

DOI: 10.17725/rensit.2021.13.027

Управляемые индукторы и трансформаторы на основе гетероструктур ферромагнетик-пьезоэлектрик

Фетисов Л.Ю., Чашин Д.В., Фетисов Ю.К.

МИРЭА – Российский технологический университет, <http://www.mirea.ru/>

Москва 119454, Российская Федерация

E-mail: fetisovl@yandex.ru, chashindv@yandex.ru, fetisov@mirea.ru

Поступила 19.01.2021, рецензирована 26.01.2021, принята 31.01.2021

Аннотация: Управляемые индуктивности (индукторы) и трансформаторы применяют в современной электронике, радиотехнике и маломощной энергетике для согласования и гальванической развязки цепей, преобразования амплитуды напряжений. В работе изготовлены и исследованы новые устройства такого типа, использующие магнитоэлектрический эффект в гетероструктурах ферромагнетик-пьезоэлектрик. Индуктивность изготовленного индуктора перестраивается на 400% управляющим электрическим полем величиной до 18 кВ/см, приложенным к пьезоэлектрическому слою структуры, и на 1000% внешним магнитным полем величиной до 10 Э, действующим на структуру. Трансформатор работает в диапазоне входных напряжений 0-8 В, имеет коэффициент передачи по мощности 30% и коэффициент трансформации 0-14, перестраиваемый управляющим магнитным полем величиной до 80 Э. Описаны методики расчёта характеристик магнитоэлектрических индуктора и трансформатора.

Ключевые слова: магнитоэлектрический эффект, трансформатор, индуктор, пьезоэффект, магнитострикция

УДК 538.955; 538.956

Благодарности: Исследования в работе выполнены при поддержке Российского Научного Фонда (грант № 19-79-10128). Часть измерений выполнена на оборудовании центра коллективного пользования РТУ МИРЭА.

Для цитирования: Фетисов Л.Ю., Чашин Д.В., Фетисов Ю.К. Управляемые индукторы и трансформаторы на основе гетероструктур ферромагнетик-пьезоэлектрик. *РЭНСИТ*, 2021, 13(1):27-38. DOI: 10.17725/rensit.2021.13.027

Controllable Inductors and Transformers Based On Ferromagnet-Piezoelectric Heterostructures

Leonid Yu. Fetisov, Dmitry V. Chashin, Yuri K. Fetisov

MIREA - Russian Technological University, <http://www.mirea.ru/>

Moscow 119454, Russian Federation

E-mail: fetisovl@yandex.ru, chashindv@yandex.ru, fetisov@mirea.ru

Received January 19, 2021, peer-reviewed January 26, 2021, accepted January 31, 2021

Abstract: The elements of electrical circuits, which inductance L can be tuned electrically (the so-called "inductors"), and transformers are used in modern electronics, radio engineering and low-power energy for galvanic isolation of circuits and converting voltage amplitudes. In this work, new devices of this type have been manufactured and investigated, using the magnetoelectric effect in ferromagnetic-piezoelectric heterostructures. The inductance of the manufactured inductor is tuned by 400% by a control electric field of up to 10 kV/cm applied to the piezoelectric layer of the structure, and by 1000% by an external magnetic field of up to 10 Oe, acting on the structure. The transformer operates in the range of input voltages of 0-8 V, has a power transfer coefficient of 30% and a voltage transformation ratio of 0-14, tunable by a control magnetic field of up to 80 Oe. Methods for calculating the characteristics of magnetoelectric inductor and transformer are described.

Keywords: **magnetoelectric effect, transformer, inductor, piezoeffect, magnetostriction**

UDC 538.955; 538.956

Acknowledgments: The research was funded by Russian Science Foundation (grant 19-79-10128).

For citation: Leonid Yu Fetisov, Dmitry V. Chashin, Yuri K. Fetisov. Controlled inductors and transformers based on ferromagnet-piezoelectric heterostructures. *RENSIT*, 2021, 13 (1):27-38. DOI: 10.17725/rensit.2021.13.027.

СОДЕРЖАНИЕ

1. ВВЕДЕНИЕ (28)
 2. МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ (28)
 3. МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ИНДУКТОР (29)
 - 3.1 КОНСТРУКЦИЯ ИНДУКТОРА (29)
 - 3.2 ПЕРЕСТРОЙКА ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ПОЛЕМ (30)
 - 3.3 ПЕРЕСТРОЙКА МАГНИТНЫМ ПОЛЕМ (32)
 4. МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТРАНСФОРМАТОР (34)
 - 4.1 КОНСТРУКЦИЯ ТРАНСФОРМАТОРА (34)
 - 4.2 УПРАВЛЕНИЕ МАГНИТНЫМ ПОЛЕМ (35)
 - 4.3 РАСЧЕТ ХАРАКТЕРИСТИК ТРАНСФОРМАТОРА (36)
 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ (37)
- ЛИТЕРАТУРА (37)

1. ВВЕДЕНИЕ

Одними из наиболее важных компонентов современной электроники, радиотехники и маломощной энергетики являются индукторы (перестраиваемая индуктивность) и трансформаторы напряжения. До недавнего времени при разработке этих устройств основной упор делали на улучшении их параметров за счёт совершенствования конструкции и использования новых материалов, повышении эксплуатационной надёжности, снижении затрат на производство. Однако современные электронные компоненты должны быть не просто технически совершенными и экономичными, но и «умными», то есть необходима возможность управления их характеристиками при помощи внешних воздействий, под которыми обычно понимают магнитные или электрические поля.

Индукторы применяют в схемах управления цепей электроснабжения, в телекоммуникационных системах, системах сбора и обработки информации [1,2]. В настоящее время наиболее распространёнными являются индукторы, представляющие собой электромагнитную катушку, внутрь которой помещён сердечник из ферромагнитного материала с высокой магнитной проницаемостью. Индуктивность устройства перестраивают,

изменяя магнитную проницаемость сердечника с помощью внешнего магнитного поля.

Трансформаторы напряжения служат для преобразования амплитуды переменного напряжения и гальванической развязки элементов электронных схем по постоянному напряжению. В настоящее время в маломощных электронных схемах широко применяют компактные трансформаторы, использующие явление электромагнитной индукции [3] и твердотельные трансформаторы, использующие пьезоэффект [4]. Однако оба вида трансформаторов имеют ряд недостатков. В частности, электромагнитные трансформаторы содержат две объёмные катушки, что увеличивает их размеры и затрудняет изготовление. Пьезоэлектрические трансформаторы имеют высокое входное и выходное сопротивление. Оба вида трансформаторов не позволяют оперативно перестраивать коэффициент преобразования напряжения.

В настоящей работе продемонстрированы возможности создания нового типа индукторов и трансформаторов, использующих магнитоэлектрические эффекты в композитных структурах ферромагнетик-пьезоэлектрик. Показано, что характеристиками таких устройств можно легко управлять с помощью электрических и магнитных полей. В начале описаны конструкции некоторых разработанных до настоящего времени устройств. Затем детально описаны и исследованы магнитоэлектрический индуктор и трансформатор новых конструкций, изготовленные в работе, которые обладают более высокими характеристиками, в том числе по диапазонам перестройки, по сравнению с известными.

2. МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ

Один из путей создания управляемых устройств электроники состоит в использовании так называемых «магнитоэлектрических» (МЭ)

эффектов в мультиферроидных материалах. Мультиферроидными называются материалы, которые обладают одновременно как магнитным, так и электрическим упорядочением. К мультиферроикам относятся целый ряд монокристаллов и искусственно созданные композитные материалы, содержащие ферромагнитную и ферроэлектрическую компоненты [5].

Выделяют два вида МЭ эффектов: прямой МЭ эффект определяют как появление (или изменение) электрического момента образца P во внешнем магнитном поле H , обратный МЭ эффект определяют как появление (изменение) намагниченности образца M во внешнем электрическом поле E .

Наибольший по величине МЭ эффект обнаружен в слоистых композитных гетероструктурах со слоями из ферромагнетика и пьезоэлектрика (ФМ-ПЭ). МЭ эффекты в таких структурах возникают в результате комбинации магнитострикции ФМ слоя и пьезоэлектричества в ПЭ слое из-за механической связи между слоями. При воздействии на структуру переменного магнитного поля $h(f)$ магнитострикция приводит к переменной деформации ФМ слоя, эта деформация передаётся ПЭ слою и он генерирует переменное электрическое напряжение $u(f)$ (прямой МЭ эффект). При приложении переменного электрического поля $e(f)$ к ПЭ слою структуры он деформируется из-за обратного пьезоэффекта, деформация передаётся ФМ слою, что, вследствие обратной магнитострикции (или эффекта Виллари), приводит к периодическому изменению его намагниченности $m(f)$ (обратный МЭ эффект) [6,7].

Прикладывая к структуре постоянные управляющее магнитное или электрическое поля можно в широких пределах изменять эффективность МЭ преобразований. Использование слоёв из различных ФМ и ПЭ материалов также открывает широкие возможности управления МЭ эффектами. Наконец, отметим, что в композитных гетероструктурах МЭ эффекты существуют при комнатных температурах, что крайне важно для применений.

3. МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ИНДУКТОР

Индукторы, в которых перестройка индуктивности осуществляется магнитным полем за счёт изменения магнитной проницаемости ферромагнитного сердечника, хорошо известны и описаны, например, в [1]. Перестройку индуктивности электрическим полем продемонстрировали недавно в индукторе, содержащем кольцо из MnZn-феррита с тороидальной обмоткой и пластину из цирконата-титаната свинца (PZT) внутри кольца [8]. Изменение индуктивности достигало $\Delta L/L_{min} = 20\%$ при поле $E = 5$ кВ/см. В индукторе на основе планарной структуры Metglas/PZT/Metglas, помещённой внутрь электромагнитной катушки, наблюдали изменение индуктивности на $\Delta L/L_{min} = 450\%$ под действием поля $E = 12$ кВ/см [9]. В [10,11] исследованы характеристики электрически перестраиваемых планарных индукторов с ФМ слоями из сплавов Metglas, FeGa, MnZn- и NiCo-ферритов и ПЭ слоями из керамики PZT и PMN-PT. В [12] описан индуктор на структуре со слоями из NiZn феррита, допированного Ga, и PZT, индуктивность которого перестраивали как магнитным, так и электрическим полем.

3.1 Конструкция МЭ индуктора

Конструкция изготовленного в работе МЭ индуктора схематически изображена на **рис. 1**. Основным элементом индуктора является кольцо из ПЭ материала, на внешнюю поверхность которого нанесено кольцо из ФМ материала. Кольцевая форма сердечника индуктора позволяет получить

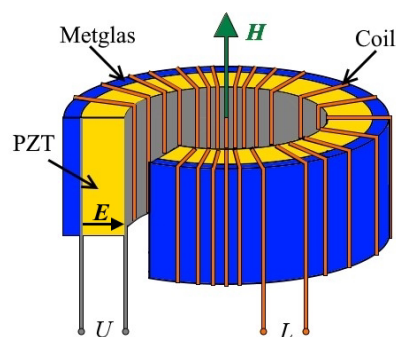


Рис. 1. Схематическое изображение МЭ индуктора. Стрелки указывают направление электрического поля E в ПЭ кольце и направление магнитного поля H .

большую величину индуктивности при малом размере и минимизирует электромагнитные наводки в окружающем пространстве. ПЭ кольцо изготовлено из широко применяемой пьезокерамики ЦТС-19 (НИИ ЭЛПА, Москва), имеет внешний диаметр $D = 17$ мм, толщину $a_p = 1$ мм и высоту 5 мм.

На внешнюю и внутреннюю поверхности кольца нанесены Ag-электроды толщиной ~ 2 мкм. Кольцо поляризовано в радиальном направлении путем приложения к электродам постоянного напряжения 600 В при температуре 100°C . Пьезомодуль керамики ЦТС-19 равен $d_{31} = -175$ пм/В, плотность $\rho_p = 7.5 \cdot 10^3$ кг/м³. В качестве ФМ материала использовали аморфную магнитную ленту состава $\text{Fe}_{81}\text{B}_{14}\text{Si}_3\text{C}_2$ (Metglas 2605SA1, Metglas Co, USA) толщиной $a_m \approx 25$ мкм, шириной $b = 5$ мм и длиной 55 мм. Аморфный ФМ сплав имеет индукцию насыщения $B_s \approx 1.6$ Тл, начальную магнитную проницаемость $\mu \approx 30000$, магнитострикцию насыщения $\lambda_s \approx 27 \cdot 10^{-6}$ и удельное сопротивление $\rho_m = 130 \cdot 10^{-6}$ Ом·см. Лента была наклеена на внешнюю поверхность ПЭ кольца с помощью цианакрилатного клея, что обеспечивало передачу деформаций через границу раздела. Структуру помещали внутрь пластмассового каркаса, на который была намотана тороидальная катушка, содержащая $N = 100$ витков провода диаметром 0.2 мм. Активное сопротивление катушки со структурой внутри равнялось $R = 1.13$ Ом, индуктивность составляла $L \approx 75$ мкГн, ёмкость кольца $C = 3.5$ нФ. Измерения индуктивности L и добротности $Q = 2\pi fL/R$ индуктора проводили методом последовательного резонанса с помощью RLC-измерителя АКТАКОМ АМ-3026 в диапазоне частот $f = 20$ Гц – 5 МГц с точностью 0.1%. Исследовали перестройку индуктивности L индуктора с помощью постоянного электрического E и магнитного H полей. Электрическое радиальное поле в ПЭ кольце напряжённостью $E = 0-18$ кВ/см создавали, прикладывая к электродам кольца напряжение $U = 0-1.8$ кВ от высоковольтного источника Stanford Research Systems PS350. Магнитное поле величиной $H = 0-200$ Э, создавали с помощью катушек Гельмгольца диаметром 15 см. Рассмотрены два случая: поле H приложено вдоль оси кольцевой структуры (показано на рис. 1) и

поле приложено в плоскости структуры. Кроме того, исследована перестройка индуктивности индуктора с помощью кругового поля H , созданного дополнительной тороидальной катушкой, намотанной на структуру, через которую пропускали постоянный ток $I = 0-200$ мА.

