

ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИИ В ПРОМЫШЛЕННОСТИ

УДК 621.31

DOI: 10.18503/2311-8318-2017-1(34)-49-55

Конесев С.Г., Хазиева Р.Т.

ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет»

АНАЛИЗ СТАБИЛИЗАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ИНДУКТИВНО-ЕМКОСТНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ СПОСОБАХ ПОДКЛЮЧЕНИЯ ГИБРИДНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Для снижения массы и габаритов, повышения КПД и надежности систем стабилизации тока предлагается осуществлять питание нагрузки от индуктивно-емкостных преобразователей (ИЕП), выполненных на основе гибридных электромагнитных элементов – многофункциональных интегрированных электромагнитных компонентов (МИЭК). Целью работы является исследование стабилизационных свойств, трех схем, предложенного авторами ИЕП, на основе двухсекционного МИЭК при различных способах соединения секций МИЭК и подключения источника питания и нагрузки. Для достижения цели построены частотные характеристики (ЧХ), произведена оценка коэффициентов усиления по напряжению и току, коэффициента стабилизации тока ИЕП по результатам математического моделирования, при помощи интегральных параметров МИЭК, к которым относятся полная индуктивность обкладок, общая емкость и токи выводов обкладок. Схема №1 обладает более высоким коэффициентом усиления по напряжению по сравнению со схемой №2 ($k_{U1} = 20 > k_{U2} = 13,5$), стабилизирует ток большей амплитуды ($i_{L1} = 0,352 > i_{L2} = 0,235$), но в узком диапазоне изменения частоты (от $0,98f_{рез}$ до $1,02f_{рез}$). При этом схема №1 обладает более широким частотным диапазоном по сравнению со схемой №3 (от $0,985f_{рез}$ до $1,003f_{рез}$), но стабилизирует ток меньшей амплитуды ($i_{L1} = 0,352$), имеет меньший коэффициент усиления по напряжению ($k_{U1} = 20 < k_{U3} = 75$). Схема №2 обладает наилучшими стабилизирующими свойствами среди двухсекционных схем МИЭК, так как осуществляет стабилизацию тока нагрузки в широком диапазоне изменения частоты (от $0,7f_{рез}$ до $1,3f_{рез}$) и может работать от несинусоидального источника напряжения. Схема №3 осуществляет стабилизацию тока нагрузки большей амплитуды ($i_{L3} = 1,23$), обладает наибольшим коэффициентом усиления по напряжению ($k_{U3} = 75$). Исследованные ИЕП на основе двухсекционного МИЭК могут использоваться в качестве УЗЕН при питании от источника напряжения синусоидальной формы.

Ключевые слова: критерий стабильности, преобразователи, источник тока, математическая модель, вольт-амперная характеристика, многофункциональный интегрированный электромагнитный компонент, индуктивно-емкостный преобразователь, частотная характеристика, стабилизация тока, стабильность тока.

ВВЕДЕНИЕ

Для снижения массы и габаритов, повышения КПД и надежности систем стабилизации тока (ССТ) широко применяемых в устройствах заряда емкостных накопителей (УЗЕН), генераторах высоковольтных импульсов, электротермических системах, требующих постоянного подводимой к ним мощности при изменении их сопротивления в широких пределах, перспективным является питание нагрузки от индуктивно-емкостного преобразователя (ИЕП) [1 – 3].

Основным свойством ИЕП является стабилизация выходного тока при изменении величины сопротивления нагрузки [4 – 7]. Однако в реальном преобразователе, ввиду конечной добротности его элементов, с ростом нагрузки стабильность выходного тока падает [8 – 10].

Преобразователи источников напряжения в источнике тока, выполненные на основе гибридных электромагнитных элементов (ЭМЭ), позволяют обеспечить требуемые рабочие характеристики [11 – 18]. Применением ИЕП можно добиться линейного изменения ВАХ заряда ЕН и тем самым создать условия, при которых потери энергии в зарядной цепи будут минимальны, а КПД максимальным [19 – 22]. Использование гибридных ЭМЭ приводит к снижению массы и габаритов, повышению надежности УЗЕН [23].

Известен многофункциональный интегрированный электромагнитный компонент (МИЭК) [24], на основе различных схемотехнических исполнений которого

разработано значительное количество (более 30) электротехнических устройств [25 – 27]. Схемотехнические исполнения МИЭК отличаются друг от друга порядком включения секций, образующих их структуру, различными способами подключения источника питания и нагрузки. Схемы ИЕП, реализованные на основе МИЭК, безусловно, неравнозначны по своим функциональным возможностям, стабилизирующим, частотным и другим свойствам и показателям. Актуальной становится задача оценки стабилизационных свойств разработанных структур МИЭК и исследование целесообразности и эффективности применения двухсекционной структуры МИЭК в качестве ИЕП для ССТ, выбор наиболее оптимального с точки зрения стабилизационных свойств способа соединения секций и подключения источника питания и нагрузки.

В данной статье рассматриваются три схемы ИЕП на основе двухсекционного МИЭК, отличающиеся способом соединения секций и подключением источника питания и нагрузки.

В работе поставлена цель исследовать стабилизационные свойства ИЕП на основе двухсекционного МИЭК при различных способах соединения секций МИЭК и подключения источника питания и нагрузки.

Для достижения цели решаются следующие задачи:

- исследование и анализ частотных характеристик (ЧХ) двухсекционного МИЭК;
- оценка коэффициентов усиления по напряжению и току;
- оценка коэффициента стабилизации тока ИЕП на основе двухсекционного МИЭК.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Возможны различные схемотехнические исполнения МИЭК, варианты соединения секций и способы подключения источника питания и нагрузки к секциям МИЭК [28, 29].

