

УДК 621.3

ИССЛЕДОВАНИЕ ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ДВУХСЕКЦИОННЫХ МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ИНТЕГРИРОВАННЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ КОМПОНЕНТОВ

С. Г. КОНЕСЕВ¹, Р. В. КИРИЛЛОВ², Р. Т. ХАЗИЕВА³

¹ KonesevSG@yandex.ru, ² romchikirill@mail.ru, ³ khazievart@mail.ru

ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный нефтяной технический университет» (УГНТУ)

Поступила в редакцию 22.11. 2014

Аннотация. Произведена оценка частотных характеристик двухсекционного многофункционального интегрированного электромагнитного компонента (МИЭК) различного схематического исполнения с точки зрения оптимальности применения данной структуры в различных электротехнических устройствах. Показаны способы расширения функциональных возможностей МИЭК. Установлено, что при последовательном включении секций МИЭК и диагональном подключении источника питания и нагрузки данное схематехническое решение наиболее оптимально для следующих устройств: индуктивно-емкостных преобразователей, устройств заряда емкостных накопителей, генераторов импульсов напряжения.

Ключевые слова: многофункциональный интегрированный электромагнитный компонент; индуктивно-емкостный преобразователь; генератор импульсов напряжения; частотная характеристика.

ВВОДНЫЕ ЗАМЕЧАНИЯ

Многофункциональный интегрированный электромагнитный компонент (МИЭК) сочетает в себе свойства катушки индуктивности и конденсатора, что позволяет снизить расход электропроводящих, изоляционных и конструкционных материалов.

Каждая секция двухсекционного МИЭК представляет собой две проводящие обкладки, свернутые в спираль и разделенные диэлектриком, при этом все секции имеют магнитную связь. Таким образом, МИЭК сочетает в себе свойства катушки индуктивности и конденсатора. Каждая обкладка МИЭК имеет выводы в начале и в конце обкладки.

Применение МИЭК позволяет улучшить технико-экономические показатели источников вторичного электропитания (ИВЭП). Ускорение процесса разработки, повышение технологичности и надежности, а также снижение себестоимости ИВЭП эффективно реализуется применением МИЭК, зачастую определяющих массу и габариты устройств, создаваемых на их основе.

Работа по созданию компонентов и электротехнических устройств на их основе ведется несколько десятилетий. Существуют различные схематехнические решения силовой части ИВЭП, выполненные на основе МИЭК, однако существует множество нерешенных вопросов

и задач. Отсутствуют инженерные методики расчета МИЭК и алгоритмы проектирования устройств на их основе. Недостаточно изучены различные режимы работы МИЭК, электродинамические и тепловые процессы в МИЭК. В связи с этим исследование и разработка МИЭК и электротехнических устройств на их основе является актуальной задачей.