3.2. ПЕРЕСТРОЙКА ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ПОЛЕМ

Перестройку МЭ индуктора электрическим полем проводили путём приложения к электродам PZT слоя постоянного напряжения величиной до $U = 1.8$ кВ. На рис. 2 приведены зависимости индуктивности L от частоты f при различных управляющих полях E . Полярность приложенного поля $E > 0$ соответствует растяжению PZT-кольца за счёт обратного пьезоэффекта. Видно, что при всех E индуктивность L монотонно падает с увеличением частоты, а при постоянной частоте L падает с увеличением E . Максимальная и минимальная величины индуктивности в данном случае составляли $L_{\max} = 80$ мкГн и $L_{\min} = 5.5$ мкГн, соответственно. Перестройку индуктивности под действием поля E наблюдали в диапазоне частот до ~ 10 кГц. Коэффициент перестройки индуктора электрическим полем достигал $\gamma = (L_0 - L)/L \approx 412\%$ (где L_0 – индуктивность в отсутствие поля).

На рис. 3 приведены зависимости индуктивности МЭ индуктора L от поля на частоте 300 Гц при изменении поля E по замкнутому циклу с большой и малой амплитудой. Без поля ($E = 0$) в начальной точке “А” индуктивность равнялась $L_0 = 76$ мкГн. Из рис. 3а видно, что при увеличении E в положительном направлении ($E > 0$), L сначала монотонно растёт до 82 мкГн,

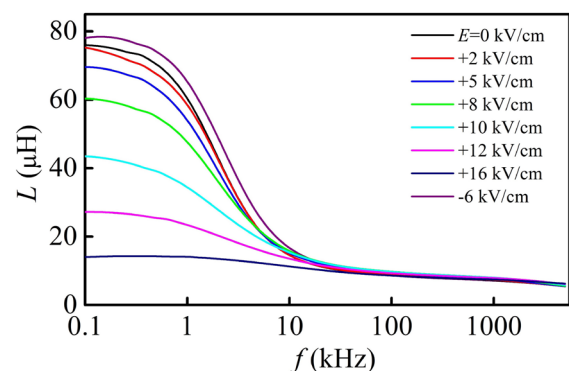


Рис. 2 Зависимость индуктивности L МЭ индуктора от частоты f при различных электрических полях E .

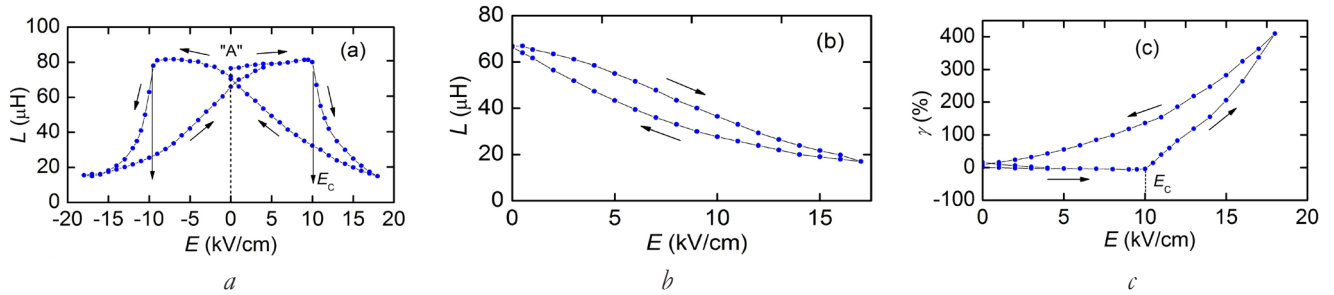


Рис. 3. Зависимость индуктивности L МЭ индуктора от поля E на частоте 300 Гц при циклическом изменении поля с большой (а) и малой (б) амплитудой. (с) зависимость коэффициента перестройки индуктивности γ от поля E . E_c – поле переполяризации PZT-кольца. Стрелки указывают направление изменения поля E .

затем начинает резко падать при напряжённости электрического поля $E \approx E_c$ и продолжает более медленно уменьшаться до $L \approx 15$ мкГн по мере увеличения поля до 18 кВ/см. В ходе последующего уменьшения поля E до нуля индуктивность монотонно возрастает до значения $L \approx 70$ мкГн. После изменения полярности поля ($E < 0$) и последующего увеличения поля, индуктивность ведёт себя аналогичным образом: сначала монотонно возрастает, затем при $E \approx -E_c$ скачком падает и продолжает уменьшаться до $L \approx 15$ мкГн в поле -18 кВ/см. На последнем участке кривой с увеличением E от -18 кВ/см до нуля индуктивность монотонно возрастает до 70 мкГн. Характерные поля $E_c \approx \pm 10$ кВ/см соответствуют полям переполяризации PZT-кольца, при которых вектор поляризации P в пьезоэлектрике изменяет свое направление на противоположное.

Видно, что электрическая перестройка МЭ индуктора при амплитуде поля $E > E_c$ существенно нелинейна и имеет большой гистерезис. Гистерезис уменьшается при изменении поля E в меньших пределах и движении только по нижнему участку кривой на рис. 3а, где переполяризация структуры отсутствует. Однако и в этом случае (рис. 3б) зависимость $L(E)$ остаётся нелинейной. На рис. 3с приведена зависимость коэффициента перестройки МЭ индуктора γ от поля E , построенная с использованием данных рис. 3а для $E > 0$. Максимальная перестройка индуктивности электрическим полем на частоте 300 Гц достигала $\gamma = 413\%$.

Изменение индуктивности МЭ индуктора под действием электрического напряжения связано с изменением проницаемости магнитного слоя

благодаря обратному МЭ эффекту. Относительная магнитная проницаемость μ_r магнитных материалов может быть выражена как [13]

$$\mu_r = \chi + 1 = \frac{\mu_0 M_s^2}{2 |K_0 + K_\sigma|} + 1, \quad (1)$$

$$K_\sigma = \frac{3}{2} \lambda_s \sigma, \quad (2)$$

где μ_0 – магнитная проницаемость вакуума, M_s – намагниченность насыщения, K_0 – начальная магнитная анизотропия (включая магнитокристаллическую анизотропию и анизотропию формы), K_σ – индуцированная напряжениями магнитоупругая анизотропия (анизотропия напряжений), λ_s – магнитострикция насыщения, σ – приложенные напряжения. В МЭ индукторе механические напряжения, приложенные к магнитному слою, образуются в результате воздействия пьезоэлектрического слоя. Поэтому μ_r коррелирует с электрическим полем, приложенным к пьезоэлектрическому слою, и соотношение (1) принимает вид:

$$\mu_r = \frac{\mu_0 M_s^w}{2K_0 + 3\lambda_s Y d_{eff} E} + 1, \quad (3)$$

где d_{eff} – эффективный коэффициент пьезодеформации, Y – модуль Юнга, E – электрическое поле, приложенное к пьезоэлектрику. Так как изменение линейных размеров индукторов из-за пьезоэлектрического эффекта и магнитострикции мало ($< 0.5\%$), а магнитная проницаемость μ_r магнитного материала существенно больше 1, то изменение индуктивности должно быть прямо пропорционально μ_r . В этом случае коэффициент перестройки индуктивности γ связан с электрическим полем E следующим

выражением [14]:

$$\gamma = \frac{L_0 - L_E}{L_E} = \frac{3}{2} \frac{\lambda_s}{K_0} Y d_{eff} E. \quad (4)$$

3.3. ПЕРЕСТРОЙКА МАГНИТНЫМ ПОЛЕМ

На рис. 4 приведена зависимость индуктивности L МЭ индуктора от частоты f при намагничивании его внешним магнитным полем H вдоль оси. Из рисунка видно, что при любом поле в диапазоне $H = 0-200$ Э индуктивность L примерно постоянна в области малых частот, а затем монотонно падает с увеличением частоты. Ширина области частот, где индуктивность постоянна, расширяется от ~ 0.2 кГц при $H \sim 0$ до ~ 100 кГц с увеличением поля H от нуля до 200 Э. При этом абсолютная величина индуктивности в целом падает с увеличением магнитного поля. Максимальная величина индуктивности составляла $L_{max} = 77$ мкГн при $H = 0$ на частоте 0.1 кГц. Минимальная величина индуктивности равнялась $L_{min} = 6$ мкГн в области больших частот ~ 5 МГц при всех полях. Аналогичные по форме зависимости были получены для двух других ориентаций магнитного поля: в плоскости структуры и с помощью кругового поля. Главное отличие заключается в диапазоне приложенного магнитного поля, который для этих случаев составлял $H = 0-20$ Э.