Рассмотрим двухсекционный МИЭК с различными способами соединения секций и подключения источника питания и нагрузки с целью оценки стабилизирующих свойств и определения их зависимости от способа соединения секций.

Оценить стабилизирующие свойства ИЕП можно через отношение модуля текущего значения выходного тока ИЕП к его значению в режиме КЗ (к входному току).

Исследуются три схемы ИЕП на основе МИЭК с различными подключениями секций, источника питания и нагрузки. Каждая из схем имеют свою собственную резонансную частоту при различных способах подключения.

Схема № 1 представляет собой двухсекционный МИЭК с параллельным соединением обкладок обеих секций, с подключением источника питания к началам первичных обкладок и к концам вторичных обкладок обеих секций, с подключением нагрузки к концам первичных обкладок и началам вторичных обкладок обеих секций (см. таблицу, схема № 1). В этом случае наблюдается согласное протекание токов в обкладках обеих секций.

Схема № 2 представляет собой двухсекционный МИЭК с последовательным соединением секций, с выводом в середине вторичной обкладки, с подключением источника питания к началу первичной обкладки первой секции и к середине вторичной обкладки, с подключением нагрузки к концу первичной обкладки второй секции и началу вторичной обкладки первой секции (см. таблицу, схема № 2). Данное схематическое исполнение МИЭК обладает резонансными свойствами на частоте 1,25 от резонансной частоты схемы №1, представленной в п. 1 таблицы.

Схема №3 представляет собой двухсекционный МИЭК с параллельным соединением обкладок обеих секций, с выводом в середине вторичной обкладки, с подключением источника питания к началам первичных обкладок обеих секций и к середине вторичной обкладки, с подключением нагрузки к концам первичных обкладок обеих секций и началу вторичной обкладки первой секции (см. таблицу, схема № 3).

Данное схематическое исполнение МИЭК обладает резонансными свойствами на частоте 1,5 от резонансной частоты схемы № 1, представленной в п. 1 таблицы.

Формулы тока нагрузки исследуемых схем при выполнении условия резонансной настройки могут быть представлены в виде:

$$I_L = \omega \cdot C \cdot U_{in} / (2 \cdot j); \quad (1)$$

$$I_L = U_{in} / (2 \cdot j \cdot \omega \cdot L). \quad (2)$$

Приведенные выражения для относительного тока нагрузки отражают частотные свойства МИЭК при различных способах соединения секций и подключения источника питания и нагрузки.

Из выражений (1) и (2) видно, что стабильность выходного тока ИЕП не зависит от порядка включения элементов и варианта подключения источника питания, определяется лишь добротностью и величиной относительного сопротивления нагрузки. При равных значениях добротности лучшими стабилизирующими свойствами обладают схемы, у которых максимальная величина относительного сопротивления нагрузки имеет меньшее значение.

Ввиду того, что структуру ИЕП образуют элементы с частотно-зависимыми параметрами и условие резонансной настройки выполняется только на определенной фиксированной частоте, целесообразно исследовать основные свойства преобразователей при отклонениях частоты питающей сети от резонансной. Связанное с этим изменение стабилизирующих свойств ИЕП можно характеризовать отношением модуля выходного тока преобразователя при текущей частоте ω к его значению при резонансной частоте ω_0 .

Изменением способа соединения секций достигается на одном и том же МИЭК три резонансных частоты.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для исследования ЧХ двухсекционного МИЭК при различных способах соединения его секций и подключения источника питания и нагрузки использован метод математического моделирования при помощи интегральных параметров МИЭК.

Для определения коэффициента стабилизации двухсекционного МИЭК с различными способами соединения секций разработаны математические модели ИЕП на их основе, описывающие электромагнитные процессы в МИЭК с помощью интегральных параметров МИЭК. На основе методики, подробно описанной в [30], в качестве интегральных параметров МИЭК выбраны полная индуктивность обкладок L , общая емкость C и токи выводов обкладок $I_{вх}$, $I_{н}$. При этом активное сопротивление обкладок МИЭК и его влияние на параметры резонансного контура не учитывается.

Произведем оценку стабилизирующих свойств, анализ ЧХ исследуемых схем. При этом расчет выполним при определенных значениях емкости и индуктивности обкладок МИЭК в функции относительной частоты $a = \omega/\omega_0$.

Как видно из формул, описывающих электромагнитные процессы, происходящие в МИЭК, интегральные параметры МИЭК зависят от частоты. В связи с этим целесообразно исследовать стабилизирующие свойства МИЭК при его питании от инвертора напряжения и регулировании тока нагрузки при изменении частоты вверх и вниз от резонансной.

Исследуется работа схем на активную нагрузку.

На рис. 1 – 6 показаны ЧХ двухсекционного МИЭК. При этом на рисунках индексы соответствуют номеру схемы МИЭК в таблице.

На рис. 1 показана зависимость коэффициента усиления по напряжению от изменения частоты в относительных единицах для двухсекционного МИЭК при различных способах соединения секций.

Из графика видно, что схема № 3 обладает наибольшим коэффициентом усиления по напряжению ($k_{U3} = 75 > k_{U1} = 20 > k_{U2} = 13,5$).