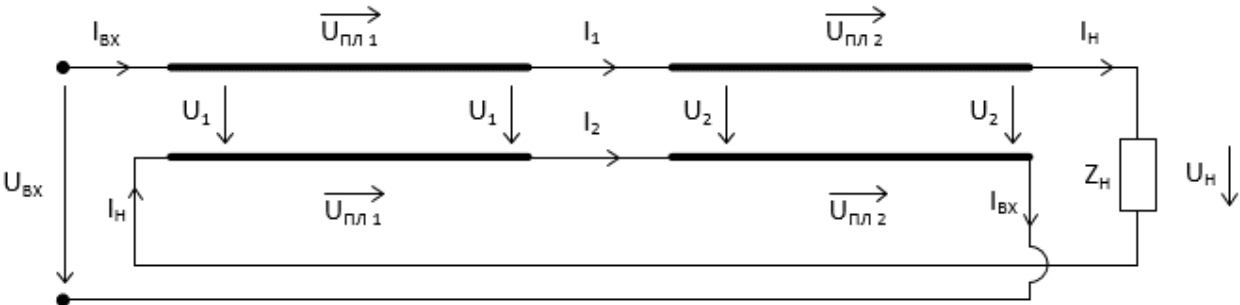
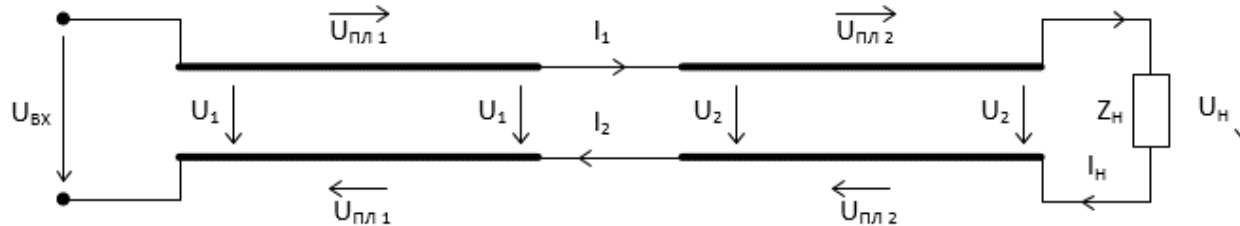
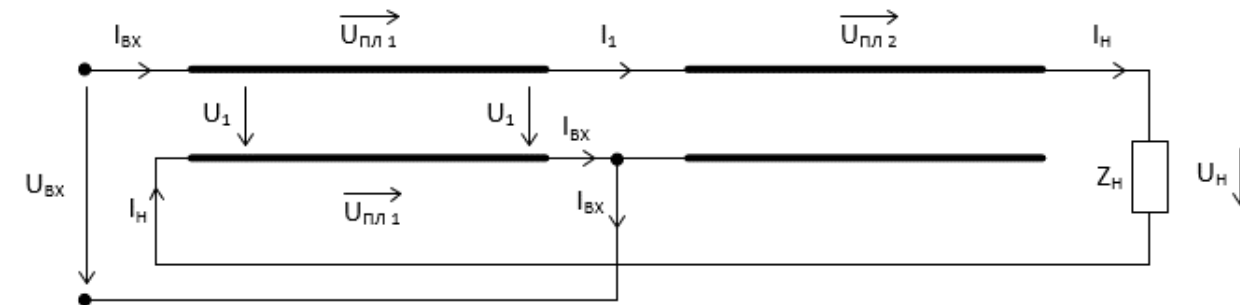
Цель исследования. Изучить структуру и выполнить оценку частотных характеристик двухсекционных МИЭК различного схематического исполнения с точки зрения оптимальности применения в электротехнических устройствах.

Материал и методы исследования. Существуют различные методы анализа работы МИЭК в электрических схемах. В статье [1] проанализированы различные подходы к расчету энергетических и частотных характеристик односекционного МИЭК. Для расчета более сложных структур (двух-, трехсекционных, трехобкладочных) целесообразно использовать метод, основанный на описании электромагнитных процессов в МИЭК интегральными параметрами как наиболее удобный и простой.

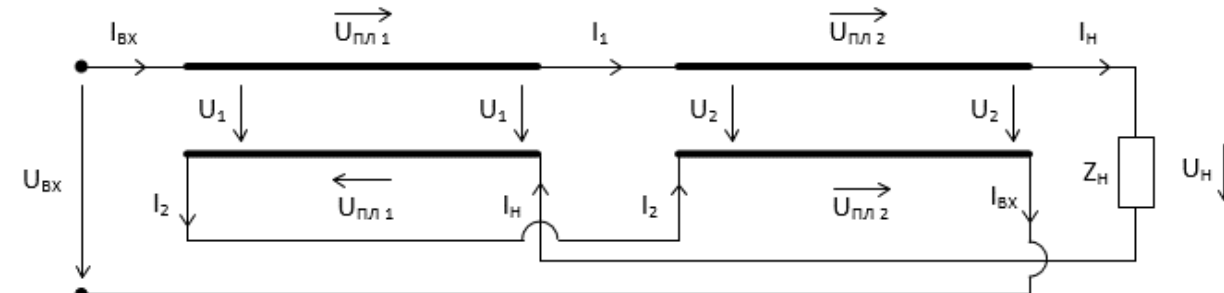
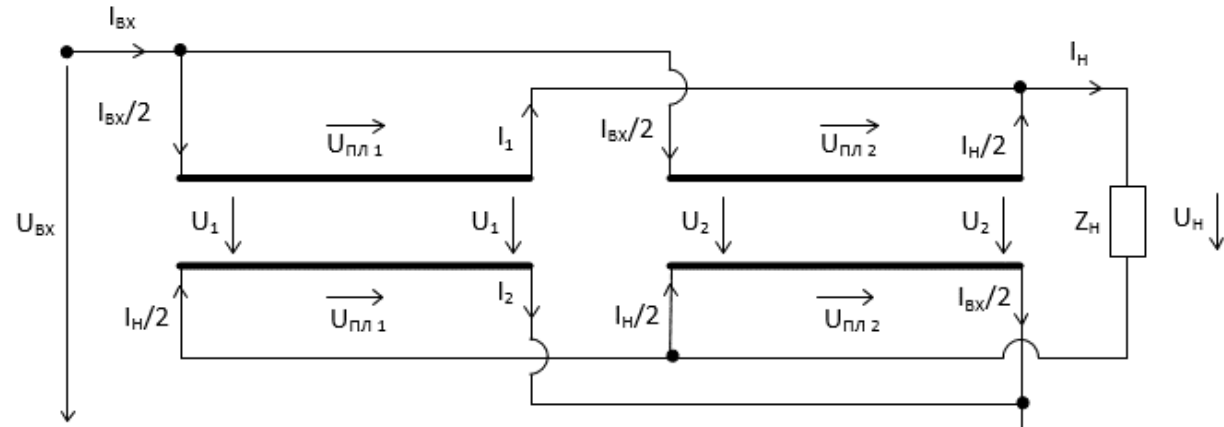
В статье приведены частотные характеристики двухсекционных МИЭК, схематические исполнения которых приведены в табл. 1, с использованием программы MathCad 15.

