

## Математическое и физическое моделирование индуктивно-емкостных преобразователей

КОНЕСЕВ С.Г., ХАЗИЕВА Р.Т.

*Моделирование индуктивно-емкостных преобразователей (ИЕП) проводится на основе многофункционального интегрированного электромагнитного компонента (МИЭК), который представляет собой единый конструкторско-технологический компонент и выполняет функции параметрического стабилизатора тока, колебательного контура инвертора, звена повышенной частоты и усилителя напряжения одновременно. Преобразователи на основе МИЭК значительно отличаются улучшенными массогабаритными показателями от ИЕП, выполненных на дискретных электромагнитных элементах, собранных из отдельных конденсаторов и катушек индуктивностей. Применение МИЭК, работающего в резонансном режиме, в качестве параметрического стабилизатора тока является эффективным техническим решением, так как позволяет обеспечить стабилизацию тока нагрузки в широком диапазоне изменения сопротивления нагрузки и частоты коммутации полупроводниковых ключей инвертора, а также минимизировать потери при коммутации. Это обусловлено тем, что в резонансном режиме работы обеспечиваются максимальные значения коэффициента стабилизации тока нагрузки и коэффициента усиления по напряжению, а также «мягкая» коммутация полупроводниковых ключей при переходе тока «через нуль». В результате получены аналитические выражения для определения токов и напряжения ИЕП с помощью интегральных параметров МИЭК. Анализируются частотные характеристики ИЕП на основе МИЭК. Физический эксперимент подтверждает адекватность полученных зависимостей и выражений реальным параметрам ИЕП на основе МИЭК.*

*Ключевые слова:* стабилизация тока, индуктивно-емкостный преобразователь, гибридный электромагнитный элемент, многофункциональный интегрированный электромагнитный компонент, параметрический стабилизатор тока

Индуктивно-емкостные преобразователи (ИЕП) применяются в преобразовательной и импульсной технике, в системах стабилизации тока, заряда емкостных накопителей и аккумуляторных батарей, в системах электроснабжения, в электроприводе [1–3]. Уменьшить массу и габариты, повысить энергетическую эффективность и надежность систем стабилизации тока позволяют гибридные электромагнитные элементы (ЭМЭ). Применение индуктона, декона, окна, каткона, МИЭК в электротехнических системах и устройствах различного назначения известно из ряда публикаций [4–12].

**Многофункциональный интегрированный электромагнитный компонент** представляет собой проводящие обкладки, выполненные из фольги, свернутые в спираль и разделенные диэлектриком, при этом все секции имеют магнитную связь [13].

В статье рассматривается структура МИЭК, каждая обкладка которого имеет выводы в начале и в конце. Данная структура путем изменения способа подключения источника питания и нагрузки позволяет реализовать более тридцати комбинаций схемотехнических решений ИЕП [14, 15]. На рис. 1 условно показано изображение исследуемой двухсекционной структуры МИЭК с диагональным подключением источника питания и нагрузки и парал-

лельным соединением обкладок каждой секции между собой. Магнитопровод на рисунке не показан.

**Индуктивно-емкостные преобразователи на основе МИЭК** работают следующим образом. При подключении источника ЭДС к началу первой проводящей обкладки и к концу второй проводящей обкладки источник ЭДС преобразуется в источник тока за счет резонансного режима работы МИЭК, достигаемого при совпадении частоты собственных колебаний колебательного контура ИЕП с частотой коммутации полупроводниковых ключей инвертора. Нагрузка при этом включается «во вторую диагональ», т.е. подключается к началу второй проводящей обкладки и к концу первой проводящей обкладки.

Основное свойство ИЕП — стабилизация тока нагрузки при изменении значения сопротивления нагрузки [16]. Однако в реальном преобразователе ввиду конечной добротности его элементов с ростом нагрузки стабильность тока нагрузки снижается [17]. Связанное с этим изменение стабилизирующих свойств ИЕП можно охарактеризовать значением коэффициента стабилизации [18].

На резонансной частоте повышается напряжение и улучшаются стабилизационные свойства ИЕП.