Схематические исполнения, системы уравнений, описывающие процессы в двухсекционном МИЭК при различных способах соединения его секций и подключения источника питания и нагрузки

№	Схемы ИЕП	Математические модели МИЭК и формулы тока нагрузки
1	<p style="text-align: center;">Схема №1</p>	$\begin{aligned} U_{BX} &= U_{\text{пл}1} + U_2 \\ U_1 &= (L_{BX}/2 - I_1)/(j \cdot \omega \cdot C_1) \\ U_2 &= (L_{BX} - I_H)/(2 \cdot j \cdot \omega \cdot C_2) \\ U_{\text{пл}1} &= j \cdot \omega \cdot L_1 \cdot (L_{BX} + I_H)/2 \\ U_{\text{пл}2} &= j \cdot \omega \cdot L_2 \cdot (L_{BX} + I_{LH})/2 \\ U_1 &= U_{\text{пл}1} + U_H \\ I_1 &= I_H/2 \\ I_2 &= I_{BX}/2 \\ I_H &= \omega \cdot C \cdot U_{BX}/(2 \cdot j) \\ I_H &= U_{BX}/(2 \cdot j \cdot \omega \cdot L) \end{aligned}$
2	<p style="text-align: center;">Схема №2</p>	$\begin{aligned} U_{BX} &= U_{\text{пл}1} + U_2 \\ U_1 &= (L_{BX} - I_1)/(j \cdot \omega \cdot C_1) \\ U_2 &= (I_1 - I_H)/(j \cdot \omega \cdot C_2) \\ U_{\text{пл}1} &= j \cdot \omega \cdot L_1 \cdot (L_{BX} + I_H)/2 \\ U_{\text{пл}2} &= j \cdot \omega \cdot L_2 \cdot I_1/2 \\ U_1 &= U_{\text{пл}1} + U_{\text{пл}2} + U_H \\ I_1 &= I_H \\ I_H &= \omega \cdot C \cdot U_{BX}/(2 \cdot j) \\ I_H &= U_{BX}/(2 \cdot j \cdot \omega \cdot L) \end{aligned}$
3	<p style="text-align: center;">Схема №3</p>	$\begin{aligned} U_{BX} &= U_{\text{пл}1} + U_1 \\ U_1 &= (L_{BX}/2 - I_1)/(j \cdot \omega \cdot C_1) \\ U_2 &= (L_{BX} - I_H)/(2 \cdot j \cdot \omega \cdot C_2) \\ U_{\text{пл}1} &= j \cdot \omega \cdot L_1 \cdot (L_{BX}/2 + I_H) \\ U_{\text{пл}2} &= j \cdot \omega \cdot L_2 \cdot I_{BX} \\ U_1 &= U_{\text{пл}1} + U_H \\ I_1 &= I_H/2 \\ I_2 &= I_{BX}/2 \\ I_H &= \omega \cdot C \cdot U_{BX}/(2 \cdot j) \\ I_H &= U_{BX}/(2 \cdot j \cdot \omega \cdot L) \end{aligned}$

Зависимость входного сопротивления исследуемой структуры МИЭК от изменения частоты в относительных единицах показана на **рис. 2**.

Полученная зависимость наглядно показывает, что входное сопротивление для рассматриваемых способов соединения секций МИЭК, представленных в таблице, с увеличением номера высших гармоник для режимов работы, близких к КЗ (с ростом частоты), уменьшается. Из графика видно, что для исследуемых схем МИЭК необходимое условие работы ИЕП – уменьшение входного и переходного сопротивлений с ростом частоты – выполняется: для схемы № 1 в диапазоне изменения частоты $0,05f_{\text{рез}}$ до $1,0f_{\text{рез}}$; для схемы № 2 в диапазоне изменения частоты $0,05f_{\text{рез}}$ до $1,5f_{\text{рез}}$; для схемы №3 в диапазоне изменения частоты $0,05f_{\text{рез}}$ до $0,7f_{\text{рез}}$, что свидетельствует о большей пригодности схемы МИЭК, представленной в п. 1 **таблицы**, для изготовления ИЕП на ее основе.

На **рис. 3** показана зависимость переходного сопротивления исследуемой структуры МИЭК от изменения частоты в относительных единицах.

Из графика видно, что переходное сопротивление для всех исследуемых способов соединения секций МИЭК с ростом частоты, т.е. с увеличением номера высших гармоник для режимов работы, близких к КЗ, уменьшается. При этом для схемы № 1 в диапазоне изменения частоты $0,05f_{\text{рез}}$ до $1,0f_{\text{рез}}$; для схемы № 2 в диапазоне изменения частоты $0,05f_{\text{рез}}$ до $1,5f_{\text{рез}}$, для

схемы № 3 в диапазоне изменения частоты $0,05f_{\text{рез}}$ до $1,0f_{\text{рез}}$, что свидетельствует о большей пригодности схем МИЭК, представленных в п. 2 и 3, для изготовления ИЕП на ее основе. Однако для схем № 1 и № 3 снижение переходного сопротивления с ростом частоты происходит быстрее и более значительно (до 275 См) в отличие от схемы №2 МИЭК, в которой переходная проводимость уменьшается до 575 См (в 2,1 раза большего значения), а затем увеличивается.

При этом для схемы № 1 снижение переходного сопротивления с ростом частоты происходит еще быстрее. Это крайне нежелательно из-за больших токов, которые могут возникнуть вследствие появления высших гармонических составляющих в кривой питающего напряжения.

Зависимость переходной проводимости исследуемой структуры МИЭК от изменения частоты в относительных единицах показана на **рис. 4**.

Из графика видно, что переходное сопротивление для рассматриваемых способов соединения секций МИЭК с ростом частоты уменьшается. Полученные зависимости показывают, что для исследуемых схем МИЭК необходимое условие работы ИЕП – увеличение переходной проводимости с ростом частоты – выполняется для всех схем в диапазоне изменения частоты $0,05f_{\text{рез}}$ до $1,0f_{\text{рез}}$.

Рассмотрим работу схемы при изменении коэффициента стабилизации тока в диапазоне $\pm 7 \%$.