Таблица 1

Схематические исполнения, системы уравнений, описывающие процессы в двухсекционных МИЭК

№	Схематические исполнения и уравнения
1.	<p>Двухсекционный МИЭК с последовательным соединением секций и диагональным подключением источника питания и нагрузки</p>  $\begin{cases} \underline{U}_{BX} = \underline{U}_{\text{пл}1} + \underline{U}_{\text{пл}2} + \underline{U}_2, \quad \underline{U}_1 = \frac{\underline{I}_{BX} - \underline{I}_1}{j\omega C_1}, \quad \underline{U}_2 = \frac{\underline{I}_1 - \underline{I}_H}{j\omega C_2}, \quad \underline{U}_{\text{пл}1} = j\omega L_1(\underline{I}_{BX} + \underline{I}_H), \\ \underline{U}_{\text{пл}2} = j\omega L_2(\underline{I}_1 + \underline{I}_2), \quad \underline{U}_1 = \underline{U}_{\text{пл}1} + \underline{U}_{\text{пл}2} + \underline{U}_H, \quad \underline{I}_1 = \frac{\underline{I}_{BX} + \underline{I}_H}{2}, \quad \underline{I}_2 = \frac{\underline{I}_{BX} + \underline{I}_H}{2}. \end{cases}$
2.	<p>Двухсекционный МИЭК с последовательным соединением секций и подключением источника питания к началам обкладок первой секции, нагрузки к концам обкладок второй секции</p>  $\begin{cases} \underline{U}_{BX} = \underline{U}_{\text{пл}1} + \underline{U}_{\text{пл}2} + \underline{U}_2, \quad \underline{U}_1 = \frac{\underline{I}_{BX} - \underline{I}_1}{j \cdot \omega \cdot C_1}, \quad \underline{U}_2 = \frac{\underline{I}_1 - \underline{I}_H}{j \cdot \omega \cdot C_2}, \quad \underline{U}_{\text{пл}1} = 0, \\ \underline{U}_{\text{пл}2} = j \cdot \omega \cdot L_2 \cdot (\underline{I}_1 - \underline{I}_2), \quad \underline{U}_1 = \underline{U}_{\text{пл}1} + \underline{U}_{\text{пл}2} + \underline{U}_H + \underline{U}_{\text{пл}2} + \underline{U}_{\text{пл}1}, \quad \underline{I}_1 = \underline{I}_2. \end{cases}$
3.	<p>Двухсекционный МИЭК с последовательным соединением секций и диагональным подключением источника питания и нагрузки с выводом в середине вторичной обкладки</p>  $\begin{cases} \underline{U}_{BX} = \underline{U}_{\text{пл}1} + \underline{U}_1, \quad \underline{U}_1 = \frac{\underline{I}_{BX} - \underline{I}_1}{j \cdot \omega \cdot C_1}, \quad \underline{U}_2 = \frac{\underline{I}_1 - \underline{I}_H}{j \cdot \omega \cdot C_2}, \quad \underline{U}_{\text{пл}1} = j \cdot \omega \cdot L_1 \cdot (\underline{I}_{BX} + \underline{I}_H), \\ \underline{U}_{\text{пл}2} = j \cdot \omega \cdot \frac{L_2}{2} \cdot \underline{I}_1, \quad \underline{U}_1 = \underline{U}_{\text{пл}1} + \underline{U}_{\text{пл}2} + \underline{U}_H, \quad \underline{I}_1 = \underline{I}_H. \end{cases}$

