которую наклеена полоса MetalGlass, помещена в магнитное поле, создаваемое катушками Гельмгольца. С помощью лабораторного источника питания регулировалась частота тока через обмотки катушек. При этом значение индукции поддерживалось постоянным. Частота магнитного поля регулировалась с целью получения частотных характеристик – действующего напряжения на образце в зависимости от модулируемой частоты. Сформированная на этапе постановки задачи предварительная гипотеза – при продольном размещении композитного двухслойного материала – полосы MetalGlass на ЦТС относительно силовых линий создаваемого катушками магнитного поля частотная характеристика (рис. 2) в области высоких частот близка к характеристике параллельного резонансного контура (полосно-пропускающего фильтра), а при поперечном размещении – полосно-заграждающего фильтра (последовательного колебательного контура) – подтвердилась. Соответственно возникает основная гипотеза исследования – о возможности аппроксимации частотной характеристики с помощью суперпозиции линейных фильтров нижних и верхних частот [7]. Рассмотрение частотных характеристик в области низких частот не проводилось ввиду малой практической применимости – необходимости построения катушек Гельмгольца значительных габаритов для получения низкочастотных магнитных полей.

Аппроксимация в рамках проводимого исследования проводится с использованием приближения (1):

$$U(f) = \prod_{j=1}^k (f - f_j)^n \cdot \prod_{i=1}^l \frac{1}{(f - f_i)^m}, \quad (1)$$

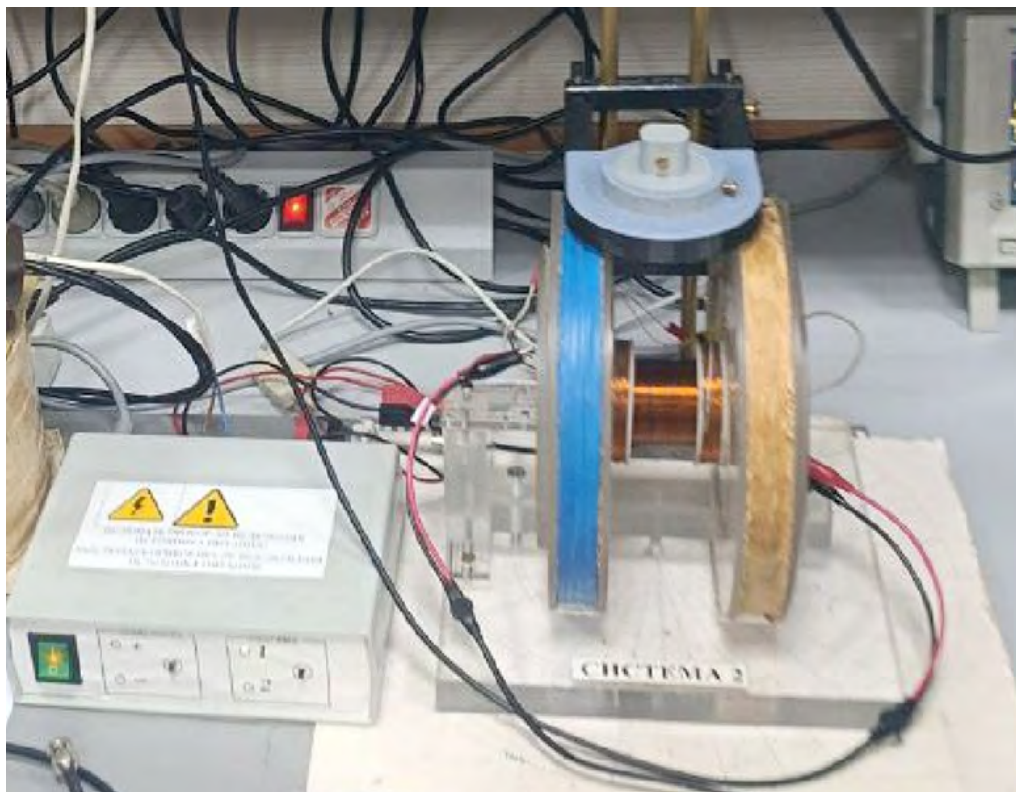


рис. 1 а) Общий вид установки



б) Структурная схема

Рис. 1. Внешний вид и структурная схема лабораторной установки

Примечание: разработано авторами в ходе подготовки экспериментальных исследований.