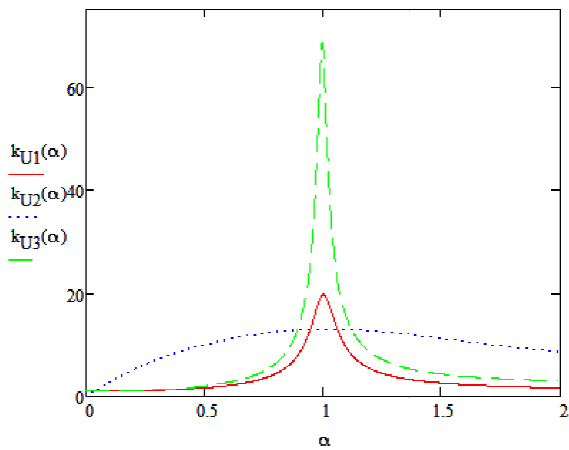


Рис. 1. АЧХ коэффициента усиления по напряжению (β) $k_u = \underline{U}_u / \underline{U}_{вх}$

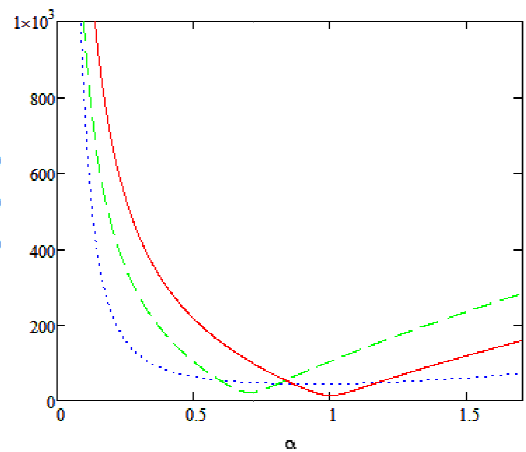


Рис. 2. АЧХ входного сопротивления (γ) $Z_{вх} = \underline{U}_{вх} / \underline{I}_{вх}$

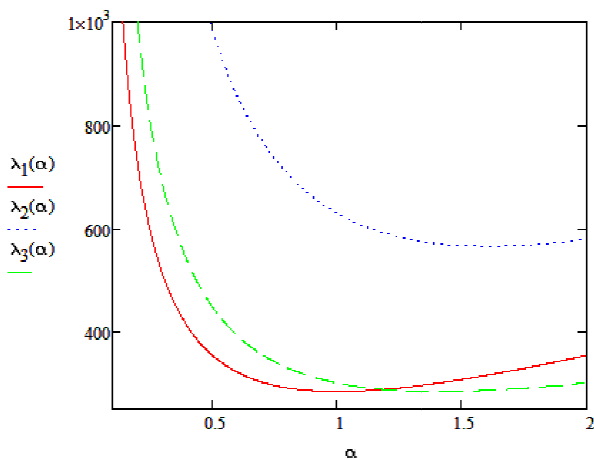


Рис. 3. АЧХ переходного сопротивления (λ) $Z_{п} = \underline{U}_u / \underline{I}_{вх}$

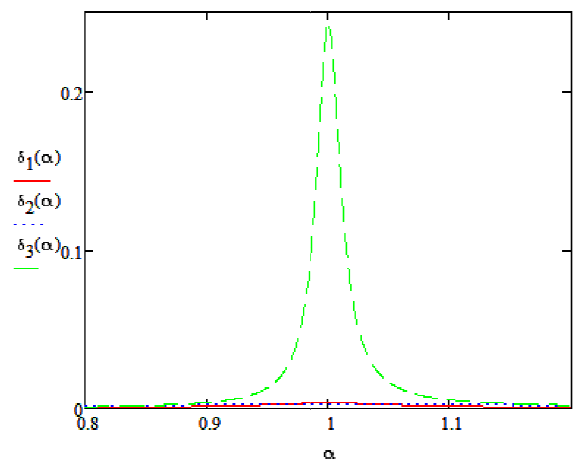


Рис. 4. АЧХ переходной проводимости (δ) $\underline{Y}_u = \underline{I}_u / \underline{U}_{вх}$

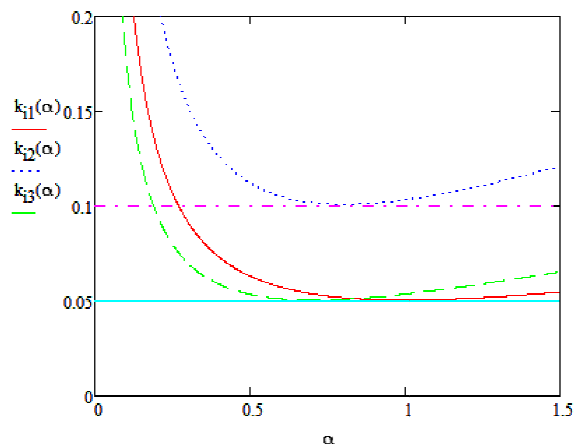


Рис. 5. АЧХ коэффициента усиления по току (ε) $k_i = \underline{I}_u / \underline{I}_{вх}$

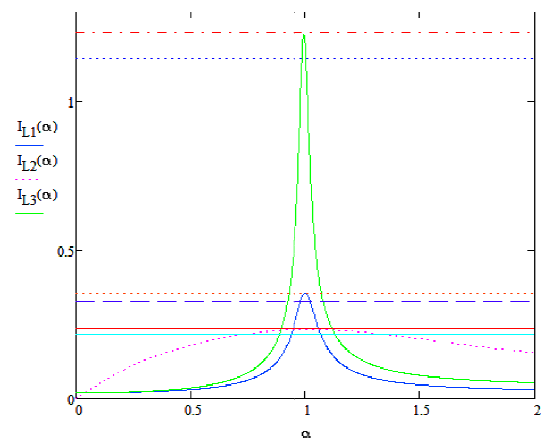


Рис. 6. График зависимости коэффициента стабилизации по току от изменения частоты в относительных единицах

На рис. 5 показана зависимость коэффициента стабилизации по току от изменения частоты в относительных единицах для двухсекционного МИЭК при различных способах соединения секций. Из графика видно, что коэффициент стабилизации тока нагрузки сохраняется: для схемы № 1 в диапазоне изменения частоты от $0,7f_{рез}$ до $1,4f_{рез}$ равным 0,05; схема № 2 от $0,7f_{рез}$ до $0,9f_{рез}$; равным 0,1; схема № 3 от $0,6f_{рез}$ до $0,9f_{рез}$ равным 0,05.

