

Математическое и физическое моделирование фильтра низких частот на основе многофункционального интегрированного электромагнитного компонента

ХАЗИЕВА Р.Т., ИВАНОВ М.Д.

УГНТУ, Уфа, Россия

Рассматривается возможность использования многофункционального интегрированного электромагнитного компонента (МИЭК) в качестве LC-фильтра. Выполнено математическое и физическое моделирование фильтра низких частот на основе МИЭК для преобразователей постоянного напряжения. Фильтры на основе МИЭК характеризуются улучшенными массогабаритными показателями по сравнению с фильтрами, выполненными на дискретных электромагнитных элементах. В статье использован подход к расчету параметров МИЭК на основе теории четырехполюсников. Получены выражения для A-параметров на основе эквивалентных интегральных параметров схемы замещения односекционного МИЭК с учетом влияния взаимной индуктивности проводящих обкладок компонента. Построены амплитудно-частотная и фазочастотная характеристики фильтра низких частот на основе МИЭК. Результаты компьютерного моделирования фильтра в Matlab Simulink подтвердили полученные аналитические выражения. Установлено, что применение фильтра низких частот на основе МИЭК снижает амплитуду высокочастотных пульсаций, возникающих при работе полупроводниковых ключей. Осциллограммы напряжений, полученные в ходе физического эксперимента, подтверждают адекватность полученных зависимостей и выражений.

К л ю ч е в ы е с л о в а: многофункциональный интегрированный электромагнитный компонент, фильтр низких частот, LC-фильтр, амплитудно-частотная характеристика, фазочастотная характеристика, четырехполюсник, преобразователь постоянного напряжения

Преобразователи постоянного напряжения используются во многих современных электротехнических комплексах, системах и устройствах: в компьютерах, телекоммуникационных устройствах, автоматизированных системах управления и транспортных системах [1–5]. Важной задачей, решаемой при проектировании таких преобразователей, является обеспечение электромагнитной совместимости с электрической сетью [6, 7]. Пульсации напряжения и тока не должны превышать допустимых значений.

Рост нелинейной нагрузки сопровождается внедрением в электрические сети ветроэнергетических установок, фотоэлектрических станций и микрогазотурбинных установок, негативно влияющих на качество электрической энергии и электромагнитную совместимость [8, 9]. Высшие гармоники тока генерируются электротехнологическим оборудованием: установками электродуговой и контактной сварки, газоразрядными лампами, вентиляционными преобразователями различных типов [10, 11].

Актуальной задачей является разработка и проектирование устройств, предназначенных для стабилизации тока и напряжения, компенсации реактивной мощности, снижения уровня гармонических составляющих тока и напряжения. Для этого используются фильтры низких частот [12–17]. Фильтр низких частот,

выполненный на базе дискретных элементов, представляет собой катушку индуктивности, включенную последовательно с нагрузкой, и конденсатор, подключенный параллельно нагрузке.

Цель работы – исследование фильтра низких частот (ФНЧ), выполненного на основе многофункционального интегрированного электромагнитного компонента (МИЭК). Получение амплитудно-частотных и фазочастотных характеристик такого фильтра позволит сделать вывод о возможности применения МИЭК в составе электротехнических устройств и систем в качестве LC-фильтра.

В статье рассматривается ФНЧ, выполненный на основе гибридного электромагнитного элемента (ЭМЭ), сочетающего свойства как дросселя, так и конденсатора.

Гибридные электромагнитные элементы. Применению гибридных ЭМЭ (индукон, декон, окон, каткон и др.) в электротехнических системах и устройствах различного назначения посвящены многие публикации [18–25]. Выполнение подобных компонентов в едином корпусе и функциональная интеграция ЭМЭ улучшают массогабаритные показатели, надежность и энергоэффективность электротехнических комплексов и систем [26–31].

В устройствах, предназначенных для снижения амплитуды высокочастотных пульсаций, можно применять каткон, математическое моделирование которого описано в [32, 33]. При моделировании каткон с магнитопроводом рассматривается как нелинейный объект с распределенными параметрами на основе метода гармонической линеаризации [34]. Авторами работы [35] получены простые аналитические выражения для интегральных параметров каткона.

В [23, 25] описан многофункциональный интегрированный электромагнитный компонент, построенный на принципах функциональной интеграции. Математическое моделирование устройства на основе МИЭК описано в работах [36–39]. Авторами исследуется односекционная структура МИЭК (рис. 1), представляющая собой две проводящие обкладки, разделенные диэлектриком и свернутые в спираль, и фильтр низких частот, выполненный на основе данного компонента.

Фильтр низких частот на основе МИЭК. Классический ФНЧ подключается к нагрузке следующим образом: катушка индуктивности – последовательно, а конденсатор – параллельно (рис. 2). Катушка индуктивности препятствует высокочастотным колебаниям тока, так как падение напряжения на ней пропорционально скорости его изменения. Конденсатор препятствует высокочастотным колебаниям напряжения, так как ток через его обкладки прямо пропорционален скорости изменения разности потенциалов, приложенной к обкладкам конденсатора. В результате амплитуда выходного напряжения значительно снижается при частоте, превышающей частоту среза фильтра.

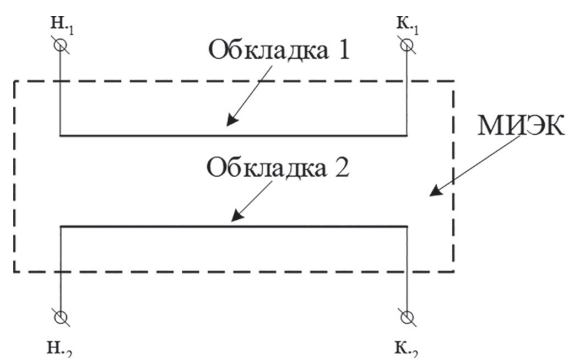


Рис. 1. Схема односекционного МИЭК

Fig. 1. Scheme of a single-section MIEC

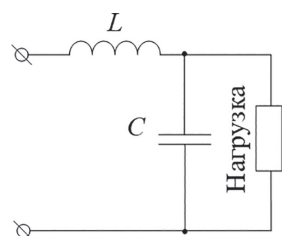


Рис. 2. Подключение классического фильтра низких частот

Fig. 2. Connecting a Classic Low Pass Filter

В [40] найден наиболее эффективный способ включения МИЭК в качестве LC-фильтра в цепи преобразователя постоянного напряжения (рис. 3). Для того чтобы многофункциональный интегрированный электромагнитный компонент действовал схожим образом, необходимо подключить источник питания к началу первой обкладки и концу второй, а нагрузку к концу первой обкладки и началу второй.

Таким образом, последовательно с нагрузкой окажется включена первая проводящая обкладка МИЭК, обладающая свойством индуктивности, а параллельно с нагрузкой окажется включен диэлектрический промежуток между обкладками, обладающий свойствами емкости. Между обкладками МИЭК существует взаимная индуктивность, оказывающая влияние на свойства фильтрации.

Математическое моделирование классического фильтра низких частот. При построении амплитудно-частотных и фазочастотных характеристик ФНЧ применяется теория четырехполюсников [41]. Для пояснения общего алгоритма решения поставленной задачи рассмотрим построение этих характеристик для классического LC-фильтра (рис. 4).