Окончание табл. 1

4	<p>Двухсекционный МИЭК с последовательным соединением первичных обкладок и параллельным соединением вторичных обкладок обеих секций и диагональным подключением источника питания и нагрузки</p>  $\begin{cases} \underline{U}_{BX} = \underline{U}_{ПЛ1} + \underline{U}_{ПЛ2} + \underline{U}_2, \quad \underline{U}_1 = \frac{\underline{I}_{BX} - \underline{I}_1}{j \cdot \omega \cdot C_1}, \quad \underline{U}_2 = \frac{\underline{I}_1 - \underline{I}_H}{j \cdot \omega \cdot C_2}, \quad \underline{U}_{ПЛ1} = j \cdot \omega \cdot L_1 \cdot (\underline{I}_{BX} - \underline{I}_2), \\ \underline{U}_{ПЛ2} = j \cdot \omega \cdot L_2 \cdot (\underline{I}_1 + \underline{I}_2), \quad \underline{U}_1 = \underline{U}_{ПЛ1} + \underline{U}_{ПЛ2} + \underline{U}_H + \underline{U}_{ПЛ1}, \quad \underline{I}_1 = \frac{\underline{I}_{BX} + \underline{I}_H}{2}, \quad \underline{I}_2 = \frac{\underline{I}_{BX} + \underline{I}_H}{2}. \end{cases}$
5	<p>Двухсекционный МИЭК с параллельным соединением секций и диагональным подключением источника питания и нагрузки</p>  $\begin{cases} \underline{U}_{BX} = \underline{U}_{ПЛ1} + \underline{U}_2, \quad \underline{U}_1 = \frac{\underline{I}_{BX} - \underline{I}_1}{j \cdot \omega \cdot C_1}, \quad \underline{U}_2 = \frac{\underline{I}_{BX} - \underline{I}_H}{2 \cdot j \cdot \omega \cdot C_2}, \quad \underline{U}_{ПЛ1} = j \cdot \omega \cdot L_1 \cdot \left(\frac{\underline{I}_{BX}}{2} + \frac{\underline{I}_H}{2} \right), \\ \underline{U}_{ПЛ2} = j \cdot \omega \cdot L_2 \cdot \left(\frac{\underline{I}_{BX}}{2} + \frac{\underline{I}_H}{2} \right), \quad \underline{U}_1 = \underline{U}_{ПЛ1} + \underline{U}_H, \quad \underline{I}_1 = \frac{\underline{I}_H}{2}, \quad \underline{I}_2 = \frac{\underline{I}_{BX}}{2}. \end{cases}$

Рассмотрим расчет частотных характеристик (рис. 1–5) двухсекционных МИЭК различного схематического исполнения (табл. 1) для заданных значений емкости и индуктивности обкладок, напряжения питания в функции относительной частоты $\alpha = \omega/\omega_0$. В [1] определено, что наиболее оптимальным является значение добротности, равное 10. На рис. 1–5 индексы соответствуют номеру пункта в табл. 1.

Вследствие того, что интегральные параметры МИЭК являются частотно-зависимыми и условие резонансной настройки выполняется только на определенной фиксированной частоте, целесообразно исследовать основные

свойства МИЭК при его питании от инвертора напряжения и регулировании тока нагрузки при изменении частоты вверх и вниз от резонансной.