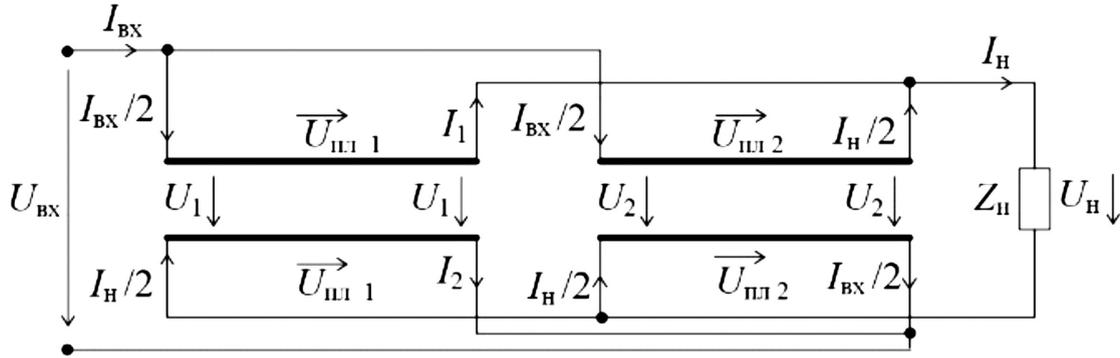


Рис. 1. Структура двухсекционного МИЭК с интегральными параметрами

Для улучшения стабилизационных свойств, энергетических параметров и массогабаритных показателей предлагается использование магнитной связи между проводящими обкладками МИЭК.

При разработке инженерных методик расчета и алгоритмов проектирования ИЕП требуется проверить необходимое условие работы схемы ИЕП в режиме короткого замыкания (уменьшение входного и передаточного сопротивлений с ростом частоты), а также оценивать значение коэффициента стабилизации и влияние на него изменения сопротивления нагрузки [19, 20]. Следовательно, актуальной задачей является исследование частотных характеристик МИЭК и оценка стабилизационных свойств ИЕП на их основе [21].

В статье решается задача построения и анализа характеристик двухсекционной структуры МИЭК выбранного схемотехнического исполнения, расчет коэффициента стабилизации по току ИЕП на базе МИЭК, экспериментальное подтверждение адекватности разработанных математических моделей.

Математическое моделирование гибридного электромагнитного элемента – каткона – описано в [22, 23]. Моделирование каткона с магнитопроводом осуществляется как моделирование нелинейного объекта с распределенными параметрами на основе метода гармонической линеаризации [23]. Авторами статьи [24] получены простые аналитические выражения интегральных параметров устройства.

**Математическое моделирование ИЕП на основе МИЭК** определяется цепью с распределенными параметрами. Упрощение расчетов при исследовании электрофизических процессов достигается путем представления ИЕП цепью интегральных параметров МИЭК, учитывающих магнитную и электрические связи между проводящими обкладками.

Электрическая цепь ИЕП является сосредоточенной (дискретной) индуктивностью и распределенной емкостью по всей длине  $l$ . При реальном распределении взаимных индуктивностей  $M_{12}$  и  $M_{21}$  в зависимости от координаты  $x$  совместное рассмотрение исходных уравнений затрудняет аналитическое решение. В связи с этим принимается допущение о том, что проводящие обкладки иден-

тичны друг другу, т.е.  $L_1(i_1) = L_2(i_2)$ ,  $R_1 = R_2 = R$ . Емкость между проводящими обкладками на единицу длины  $C_0$  намного больше значения межвитковой емкости.

С учётом идентичности параметров проводящих обкладок и равенства числа витков  $w_1 = w_2 = w$  принимаем коэффициенты связи между отдельными витками, равными единице (сильная магнитная связь) и не зависящими от координаты  $x$ . При сильной магнитной связи  $M_{12} = M_{21}$ , распределение токов  $i_1(x) = i_2(x)$  носит линейный характер.

На резонансной частоте наблюдается резонанс напряжений, при этом коэффициент усиления напряжения определяется значением добротности контура. При высокой добротности колебательного контура в режиме резонанса влияние активного сопротивления цепи на частоту  $f_{рез}$  минимально.

Разработана математическая модель ИЕП на основе МИЭК для определения диапазона изменения значений сопротивления нагрузки и частоты, при котором осуществляется стабилизация тока нагрузки с заданной точностью. Новизна разработанной математической модели заключается в использовании уточненной схемы замещения, учитывающей активное сопротивление обкладок МИЭК и магнитную связь обкладок и секций (рис. 2).

На рис. 2 представлена уточненная схема замещения двухсекционной структуры МИЭК.

Разработанная математическая модель зарегистрирована в качестве программы для ЭВМ, которая позволяет с допустимой точностью рассчитать энергетические и частотные характеристики базовых структур МИЭК.