Определим комплексные сопротивления катушки индуктивности и конденсатора LC-фильтра:

$$Z_1 = j\omega L; Z_2 = \frac{1}{j\omega C}; \quad (1)$$

коэффициенты для A-формы:

$$A_{11} = 1 + \frac{Z_1}{Z_2} = 1 - \omega^2 LC; A_{12} = j\omega L. \quad (2)$$

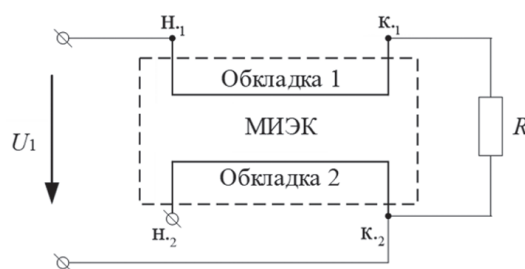


Рис. 3. Оптимальный способ включения МИЭК в качестве LC-фильтра в цепи преобразователя постоянного напряжения

Fig. 3. The optimal way to include MIEC as an LC-filter in a DC/DC-converter circuit

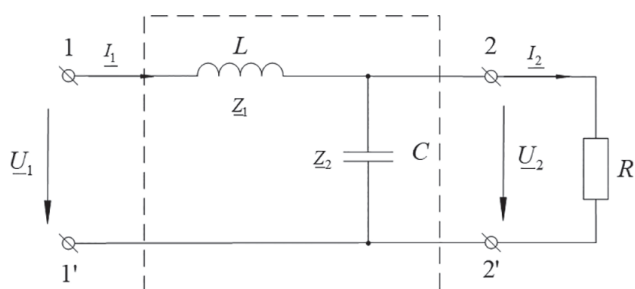


Рис. 4. LC-фильтр в виде четырехполюсника

Fig. 4. An LC-filter as a four-input circuit

Для четырехполюсника (рис. 4) в форме A первое уравнение выглядит так:

$$\underline{U}_1 = \underline{A}_{11}\underline{U}_2 + \underline{A}_{12}\underline{I}_2 = \underline{U}_2 \left(\underline{A}_{11} + \frac{\underline{A}_{12}}{R} \right). \quad (3)$$

С учетом (3) комплексная передаточная функция напряжения с известными коэффициентами формы A и активным сопротивлением R примет вид:

$$\underline{H}(\omega) = \frac{\underline{U}_2}{\underline{U}_1} = \frac{1}{\underline{A}_{11} + \frac{\underline{A}_{12}}{R}} = \frac{1}{a(\omega) + jb(\omega)}, \quad (4)$$

где $a(\omega)$ и $b(\omega)$ – действительная и мнимая части выражения $\underline{A}_{11} + \frac{\underline{A}_{12}}{R}$.

Для Г-образного LC-фильтра справедливы соотношения:

$$a(\omega) = \operatorname{Re} \left(\underline{A}_{11} + \frac{\underline{A}_{12}}{R} \right) = 1 - \omega^2 LC; \quad (5)$$

$$b(\omega) = \operatorname{Im} \left(\underline{A}_{11} + \frac{\underline{A}_{12}}{R} \right) = \frac{\omega L}{R}. \quad (6)$$

Амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) представляет собой модуль передаточной функции напряжения и в соответствии с (4) выражается:

$$H(\omega) = \frac{1}{\sqrt{a^2(\omega) + b^2(\omega)}}. \quad (7)$$

Фазочастотная характеристика (ФЧХ) представляет собой зависимость аргумента передаточной функции напряжения от частоты:

$$\varphi(\omega) = \arg(\underline{H}(\omega)). \quad (8)$$

Математическое моделирование ФНЧ на основе МИЭК. Схема замещения многофункционального интегрированного электромагнитного компонента, учитывающая активное сопротивление обкладок и их магнитную связь, представлена на рис. 5. Математическая модель ФНЧ на основе МИЭК построена с использованием данной схемы замещения.

Каждая проводящая обкладка МИЭК имеет индуктивность L_1 , L_2 и сопротивление R_1 , R_2 , а диэлектрический слой между обкладками имеет емкость C_1 , C_2 . Существует взаимная индукция между обкладками M .

Для того чтобы МИЭК выполнял роль фильтра для преобразователей постоянного напряжения, данный компонент необходимо включить в электрическую цепь в соответствии с рис. 3. На рис. 6 представлен фильтр на основе МИЭК согласно теории четырехполюсников.

Для построения АЧХ и ФЧХ МИЭК необходимо определение параметров четырехполюсника \underline{A}_{11} и \underline{A}_{12} .

Параметры МИЭК в качестве LC-фильтра согласно теории четырехполюсников. Составлены эк-

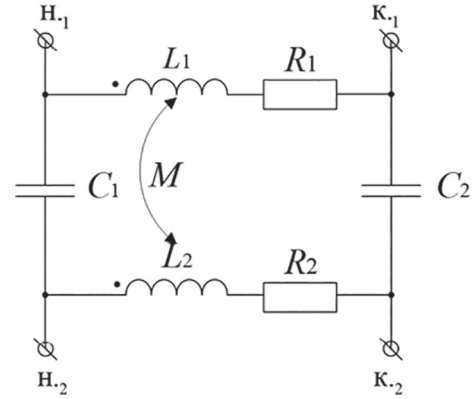


Рис. 5. Схема замещения односекционного МИЭК

Fig. 5. Equivalent circuit of a single-section MIEC

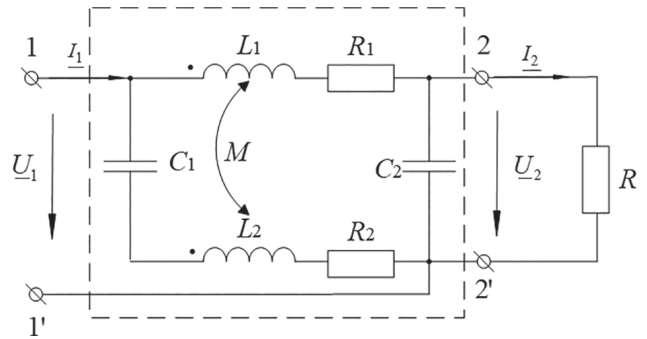


Рис. 6. LC-фильтр на базе МИЭК в качестве четырехполюсника в электрической цепи преобразователя постоянного напряжения

Fig. 6. LC-filter based on MIEC as a four-input circuit in the electric circuit of the DC/DC-converter

вивалентные схемы для опытов холостого хода (ХХ) (рис. 7,а) и короткого замыкания (КЗ) (рис. 7,б). В соответствии со вторым законом Кирхгофа система уравнений для опыта ХХ:

$$\begin{cases} \underline{I}_1 \left(R_1 + j\omega L_1 + \frac{1}{j\omega C_2} \right) + \underline{I}_2 j\omega M = \underline{U}_1; \\ \underline{I}_1 j\omega M + \underline{I}_2 \left(R_2 + j\omega L_2 + \frac{1}{j\omega C_1} \right) = \underline{U}_1. \end{cases} \quad (9)$$