На рис. 5 приведены зависимости индуктивности L МЭ индуктора и коэффициента перестройки индуктивности γ от магнитного поля и от управляющего тока (для случая кольцевого магнитного поля). Измерения проводили на частоте 300 Гц. Значения $H < 0$ соответствуют изменению направления поля на противоположное. Видно, что для всех трёх ориентаций магнитного поля L не зависит от направления поля и монотонно падает с

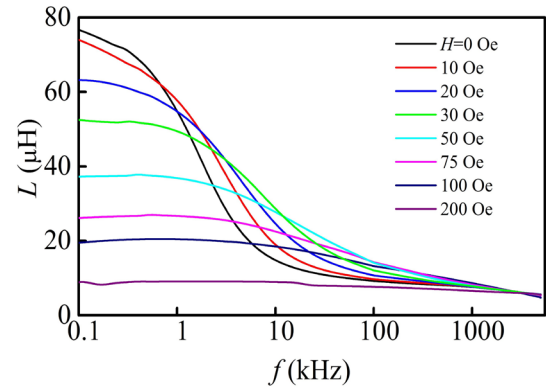


Рис. 4. Зависимость индуктивности L индуктора от частоты f при намагничивании полем H вдоль оси структуры. увеличением H .

В случае ориентации поля вдоль оси структуры (рис. 5а) на частоте 300 Гц индуктивность под действием магнитного поля уменьшалась в ~ 8 раз. С увеличением частоты, как следует из рис. 4, диапазон перестройки L под действием поля уменьшается. В области низких частот коэффициент перестройки индуктивности индуктора магнитным полем, параллельным оси структуры, составлял $\gamma \approx 690\%$ при величине управляющего поля до $H = 200$ Э.

В случае ориентации поля в плоскости структуры (рис. 5б) индуктивность L падает до минимального значения в поле $H \sim 20$ Э, в ~ 10 раз меньше, чем в предыдущем случае. На частоте 300 Гц индуктивность под действием магнитного поля уменьшается в ~ 11 раз. Максимальный коэффициент перестройки индуктора при намагничивании структуры в плоскости достигал $\gamma \approx 1000\%$ при величине управляющего поля $H \approx 20$ Э.

На рис. 5с приведены зависимости индуктивности L МЭ индуктора от управляющего тока для случая кольцевого магнитного поля. На верхней оси рис. 5с для сравнения с предыдущими случаями отложена рассчитанная величина поля

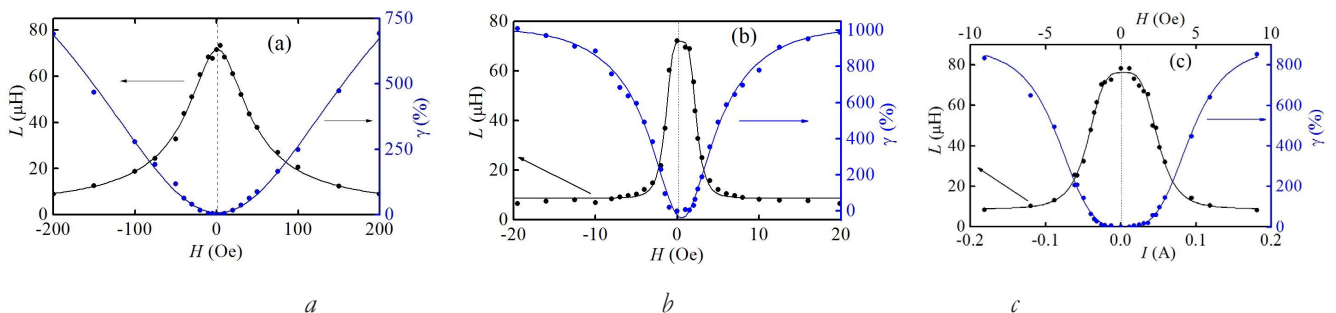


Рис. 5. Зависимости индуктивности L индуктора и коэффициента перестройки индуктивности γ от магнитного поля (тока) для случая: (а) поле направлено вдоль оси; (б) поле направлено в плоскости; (в) Кольцевое магнитное поле. Измерения проводили на частоте 300 Гц.

H , созданного этим током в месте расположения ФМ слоя. Падение индуктивности с увеличением H более быстрое, чем в предыдущих случаях. Максимальный коэффициент перестройки индуктивности при намагничивании структуры полем тороидальной катушки достигал $\gamma \approx 850\%$ при величине управляющего тока $I = 0.18 \text{ А}$ ($H = 9 \text{ Э}$).

Индуктивность МЭ индуктора L меняется из-за изменения магнитной проницаемости ФМ слоя. Относительные изменения размеров структуры из-за магнитоупругости составляют не более 10^{-4} и их можно не учитывать.

Для объяснения механизма перестройки индуктора магнитным полем были проведены дополнительные измерения. На рис. 6 приведена измеренная кривая намагничивания $B(H)$ для тестового образца из ленты Metglas 2605SA1 размерами $15 \text{ мм} \times 5 \text{ мм} \times 23 \text{ мкм}$, намагниченном вдоль длинной оси. Там же показана полевая зависимость действительной части нормированной магнитной проницаемости $\mu'(H)/\mu_{\text{max}}$, полученная методом численного дифференцирования кривой $B(H)$. Видно, что в области малых полей проницаемость примерно постоянна, а затем монотонно падает до нуля с увеличением H . Именно такая зависимость $\mu(H)$ позволяет изменять индуктивность с помощью магнитного поля H . Для качественного объяснения рассмотренных выше случаев учтем эффекты размагничивания.

Известно, что в ФМ образце конечных размеров из-за размагничивания среднее поле H_{in} внутри ферромагнетика меньше внешнего

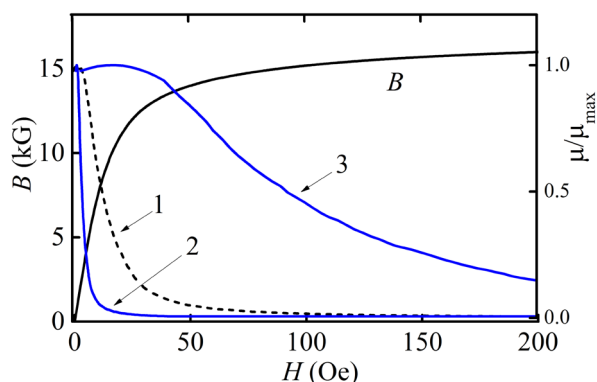


Рис. 6. Полевые зависимости магнитной индукции B для тестового образца Metglas и нормированной магнитной проницаемости μ/μ_{max} для: 1 — тестового образца, 2 — кольцевой структуры, намагниченной вдоль образующей, 3 — кольцевой структуры, намагниченной вдоль оси.