Конструкционное исполнение секций МИЭК обеспечивает полную магнитную связь между обкладками каждой секции (на рис. 2  $M_{11} = M_{22}$ ) и учитывается с коэффициентом связи, равным единице:

$$k_{M1} = k_{M2} = 1.$$

Магнитная связь между обкладками разных секций определяется значениями взаимной индуктивности  $M_{12}$  и  $M_{21}$  (рис. 2) с коэффициентом связи,

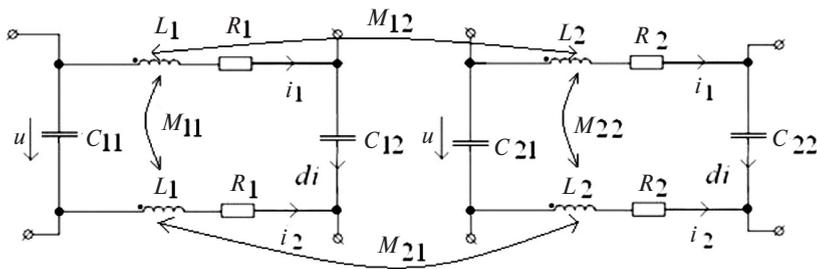


Рис. 2. Уточненная схема замещения МИЭК

который либо рассчитывается при проектировании, либо определяется экспериментальным путем.

Система уравнений, описывающая эту схему:

$$\underline{U}_{\text{ВХ}} = \underline{U}_{\text{ПЛ1}} + \underline{U}_2;$$

$$\underline{U}_1 = (\underline{I}_{\text{ВХ}} / 2 - \underline{I}_1) / (j\omega C_{11});$$

$$\underline{U}_2 = (\underline{I}_{\text{ВХ}} - \underline{I}_H) / (2j\omega C_{22});$$

$$\underline{U}_{\text{ПЛ1}} = (R_1 + j\omega(L_1 + M_{12}))(\underline{I}_{\text{ВХ}} + \underline{I}_H) / 2;$$

$$\underline{U}_{\text{ПЛ2}} = (R_2 + j\omega(L_2 + M_{21}))(\underline{I}_{\text{ВХ}} + \underline{I}_H) / 2;$$

$$\underline{U}_1 = \underline{U}_{\text{ПЛ1}} + \underline{U}_H;$$

$$\underline{I}_1 = \underline{I}_H / 2;$$

$$\underline{I}_2 = \underline{I}_{\text{ВХ}} / 2;$$

$$\underline{I}_H = \omega C_{22} \underline{U}_{\text{ВХ}} / (2j);$$

$$\underline{I}_H = \underline{U}_{\text{ВХ}} / (2(R_1 + R_2) + j\omega(L_1 + L_2 + M_{12} + M_{21})).$$

Рассчитаны частотные характеристики двухсекционной структуры МИЭК и сделана экспериментальная оценка адекватности разработанной математической модели.

**Физическое моделирование МИЭК** нашло экспериментальное адекватное подтверждение. Модель соответствует схеме по патенту [25], соединение секций модели выполнено согласно рис. 3.

Каждая секция выполнена из медной фольги толщиной 20 мкм, шириной 50 мм, длиной 3 м, имеет 34 витка и располагается на магнитопроводе (рис. 4). Изоляция выполнена из полиимидной пленки толщиной 12 мкм, шириной 60 мм. Электрические параметры макетного образца МИЭК:

емкость  $C = 0,289$  мкФ, индуктивность обкладок  $L = 0,042$  мГн, активное сопротивление обкладок  $R = 60$  мОм.

Экспериментально получено значение коэффициента связи между обкладками разных секций МИЭК, равное 0,9, которое и использовалось в теоретических исследованиях.

Экспериментально определенная резонансная частота равна 40 кГц, ее расчетное значение 46 кГц.

По результатам расчета физической модели ИЕП на основе МИЭК с параметрами, приведенными выше, получены графики зависимостей, приведенные на рис. 5–9. Цифрой 1 на графиках обозначены данные, полученные по результатам расчетов с помощью математического моделирования, цифрой 2 — результаты экспериментов.

В режиме резонанса МИЭК достигается максимальный коэффициент усиления по напряжению ( $k_U = 9$ ). В диапазоне изменения частоты от  $-15$  до  $+30\%$  резонансной происходит уменьшение коэффициента усиления по напряжению, которое не превышает 50% (рис. 5).

В режиме резонанса МИЭК достигается коэффициент стабилизации тока нагрузки ( $\delta = 0,8$ ). В диапазоне изменения частоты от  $-28$  до  $+35\%$  резонансной происходит снижение коэффициента стабилизации тока, которое не превышает 15% (рис. 6).