Решение (9) позволяет определить ток \underline{I}_1 :

$$\underline{I}_1 = \underline{U}_1 \frac{R_2 + j\omega L_2 + \frac{1}{j\omega C_1} - j\omega M}{\left(R_1 + j\omega L_1 + \frac{1}{j\omega C_2} \right) \left(R_2 + j\omega L_2 + \frac{1}{j\omega C_1} \right) + \omega^2 M^2}. \quad (10)$$

По эквивалентной схеме (рис. 7,а)

$$\underline{U}_2 = \frac{\underline{I}_1}{j\omega C_2}; \quad \underline{A}_{11} = \frac{\underline{U}_1}{\underline{U}_2}$$

и по (10)

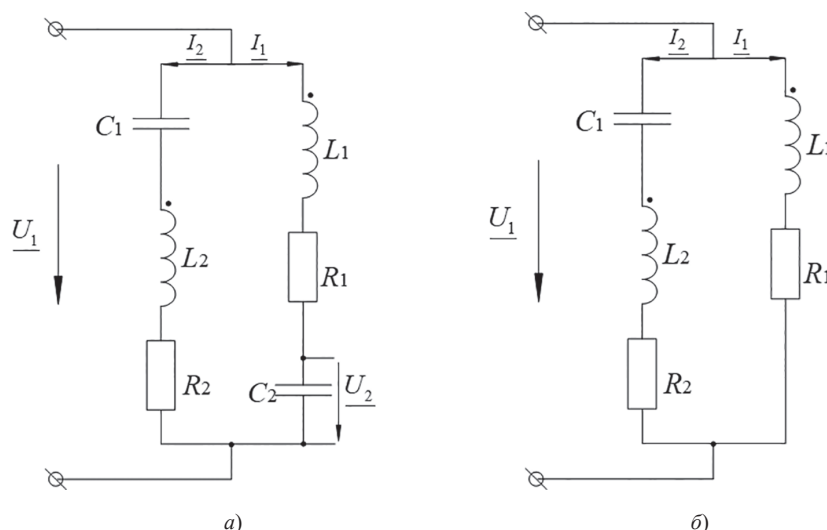


Рис. 7. Эквивалентная схема: а – для опыта ХХ; б – для опыта КЗ

Fig. 7. Equivalent circuit: а – for idle; б – for short circuit

$$\underline{A}_{11} = \frac{j\omega C_2 \left[\left(R_1 + j\omega L_1 + \frac{1}{j\omega C_2} \right) \left(R_2 + j\omega L_2 + \frac{1}{j\omega C_1} \right) + \omega^2 M^2 \right]}{R_2 + j\omega L_2 + \frac{1}{j\omega C_1} - j\omega M}. \quad (11)$$

В соответствии со вторым законом Кирхгофа составлена система уравнений для опыта КЗ:

$$\begin{cases} \underline{I}_1(R_1 + j\omega L_1) + \underline{I}_2 j\omega M = \underline{U}_1; \\ \underline{I}_1 j\omega M + \underline{I}_2 \left(R_2 + j\omega L_2 + \frac{1}{j\omega C_1} \right) = \underline{U}_1. \end{cases} \quad (12)$$

После решения (12)

$$\underline{I}_1 = \underline{U}_1 \frac{R_2 + j\omega L_2 + \frac{1}{j\omega C_1} - j\omega M}{(R_1 + j\omega L_1) \left(R_2 + j\omega L_2 + \frac{1}{j\omega C_1} \right) + \omega^2 M^2}. \quad (13)$$

По эквивалентной схеме $\underline{A}_{12} = \frac{\underline{U}_1}{\underline{I}_1}$. С учетом (13)

$$\underline{A}_{12} = \frac{(R_1 + j\omega L_1) \left(R_2 + j\omega L_2 + \frac{1}{j\omega C_1} \right) + \omega^2 M^2}{R_2 + j\omega L_2 + \frac{1}{j\omega C_1} - j\omega M}. \quad (14)$$

Построение частотных характеристик МИЭК по (5–8, 11, 14) описано в [32].

Построены АЧХ и ФЧХ LC-фильтра на основе МИЭК (рис. 8 и 9). Параметры схемы замещения МИЭК ($L_1 = L_2 = 10$ мкГн; $M = 9$ мкГн; $C_1 = C_2 = 0,129$ мкФ; $R_1 = R_2 = 85$ мОм) соответствуют параметрам лабораторного образца компонента, на котором была проведена экспериментальная проверка полученных ана-

литических соотношений. В качестве нагрузки был выбран резистор сопротивлением 1 кОм.

Из рис. 8 видно, что на частоте 100 кГц наблюдается резонанс, происходит резкое нарастание амплитуды колебаний до 35–40 дБ. Более высокие частоты сглаживаются, спад составляет 40 дБ на декаду. Кроме того, для частот выше резонансной происходит поворот фазы на 180°.

Выполненные расчеты и формулы верифицированы с помощью имитационного моделирования в *MATLAB Simulink*. На рис. 9 показана модель, позволяющая с допустимой точностью рассчитать частотные характеристики фильтра на основе МИЭК и использованная для измерения АЧХ МИЭК.

На рис. 10 представлены АЧХ и ФЧХ, полученные путем имитационного моделирования. Резонансная частота, найденная путем имитационного моделирования, составляет 113 кГц, что очень близко к результатам аналитического расчета. Паттерны АЧХ и ФЧХ, полученные двумя способами, совпадают, что свидетельствует об адекватности разработанной математической модели.

Физическое моделирование фильтра на основе МИЭК для преобразователя постоянного напряжения. На рис. 11 приведена принципиальная электрическая схема подключения компонента к блоку «выпрямитель–инвертор», позволяющая исследовать режимы работы МИЭК.

Лабораторный стенд для исследования МИЭК (рис. 12) представляет собой каркас из текстолита с расположенными на нем источником вторичного электропитания (ИВЭП) 1, блоком реле 2, микроконтроллером *Arduino* с дисплеем 3 и двухсекционным МИЭК 4.

Подключение МИЭК в режиме LC-фильтра соответствует схеме включения фильтра нижних частот (напряжение подается на начало первой и конец второй