поля H и связано с ним соотношением [15]

$$H_{\text{in}} \approx \frac{H}{1 + N\chi}, \quad (5)$$

где N — размагничивающий фактор образца вдоль направления поля, $\chi(H=0)$ — начальная магнитная восприимчивость. Для Metglas $\chi \gg 1$, поэтому можно принять $\chi = \mu(0)$. Таким образом, размагничивание фактически приводит к масштабированию внешнего магнитного поля в $1 + N\mu(0)$ раз. Измерив полевую зависимость $\mu(H)$ для ФМ образца с известным размагничивающим фактором и зная размагничивающий фактор для другого образца, можно построить для другого образца полевую зависимость $\mu(H)$. Для ФМ образцов в виде прямоугольной призмы размагничивающие факторы рассчитаны в [16]. Рассчитанные с использованием измеренной кривой $B(H)$ для тестового образца и уравнения (4) полевые зависимости $\mu(H)$ для ФМ полоски, намагниченной вдоль длины и вдоль ширины, также показаны на рис. 6. Будем полагать, что для ФМ кольца, намагниченного вдоль образующей и вдоль оси, зависимости $\mu(H)$ имеют аналогичный вид.

Тогда из рис. 6 следует, что при намагничивании кольцевой структуры вдоль образующей μ спадает, например в 5 раз, в магнитном поле $H \sim 4 \text{ Э}$, что согласуется с уменьшением индуктивности L индуктора на рис. 5с в 5 раз при изменении поля на $\sim 4.5 \text{ Э}$. При намагничивании кольцевой структуры вдоль оси из-за сильного размагничивания μ уменьшается гораздо медленнее. Магнитная проницаемость на кривой 3 рис. 6 спадает в 5 раз при изменении поля на 150 Э, что хорошо согласуется с уменьшением индуктивности L на Рис. 5с в 5 раз при изменении поля на $\sim 135 \text{ Э}$.

Магнитный гистерезис ФМ слоя структуры при циклической перестройке индуктора магнитным полем приводит к неоднозначности установления индуктивности L . Для аморфного сплава Metglas 2605SA1 величина коэрцитивной силы составляла $H_c = 0.2 \text{ Э}$. Из-за гистерезиса максимальная погрешность установки индуктивности составляла $\Delta L/L \approx 0.3\%$ при намагничивании структуры вдоль оси и $\Delta L/L \approx 12\%$ при намагничивании структуры в плоскости или вдоль образующей.

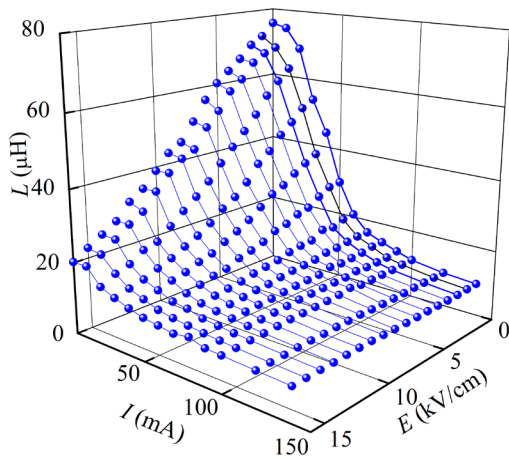


Рис. 7. Зависимости индуктивности L от тока I через управляющую катушку при разных электрических полях E .

Рис. 7 демонстрирует возможность перестройки индуктора одновременно током I через управляющую катушку (т.е. магнитным полем H) и электрическим полем E , приложенным к PZT-кольцу. В отсутствие тока при $E = 0$ индуктивность равнялась $L \approx 75$ мкГн. При возрастании тока I и электрического поля E индуктивность монотонно падает. Поэтому с увеличением поля E , диапазон перестройки индуктивности током сужается.

4. МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТРАНСФОРМАТОР

На сегодняшний день предложено несколько различных конструкций МЭ трансформаторов. Созданы и исследованы макеты как повышающих [17-19] (работающих на прямом МЭ эффекте), так и понижающих трансформаторов [20-22] (работающих на обратном МЭ эффекте) на основе гетероструктур со слоями из различных ФМ и ПЭ материалов. Продемонстрированы возможности управления коэффициентом трансформации напряжения с помощью постоянного магнитного поля [18,23] или

постоянного электрического поля [24], приложенных к структуре. Предложены методы расчёта характеристик МЭ трансформаторов различных конструкций [25].

4.1 КОНСТРУКЦИЯ ТРАНСФОРМАТОРА

Композитная гетероструктура и конструкция повышающего МЭ трансформатора на её основе схематически изображены на рис. 8а и 8б, соответственно. Основным элементом трансформатора является трёхслойная гетероструктура, содержащая ПЭ слой, расположенный между двумя ФМ слоями [26]. Пьезоэлектрический слой размерами $20 \text{ мм} \times 10 \text{ мм}$ и толщиной $a_p = 2 \text{ мм}$ выполнен из трансформаторной пьезокерамики состава $\text{Pb}(\text{Zr},\text{Ti})\text{O}_3$ (ЦТС-47, АО НИИ «Элпа», Россия). Пьезокерамика имеет пьезомодуль $d_{33} = 290 \text{ пКл/Н}$, высокую электромеханическую добротность $Q = 900$, коэффициент электромеханической связи $k_p = 0.56$, тангенс диэлектрических потерь $\text{tg} \delta < 0.6$ и температуру Кюри $T_c = 270^\circ\text{C}$. На торцы ПЭ слоя были нанесены Ag-электроды и он был поляризован вдоль длинной оси. Ёмкость между электродами ПЭ элемента составляла $C_2 = 66.3 \text{ пк Ф}$. Ферромагнитные слои, размерами $20 \text{ мм} \times 10 \text{ мм}$ и толщиной $a_m = 0.5 \text{ мм}$ каждый, выполнены из магнитострикционного никелевого феррита состава $\text{Ni}_{0.99}\text{Co}_{0.01}\text{F}_2\text{O}_3$. Слои имели индукцию насыщения $B_s = 0.33 \text{ Тл}$, магнитострикцию насыщения $\lambda_s = 26 \cdot 10^{-6}$, магнитную проницаемость $\mu = 51$, магнитомеханический коэффициент связи $k_m = 0.2$ и температуру Кюри $T_c = 500^\circ\text{C}$. Слои пьезокерамики и феррита были соединены под прессом с помощью цианакрилатного клея.