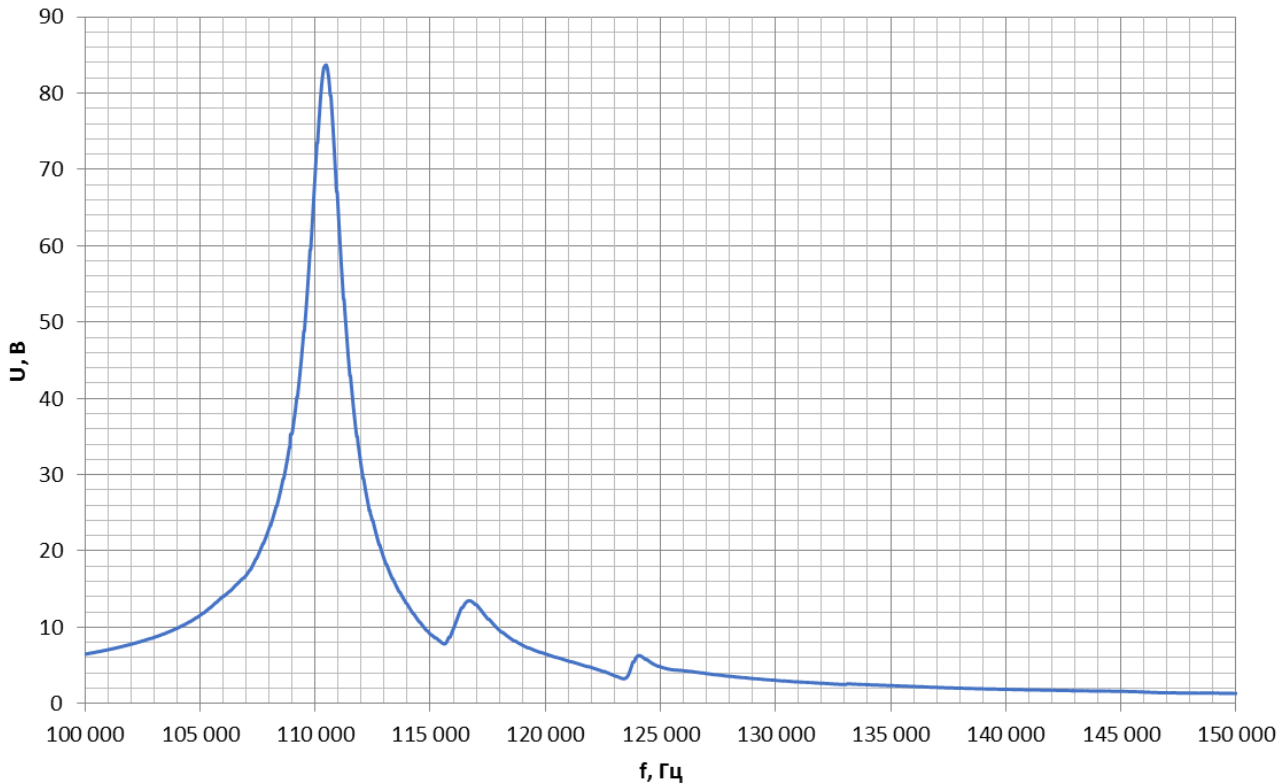


Рис. 2. Амплитудно-частотная характеристика образца

Примечание: данные получены авторами на основе исследований экспериментального образца.

где k – количество звеньев фильтров верхних частот (ФВЧ);

l – количество звеньев фильтров нижних частот (ФНЧ);

n, m – порядок однотипных фильтров.