Входное сопротивление — отношение напряжения на входе к входному току:  $Z_{\text{ВХ}} = U_{\text{ВХ}} / I_{\text{ВХ}}$ . Требуемое условие работы МИЭК в качестве ИЕП —

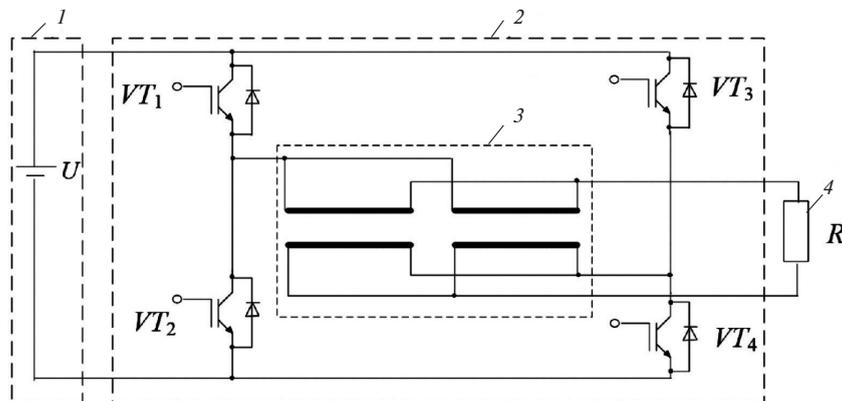
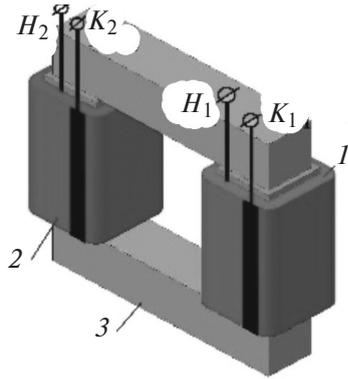
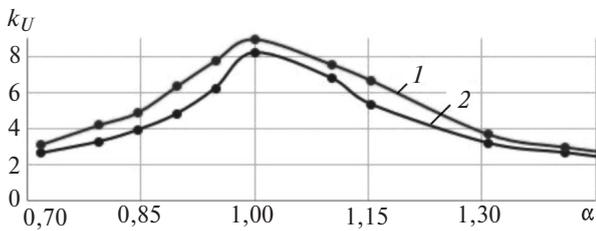


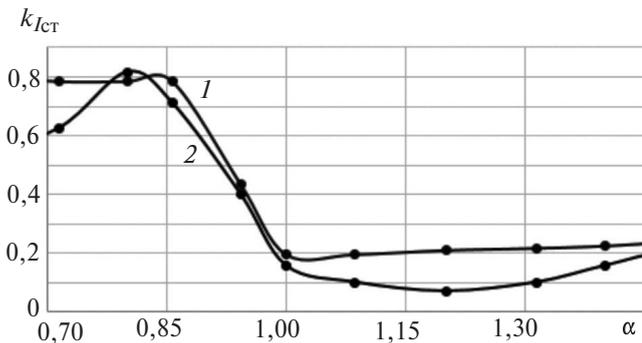
Рис. 3. Схема эксперимента с двухсекционным МИЭК: 1 — источник напряжения; 2 — мостовой инвертор; 3 — двухсекционный МИЭК; 4 — нагрузка



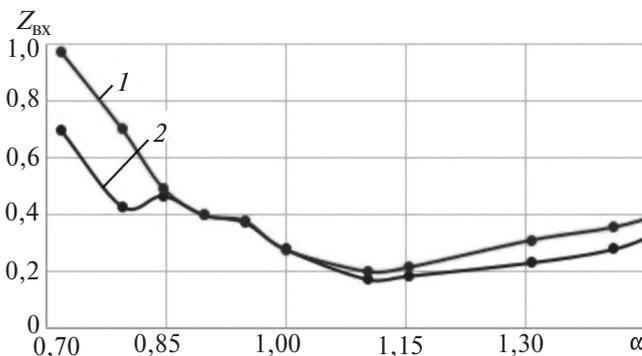
**Рис. 4.** Конструктивное исполнение двухсекционного МИЭК: 1 – первая секция; 2 – вторая секция; 3 – магнитопровод;  $H_1$ ,  $H_2$  и  $K_1$ ,  $K_2$  – начала и концы первой и второй проводящих обкладок