Структура была помещена внутрь электромагнитной катушки длиной 20 мм , содержащей 120 витков провода диаметром 0.2 мм , которая создавала переменное магнитное поле $h(f)$, и жёстко закреплена в центре для максимально

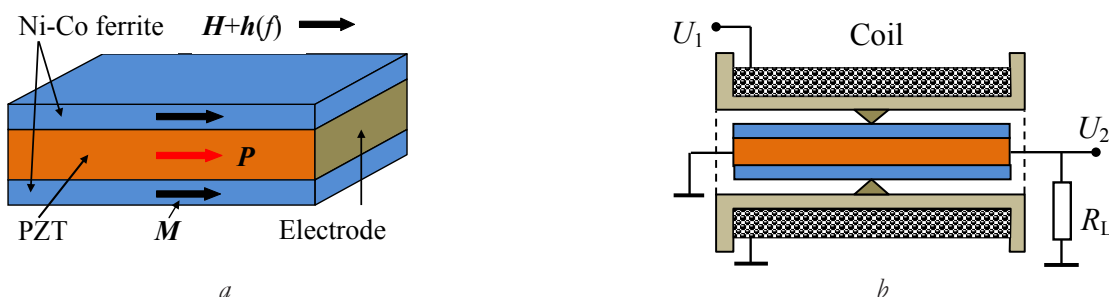


Рис. 8. Схематичное изображение (а) трёхслойной структуры Ni-Co-ferrite-PZT и (б) трансформатора. Стрелки указывают направление поляризации PZT слоя и направление поля H .

эффективного возбуждения основной моды продольных акустических колебаний. Сопротивление и индуктивность катушки со структурой внутри равнялись $R_1 = 2.3$ Ом и $L = 168$ мкГн, соответственно. Постоянное управляющее магнитное поле $H = 0-200$ Э прикладывали параллельно длинной оси структуры и оси катушки с помощью электромагнита.

На входную катушку трансформатора подавали напряжение $U_1 \cos(2\pi ft)$ с амплитудой U_1 до 8 В и частотой $f = 0-200$ кГц от генератора Agilent 33210А. Выходное напряжение трансформатора U_2 регистрировали на сопротивлении нагрузки R_L . Напряжения измеряли с помощью вольтметра АКІР 2401 с входным сопротивлением более 10 МОм. Коэффициент преобразования напряжения трансформатора определяли как $K = U_2/U_1$. Для нахождения входной мощности P_1 во входной цепи трансформатора последовательно с катушкой было включено малое добавочное сопротивление для определения тока I_1 . Входную мощность рассчитывали по формуле $P_1 = U_1 I_1 \cos(\varphi)$, где φ – сдвиг фаз между напряжением и током. Выходную мощность рассчитывали как $P_2 = U_2^2 / R_L$. Регистрировали характеристики устройства при изменении частоты f и амплитуды U_1 входного напряжения, управляющего магнитного поля H и сопротивления нагрузки R_L .

4.2 УПРАВЛЕНИЕ МАГНИТНЫМ ПОЛЕМ

На рис. 9 приведена амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) МЭ трансформатора в режиме холостого хода (при $R_L = \infty$) при $U_1 = 1$ В и постоянном магнитном поле $H = 80$ Э. На АЧХ виден резонансный пик вблизи центральной частоты $f_0 \approx 99$ кГц. Добротность резонанса, оценённая по ширине резонансной кривой δf на высоте 0.7, составляет $Q = f_0/\delta f \approx 143$. Коэффициент преобразования напряжения на частоте резонанса равен $K = U_2/U_1 = 14.1$.

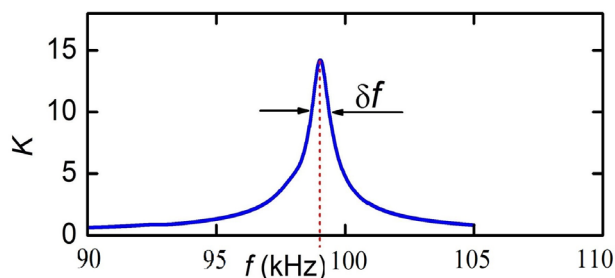


Рис. 9. Зависимость выходного напряжения U_2 от частоты f при $U_1 = 1$ В.

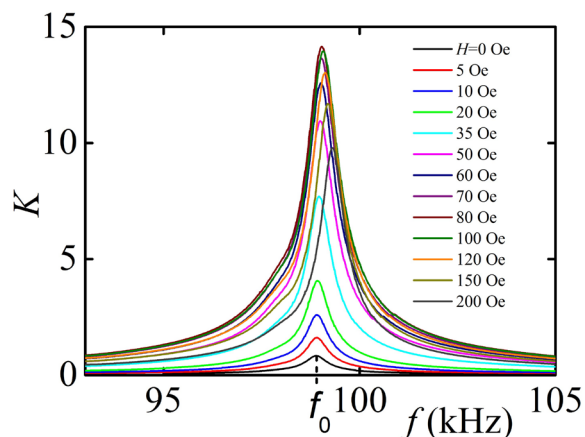


Рис. 10. Зависимости коэффициента преобразования напряжения K МЭ трансформатора от частоты f при различных значениях управляющего постоянного поля $H = 0-200$ Э в отсутствии сопротивления нагрузки.

Рассчитанное значение резонансной частоты структуры составило $f_0 \approx 100.4$ кГц, что хорошо согласуется с измеренным значением.

Важнейшей особенностью МЭ трансформаторов, по сравнению с электромагнитными и пьезоэлектрическими трансформаторами, является возможность управления коэффициентом преобразования напряжения с помощью магнитного поля. На рис. 10 приведены измеренные зависимости коэффициента преобразования напряжения K от частоты f входного напряжения с амплитудой 1 В без нагрузки. Видно, что увеличение постоянного поля H приводит к сильному изменению коэффициента преобразования K и небольшому сдвигу резонансной частоты f_0 .

На рис. 11 приведены зависимости коэффициента K трансформатора, резонансной частоты f_0 и добротности резонанса Q от магнитного поля H , построенные по данным рис. 10. Видно, что с увеличением поля коэффициент K сначала примерно линейно растёт от нуля до максимального значения $K = 14.1$ при $H_m \approx 80$ Э, а затем монотонно уменьшается с дальнейшим ростом поля. Резонансная частота f_0 примерно линейно возрастает на $\sim 0.4\%$ с увеличением поля. Добротность резонанса уменьшается от $Q \approx 200$ в отсутствие поля до минимума $Q \approx 143$ при том же значении $H_m \approx 80$ Э, а затем снова растёт до $Q \approx 189$ при $H = 200$ Э.

Возможность управления коэффициентом передачи напряжения обусловлена зависимостью величины прямого МЭ эффекта в композитных

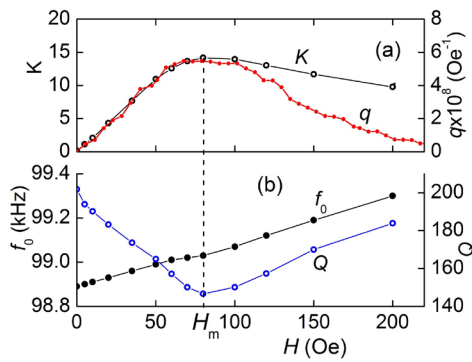


Рис. 11. Зависимости (а) коэффициента преобразования К МЭ трансформатора и пьезомагнитного коэффициента q от магнитного поля H и (б) резонансной частоты f_0 и добротности Q от поля H в случае отсутствия нагрузки.