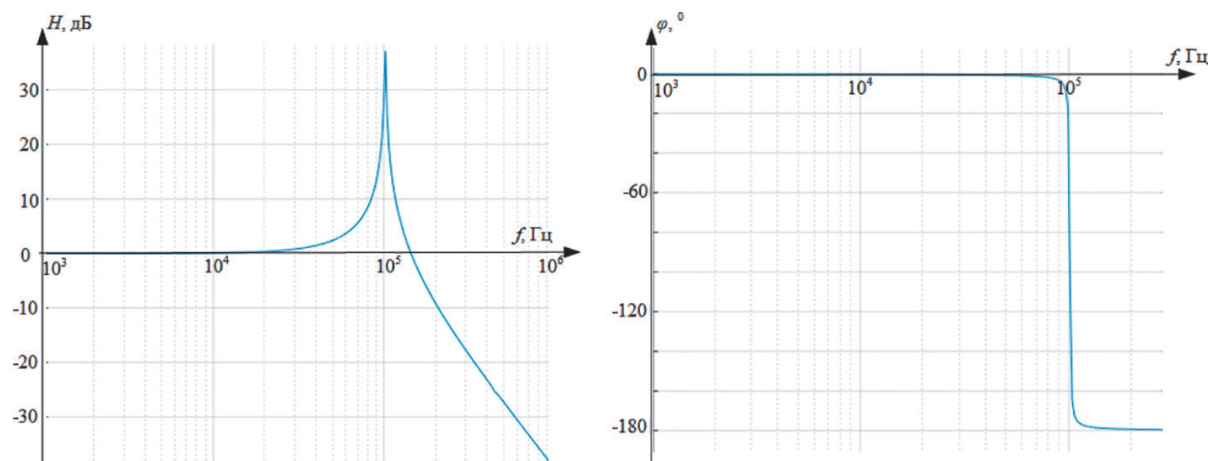


Рис. 8. Амплитудно-частотная и фазочастотная характеристики МИЭК

Fig. 8. Amplitude-frequency and phase-frequency characteristics of MIEC

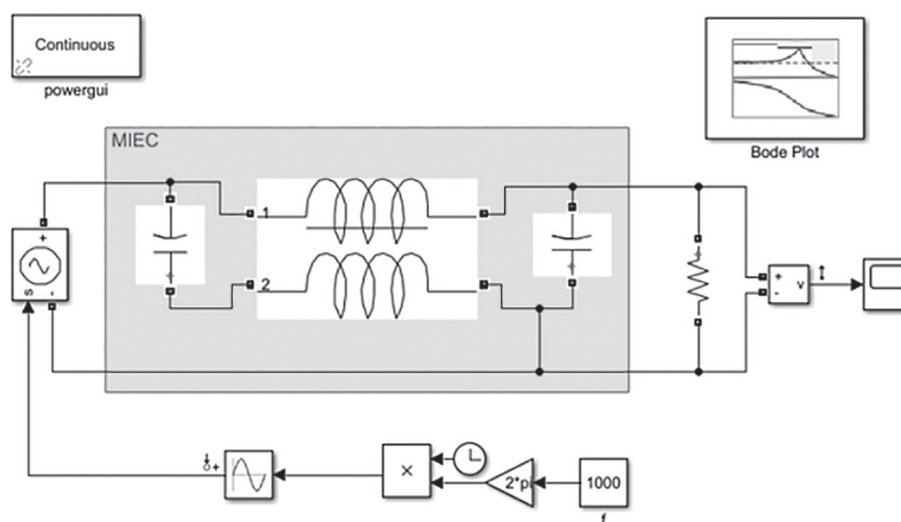


Рис. 9. Simulink-модель для измерения АЧХ МИЭК

Fig. 9. Simulink model for measuring the amplitude-frequency characteristic of MIEC

обкладок, а снимается с их концов) (рис. 3). Параметры лабораторного образца МИЭК: ширина 30 мм; длина 32 мм; высота 50 мм; длина намотки 3 м; количество витков 21; индуктивность одной обкладки 10 мкГн; емкость между обкладками 258,5 нФ.

На рис. 13–16 представлены осциллограммы, полученные в результате эксперимента (красной линии соответствует входное напряжение, желтой – выходное).

На частоте порядка 100 кГц наступает резонанс и выходное напряжение резко увеличивается, после чего наблюдается изменение фазы выходного напряжения на 180° и постепенное уменьшение амплитуды выходного напряжения (рис. 15 и 16), что соответствует ранее полученным теоретическим расчетам.

После обработки осциллограмм и разложения в ряд Фурье сигналов входного и выходного напряжения по (4, 7–8) были определены амплитуда передаточной характеристики и её фаза для первой гармоники вход-

ного и выходного напряжения в каждом эксперименте. Результаты сравнения АЧХ и ФЧХ, полученных аналитически и путем компьютерного и физического моделирования, свидетельствуют об адекватности математической модели ФНЧ на основе МИЭК (таблица).

Выводы. Фильтр низких частот на основе многофункционального интегрированного электромагнитного компонента отличается от классических LC-фильтров наличием резонансной частоты, на которой существенно увеличивается амплитуда колебаний.

При работе фильтра на частотах выше резонансной фаза выходного напряжения отличается от фазы входного напряжения на 180°.

Рассмотренные способы построения АЧХ и ФЧХ дают схожие результаты, что говорит о точности разработанной математической модели ФНЧ на основе МИЭК.

Наличие резонансной частоты для ФНЧ на основе МИЭК позволяет использовать подобный компонент

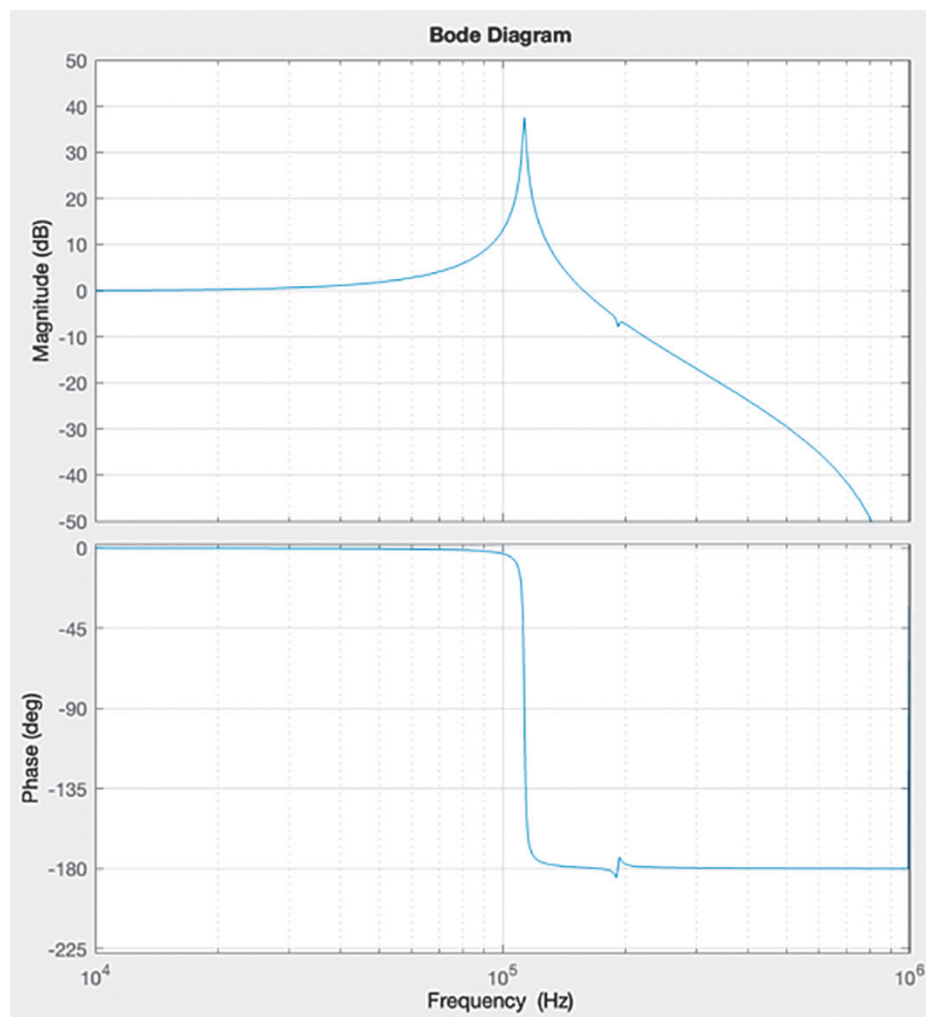


Рис. 10. АЧХ и ФЧХ, полученные с помощью компьютерного моделирования

Fig. 10. Amplitude-frequency and phase-frequency characteristics obtained by computer simulation