**Рис. 5.** Зависимость коэффициента усиления по напряжению от относительного значения частоты

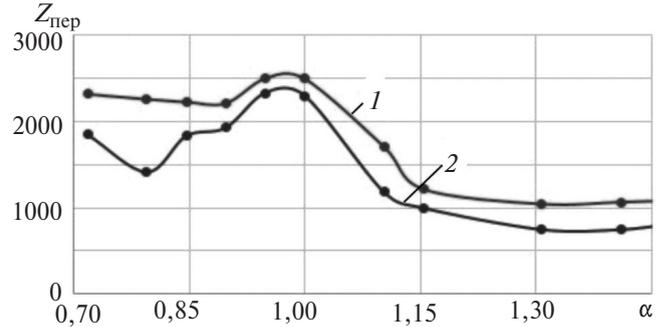


**Рис. 6.** Зависимость коэффициента стабилизации тока от относительного значения частоты

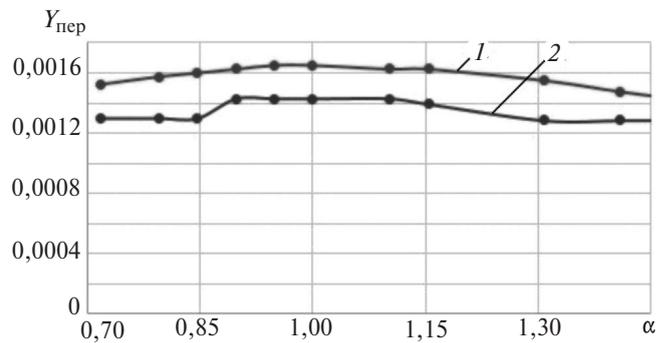


**Рис. 7.** Зависимость входного сопротивления ИЕП от относительного значения частоты

снижение входного сопротивления ИЕП на основе МИЭК с ростом частоты ( $1 \text{ Ом} > Z_{\text{вх}} > 0,2 \text{ Ом}$ ) — будет выполняться в диапазоне изменения частоты от  $-30$  до  $+15\%$  ее резонансного значения (рис. 7).



**Рис. 8.** Зависимость передаточного сопротивления ИЕП от относительного значения частоты



**Рис. 9.** Зависимость передаточной проводимости ИЕП от относительного значения частоты

Передаточное сопротивление — отношение напряжения на выходе к входному току:  $Z_{\text{п}} = U_{\text{н}} / I_{\text{вх}}$ . Требуемое условие работы МИЭК в качестве ИЕП — уменьшение передаточного сопротивления ИЕП на основе МИЭК с ростом частоты ( $2300 \text{ Ом} > Z_{\text{п}} > 750 \text{ Ом}$ ) — будет выполняться в диапазоне изменения частоты от  $-10$  до  $+40\%$  ее резонансного значения (рис. 8).

Передаточное сопротивление — отношение выходного тока  $I_{\text{н}}$  к входному напряжению  $U_{\text{вх}}$ :  $Y_{\text{п}} = I_{\text{н}} / U_{\text{вх}}$ . Требуемое условие работы МИЭК в качестве ИЕП — увеличение передаточной проводимости ИЕП на основе МИЭК с ростом частоты ( $0,0015 \text{ См} < Y_{\text{п}} < 0,0017 \text{ См}$ ) — будет выполняться в диапазоне изменения частоты от  $-30$  до  $+10\%$  ее резонансного значения (рис. 9).

Физическое моделирование МИЭК показано в [14, 15, 21]. Физический эксперимент подтверждает адекватность математической модели МИЭК с интегральными параметрами.

По результатам теоретических и экспериментальных исследований частотных характеристик двухсекционного МИЭК, работающего в качестве ИЕП, сделана оценка параметров, характеризующих ИЕП как стабилизатора тока.

**Выводы.** 1. В режиме резонанса МИЭК достигается максимальный коэффициент усиления по напряжению и стабилизируется ток нагрузки максимальной амплитуды.

2. Требуемая частотная зависимость входного и передаточного сопротивлений ИЕП обеспечивается

в диапазоне изменения частоты от  $-30\%$  до  $+15\%$  и от  $-10\%$  до  $+40\%$  ее резонансных значений соответственно;

3. Экспериментально подтверждена адекватность разработанных моделей. Массив данных, полученных экспериментальным путем, был обработан методами математической статистики: определены среднеквадратичные значения, которые не превышают  $7\%$ , и среднеквадратичные отклонения, которые не превышают  $\pm 2,5\%$ .