структурах от постоянного поля. Для подтверждения этого обстоятельства, с помощью тензодатчика, наклеенного на поверхность слоя феррита, была измерена полевая зависимость магнитоупругости $\lambda(H)$. Затем методом численного дифференцирования была найдена полевая зависимость пьезомагнитного коэффициента ($q = d\lambda/dH$). Полученная зависимость $q(H)$ также изображена на рис. 11а. Для удобства сравнения масштаб по вертикальной оси для q выбран так, чтобы максимумы зависимостей $K(H)$ и $q(H)$ визуально совпадали. Видно, что пьезомагнитный коэффициент q вначале линейно растёт с увеличением поля H , достигает максимума при том же характерном поле $H_m \approx 80$ Э, а затем уменьшается по мере насыщения слоя феррита. Формы полевых зависимостей $K(H)$ и $q(H)$ качественно хорошо совпадают. Расхождение зависимостей в области больших полей может быть обусловлено влиянием эффекта Пуассона и неоднородностью магнитного поля внутри ФМ пластин из-за эффектов размагничивания, что не учитывали в расчетах. Зависимость резонансной частоты f_0 и добротности Q структуры от постоянного поля H (рис. 11б) обусловлены зависимостью модуля Юнга и механических потерь ферритового слоя структуры от магнитного поля H .

Затем были измерены характеристики трансформатора в зависимости от сопротивления нагрузки $R_L = 0-220$ кОм при оптимальном поле смещения $H_m = 80$ Э и амплитуде входного напряжения $U_1 = 1$ В. На рис. 12 приведены зависимости коэффициента преобразования K , выходной мощности P_2 , частоты f_0 и добротности Q резонанса от R_L . Видно, что коэффициент

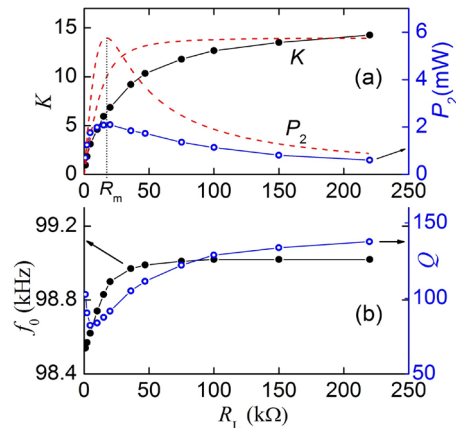


Рис. 12. Зависимости (а) коэффициента преобразования К трансформатора и мощности P_2 от сопротивления нагрузки R и (б) резонансной частоты f_0 и добротности Q от сопротивления нагрузки R_L при $H = 80$ Э. Пунктиром показаны результаты расчетов.

преобразования напряжения монотонно растёт от нуля до 14.1 с увеличением сопротивления нагрузки до $R_L = 220$ кОм. При этом выходная мощность P_2 изменяется немонотонно: сначала растёт от нуля и достигает максимума $P_m \approx 2.1$ мВт при сопротивлении нагрузки $R_m \approx 20$ кОм, а затем монотонно уменьшается до $P_2 \approx 0.6$ мВт при дальнейшем увеличении сопротивления до $R_L = 220$ кОм. При выходном напряжении $U_2 = 50$ В она составляла 125 мВт.

Резонансная частота МЭ трансформатора f_0 при этом монотонно растёт менее, чем на 0.5%, от 98.54 кГц до 99.02 кГц с увеличением нагрузки. Добротность резонанса Q с увеличением сопротивления нагрузки сначала резко уменьшается от $Q \approx 100$ до $Q \approx 80$ при $R_L \approx 5$ кОм, а затем вновь возрастает до $Q \approx 142$ при больших сопротивлениях нагрузки (см. рис. 11б).

На рис. 13 приведены зависимости напряжения на выходе МЭ трансформатора от напряжения на его входе при различных сопротивлениях нагрузки. Видно, что в исследованном диапазоне входных напряжений 0-8 В зависимости линейны и диапазон рабочих выходных напряжений трансформатора достигает сотни вольт.

4.3. РАСЧЁТ ХАРАКТЕРИСТИК ТРАНСФОРМАТОРА

Для объяснения зависимостей, показанных на рис. 12а, запишем уравнение для тока в выходном контуре трансформатора

$$I_2 = \frac{U_{ME}}{\sqrt{R_2^2(1/\omega C)^2 + R_L^2}}, \quad (6)$$

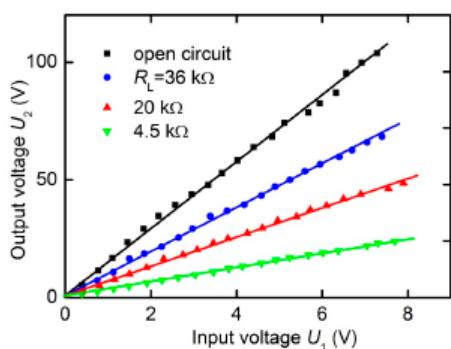


Рис. 13. Зависимости выходного напряжения МЭ трансформатора U_2 от входного напряжения U_1 на резонансной частоте при $H_m = 80$ Э и различных сопротивлениях нагрузки R_L (4.5, 20 and 36 $\text{k}\Omega$) и без нагрузки.

где U_{ME} – амплитуда напряжения в выходном контуре, индуцированного в результате МЭ эффекта. На частоте резонанса измеренное активное сопротивление и ёмкость PZT-слоя равнялись $R_2 \approx 17 \text{ кОм}$ и $C \approx 1.8 \text{ пФ}$, т.е. выполнялось условие $R_2 \ll 1/(\omega C)$, где $\omega = 2\pi f$. Тогда для выходного напряжения из (6) получаем

$$U_2 = I_2 R_L \approx \frac{U_{ME} R_L}{\sqrt{R_2^2 + R_L^2}}. \quad (7)$$

Рассчитанная по формуле (7) зависимость при значении параметра $U_{ME} = 14.1 \text{ В}$ показана на рис. 12а пунктирной линией. Видно, что теория качественно хорошо описывает зависимость напряжения от сопротивления нагрузки. Для выходной мощности P_2 , используя формулу (7) в том же приближении $R_2^2 \ll 1/(\omega C)$ получаем выражение

$$P_2 = I_2^2 R_L = \frac{U_{ME}^2 R_L}{R_2^2 + R_L^2}. \quad (8)$$

Мощность на выходе трансформатора достигает максимального значения при $R_L = R_2 \approx 17 \text{ кОм}$. Рассчитанная с использованием (8) зависимость $P_2(R_L)$ при значениях параметров $U_{ME} = 14.1 \text{ В}$ и $R_2 = 17 \text{ кОм}$ также показана на рис. 12а пунктирной линией. Таким образом, теория качественно хорошо описывает зависимость выходной мощности от сопротивления нагрузки.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в работе изготовлены и исследованы МЭ индуктор с изменяемым коэффициентом перестройки индуктивности и МЭ трансформатор с управляемым коэффициентом преобразования напряжения новых конструкций.