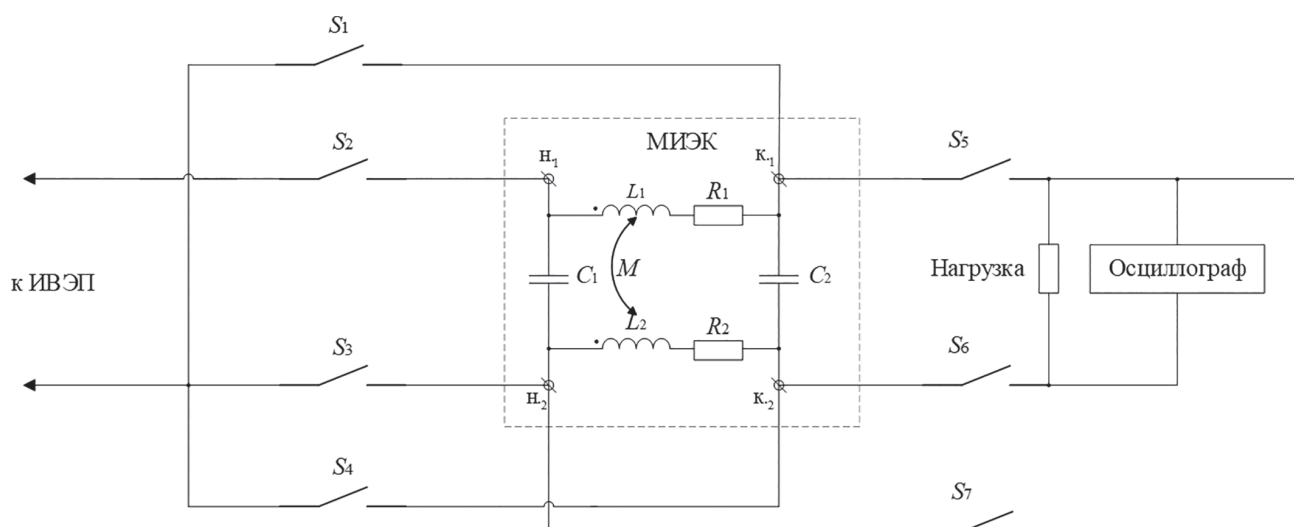


Рис. 11. Принципиальная электрическая схема подключения МИЭК

Fig. 11. Schematic diagram of MIEC connection

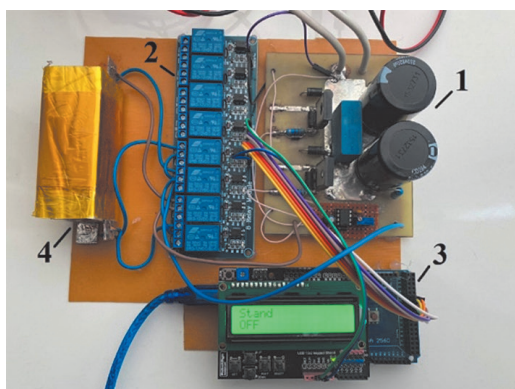


Рис. 12. Общий вид стенда по изучению МИЭК: 1 – источник вторичного электропитания; 2 – блок реле; 3 – микроконтроллер; 4 – МИЭК

Fig. 12. General view of the stand for the study of MIEK: 1 – secondary power supply; 2 – relay unit; 3 – microcontroller; 4 – MIEK

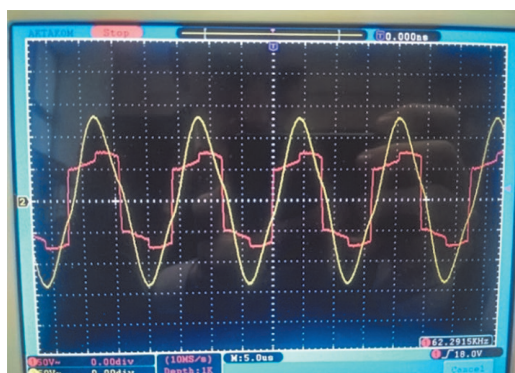


Рис. 13. Осциллограммы напряжений при частоте 62,3 кГц

Fig. 13. Voltage waveforms at the 62.3 kHz frequency

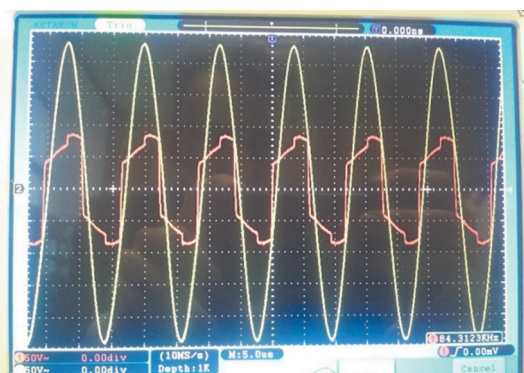


Рис. 14. Осциллограммы напряжений при частоте 84,3 кГц

Fig. 14. Voltage waveforms at the 84.3 kHz frequency

в электротехнических устройствах, принцип работы которых основан на резонансе. Важно, что при этом многофункциональный интегрированный электромагнитный компонент может выполнять две функции одновременно: повышать амплитуду гармоник, близких к резонансной частоте, и сглаживать более высокие гармоники, что избавляет от дополнительной установки ФНЧ в схему устройства.

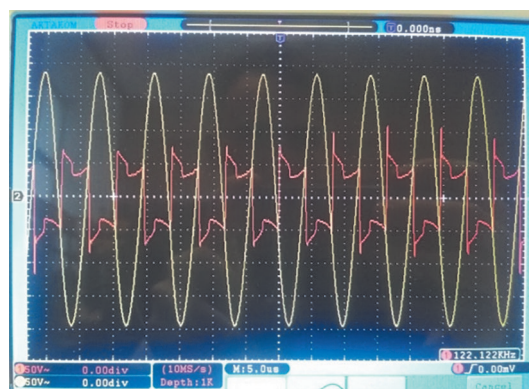


Рис. 15. Осциллограммы напряжений при частоте 122,1 кГц

Fig. 15. Voltage waveforms at the 122.1 kHz frequency

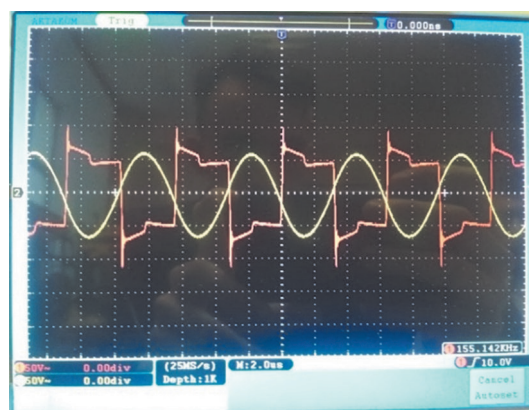


Рис. 16. Осциллограммы напряжений при частоте 155,1 кГц

Fig. 16. Voltage waveforms at 155.1 kHz frequency

Сравнение частотных характеристик, полученных аналитически и моделированием Comparison of frequency characteristics obtained analytically and by modeling