Зависимость тока нагрузки от изменения частоты в

относительных единицах при различных способах соединения обкладок секций МИЭК показана на рис. 6.

Из графика видно, что исследуемые схемы МИЭК осуществляют стабилизацию тока нагрузки в диапазоне $\pm 7\%$ при изменении частоты: схема № 1 $0,98f_{рез}$ до $1,02f_{рез}$, для схемы № 2 в диапазоне изменения частоты от $0,7f_{рез}$ до $1,3f_{рез}$, для схемы № 3 в диапазоне изменения частоты от $0,985f_{рез}$ до $1,003f_{рез}$.

Следовательно, стабильность выходного тока ИЕП при отклонении частоты питающей сети зависит не

только от способа подключения источника питания, но и способа соединения секций МИЭК, образующих его структуру.

Наименьшими отклонениями тока при изменении частоты обладает схема № 2.

Таким образом, схема № 2 обладает более подходящими свойствами для ИЕП (наилучшими стабилизирующими свойствами среди исследованных схем МИЭК), так как осуществляет стабилизацию тока нагрузки в широком диапазоне изменения частоты (от $0,7f_{рез}$ до $1,3f_{рез}$). Данная схема обладает высокими фильтрующими свойствами и может работать от несинусоидального источника напряжения.

Схема № 3 осуществляет стабилизацию тока нагрузки большей амплитуды.

Изменение сопротивления нагрузки в широких пределах не приводит к заметному изменению резонансной частоты.

По результатам исследования ЧХ двухсекционного МИЭК при различных способах подключения источника питания и нагрузки и соединения секций и стабилизационных свойств ИЕП на его основе можно сделать следующий вывод: изменение способа соединения секций позволяет расширить частотный диапазон работы ИЕП: резонансная частота может быть в диапазоне от $1,0f_{рез}$ до $1,5f_{рез}$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Оценка стабилизационных свойств ИЕП на основе двухсекционного МИЭК при различных способах соединения секций МИЭК (последовательном и параллельном) и подключения источника питания и нагрузки с точки зрения оптимальности применения в ИЕП позволяет сказать, что:

– при необходимости усиления напряжения и тока и стабилизации тока в узком диапазоне изменения частоты наиболее оптимальной является схема № 1, занимающая промежуточное положение. Схема № 1 обладает более высоким коэффициентом усиления по напряжению по сравнению со схемой № 2 ($k_{U1} = 20 > k_{U2} = 13,5$), стабилизирует ток большей амплитуды ($i_{L1} = 0,352 > i_{L2} = 0,235$), но в узком диапазоне изменения частоты ($0,98f_{рез}$ до $1,02f_{рез}$). При этом схема № 1 обладает более широким частотным диапазоном ($0,98f_{рез}$ до $1,02f_{рез}$) по сравнению со схемой № 3 ($0,985f_{рез}$ до $1,003f_{рез}$), но стабилизирует ток меньшей амплитуды ($i_{L1} = 0,352 < i_{L3} = 1,23$), имеет меньший коэффициент усиления по напряжению ($k_{U1} = 20 < k_{U3} = 75$);

– схема № 2 обладает более подходящими свойствами для ИЕП (наилучшими стабилизирующими свойствами среди исследованных схем МИЭК), так как осуществляет стабилизацию тока нагрузки в широком диапазоне изменения частоты (от $0,7f_{рез}$ до $1,3f_{рез}$). Данная схема обладает высокими фильтрующими свойствами и может работать от несинусоидального источника напряжения;

– схема № 3 осуществляет стабилизацию тока нагрузки большей амплитуды ($i_{L3} = 1,23 > i_{L1} = 0,352 > i_{L2} = 0,235$), обладает наибольшим коэффициентом усиления по напряжению ($k_{U3} = 75 > k_{U1} = 20 > k_{U2} = 13,5$). Исследованные ИЕП на основе двухсекционного МИЭК могут использоваться в качестве УЗЕН при питании от источника напряжения синусоидальной формы.