В случае последовательного (или параллельного) соединения обкладок обеих секций и диагонального подключения источника питания и нагрузки наблюдается согласное протекание токов в обкладках обеих секций. В случае последовательного соединения секций и подключения источника питания к началам обкладок первой секции, нагрузки к концам обкладок второй секции наблюдается противоположное протекание токов в обкладках обеих секций. В случае последовательного соединения первич-

ных обкладок и параллельным соединением вторичных обкладок обеих секций и диагональным

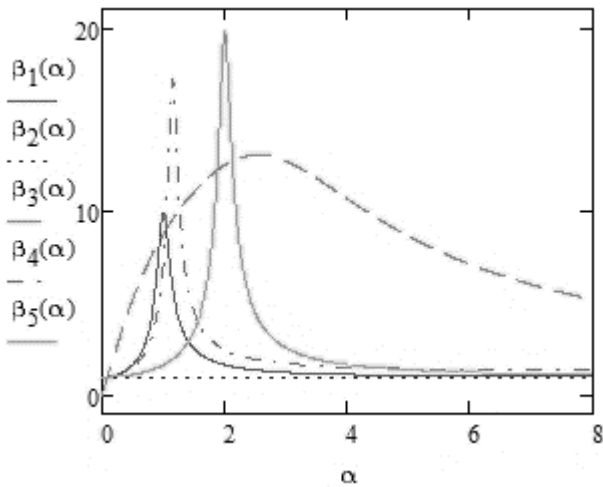


Рис. 1. АЧХ коэффициента усиления по напряжению (β) $k_u = \underline{U}_n / \underline{U}_{вх}$

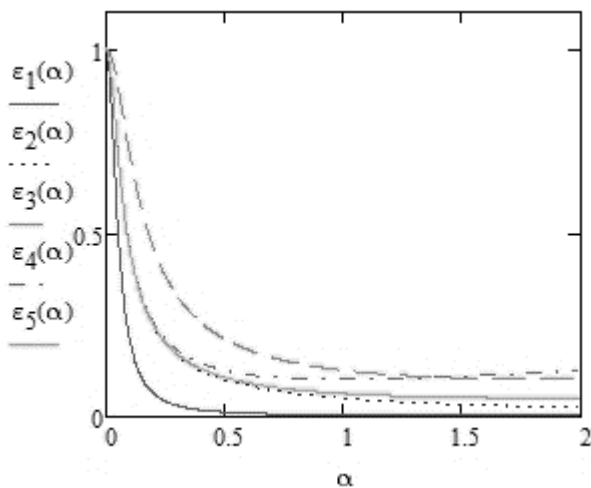


Рис. 2. АЧХ коэффициента усиления по току (ϵ) $k_i = \underline{I}_n / \underline{I}_{вх}$

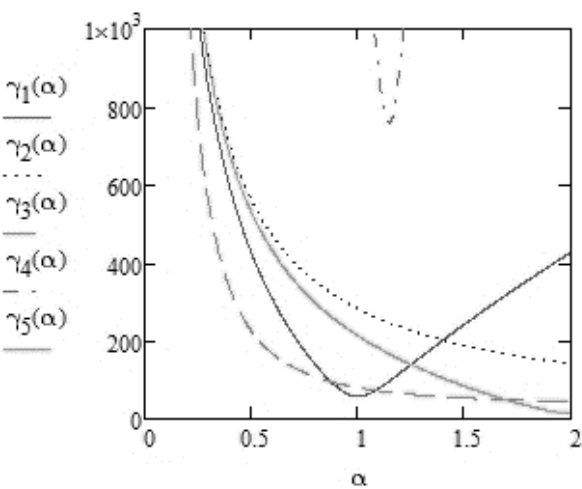


Рис. 3. АЧХ входного сопротивления (γ) $Z_{вх} = \underline{U}_{вх} / \underline{I}_{вх}$

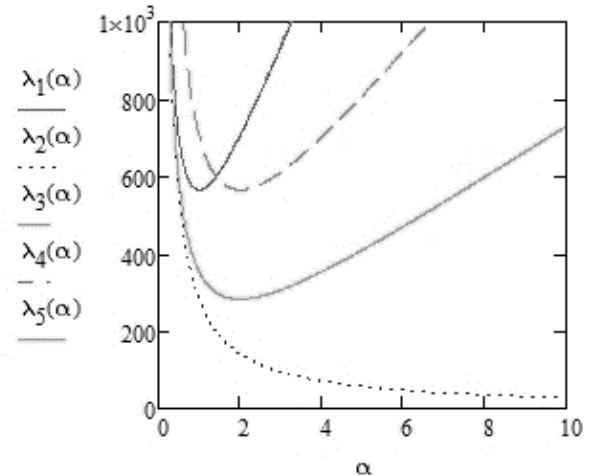


Рис. 4. АЧХ передаточного сопротивления (λ) $Z_{п} = \underline{U}_n / \underline{I}_{вх}$