Уникальным свойством МЭ индуктора

является перестройка индуктивности с помощью внешних электрического и магнитного полей. Индуктивность L устройства перестраивается в пределах $\sim 65 \text{ мкГн}$ электрическим и магнитным полем. Управляющее магнитное поле минимально $\sim 10 \text{ Э}$ при намагничивании кольцевой структуры в плоскости или вдоль образующей и возрастает до $\sim 200 \text{ Э}$ при намагничивании структуры вдоль оси из-за эффектов размагничивания. Коэффициент перестройки индуктивности составлял $\sim 400\%$ при электрической и $\sim 1000\%$ при магнитной перестройке. Затраты мощности для магнитной и электрической перестройки индуктора примерно сравнимы по величине и составляют $\sim 1-10 \text{ мВт}$. Однако при электрической перестройке не требуется дополнительная мощность для поддержания заданной индуктивности

Уникальным свойством МЭ трансформатора является перестройка коэффициента преобразования напряжения внешним магнитным полем. Трансформатор работает в диапазоне входных напряжений $0-8 \text{ В}$, коэффициент преобразования напряжения достигает $K = 14.1$ и перестраивается от нуля до максимального значения при изменении магнитного поля H от нуля до 80 Э . В диапазоне входных напряжений от нуля до 8 В амплитуда выходного напряжения линейно зависит от входного напряжения. При оптимальном сопротивлении нагрузки 20 кОм максимальная мощность на выходе трансформатора достигала 125 мВт , при этом максимальный коэффициент передачи мощности составлял $\sim 30.5\%$.

ЛИТЕРАТУРА

1. Hurley WG, Wolfe WH. *Transformers and Inductors for Power Electronics: Theory, Design and Applications* (1st ed.). WILEY, 2013, 370 pages.
2. Mathuna CO, Wang N, Kulkarni S and Roy S. Review of integrated magnetics for power supply on chip (PwrSoC), *IEEE Tran. On Power Electronics*, 2012, 27(11):4799-4816.
3. Harlow JH. *Electric Power Transformer Engineering* (3rd ed.). CRC Press, Taylor and Francis Group: Boca Raton, FL, USA, 2017.
4. Carazo AV. Piezoelectric Transformers: An Historical Review. *Actuators*, 2016, 5:12.
5. Пятаков АП, Звездин А К. Магнитоэлектрические материалы и мультиферроики. УФН, 2012, 182(6):593-620.

6. Cho K-H, Priya S. Direct and converse effect in magnetoelectric laminate composites. *Appl. Phys. Lett.*, 2011, 98(23):232904.
7. Nan C-W, Bichurin MI, Dong S, Viehland D, Srinivasan G. Multiferroic magnetoelectric composites: Historical perspective, status, and future directions. *J. Appl. Phys.*, 2008, 103(3):031101.
8. Geng LD, Yan Y, Priya S, Wang YU. Computational study of cobalt-modified nickel-ferrite/PZT magnetoelectric composites for voltage tunable inductor applications. *Acta Materialia*, 2019, 166:493-502.
9. Lou J, Reed D, Liu M and Sun NX. Electrostatically tunable magnetoelectric inductors with large inductance tunability. *Appl. Phys. Lett.*, 2009, 94:112508.
10. Yan Y, Geng LD, Tan Y, Ma J, Zhang L, Sanghadasa M, Nga K, Ghost AW, Wang YU, Priya S. Colossal tunability in high frequency magnetoelectric voltage tunable inductors. *Nature comm.*, 2018, 9:4998.
11. Yan Y, Geng LD, Zhang L, Tu C, Sriramdas R, Liu H, Li X, Sanghadasa M, Ngo K, Wang YU, Priya S. High power magnetoelectric voltage tunable inductors. *IEEE Trans on Industrial Electronics*, 2020, 1-1.
12. Zhang J, Chen D, Filippov DA, Li K, Zhang Q, Jiang L, Zhu W, Cao L and Srinivasan G. Bidirectional tunable ferrite-piezoelectric trilayer magnetoelectric inductors. *Appl. Phys. Lett.*, 2018, 113:113502.
13. Spano ML, Hathaway KB & Savage HT. Magnetostriction and magnetic-anisotropy of annealed Metglas 2605 alloys via DC M-H loop measurements under stress. *J. Appl. Phys.*, 1982, 53:2667-2669.
14. Yan Y, Geng LD, Zhang L, Gao X, Gollapudi S, Song HC, Dong S, Sanghadasa M, Ngo K, Wang YU, Priya S. Correlation between tenability and anisotropy in magnetoelectric voltage tunable inductor (VTI) *Scientific Rep.*, 2017, 7:16008.
15. Osborn JA. Demagnetizing factors of general ellipsoid. *Phys. Rev.*, 1945, 67:1351-1357.
16. Chen DX, Pardo E, Sanchez A. Demagnetizing factors for rectangular prisms. *IEEE Trans. Magnetism*, 2006, 41:2077-2088.
17. Dong S, Li JF, Viehland D, Cross LE. A strong magnetoelectric voltage gain effect in magnetostrictive-piezoelectric composite. *Appl. Phys. Lett.*, 2004, 85:3534-3536.
18. Dong S, Li JF, Viehland D. Voltage gain effect in a ring-type magnetoelectric laminate. *Appl. Phys. Lett.*, 2004, 84:4188-4190.
19. Dong S, Zhai J, Priya S, Li J-F, Viehland D. Tunable features of magnetoelectric transformers. *IEEE Trans on Ultrasonics, Ferroelectrics and Freq. Control.*, 2009, 56:1124-1127.
20. Leung CM, Or SW, Wang F, Ho SL. Dual resonance converse magnetoelectric and voltage step-up effects in laminated composite of long-type PMN piezoelectric single-crystal transformer and Terfenol magnetostrictive alloy bars. *J. Appl. Phys.*, 2011, 109:104103.
21. Filippov DA, Galkina TA, Laletin VM, Srinivasan G. Voltage transformer based on inverse magnetoelectric effect. *Tech. Phys. Lett.*, 2012, 38:93-95.
22. Wang H, Qu L, Qiao W. Adjustable-voltage-ratio magneto-electric transformer. *IEEE Magnetic Letters*, 2015, 6:6000104.
23. Liu YH, Wan JG, Liu J-M, Nan CW. Effect of magnetic bias field on magnetoelectric coupling in magnetoelectric composites. *J. Appl. Phys.*, 2003, 94:5118-5122.
24. Fetisov YK, Fetisov LY, Srinivasan G. Influence of bias electric field on magnetoelectric interactions in ferromagnetic-piezoelectric layered structures. *Appl. Phys. Lett.*, 2009, 94:132507.
25. Leung CM, Zhuang X, Xu J, Li J, Srinivasan G, Viehland D. Importance of composite parameters in enhanced power conversion efficiency of Terfenol D/PZT magnetoelectric gyrators. *Appl. Phys. Lett.*, 2017, 110:112904.
26. Saveliev D, Chashin D, Fetisov L, Shamonin M, Fetisov Y. Ceramic-heterostructure-based magnetoelectric voltage transformer with an adjustable transformation ratio. *Materials*, 2020, 13(18):3981.

Фетисов Леонид Юрьевич

д.ф.-м.н., доцент

РТУ МИРЭА, кафедра наноэлектроники
78, просп. Вернадского, Москва 119454, Россия
fetisovl@yandex.ru

Чашин Дмитрий Владимирович

к.т.н., ведущий научный сотрудник,

РТУ МИРЭА, НОЦ «Магнитоэлектрические материалы и устройства»
78, просп. Вернадского, Москва 119454, Россия
chashindv@yandex.ru

Фетисов Юрий Константинович

д.ф.-м.н., профессор

РТУ МИРЭА, НОЦ «Магнитоэлектрические материалы и устройства», директор
78, просп. Вернадского, Москва 119454, Россия
fetisov@mirea.ru.