Исследованные ИЕП на основе двухсекционного МИЭК могут использоваться в качестве УЗЕН при питании от источника напряжения синусоидальной формы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Конесев С.Г., Хазиева Р.Т. Индуктивно-емкостные преобразователи. Применение в электротехнике и обзор схемотехнических решений // Ресурсо-энергосбережение и эколого-энергетическая безопасность промышленных городов: сб. тр. 3-й Всерос. науч.-практ. конф.; Филиал ГОУ ВПО МЭИ. Волжский, 2010. С. 120-125.
2. Ильинский Н.Ф. Электропривод: энерго- и ресурсосбережение: учеб. пособие для вузов. М.: Изд-во Академия, 2008. 124 с.
3. Тарасов В.Т. Однофазный сварочный стабилизатор тока: пат. 2299794 РФ, БИ №15, 2007.
4. Индуктивно-емкостный преобразователь: пат. 77517 РФ. Саенко И.В., Опре В.М., Новик А.А., Кошелев П.А., Парамонов С.В., Дозоров С.А.
5. Источник неизменного тока: пат. 100687 РФ. Дозоров С.А., Кошелев П.А., Опре В.М., Парамонов С.В., Терещенко В.Н.
6. Высоковольтный источник неизменного тока: пат. 114567 РФ. Дозоров А.А., Дозоров С.А., Опре В.М., Сомов А.И., Терещенко В.Н.
7. O'Loughlin. M. An Interleaved PFC Preregulator for High-Power Converters // Topic 5: Texas Instrument Power Supply Design Seminar, 2007, pp. 5-1, 5-14.
8. Kit Sum. K. Improved valley-fill passive power factor correction current shaper approaches IEC specification limits // PCIM Magazine, Feb. 1998.
9. Chin, Shaoran A., John Tero, Milan M. Jovanovic, Raymond B. Ridley, Fred C. Lee. A New IC Controller for Resonant-Mode Power Supplies // IEEE Applied Power Electronics Conference Proceedings, Los Angeles, California, March 1990, pp. 459-466.
10. Musavi F., Eberle W., Dunford W.G. A phase shifted semi-bridgeless boost power factor corrected converter for plug in hybrid electric vehicle battery chargers // Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), 2011. Twenty-Sixth Annual IEEE, March 2011, pp. 821-828.
11. Morrow K., Karner D., Francfort J., Plug-in Hybrid Electric Vehicle Charging Infrastructure Review, U.S. Department of Energy - Vehicle Technologies Program, 2008.
12. Kokes M. Serienschwingkreis-Brückenwechselrichter für Mittelfrequenz. Patent DE 19624117 A1; publ. 18.12.1997.
13. John H. Alexander. Method of integrating electronic components into electronic circuit structures made using LTCC tape. Patent US 5661882 A; publ. 02.09.1997.
14. Gideon S. Grader, David W. Johnson, Jr., Apurba Roy, John Thomson, Jr. Method of making a multilayer monolithic magnetic component. Patent US 5479695 A, CA 2067008 A1, CA 2067008 C, DE 69202097 D1, DE 69202097 T2, EP 0512718 A1, EP 0512718 B1, US 5349743 A; publ. 02.01.1996.
15. Dale F. Regelman, Waseem A. Roshen, David E. Turcotte. Integrated power capacitor and inductors/transformers utilizing insulated amorphous metal ribbon. Patent US 4922156 A, DE 68908234 D1, DE 68908234 T2, EP 0336771 A2, EP 0336771 A3, EP 0336771 B1; publ. 01.05.1990.
16. Dale F. Regelman, Waseem A. Roshen, David E. Turcotte. Transformer/inductor with integrated capacitor using soft ferrites. Patent US 4837659 A, DE 68900037 D1, EP 0334520 A1, EP 0334520 B1; publ. 06.06.1989.
17. Дозоров С.А., Опре В.М. Электромагнитные процессы в трехфазных индуктивно-емкостных преобразователях // Силовая электроника. 2014. №46. С. 61-64.
18. Карла Х. Смит, Роберт М. VonHoene. Magnetic cores utilizing metallic glass ribbons and mica paper interlaminar in-

- sulation. Patent US 5091253 A, CA 2079324 A1, CA 2079324 C, DE 69100720 D1, DE 69100720 T2, EP 0528883 A1, EP 0528883 B1, WO1991018404 A1; publ. 25.02.1992.
19. Компьютерная модель системы заряда емкостного накопителя на основе индуктивно-емкостного преобразователя / С.Г. Конесев, Р.Т. Хазиева, Р.В. Кириллов, П.А. Хлюпин // Нефтегазовое дело. Электронный научный журнал. 2015. №4. С. 374-390. URL: http://ogbus.ru/issues/4_2015/ogbus_4_2015_p374-390_KonesevSG_ru.pdf (дата обращения: 09.09.2015).
 20. Месяц Г.А. Импульсная энергетика и электроника. М.: Наука, 2004. 704 с.
 21. Импульсный стабилизатор тока: пат. 2194352 РФ. Лачин В.И., Проус В.Р., Зиновьев Н.Д.
 22. Зарядное устройство: пат. 123266 РФ. Опре В.М., Кошелев П.А., Парамонов С.В., Дозоров С.А., Тимахович А.А.
 23. Burghartz J.N., Edelstein D.C., Jahnes C.V., Uzoh C.E. Integrated circuit spiral inductor. Patent US 6114937 A, US 5793272 A, US 5884990 A, US 6054329 A4; publ. 05.09.2000.
 24. Многофункциональный интегрированный электромагнитный компонент: пат. 2585248 РФ. Конесев С.Г.
 25. Устройство заряда емкостного накопителя: пат. 117748 РФ. Конесев С.Г., Хазиева Р.Т., Мухаметшин А.В., Кириллов Р.В., Садиков М.Р.
 26. Генератор импульсов напряжения: пат. 2477918 РФ. Конесев С.Г., Хазиева Р.Т., Кириллов Р.В., Мухаметшин А.В., Садиков М.Р.
 27. Конесев С.Г., Хазиева Р.Т., Конесев И.С., Нурлыгаянов А.Р. Индуктивно-емкостный преобразователь // Патент РФ на изобретение №2450413 от 10.05.2012. БИ №13, 2012.
 28. Конесев С.Г., Хазиева Р.Т., Кириллов Р.В. Анализ энергетических и частотных характеристик многофункциональных интегрированных электромагнитных компонентов // Энергетические и электротехнические системы: междунар. сб. науч. тр. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2014. С. 65-75.
 29. Конесев С.Г., Хазиева Р.Т. Оценка показателей надежности многофункциональных интегрированных электромагнитных компонентов // Современные проблемы науки и образования. Электронный научный журнал. 2015. №1. URL: <http://www.science-education.ru/121-18445> (дата обращения: 09.04.2015).
 30. 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.