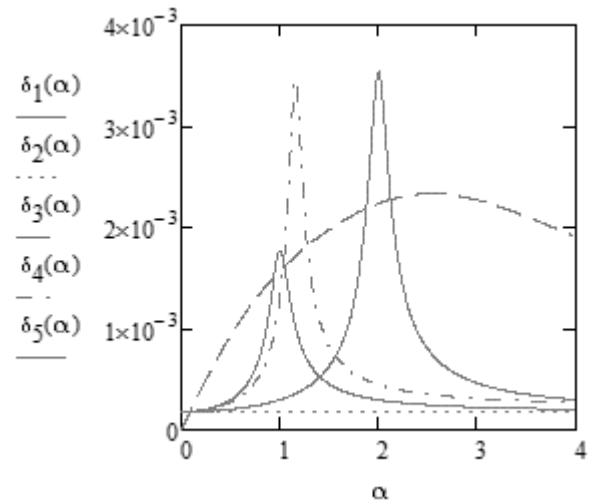


Рис. 5. АЧХ передаточной проводимости (δ) $Y_{п} = \underline{I}_n / \underline{U}_{вх}$

подключением источника питания и нагрузки наблюдается противоположное протекание токов в обкладках первой секции и согласное протекание токов в обкладках второй секции.

Двухсекционный МИЭК обладает резонансными свойствами с максимальным значением амплитуды коэффициента усиления по напряжению (относительное значение 20 при добротности, равной 10) (рис. 1) при параллельном соединении секций и диагональном подключении источника питания и нагрузки, что позволяет использовать его в генераторах импульсов напряжения [2], устройствах для испытания изоляции повышенным напряжением [3].

Применение МИЭК в генераторе импульсов напряжения приводит к повышению степени интеграции устройства и расширению функциональных возможностей устройства. Применение МИЭК в устройствах для испытания изоляции повышенным напряжением позволяет снизить массу и габариты устройства.

Входное и переходное сопротивления (рис. 3, 4) для различного схематического исполнения двухсекционного МИЭК с ростом частоты, т. е. с увеличением номера высших гармоник для режимов работы, близких к короткому замыканию, уменьшаются. Высшие гармонические составляющие в кривой питающего напряжения могут вызвать большие токи, что, естественно, нежелательно.

Из графиков (рис. 1–5) видно, что необходимое условие работы схемы индуктивно-емкостных преобразователей (ИЕП) [4] в режиме короткого замыкания (уменьшение входного и переходного сопротивлений с ростом частоты) выполняется для всех схематических исполнений двухсекционных МИЭК.

Переходная проводимость для различного схематического исполнения двухсекционных МИЭК (рис. 5) с ростом частоты увеличивается.

Схема, для которой выполняется условие равенства нулю переходной проводимости $\delta = 0$ при частоте, равной нулю, $\omega = 0$, обладает идеальными фильтрующими свойствами по току нагрузки преобразователя, например, ИЕП. Среди рассмотренных схематических исполнений двухсекционного МИЭК данному условию удовлетворяет двухсекционный МИЭК с последовательным соединением секций и диагональным подключением источника питания и нагрузки с выводом в середине вторичной обкладки. Таким образом, из рассмотренных схем наиболее пригодными при питании от источника напряжения с высшими гармониками является схематическое исполнение двухсекционного МИЭК с последовательным соединением секций и диагональным подключением источника питания и нагрузки с выводом в середине вторичной обкладки. Применение МИЭК в ИЕП позволяет снизить массу, габариты и себестоимость устройства за счет уменьшения числа компонентов при обеспечении возможности трансформации электрической энергии и изменении (регуливании) резонансной частоты устройства.

По результатам исследования частотных характеристик двухсекционных МИЭК различного схематического исполнения можно сделать следующие выводы:

1. Установлено, что последовательное соединение секций двухсекционного МИЭК при диагональном подключении источника питания и нагрузки является эквивалентным односекционной структуре МИЭК. Преимущество двухсекционной структуры МИЭК заключается в возможности различных вариантов соединения секций МИЭК.