Параметры		Частота, кГц			
		62,3	84,3	122,1	155,1
АЧХ, дБ	теория	4,09	10,11	7,08	–2,47
	имитация	3,11	6,96	15,55	0,80
	эксперимент	2,97	7,77	10,12	–0,49
ФЧХ, °	теория	–0,75	–2,00	182,01	180,83
	имитация	–0,65	–1,36	184,78	180,76
	эксперимент	1,68	1,21	188,65	179,09

На следующем этапе исследований планируется математическое и имитационное моделирование ФНЧ на основе МИЭК в составе DC/DC-преобразователей, а также проведение физического эксперимента для верификации аналитических результатов.

Исследование выполнено на средства гранта Стипендии Президента Российской Федерации в 2022–2024 гг.

для молодых ученых и аспирантов, осуществляющих перспективные научные исследования и разработки по приоритетным направлениям модернизации российской экономики. Грантополучатель Хазиева Регина Тагировна. Тема исследований «Разработка и исследование фильтрокомпенсирующего устройства для повышения качества электроэнергии».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Варганова А.В. О методах оптимизации режимов работы электроэнергетических систем и сетей. – Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика», 2017, т. 17, № 3, с. 76–85.
2. Кузнецов Р.В., Федотов Е.А. Применение динамических компенсаторов искажений напряжения для повышения надежности системы электроснабжения. – Проблемы энергетики, 2013, № 3-4, с. 82–88.
3. Абрамович Б.Н. и др. Минимизация ущерба при добыче нефти из-за кратковременных перерывов электроснабжения. – Промышленная энергетика, 2009, № 7, с. 25–28.
4. Вершинин Н.Ф., Карпов А.М., Кузнецов С.В. DC/DC-преобразователь с гальванической развязкой на SIC-MOSFET для гибридного автотранспортного средства. – Электричество, 2022, № 9, с. 53–65.
5. Исхаков А.С. и др. Прямое аperiodическое управление понижающим широтно-импульсным преобразователем. – Электричество, 2022, № 12, с. 48–58.
6. Сычев Ю.А. Фильтрокомпенсирующие устройства с активными преобразователями для повышения качества электроэнергии в электротехнических комплексах нефтегазовых предприятий: дис. ... канд. техн. наук. СПб., 2021, 365 с.
7. Гиршин С.С., Владимиров Л.В. Методы расчета и оптимизации электроэнергетических систем: конспект лекций. Омск: Изд-во ОмГТУ, 2010, 48 с.
8. Ткаченко С.В., Нич Ю.Б., Коровкин Н.В. Влияние высокочастотных электромагнитных полей на провода большого сечения. – Электричество, 2018, № 7, с. 4–18.
9. Абрамович Б.Н. и др. О компенсации высших гармоник тока и напряжения, создаваемых источником бесперебойного питания. – Нефтяное хозяйство, 2013, № 10, с. 126–127.
10. Голубчик Т.В., Куликов А.С., Аль-Антаки А.М.А. Опыт применения автоматизированных систем накопления энергии на базе литий-ионных аккумуляторных батарей в автономных солнечно-дизельных электростанциях. – Электричество, 2022, № 9, с. 66–76.
11. Цицикян Г.Н., Антипов М.Ю. Индуктивность и электродинамические силы в круговых витках с параллельными осями. – Электричество, 2023, № 1, с. 52–56.
12. Hidayatullah N.A., Paracha Z.J., Kalam A. Impact of Distributed Generation on Smart Grid Transient Stability. – Smart Grid and Renewable Energy, 2011, vol. 2, pp. 99–109.
13. Prasad T.N., Mohan V.C.J., Reddy V.C.V. Harmonic Reduction in Hybrid Filters for Power Quality Improvement in Distribution Systems. – Journal of Theoretical and Applied Information Technology, 2012, vol. 35, No.1, pp. 44–55.
14. Sattarov R., Khazieva R., Ivanov M. Integrated LC-Components for Electrical Systems and Devices. – International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon): 2021, DOI:10.1109/UralCon52005.2021.9559527.
15. Budunova K.A., Kravchenko V.F. Low-Pass Filters on Atomic Functions ha(x) and Their Application in Digital to Analog Conversion. – Physical Bases of Instrumentation, 2021, vol. 10, No. 1(39), pp. 26–35, DOI:10.25210/jfop-2101-026035.
16. Laforge P.D., Mansour R.R., Yu M. The Use of Low-Pass Filters as Impedance Inverters for Highly Miniaturized Superconducting Bandstop Filter Designs. – IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2011, vol. 21, No. 3, pp. 575–578, DOI: 10.1109/TASC.2010.2087733.
17. Михеев Д.В. Экспериментальное исследование частотных характеристик катушки-конденсатора при различных граничных условиях – Электричество, 2018. № 9, с. 52–55.
18. Jung J.-H. Bifilar Winding of a Center-Tapped Transformer Including Integrated Resonant Inductance for LLC Resonant Converters. – IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, vol. 28, No. 2, pp. 615–620, DOI: 10.1109/TPEL.2012.2213097.
19. Long X. et al. The Structure and Modelling Method of Integrated LLC Transformer with Wide Range Resonant Inductance Regulation. – IEEE 1st International Power Electronics and Application Symposium (PEAS), 2021, DOI:10.1109/PEAS53589.2021.9628473.
20. Бутырин П.А. и др. Разработка математической модели и анализ особенностей режимов индуктивно-емкостного преобразователя на основе каткона. – Вестник МЭИ, 2018, № 4, с. 81–88.
21. Бутырин П.А., Гусев Г.Г., Кузман В.В. Математическая модель фильтрокомпенсирующего устройства на основе катушки-конденсатора. – Известия РАН. Энергетика, 2014, № 2, с. 130–135.
22. Бутырин П.А. и др. Алгоритм определения параметров каткона – элемента оптимизации режимов электрических сетей. – Известия РАН. Энергетика, 2015, № 2, с. 69–75.
23. Пат. RU 2585248 C2. Многофункциональный интегрированный электромагнитный компонент / С.Г. Конесев, 2016.
24. Wang Y.L. et al. Component-Based Functional Integrated Circuit System Design and Its Straight Implementation. – International Journal of Engineering and Industries, 2011, vol. 2(4), DOI:10.4156/ijei.vol2.issue4.3.
25. Пат. SU1492453A1. Спиральный генератор импульсов напряжения / В.И. Мельников и др., 1989.
26. Кабан В.П. Сравнительный анализ Т-образных индуктивно-емкостных преобразователей CLL-структуры по установленной мощности реактивных элементов. – Сб. Института электродинамики НАН Украины. Киев, 2012, № 33, с. 87–91.
27. Губаревич В.Н. и др. Регулирование выходного напряжения в инверторе в однофазной системе инвертор – индуктивно-емкостный преобразователь. – Сб. Института электродинамики НАН Украины. Киев, 2010, № 25, с. 114–118.
28. Кабан В.П. и др. Расчет схем Г-образных индуктивно-емкостных преобразователей CL-вида с учетом характера нагрузки. – Сб. Института электродинамики НАН Украины. Киев, 2012, № 33, с. 83–87.
29. Брылина О.Г., Гельман М.В. Исследование двухзвенных преобразователей частоты. – Электротехнические системы и комплексы, 2013, № 21, с. 270–278.
30. Khazieva R., Aflyatunov R., Vasilyev P. Investigation of LC Filter Function Based on Multifunctional Integrated Electromagnetic Component. – International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon), 2022, pp. 16–20, DOI: 10.1109/UralCon54942.2022.9906768.
31. Конесев С.Г., Хазиева Р.Т. Анализ стабилизационных свойств индуктивно-емкостных преобразователей при различных способах подключения гибридного электромагнитного элемента. – Электротехнические системы и комплексы, 2017, № 1, с. 49–55.
32. Бутырин П.А. и др. Математическая модель фильтрокомпенсирующих устройств на основе гармонической линеаризации характеристики магнитопровода каткона. – Вестник МЭИ, 2015, № 5, с. 79–84.
33. Бутырин П.А. и др. Идентификация математической модели фильтрокомпенсирующего устройства на основе каткона с учетом нелинейной характеристики магнитопровода. – Электричество, 2017, № 10, с. 55–60.
34. Бутырин П.А. и др. Математическое и физическое моделирование фильтрокомпенсирующего устройства на основе каткона. – Электричество, 2014, № 11, с. 58–62.
35. Пат. RU 2632412 C1. Индуктивно-емкостный преобразователь / С.Г. Конесев, Р.Т. Хазиева, Т.А. Бочкарева, 2017.
36. Конесев С.Г., Хазиева Р.Т., Кириллов Р.В. Исследование частотных характеристик двухсекционных многофункциональных интегрированных электромагнитных компонентов. – Вестник УГАТУ, 2015, т. 19, № 4 (70), с. 66–71.
37. Konesev S.G. et al. Research on Stabilization Properties of Inductive-Capacitive Transducers Based on Hybrid Electromagnetic Elements. – Journal of Physics: Conference Series, 2017, vol. 803, No 1. DOI: 10.1088/1742-6596/803/1/012076.