Поступила в редакцию 20 июля 2016 г.

INFORMATION IN ENGLISH

STABILIZATION PROPERTIES OF INDUCTIVE-CAPACITIVE CONVERTERS WITH DIFFERENT CONNECTION METHODS OF HYBRID ELECTROMAGNETIC ELEMENTS

Sergey G. Konesev

Ph.D. (Engineering), Associate Professor, the Department of Electrical Engineering and Electrical Equipment of Enterprises, Ufa State Oil Technical University, Ufa, Russia. E-mail: KonesevSG@yandex.ru.

Regina T. Khazieva

Post-graduate student, the Department of Electrical Engineering and Electrical Equipment of Enterprises, Ufa State Oil Technical University, Ufa, Russia. E-mail: khazievert@mail.ru.

The authors proposed to supply the load with the help of inductive-capacitive converters (ICC) based on hybrid electromagnetic elements (EME), which are referred to as multifunctional integrated electromagnetic components (MIEC). The use of hybrid EME can reduce the weight and size, increase the efficiency and reliability of current stabilization systems (CSS). The goal of the article is to investigate the stabilization properties of the three schemes proposed by the authors of IEP, based on the two-section MIEC with the different methods of connection MIEC sections and connection of the power supply and the load. The authors carried out the research and analysis of the frequency response (FR), evaluated the gains of voltage and current, power factor stabilizing the ICC based on the two-section MIEC with the different methods of connection MIEC sections and connection of the power supply and the load. Scheme no.1 has a higher voltage gain as compared with the scheme no.2 ($k_{U1} = 20 > k_{U2} = 13.5$), it stabilizes the current of greater amplitude ($i_{L1} = 0.352 > i_{L2} = 0.235$), but in a narrow frequency range (from $0.98f_{res}$ to $1.02f_{res}$). Thus, circuit №1 has a wide frequency range as compared with the scheme №3 (from $0.985f_{res}$ to $1.003f_{res}$), but it stabilizes current of smaller amplitude ($i_{L1} = 0.352$) and has a smaller voltage gain ($k_{U1} = 20 < k_{U3} = 75$). Scheme no.2 has the best stabilizing properties among the two-section schemes of MIEC. Scheme no.2 provides stabilization of the load current over a wide frequency range (from $0.7f_{res}$ to $1.3f_{res}$). This scheme has high filtering properties and can be operated by a non-sinusoidal voltage source. Scheme no.3 provides stabilization of

greater amplitude of the load current ($i_{L3} = 1.23$). It has the highest voltage gain ($k_{U3} = 75$). The investigated ICC based on the two-section MIEC can be used as capacitive storage charge devices powered by the source voltage sine wave.

Keywords: Stability criteria, converters, current supply, mathematical model, current-voltage characteristics, multifunctional integrated electromagnetic component, inductive-capacitive converter, frequency response, current stabilization, current stability.

REFERENCES

1. Konesev S.G., Khazieva R.T. Inductive-capacitive transducers. Application in electrical engineering and a review of circuit solutions. *Resurso-energoberezhenie i ekologo-energeticheskaya bezopasnost' promyshlennykh gorodov: sb. tr. 3-y Vseros. nauch.-prakt. konf* [Resource-saving and environmental-energy security of industrial cities, the 3rd national conf.] MEI, Volga Publ., 2010, pp. 120–125. (In Russian)
2. Ilyinsky N.F. *Elektroprivod: energo- i resursoberazhenie* [Electric drive: energy and resource saving: a textbook for high schools.]. Moscow, Publishing House of the Academy, 2008. 124 p.
3. Tarasov V.T. *Odnofaznyi svarochnyi stabilizator toka* [Alternating welding current stabilizer], Patent RF, no. 2299794, 2007.
4. Saenko I.V., Opre V.M., Novik A.A., Koshelev P.A., Paramonov S.V., Dozorov S.A. *Induktivno-yomkostnyi*