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Милях А.Н., Волков И.В.** Системы неизменного тока на основе индуктивно-емкостных преобразователей. — Киев: Наукова Думка, 1974, 216 с.
2. **Chin Shaoan A., John Tero, Milan M. Jovanovic, Raymond B. Ridley, and 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.
3. **Yuan Y.S., Chen M. and Qian Z.M.** A Parallel Front-End LCL Resonant Push-Pull Converter with a Coupled Inductor for Automotive Applications, in Proceedings of IEEE APEC, Palm Springs, USA, 2010, pp. 1460–1463.
4. **Волков И.В., Закревский С.И., Пшеничный В.В.** Гибридный элемент электрической цепи – индуктор и его использование в качестве преобразователя источника напряжения в источник тока. — Тезисы докладов Всесоюз. науч.-техн. конф. «Проблемы преобразовательной техники». Киев, 1983.
5. **Кашин Ю.А., Сибгатуллин Р.С., Тухватуллин Р.А., Хомяков И.М.** Деконные системы преобразования электромагнитной энергии. — Тезисы докладов Всесоюз. науч.-техн. конф. «Проблемы преобразовательной техники». Киев, 1983.
6. **Бердников С.В.** Узлы принудительной коммутации тиристоров с обмоткой-емкостью. — Тезисы докладов Всесоюз. науч.-техн. конф. «Проблемы преобразовательной техники». Киев, 1983.
7. **Бутырин П.А., Гусев Г.Г., Михеев Д.В., Сиренко В.В., Шакирзянов Ф.Н.** Разработка математической модели и анализ особенностей режимов индуктивно-емкостного преобразователя на основе каткона. — Вестник МЭИ, 2018, № 4, с. 81–88.
8. **Бутырин П.А., Гусев Г.Г., Кужман В.В.** Математическая модель фильтрокомпенсирующего устройства на основе катушки-конденсатора. — Изв. РАН. Энергетика, 2014, № 2, с. 130–135.
9. **Бутырин П.А., Гусев Г.Г., Михеев Д.В., Шакирзянов Ф.Н.** Алгоритм определения параметров каткона – элемента оптимизации режимов электрических сетей. — Изв. РАН. Энергетика, 2015, № 2, с. 69–75.
10. **Пат. РФ № 2585248.** Многофункциональный интегрированный электромагнитный компонент/С.Г. Конесев. — БИ, 2016, № 15.
11. **Кувалдин А.Б., Утегулов Б.Б., Захаров И.В., Ижикова А.Д.** Анализ потерь активной мощности в многослойном индукторе с самокомпенсацией реактивной мощности. — Электричество, 2005, № 2, с. 53–56.
12. **Пат. РФ № 1492453.** Спиральный генератор импульсов напряжения/В.И. Мельников, С.Г. Конесев, С.В. Осинцев, Р.А. Тухватуллин. — БИ, 1989, № 24.
13. **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.
14. **Konesev S.G., Khazieva R.T., Kirillov R.V., Konev A.A.** Research on stabilization properties of inductive-capacitive transducers based on hybrid electromagnetic elements. — Journal of Physics: Conf. Series, 2017, vol. 803. No. 1. Doi: 10.1088/1742-6596/803/1/012076.
15. **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. — X International IEEE Scientific and Technical Conference, 15–17 November 2016, Omsk, 2017, pp. 1–7. DOI: 10.1109/Dynamics.2016.7819030.
16. **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.
17. **Губаревич В.Н., Спиринов В.М., Кабан В.П., Матвеев В.Ю.** Регулирование выходного напряжения в инверторе в однофазной системе инвертор – индуктивно-емкостный преобразователь. — Сб. Института электродинамики НАН Украины. Киев, 2010, № 25, с. 114–118.
18. **Кабан В.П., Матвеев В.Ю., Губаревич В.Н., Спиринов В.М.** Расчет схем Г-образных индуктивно-емкостных преобразователей CL-вида с учетом характера нагрузки. — Сб. Института электродинамики НАН Украины, Киев, 2012, № 33 с. 83–87.
19. **Брылина О.Г., Гельман М.В.** Исследование двухзвенных преобразователей частоты. — Электротехнические системы и комплексы, 2013, № 21, с. 270–278.
20. **Храмшин Т.Р., Храмшин Р.Р., Корнилов Г.П., Крубинов Д.С.** Формирование фазных напряжений четырехуровневого высоковольтного преобразователя частоты. — Электротехнические системы и комплексы, 2011, № 1, с. 174–181.
21. **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. DOI: 10.18503/2311-8318-2017-1(34)-49-55.
22. **Бутырин П.А., Гусев Г.Г., Кужман В.В., Михеев Д.В., Шакирзянов Ф.Н.** Математическая модель фильтрокомпенсирующих устройств на основе гармонической линеаризации характеристики магнитопровода каткона. — Вестник Московского энергетического института, 2015, № 5, с. 79–84.
23. **Бутырин П.А., Гусев Г.Г., Михеев Д.В., Шакирзянов Ф.Н.** Идентификация математической модели фильтрокомпенсирующего устройства на основе каткона с учетом нелинейной характеристики магнитопровода. — Электричество, 2017, № 10, с. 55–60.
24. **Бутырин П.А., Гусев Г.Г., Кужман В.В., Михеев Д.В.** Математическое и физическое моделирование фильтрокомпенсирующего устройства на основе каткона. — Электричество, 2014, № 11, с. 58–62.
25. **Пат. РФ № 2632412.** Индуктивно-емкостный преобразователь/ С.Г. Конесев, Р.Т. Хазиева, Т.А. Бочкарева. — БИ, 2017, № 28.