Для аппроксимации структуры в качестве $f_{i,j}$ принимаются значения экспериментальной АЧХ, причем локальные максимумы соответствуют ФНЧ, а минимумы – ФВЧ [8].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для аппроксимации характеристики, приведенной на рис. 2, использовался полином (1) пятого порядка. Расчетные минимумы наблюдались на частотах 115,7; 123,6 кГц, а максимумы – 110,455; 117,005 и 124,55 кГц соответственно. Таким образом, для аппроксимации применено три ФНЧ- и два ФВЧ-звена. Порядок фильтров n, m может быть выбран как эмпирически, так и с помощью аналитического соотношения при максимальной паре значений частот среза:

$$n = \frac{\lg|f_{\text{ФВЧ}} - f_{\text{ФНЧ}}|}{20}, \quad (2)$$

основанного на известном из теории сигналов факте, что увеличение порядка фильтра на единицу приводит к увеличению наклона логарифмической частотной характеристики на 20 децибел на декаду.

Также при аппроксимации двухслойной структуры необходимо стремиться к минимальному порядку звеньев фильтров, поскольку количество дифференциальных уравнений, составляемых для моделирования во временной и частотной области, прямо пропорционально порядку, в связи с чем с ростом порядка возрастает время и вычислительная сложность моделирования. Соответственно требуется достижение оптимума между точностью аппроксимации и сложностью модели. Для рассматриваемой структуры проведена аппроксимация фильтрами второго порядка, соответственно, для реализации модели достаточно системы из десяти дифференциальных уравнений. Точность аппроксимации при этом (рис. 3) достаточно высока – отклонение не превышает пяти процентов.

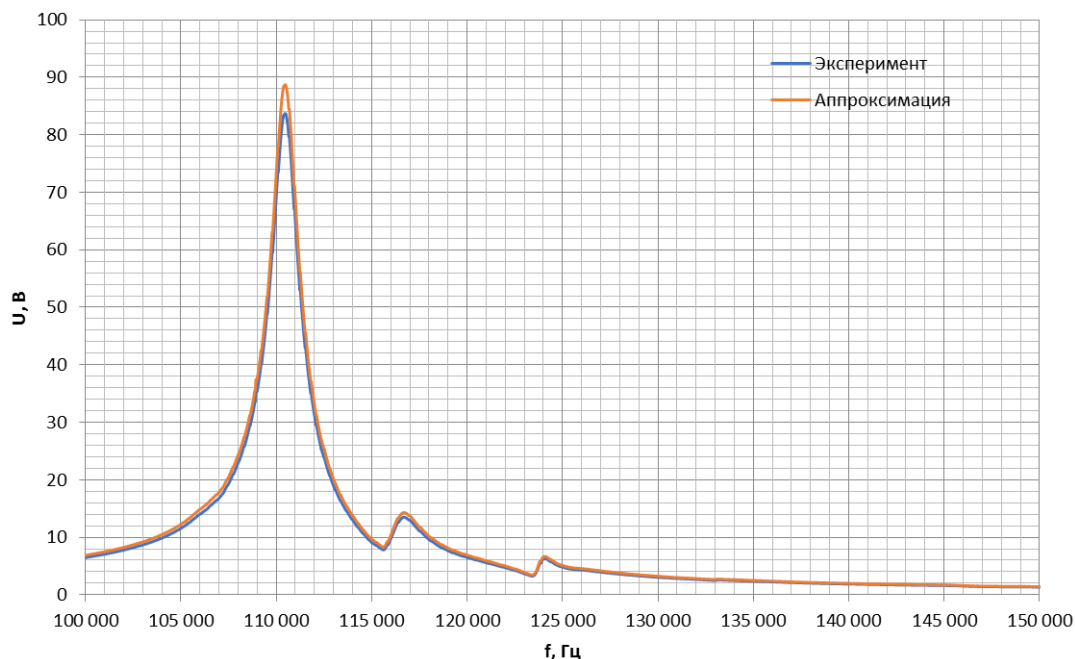


Рис. 3. Сопоставление экспериментальной и аппроксимированной характеристик

Примечание: составлено авторами на основании сопоставления данных, полученных в результате эксперимента и аналитической аппроксимации.

Большинство современных пакетов схемотехнического моделирования предусматривают ввод математической модели на основе электротехнической аналогии. В рамках поставленной при исследовании задачи каждое элементарное звено, состоящее из пары ФНЧ–ФВЧ, может быть представлено комбинацией RC-звеньев (рис. 4).