- preobrazovatel* [Inductive-capacitive converter]. Patent RF, no. 77517, 2008.
5. Dozorov S.A., Koshelev P.A., Opre V.M., Paramonov S.V., Tereshchenko V.N. *Istochnik neizmennogo toka* [A constant current source]. Patent RF, no. 100687, 2010.
 6. Dozorov A.A., Dozorov S.A., Opre V.M., Somov A.I., Tereshchenko V.N. *Vysokovoltnyi istochnik neizmennogo toka* [High-voltage constant current]. Patent RF, no. 114567, 2012.
 7. O'Loughlin. M. An Interleaved PFC Preregulator for High-Power Converters. Topic 5: Texas Instrument Power Supply Design Seminar, 2007, pp. 5-1, 5-14.
 8. Kit Sum. K. Improved valley-fill passive power factor correction current shaper approaches IEC specification limits. PCIM Magazine, Feb. 1998.
 9. Chin, Shaoan A., John Tero, Milan M. Jovanovic, Raymond B. Ridley, Fred C. Lee. A New IC Controller for Resonant-Mode Power Supplies. IEEE Applied Power Electronics Conference Proceedings, Los Angeles, California, March 1990, pp. 459-466.
 10. Musavi F., Eberle W., Dunford W.G. A phase shifted semi-bridgeless boost power factor corrected converter for plug in hybrid electric vehicle battery chargers. Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), 2011. Twenty-Sixth Annual IEEE, March 2011, pp. 821-828.
 11. Morrow K., Karner D., Francfort J., Plug-in Hybrid Electric Vehicle Charging Infrastructure Review, U.S. Department of Energy - Vehicle Technologies Program, 2008.
 12. Kokes M. Serienschwingkreis-Brückenwechselrichter für Mittelfrequenz. Patent DE 19624117 A1; publ. 18.12.1997.
 13. John H. Alexander. Method of integrating electronic components into electronic circuit structures made using LTCC tape. Patent US 5661882 A; publ. 02.09.1997.
 14. Gideon S. Grader, David W. Johnson, Jr., Apurba Roy, John Thomson, Jr. Method of making a multilayer monolithic magnetic component. Patent US 5479695 A, CA 2067008 A1, CA 2067008 C, DE 69202097 D1, DE 69202097 T2, EP 0512718 A1, EP 0512718 B1, US 5349743 A; publ. 02.01.1996.
 15. Dale F. Regelman, Waseem A. Roshen, David E. Turcotte. Integrated power capacitor and inductors/transformers utilizing insulated amorphous metal ribbon. Patent US 4922156 A, DE 68908234 D1, DE 68908234 T2, EP 0336771 A2, EP 0336771 A3, EP 0336771 B1; publ. 01.05.1990.
 16. Dale F. Regelman, Waseem A. Roshen, David E. Turcotte. Transformer/inductor with integrated capacitor using soft ferrites. Patent US 4837659 A, DE 68900037 D1, EP 0334520 A1, EP 0334520 B1; publ. 06.06.1989.
 17. Dozorov S.A., Opre V.M. Electromagnetic processes in the three-phase inductive-capacitive converters. *Silovaya elektronika* [Power electronics], 2014, no. 46, pp. 61-64. (In Russian)
 18. Charles H. Smith, Robert M. VonHoene. Magnetic cores utilizing metallic glass ribbons and mica paper interlaminar insulation. Patent US 5091253 A, CA 2079324 A1, CA 2079324 C, DE 69100720 D1, DE 69100720 T2, EP 0528883 A1, EP 0528883 B1, WO1991018404 A1; publ. 25.02.1992.
 19. Konesev S.G., Khazieva R.T., Kirillov R.V., Khlupin P.A. Computer model of the capacitive storage charge system based on inductive-capacitive transducer. *Neftegazovoe delo. Elektronnyy nauchnyy zhurnal* [Oil and Gas Business: electronic scientific journal], 2015, no. 4, pp. 374-390. Available at: http://ogbus.ru/issues/4_2015/ogbus_4_2015_p374-390_KonesevSG_ru.pdf (Accessed 09.09.2015). (In Russian)
 20. Mesyats G.A. *Impulsnaya energetika i elektronika* [Pulsed power and electronics], Moscow, Science Publ., 2004. 704 p.
 21. Lachin V.I., Prous V.R., Zinoviyev N.D. *Impulsnyy stabilizator toka* [DC switching regulator]. Patent RF, no. 2194352, 2002.
 22. Opre V.M., Koshelev P.A., Paramonov S.V., Dozorov S.A., Timokhovitch A.A. *Zaryadnoe ustroystvo* [Charging device]. Patent RF, no. 123266, 2012.
 23. Burghartz J.N., Edelstein D.C., Jahnes C.V., Uzoh C.E. Integrated circuit spiral inductor. Patent US 6114937 A, US 5793272 A, US 5884990 A, US 6054329 A4; publ. 05.09.2000.
 24. Konesev S.G. *Mnogofunktsionalnyi integrirovannyi elektromagnitnyi component* [Multifunctional integrated electromagnetic component]. Patent RF, no. 2585248, 2016.
 25. Konesev S.G., Khazieva R.T., Kirillov R.V., Muhametshin A.V., Sadikov M.R. *Ustroystvo zaryada yomkostnogo nakopitelya* [Capacitive storage device charge]. Patent RF, no. 117748, 2012.
 26. Konesev S.G., Khazieva R.T., Kirillov R.V., Muhametshin A.V., Sadikov M.R. *Generator impulsov napryazheniya* [Voltage pulse generator]. Patent RF, no. 2477918, 2013.
 27. Konesev S.G., Khazieva R.T., Konesev I.S., Nurlygayanov A.R. *Induktivno-yomkostnyi preobrazovatel* [Inductive-capacitive converter]. Patent RF, no. 2450413, 2012.
 28. Konesev S.G., Kirillov R.V., Khazieva R.T. Analysis of energy and frequency characteristics of the multifunction integrated electromagnetic components. *Energeticheskie i elektrotekhnicheskie sistemy: mezhdunar. sb. nauch. tr.* [Energy and electrical systems: university collection of scientific articles], Magnitogorsk, 2014, pp. 65-75.
 29. Konesev S.G., Khazieva R.T. Evaluation of reliability indices multifunctional integrated electromagnetic components. *Sovremennyye problemy nauki i obrazovaniya. Elektronnyy nauchnyy zhurnal* [Modern problems of science and education: electronic scientific journal], 2015, no. 1. Available at: <http://science-education.ru/ru/article/view?id=18445>.
 30. Konesev S.G., Khazieva R.T., Kirillov R.V. Research of frequency responses of the two-section multifunctional integrated electromagnetic components. *Vestnik UGATU* [Vestnik of UGATU (scientific journal of Ufa State Aviation Technical University)], 2015, vol. 19, no. 4 (70), pp. 66-71.

Конесев С.Г., Хазиева Р.Т. Анализ стабилизационных свойств индуктивно-емкостных преобразователей при различных способах подключения гибридных электромагнитных элементов // Электротехнические системы и комплексы. 2017. №1(34). С. 49-55. doi: 10.18503/2311-8318-2017-1(34)-49-55

Konesev S.G., Khazieva R.T. Stabilization Properties of Inductive-Capacitive Converters with Different Connection Methods of Hybrid Electromagnetic Elements. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2017, no.1(34), pp. 49-55. (In Russian) doi: 10.18503/2311-8318-2017-1(34)-49-55