38. **Konesev S.G., Khazieva R.T., Kirillov R.V.** The Research of Stabilization Properties of Inductive-Capacitive Converters Based on the Two-Sections Hybrid Electromagnetic Elements. – Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines, 2016, DOI: 10.1109/Dynamics.2016.7819030.

39. **Конесев С.Г., Хазиева Р.Т.** Математическое и физическое моделирование индуктивно-емкостных преобразователей. – Электричество, 2020, № 1, с. 32–38.

40. **Sattarov R. et al.** Amplitude-Frequency Characteristic of a MIEC-Based Filter for DC/DC Converters. – International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), 2022, pp. 362–367, DOI: 10.1109/ICIEAM54945.2022.9787145.

41. **Ларин В.С.** Входная проводимость и частотная характеристика обмотки силового трансформатора. – Электричество, 2022, № 8, с. 33–39.

Поступила в редакцию [31.03.2023]
Принята к публикации [29.06.2023]

Авторы:



Хазиева Регина Тагировна – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры «Электротехника и электрооборудование предприятий», Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Россия.



Иванов Максим Дмитриевич – инженер кафедры «Электротехника и электрооборудование предприятий», Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Россия.

Elektrichestvo, 2023, No. 8, pp. 13–22

DOI:10.24160/0013-5380-2023-8-13-22

Mathematical and Physical Modeling of a Low-Pass Filter Based on a Multifunctional Integrated Electromagnetic Component

HAZIEVA Regina T. (Ufa State Petroleum Technical University, Ufa, Russia) – Docent of the Electrical Engineering and Electrical Equipment of Enterprises Dept., Cand. Sci. (Eng.), Docent.

IVANOV Maksim D. (Ufa State Petroleum Technical University, Ufa, Russia) – Engineer of the Electrical Engineering and Electrical Equipment of Enterprises Dept.

The possibility of using a multifunctional integrated electromagnetic component (MIEC) as an LC-filter is considered. Mathematical and physical modeling of an MIEC-based low-pass filter (LPF) for DC voltage converters is performed. MIEC-based filters feature improved weight and size characteristics in comparison with filters made on discrete electromagnetic components. For calculating the MIEC parameters, an approach based on the quadrupole theory is used. Expressions for the A-parameters have been obtained. To this end, the equivalent integral parameters of the equivalent circuit of a single-section MIEC were used with taking into account the mutual inductance of the component's conducting plates. The amplitude-frequency and phase-frequency responses of the MIEC-based low-pass filter based are constructed. Computer simulation of the filter in the Matlab Simulink environment was carried out, the results of which have confirmed validity of the obtained analytical expressions. It has been determined that the use of an MIEC-based low-pass filter decreases the amplitude of high-frequency pulsations that occur during the operation of semiconductor switches. The voltage waveforms obtained in the course of a physical experiment confirm the adequacy of the obtained dependencies and expressions.

Key words: multifunctional integrated electromagnetic component, low-pass filter, LC-filter, amplitude-frequency response, phase-frequency response, two-port circuit, DC voltage converter

The research was carried out at the expense of the grant of the Scholarship of the President of the Russian Federation in 2022-2024 for young scientists and postgraduates engaged in promising research and development in priority areas of modernization of the Russian economy. Grantee Khazieva Regina Tagirovna. The research topic is "Development and research of a filter-compensating device to improve the quality of electricity".

REFERENCES

1. **Varganova A.V.** Vestnik YuUrGU. Seriya «Energetika» – in Russ. (Bulletin of SUSU. Power Engineering Series), 2017, vol. 17, No. 3, pp. 76–85.
2. **Kuznetsov R.V., Fedotov E.A.** Problemy energetiki – in Russ. (Power Engineering Problems), 2013, No. 3-4, с. 82–88.

3. **Abramovich B.N. et al.** Promyshlennaya energetika – in Russ. (Industrial Power Engineering), 2009, No. 7, pp. 25–28.
4. **Vershinin N.F., Karpov A.M., Kuznetsov S.V.** Elektrichestvo – in Russ. (Electricity), 2022, No. 9, pp. 53–65.
5. **Iskhakov A.S. et al.** Elektrichestvo – in Russ. (Electricity), 2022, № 12, с. 48–58.