Так как первичное модельное напряжение формируется с помощью создаваемого током в катушке Гельмгольца магнитного поля, для проведения электротехнической аналогии введен источник напряжения, управляемый током. Для формирования частотной харак-

теристики использованы дифференцирующая $C_n R_n$ и интегрирующая $C_n R_n$ цепи. Для учета возможных нелинейностей статической характеристики в модель вводится нелинейное сопротивление, позволяющее получать нелинейную зависимость напряжения на обкладках композитного материала от индукции магнитного поля.

За счет применения управляемых током источников предложенная модель не требует принятия дополнительных мер по согласованию входного и выходного сопротивлений и может быть введена в качестве макроэлемента в пакеты схемотехнического моделирования [9].

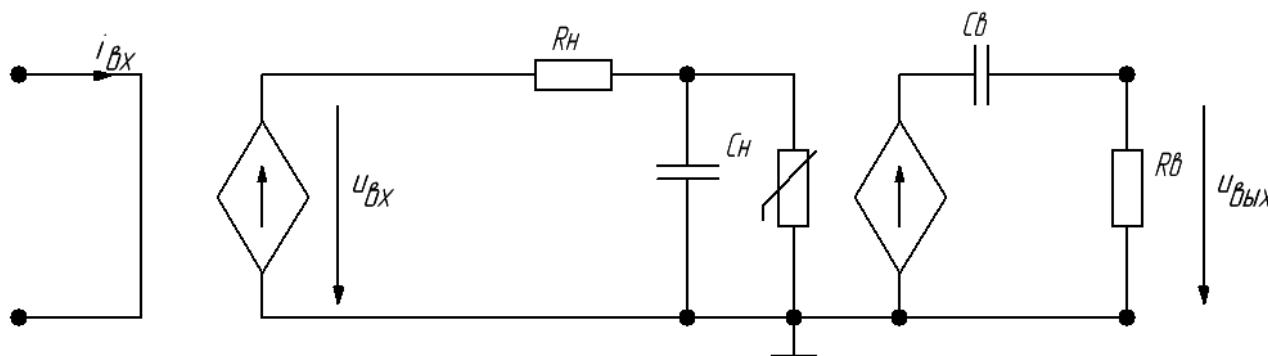


Рис. 4. Схема замещения элементарного звена фильтра

Примечание: получена авторами на основе полученного аналитического выражения (1).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный в настоящем исследовании синтез математической, а затем имитационной модели двухслойной структуры на основе экспериментальных частотных характеристик позволяет значительно расширить перспективы применения подобных композитных материалов в миниатюрных электротехнических и электронных устройствах. Так, по ряду показателей (значительное подавление побочных гармоник) структуры ЦТС–MetalGlass более перспективны для применения в качестве резонансных элементов вместо классических кварцевых резонаторов в фильтрах и времязадающих цепях. Препятствием для внедрения в этой роли на настоящий момент является отсутствие расчетных и проектных методик, позволяющих детерминированно разрабатывать конструкции с наперед заданными частотными свойствами.

Возможность преобразования электромагнитного поля в электростатическое позволяет использовать многослойные структуры в статических преобразователях – маломощных измерительных высокочастотных преобразователях. Наибольшее применение, на взгляд авторов, в данной задаче могут получить структуры с большим количеством слоев, в пределе – градиентные конструкции. Предложенная в настоящем исследовании методика синтеза схемы замещения может быть расширена и на градиентные структуры за счет перехода от модели многозвенного фильтра к модели фильтра на отрезках длинных линий с учетом возможных паразитных эффектов [10–12].

Разработанная имитационная модель в силу универсальности описания может при-

меняться для моделирования во всех вышеперечисленных областях. На настоящий момент подобный подход к магнитоэлектрическим композитам применен впервые. Некоторым недостатком проведенного исследования является отсутствие статистического анализа полученных результатов ввиду недостаточной на настоящем этапе выборки результатов эксперимента. В дальнейшем планируется проведение статистически значимой серии экспериментов с целью исследования, первичной гипотезой которого является вывод из результатов настоящей работы – двухслойные металлокерамические образцы могут быть аппроксимированы фильтрами первого порядка.