2. Сравнение частотных характеристик односекционного и двухсекционных МИЭК позволяет сказать, что двухсекционный МИЭК с последовательным включением секций и диагональным подключением источника питания и нагрузки с выводом в середине вторичной обкладки обладает резонансными свойствами с теми же значениями коэффициента усиления по напряжению, коэффициента усиления по току, входного сопротивления, переходного сопротивления и переходной проводимости, что и односекционный МИЭК на частоте вдвое больше резонансной.

Анализ ЧХ двухсекционных МИЭК различного схематического исполнения с точки зрения оптимальности применения в электротехнических устройствах позволяет сказать, что:

- изменением амплитуды напряжения питания МИЭК можно регулировать уровень стабилизированного тока в нагрузке при питании МИЭК от инвертора, поскольку ток нагрузки при резонансной настройке МИЭК прямо пропорционален напряжению питания, что позволяет использовать данные схемы МИЭК в устройствах заряда емкостных накопителей [5], где требуется заряд накопительного конденсатора постоянным током с целью получения линейно возрастающего напряжения для экономичного заряда электрических аккумуляторов постоянным током с автоматическим поддержанием его постоянства в процессе зарядки. Применение МИЭК в устройствах заряда емкостных накопителей позволяет снизить массу и габариты устройства;

- двухсекционный МИЭК с последовательным соединением секций и подключением источника питания к началам обкладок первой секции, нагрузки к концам обкладок второй секции целесообразно применять в устройствах, передаточные функции которых должны быть близки к единице, например, в датчиках;

- при питании МИЭК напряжением синусоидальной формы, когда имеется единственная гармоника, схема настраивается на частоту этой гармоники, что обеспечивает независимость тока от величины нагрузки и максимальное значение амплитуды коэффициента усиления по току (относительное значение 1 при добротности $Q = 10$) двухсекционных МИЭК не зависит от схематического исполнения (способа соединения обкладок и направления тока в обкладках).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Показано, что при последовательном включении секций МИЭК и диагональном подклю-

чении источника питания и нагрузки данное схемотехническое решение наиболее оптимальное для следующих устройств: индуктивно-емкостных преобразователей, устройств заряда емкостных накопителей.

Схемы, обладающие высокими фильтрующими свойствами, обеспечивают и максимальную стабильность тока нагрузки при питании несинусоидальным напряжением. Правильный учет особенностей, связанных с влиянием на характеристики МИЭК несинусоидальности питающего напряжения, позволяет разрабатывать преобразователи с высокими технико-экономическими показателями (коэффициент усиления по напряжению и току).

В результате расчета частотных характеристик МИЭК различного схематического исполнения показаны способы расширения функциональных возможностей МИЭК.

Целесообразно рассмотреть в дальнейшем работу МИЭК в электрических схемах при постоянном напряжении в условиях коммутации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Конесев С. Г., Кириллов Р. В., Хазиева Р. Т. Анализ энергетических и частотных характеристик многофункциональных интегрированных электромагнитных компонентов // Энергетические и электротехнические системы: сб. науч. тр. Магнитогорск, 2014. С. 354–361. [[S. G. Konesev, R. V. Kirillov, and R. T. Khazieva, "Analysis of energy and frequency responses of multifunctional integrated electromagnetic components," (in Russian), in *Energeticheskie i elektrotehnicheskie sistemy*. Magnitogorsk, pp. 65-75, 2014.]]

2. Конесев С. Г., Хазиева Р. Т., Кириллов Р. В., Мухаметшин А. В., Садиков М. Р. Пат. №2477918 РФ. Генератор импульсов напряжения; заявл. 29.02.2012; опубл. 20.03.2013, Бюл. №8. 6 с. [[S. G. Konesev, R. T. Khazieva, R. V. Kirillov, A. V. Muhametshin, M. R. Sadikov, Pat. 2477918 RF. *Voltage pulse generator*; stated 29.02.2012; published 20.03.2013, BI no. 8. 6 p.]]

3. Конесев С. Г., Хазиева Р. Т., Стрижев Д. А. Пат. №108856 РФ. Компактное устройство для испытания изоляции повышенным напряжением; заявл. 06.04.2011; опубл. 27.09.2011, Бюл. №27. 4 с. [[S. G. Konesev, R. T. Khazieva, D. A. Strizhev, Pat. 108856 RF. *Compact device for testing high voltage insulation*; stated 06.04.2011; published 27.09.2011, BI no. 27. 4 p.]]