6. Sychev Yu.A. *Fil'trokompensiruyushchie ustroystva s aktivnymi preobrazovatelyami dlya povysheniya kachestva elektroenergii v elektrotekhnicheskikh kompleksakh neftegazovykh predpriyatiy: dis. ... kand. tekhn. nauk* (Filter-Compensating Devices with Active Converters for Improving the Quality of Electricity in Electrical Complexes of Oil and Gas Enterprises: Dis. ... Cand. Sci. (Eng.)). SPb., 2021, 365 p.
7. Girshin S.S., Vladimirov L.V. *Metody rascheta i optimizatsii elektroenergeticheskikh sistem: konspekt lektsiy* (Methods of Calculation and Optimization of Electric Power Systems: Lecture Notes). Omsk: Izd-vo OmGTU, 2010, 48 p.
8. Tkachenko S.V., Nich Yu.B., Korovkin N.V. *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 2018, No. 7, pp. 4–18.
9. Abramovich B.N. et al. *Neftyanoe hozyaystvo – in Russ. (Oil Industry)*, 2013, No. 10, pp. 126–127.
10. Golubchik T.V., Kulikov A.S., Al'-Antaki A.M.A. *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 2022, No. 9, pp. 66–76.
11. Tsitsikyan G.N., Antipov M.Yu. *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 2023, No. 1, pp. 52–56.
12. Hidayatullah N.A., Paracha Z.J., Kalam A. Impact of Distributed Generation on Smart Grid Transient Stability. – *Smart Grid and Renewable Energy*, 2011, vol. 2, pp. 99–109.
13. Prasad T.N., Mohan V.C.J., Reddy V.C.V. Harmonic Reduction in Hybrid Filters for Power Quality Improvement in Distribution Systems. – *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*, 2012, vol. 35, No.1, pp. 44–55.
14. Sattarov R., Khazieva R., Ivanov M. Integrated LC-Components for Electrical Systems and Devices. – *International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon)*: 2021, DOI:10.1109/UralCon52005.2021.9559527.
15. Budunova K.A., Kravchenko V.F. Low-Pass Filters on Atomic Functions $ha(x)$ and Their Application in Digital to Analog Conversion. – *Physical Bases of Instrumentation*, 2021, vol. 10, No. 1(39), pp. 26–35, DOI:10.25210/jfop-2101-026035.
16. Laforge P.D., Mansour R.R., Yu M. The Use of Low-Pass Filters as Impedance Inverters for Highly Miniaturized Superconducting Bandstop Filter Designs. – *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2011, vol. 21, No. 3, pp. 575–578, DOI: 10.1109/TASC.2010.2087733.
17. Miheev D.V. *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 2018, No. 9, pp. 52–55.
18. Jung J.-H. Bifilar Winding of a Center-Tapped Transformer Including Integrated Resonant Inductance for LLC Resonant Converters. – *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2013, vol. 28, No. 2, pp. 615–620, DOI: 10.1109/TPEL.2012.2213097.
19. Long X. et al. The Structure and Modelling Method of Integrated LLC Transformer with Wide Range Resonant Inductance Regulation. – *IEEE 1st International Power Electronics and Application Symposium (PEAS)*, 2021, DOI:10.1109/PEAS53589.2021.9628473.
20. Butyrin P.A. et al. *Vestnik MEI – in Russ. (Bulletin of MPEI)*, 2018, No. 4, pp. 81–88.
21. Butyrin P.A., Gusev G.G., Kuzhman V.V. *Izvestiya RAN. Energetika – in Russ. (News of the Russian Academy of Sciences. Power Engineering)*, 2014, No. 2, pp. 130–135.
22. Butyrin P.A. et al. *Izvestiya RAN. Energetika – in Russ. (News of the Russian Academy of Sciences. Power Engineering)*, 2015, No. 2, pp. 69–75.
23. Pat. RU 2585248 C2. *Mnogofunktsional'nyy integrirovannyi elektromagnitnyy komponent* (Multifunctional Integrated Electromagnetic Component) / S.G. Konesev, 2016.
24. Wang Y.L. et al. Component-Based Functional Integrated Circuit System Design and Its Straight Implementation. – *International Journal of Engineering and Industries*, 2011, vol. 2(4), DOI:10.4156/ije.2011.issue4.3.
25. Pat. SU1492453A1. *Spiral'nyy generator impul'sov napryazheniya* (Spiral Voltage Pulse Generator) / V.I. Mel'nikov et al., 1989.
26. Kaban V.P. *Sb. Instituta elektrodinamiki NAN Ukrainy – in Russ. (Collection of the Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine)*. Kiev, 2012, No. 33, pp. 87–91.
27. Gubarevich V.N. et al. *Sb. Instituta elektrodinamiki NAN Ukrainy – in Russ. (Collection of the Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine)*. Kiev, 2010, No. 25, pp. 114–118.
28. Kaban V.P. et al. *Sb. Instituta elektrodinamiki NAN Ukrainy – in Russ. (Collection of the Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine)*. Kiev, 2012, No. 33, pp. 83–87.
29. Brylina O.G., Gel'man M.V. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы – in Russ. (Electrical Systems and Complexes)*, 2013, No. 21, pp. 270–278.
30. Khazieva R., Aflyatunov R., Vasilyev P. Investigation of LC Filter Function Based on Multifunctional Integrated Electromagnetic Component. – *International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon)*, 2022, pp. 16–20, DOI: 10.1109/UralCon54942.2022.9906768.
31. Konesev S.G., Hazieva R.T. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы – in Russ. (Electrical Systems and Complexes)*, 2017, No. 1, pp. 49–55.
32. Butyrin P.A. et al. *Vestnik MEI – in Russ. (Bulletin of MPEI)*, 2015, No. 5, pp. 79–84.
33. Butyrin P.A. et al. *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 2017, No. 10, pp. 55–60.
34. Butyrin P.A. et al. *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 2014, No. 11, pp. 58–62.
35. Pat. RU 2632412 C1. *Induktivno-emkostnyy preobrazovatel'* (Inductive-Capacitive Converter) / S.G. Konesev, R.T. Hazieva, T.A. Bochkareva, 2017.
36. Konesev S.G., Hazieva R.T., Kirillov R.V. *Vestnik UGATU – in Russ. (Bulletin of USPTU)*, 2015, vol. 19, No. 4 (70), pp. 66–71.
37. Konesev S.G. et al. Research on Stabilization Properties of Inductive-Capacitive Transducers Based on Hybrid Electromagnetic Elements. – *Journal of Physics: Conference Series*, 2017, vol. 803, No. 1. DOI: 10.1088/1742-6596/803/1/012076.
38. Konesev S.G., Khazieva R.T., Kirillov R.V. The Research of Stabilization Properties of Inductive-Capacitive Converters Based on the Two-Sections Hybrid Electromagnetic Elements. – *Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines*, 2016, DOI: 10.1109/Dynamics.2016.7819030.
39. Konesev S.G., Hazieva R.T. *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 2020, No. 1, pp. 32–38.
40. Sattarov R. et al. Amplitude-Frequency Characteristic of a MIEC-Based Filter for DC/DC Converters. – *International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM)*, 2022, pp. 362–367, DOI: 10.1109/ICIEAM54945.2022.9787145.
41. Larin V.S. *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 2022, No. 8, pp. 33–39.

Received [31.03.2023]

Accepted [29.06.2023]