Диалектически проведенное исследование не только отвечает на ряд вопросов, но и задает ряд новых, представляющих собой направления дальнейших исследований:

- расширение функционала разработанной модели за счет учета возможного гистерезиса характеристик;
- установление взаимосвязи между конструктивными и частотными характеристиками образцов;
- проверка гипотезы о наличии «эффекта масштаба» – изменение пропорциональности магнитоэлектрического эффекта при пропорциональном изменении размеров образца;
- расширение полученных результатов на многослойные и градиентные композитные структуры;
- разработка методов синтеза конструкции магнитоэлектрических элементов по известным статическим и частотным характеристикам.

Список источников

1. Вольпяс О. В. Полупроводниковые материалы для создания перспективной компонентной базы и развития отечественной микроэлектроники: перовскиты // Open Science 2023 : сб. тезисов X Всероссийского молодежного научного форума с международным участием, 15–17 ноября 2023 г., г. Гатчина. Гатчина : Петербургский институт ядерной физики им. Б. П. Константинова, 2023. С. 176.
2. Юсупов Д. М., Амиров А. А. Магнитоэлектрический эффект в композитах из материала с эффектом памяти формы // Новые материалы: дизайн,

References

1. Volpyas O. V. Poluprovodnikovye materialy dlya sozdaniya perspektivnoy komponentnoy bazy i razvitiya otechestvennoy mikroelektroniki: perovskity. In: *Collection of Abstracts of the 10th All-Russian Youth Scientific Forum with International Participation "Open Science 2023"*, November 15–17, 2023, Gatchina. Gatchina: Petersburg Nuclear Physics Institute named by B. P. Konstantinov; 2023, p. 176. (In Russ.).
2. Yusupov D. M., Amirov A. A. Magnitoelektricheskiy effect v kompozitakh iz materiala s effectom pamyati formy. In: Zagrebin M. A., ed. *Proceedings of the*