4. Конесев С. Г., Хазиева Р. Т., Конесев И. С., Нурлыгаянов А. Р. Пат. №2450413 РФ. Индуктивно-емкостный преобразователь; заявл. 03.12.2010; опубл. 10.05.2012, Бюл. №13. 4 с. [[S. G. Konesev, R. T. Khazieva, I. S. Konesev., A. R. Nurlygajanov. Pat. 2450413 RF. *Inductive-capacitive transducer*; stated 03.12.2010; published 10.05.2012, BI no. 13. 4 p.]]

5. Конесев С. Г., Хазиева Р. Т., Кириллов Р. В., Мухаметшин А. В., Садиков М. Р. Пат. №117748 РФ. Устройство заряда емкостного накопителя; заявл. 14.02.2011; опубл. 10.06.2011, Бюл. №16. 4 с. [[S. G. Konesev, R. T. Khazieva, I. S. Konesev., A. R. Nurlygajanov. Pat. 117748 RF. *Capacitive storage device charge*; stated 14.02.2011; published 10.06.2011, BI no. 16. 4 p.]]

ОБ АВТОРАХ

КОНЕСЕВ Сергей Геннадьевич, доц. каф. э/техн. и э/оборудования предприятий. Дипл. инж. э/мех. (Уфимск. ордена Ленина авиац. ин-т, 1986). Канд. техн. наук (там же, 1992). Иссл. в обл. функциональной интеграции.

КИРИЛЛОВ Роман Вячеславович, асп. каф. э/техн. и э/оборудования предприятий. Дипл. инж. по электроприводу и автоматике пром. установок и технол. комплексов» (УГНТУ, 2013). Готовит дис. об устройствах импульсного индукционного нагрева.

ХАЗИЕВА Регина Тагировна, асп. каф. э/техн. и э/оборудования предприятий. М-р техн. и технол. по э/энергетике и э/технике (УГНТУ, 2014). Готовит дис. о многофункциональных интегрированных электромагнитных компонентах.

METADATA

Title: Research of frequency responses of the two-section multifunctional integrated electromagnetic components.

Authors: S. G. Konesev¹, R. V. Kirillov², R. T. Khazieva³.

Affiliation:

Ufa State Petroleum Technological University, (UGNTU), Russia.

Email: ¹ KonesevSG@yandex.ru, ² romchikrill@mail.ru, ³ khazievart@mail.ru

Language: Russian.

Source: Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa State Aviation Technical University), vol. 19, no. 4 (70), pp. 66-71, 2015. ISSN 2225-2789 (Online), ISSN 1992-6502 (Print).

Abstract: The estimation of the frequency characteristics of the two-piece multi-functional integrated of the electromagnetic component (MIEC) different schematic implementation in terms of an optimal use of this structure in various electrical devices. Shows how to extend the functionality of MIEC, in particular, that in series of sections MIEC and diagonal connecting the power supply and load this circuit solution optimally for the following devices: inductive-capacitive transformers (IEP), the capacitive charge storage devices.

Key words: multifunctional integrated electromagnetic component, frequency response, inductive-capacitive transducer.

About authors:

KONESEV, Sergey Gennadevich, Assistant Professor of the Chair Electrical Engineering and Electrical Equipment Enterprises. Dipl. electromechanical engineer (Order of Lenin Ufa Aviation Inst., 1986). Cand. of Tech. Sci. (Ufa Aviation Inst. Ordzhonikidze, 1992). Research in the region of functional integration.

KIRILLOV, Roman Vyacheslavovich, Postgrad. (PhD) Student, Dept. of the Chair Electrical Engineering and Electrical Equipment Enterprises. Engineer by profession "Electric drive and automation of industrial installations and technological complexes" (UGNTU, 2013). Prepares diss. on pulse induction heating devices.

KHAZIEVA, Regina Tagirovna, Postgrad. (PhD) Student, Dept. of the Chair Electrical Engineering and Electrical Equipment Enterprises. Master of Technics & Technology (UGNTU, 2014). Prepares diss. of multifunctional integrated of electromagnetic components.