[24.06.2019]

*Авторы: Конесев Сергей Геннадьевич – кандидат техн. наук, доцент Уфимского государственного нефтяного технического университета, диссертацию защитил в 1992 г.*

*Хазиева Регина Тагировна – кандидат техн. наук, старший преподаватель Уфимского государственного нефтяного технического университета, диссертацию защитила в 2019 г.*

# Mathematical and Physical Modeling of Combined Inductive-and-Capacitive Converters on the Basis of a Multifunctional Integrated Electromagnetic Component

**KONESEV Sergey G.** (*Ufa State Petroleum Technical University (USPTU), Ufa, Russia*) — Associate Professor, Cand. Sci. (Eng.)

**KHAZIYEVA Regina T.** (*USPTU, Ufa, Russia*) — Senior Lecturer, Cand. Sci. (Eng.)

*Combined inductive-and-capacitive converters (ICCs) are modeled on the basis of a multifunctional integrated electromagnetic component (MIEC), which is made as a single structural-and-process component that simultaneously performs the functions of a parametric current stabilizer, an inverter's oscillatory circuit, an elevated frequency section, and a voltage amplifier. MIEC-based converters differ significantly from the ICCs made using discrete electromagnetic components assembled from separate capacitors and inductance coils in having improved mass and overall dimensions. The use of an MIEC operating in a resonance mode as a parametric current stabilizer is an efficient technical solution owing to its ability to stabilize the load current in wide variation ranges of load resistance and switching frequency of inverter semiconductor switches; in addition, it allows the switching losses to be minimized. This is because during operation in a resonance mode, the maximal values of the load current stabilization and voltage amplification coefficients are achieved, and "soft" switching of semiconductor switches is ensured at the moment in which the current crosses zero. Analytical expressions for determining the ICC currents and voltage using the MIEC integral parameters are obtained. The frequency responses of the MIEC-based ICC are analyzed. The physical experiment confirms that the obtained dependences and expressions adequately reflect the real parameters of MIEC-based ICCs.*

*Key words:* current stabilization, combined inductive-and-capacitive converter, hybrid electromagnetic element, multifunctional integrated electromagnetic component, parametric current stabilizer

## REFERENCES

1. Milyakh A.N., Volkov I.V. *Sistemy ntizmennogo toka na osnove induktivno-emkostnykh preobrazovatelei* (Constant current systems on the basis of combined inductive-and-capacitive converters). Kiev, Naukova Dumka, 1974, 216 p.
2. Chin Shaoan A., John Tero, Milan M. Jovanovic, Raymond B. Ridley, and 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.
3. Yuan Y.S., Chen M. and Qian Z.M. A Parallel Front-End LCL Resonant Push-Pull Converter with a Coupled Inductor for Automotive Applications, in Proceedings of IEEE APEC, Palm Springs, USA, 2010, pp. 1460–1463.
4. Volkov I.V., Zakrevsky S.I., Pshenichnyi V.V. *Gibridnyi element elektricheskoi tsepi – indukcion i ego ispol'zovaniye v kachestve preobrazovatelya istochnika napryazheniya v istochnik toka* (Inducon: an electric circuit hybrid element and its application as a voltage source to current source converter), in Proceedings of the All-Russia Scientific-Technical Conference «Converter Engineering Problems». Kiev, 1983.
5. Kashin Yu.A., Sibagatullin R.S., Tukhvatullin R.A., Khomyakov I.M. *Dekonnnye sistemy preobrazovaniya elektromagnitnoi energii* (Decon-based electromagnetic energy conversion systems), in Proceedings of the All-Russia Scientific-Technical Conference «Converter Engineering Problems». Kiev, 1983.
6. Berdnikov S.V. *Uzly prinuditel'noi kommutatsii tiristorov s obmotkoi-emkost'yu* (Forced thyristor switching units with a winding-capacitor), in Proceedings of the All-Russia Scientific-Technical Conference «Converter Engineering Problems». Kiev, 1983.
7. Butyrin P.A., Gusev G.G., Mikheyev D.V., Sirenko V.V., Shakirzyanov F.N. *Vestnik MEI – in Russ. (Bulletin of National Research University «Moscow Power Engineering Institute»)*, 2018, No. 4, p. 81–88.
8. Butyrin P.A., Gusev G.G., Kuzhman V.V. *Izvestiya RAN. Energetika – in Russ. (News of Russian Academy of Sciences. Energetics)*, 2014, No. 2, p. 130–135.
9. Butyrin P.A., Gusev G.G., Mikheyev D.V., Shakirzyanov F.N. *Energetika – in Russ. (News of Russian Academy of Sciences. Energetics)*, 2015, No. 2, p. 69–75.
10. Pat. RF No. 2585248. *Mnogofunktsional'nyi integrirovannyi elektromagnitnyi komponent* (A multifunctional integrated electromagnetic component) / S.G. Konesev. Bulletin of inventions, 2016, No. 15.
11. Kuvaldin A.B., Utegulov B.B., Zakharov I.V., Izhikova A.D. *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 2005, No. 2, p. 53–56.
12. Pat. RF No. 1492453. *Spiral'nyi generator impul'sov napryazheniya* (A helical generator of voltage impulses)/V.I. Melnikov, S.G. Konesev, S.V. Osintsev, R.A. Tukhvatullin. Bulletin of inventions, 1989, No. 24.
13. Konesev S.G., Khaziyeva R.T., Kirillov R.V. *Vestnik UGATU – in Russ. (Bulletin of Ufa State Aviation Technical University)*, 2015, vol. 19, No. 4 (70), pp. 66–71.
14. Konesev S.G., Khaziyeva R.T., Kirillov R.V., Konev A.A. Research on stabilization properties of inductive-capacitive transducers based on hybrid electromagnetic elements. — Journal of