- синтез, функциональные свойства : сб. материалов научного семинара, 18–19 августа 2018 г., г. Челябинск. Челябинск : Челябинский государственный университет, 2018. С. 26.
- Звездин А. К., Воробьева Г. П., Кадомцева А. М. и др. Квадратичный магнитоэлектрический эффект и роль магнитокалорического эффекта в магнитоэлектрических свойствах мультиферроика BaMnF₄ // Журнал экспериментальной и теоретической физики. 2009. Т. 136, № 2. С. 265–271.
 - Маничева И. Н., Филиппов Д. А., Лалетин В. М. Магнитоэлектрический эффект в трехслойной структуре никель – кварц – никель // Международный научно-исследовательский журнал. 2019. № 4 (82). С. 27–32. <http://doi.org/10.23670/IRJ.2019.82.4.005>.
 - Лалетин В. М., Филиппов Д. А. Влияние Delta E-эффекта на полевую зависимость магнитоэлектрического эффекта в области электромеханического резонанса // Журнал технической физики. 2018. Т. 88, № 2. С. 194–197. <http://doi.org/10.21883/JTF.2018.02.45406.2337>.
 - Болотина Е. В., Савельев Д. В., Турутин А. В. и др. Влияние температуры на магнитоэлектрический эффект в композитной гетероструктуре бидоменный ниобат/fecosib // Оптические технологии, материалы и системы (Оптотех-2024) : Международная научно-техническая конференция, 02–08 декабря 2024 г., г. Москва. М. : МИРЭА – Российский технологический университет, 2024. С. 542–545.
 - Смирнов А. В. Метод одновременной оптимизации характеристик электрических фильтров в частотной и временной областях // Российский технологический журнал, 2018. Т. 6, № 6. С. 13–27. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2018-6-6-13-27>.
 - Трифонов И. И., Скиба К. С. Аппроксимация амплитудно-частотных характеристик минимально-фазовых рекурсивных цифровых полосовых фильтров // Известия высших учебных заведений. Радиоэлектроника, 2005. Т. 48, № 7. С. 11–17.
 - Прикота А. В., Бубнов В. В. Современные технологии моделирования электронных схем в системе схемотехнического моделирования SimOne // Наноиндустрия. 2019. № S89. С. 361–367. <https://doi.org/10.22184/NanoRus.2019.12.89.361.367>.
 - Иванов Д. В., Кащуба О. А., Дубинин А. Е. Идентификация моделей длинных линий на основе адаптивных фильтров с разностями дробного порядка // Электротехника. 2017. № 3. С. 23–26.
 - Будко Д. А. Фильтры на поверхностных акустических волнах, датчики физических величин на их основе и меры малой длины (5 мкм), изготавливаемые ОАО НПП Эталон г. Омск // Промышленные АСУ и контроллеры. 2010. № 11. С. 44–45.
 - Унру Н. Э. Межрезонаторная связь в дискретно перестраиваемых фильтрах на отрезках однородных длинных линий // Вопросы радиоэлектроники. 2016. № 4. С. 60–63.
 - Scientific Seminar “Novye materialy: dizayn, sintez, funktsionalnye svoystva”, August 18–19, 2018, Chelyabinsk. Chelyabinsk: Chelyabinsk State University; 2018. p. 26. (In Russ.).
 - Zvezdin A. K., Vorobyova G. P., Kadomtseva A. M. et al. Quadratic magnetoelectric effect and the role of the magnetocaloric effect in the magnetoelectric properties of multiferroic BaMnF₄. *Journal of Experimental and Theoretical Physics*. 2009;136(2):265–271. (In Russ.).
 - Manicheva I. N., Filippov D. A., Laletin V. M. Magnetoelectric effect in a three layer nickel – quartz – nickel structure. *International Scientific Research Journal*. 2019;4–1(82):27–32. <https://doi.org/10.23670/IRJ.2019.82.4.005>. (In Russ.).
 - Laletin V. M., Filippov D. A. The influence of the Delta E effect on the field dependence of the magnetoelectric effect in the region of electromechanical resonance. *Journal of Technical Physics*. 2018;88(2):194–197. <https://doi.org/10.21883/JTF.2018.02.45406.2337>. (In Russ.).
 - Bolotina E. V., Savelev D. V., Turutin A. V. et al. Influence of temperature on the magnetoelectric effect in the composite heterostructure of bidomain niobate/fecosib. In: *International Scientific and Technical Conference: “Optical technologies, materials and systems (Optotech-2024)”*, December 02–08, 2024, Moscow. Moscow: MIREA – Russian Technological University; 2024. p. 542–545. (In Russ.).
 - Smirnov A. V. Method of simultaneous optimization of radio devices performance in frequency and time domains. *Rossiyskiy tekhnologicheskiy zhurnal*. 2018;6(6):13–27. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2018-6-6-13-27>. (In Russ.).
 - Trifonov I. I., Skiba K. S. Approximation of amplitude-frequency responses of minimum-phase recursive digital band-pass filters. *Izvestiya vysshykh uchebnykh zavedeniy. Radioelektronika*. 2005;48(7):11–17. (In Russ.).
 - Prikota A. V., Bubnov V. V. Modern technologies in electronic circuit simulation released in SimOne circuit simulator. *Nanoindustria*. 2019;S(89):361–367. <https://doi.org/10.22184/NanoRus.2019.12.89.361.367>. (In Russ.).
 - Ivanov D. V., Katsyuba O. A., Dubinin A. E. Identification of models of long lines on the basis of adaptive filters with a fractional-order differences. *Russian Electrical Engineering*. 2017;(3):23–26. (In Russ.).
 - Budko D. A. Filters on surface acoustic waves, sensors physical quantities on their base and measure of the small length (to 5 microns), made on “Plant Etalon” Omsk. *Industrial Automated Control Systems and Controllers*. 2010;(11):44–45. (In Russ.).
 - Unruh N. E. Interresonators circuit of coupling in discrete tuning filters on pieces of homogeneous long lines. *Voprosy radioelektroniki*. 2016;(4):60–63. (In Russ.).

Информация об авторах

А. В. Метёлкин – аспирант;
<https://orcid.org/0009-0008-6592-3806>,
almet20@mail.ru

И. А. Поликарпов – аспирант;
<https://orcid.org/0009-0001-6081-8571>,
nenchic756@yandex.ru✉

About the authors

A. V. Metelkin – Postgraduate;
<https://orcid.org/0009-0008-6592-3806>,
almet20@mail.ru

I. A. Polikarpov – Postgraduate;
<https://orcid.org/0009-0001-6081-8571>,
nenchic756@yandex.ru✉