Physics: Conf. Series, 2017, vol. 803, No. 1. Doi: 10.1088/1742-6596/803/1/012076.

15. **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. — X International IEEE Scientific and Technical Conference, 15–17 November, 2016, Omsk, 2017, pp. 1–7. DOI: 10.1109/Dynamics.2016.7819030.

16. **Kaban V.P.** *Sb. Instituta elektrodinamiki NAN Ukrainy – in Ukraine (Proc. Institute Electrodynamics NAS of Ukraine)*, Kuev, 2012, No. 33, pp. 87–91.

17. **Gubarevich V.N., Spirin V.M., Kaban V.P., Matveyev V.Yu.** *Sb. Instituta elektrodinamiki NAN Ukrainy – in Ukraine (Proc. Institute of Electrodynamics NAS of Ukraine)*, Kuev, 2010, No. 25, pp. 114–118.

18. **Kaban V.P., Matveyev V.Yu., Gubarevich V.N., Spirin V.M.** *Sb. Instituta elektrodinamiki NAN Ukrainy – in Ukraine (Proc. Institute of Electrodynamics NAS of Ukraine)*. Kuev, 2012, No. 33, pp. 83–87.

19. **Brylina O.G., Gel'man M.V.** *Elektrotekhnicheskiye sistemy i komplekсы – in Russ. (Electrical Engineering systems and complexes)*, 2013, No. 21, pp. 270–278.

20. **Khramshin T.R., Khramshin R.R., Kornilov G.P., Krubtsov D.S.** *Elektrotekhnicheskiye sistemy i komplekсы – in Russ. (Electrical Engineering systems and complexes)*, 2011, No. 1, pp. 174–181.

21. **Konesev S.G., Khaziyeva R.T.** *Elektrotekhnicheskiye sistemy i komplekсы – in Russ. (Electrical Engineering systems and complexes)*. DOI: 10.18503/2311-8318-2017-1(34)-49-55.

22. **Butyrin P.A., Gusev G.G., Kuzhman V.V., Mikheyev D.V., Shakirzyanov F.N.** *Vestnik Moskovskogo energeticheskogo instituta – in Russ. (Bulletin of Moscow Power Engineering Institute)*, 2015, No. 5, pp. 79–84.

23. **Butyrin P.A., Gusev G.G., Mikheyev D.V., Shakirzyanov F.N.** *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 2017, No. 10, pp. 55–60.

24. **Butyrin P.A., Gusev G.G., Kuzhman V.V., Mikheyev D.V.** *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 2014, No. 11, p. 58–62.

25. **Pat. RF No. 2632412.** *Induktivno-emkostnyi preobrazovatel' (Inductive-capacitive converter)/S.G. Konesev, R.T. Khaziyeva, T.A. Bochkareva.* Bulletin of inventions, 2017, No. 28.

[24.06.2019]