

УДК 338.46:621.31

DOI: 10.24160/1993-6982-2018-4-81-88

Разработка математической модели и анализ особенностей режимов индуктивно-емкостного преобразователя на основе каткона

П.А. Бутырин, Г.Г. Гусев, Д.В. Михеев, В.В. Сиренко, Ф.Н. Шакирзянов

Рассмотрены вопросы разработки математической модели индуктивно-емкостного преобразователя (ИЕП) на основе нового элемента электрических цепей — катушки-конденсатора (каткона). Для построения математической модели ИЕП на основе теоремы об активном двухполоснике взята схема замещения устройства в виде нелинейной цепи с распределенными параметрами. Относительно выходных зажимов устройства получено выражение для нахождения напряжения холостого хода для первого граничного условия (выходные зажимы разомкнуты) и входного сопротивления для второго граничного условия (выходные зажимы замкнуты) с гиперболическими функциями. Для упрощения полученных выражений проведена оценка малости параметров. Установлена связь между напряжением холостого хода устройства, напряжением питания и добротностью колебательного контура. Показано, что ИЕП на основе каткона может применяться не только в качестве фильтрокомпенсирующего устройства, но и в качестве повышающего трансформатора. Получены выражения для нахождения входных сопротивлений ИЕП и резонансных частот для первого и второго граничных условий, продемонстрировано, что резонансные частоты для обоих граничных условий практически совпадают. Проведено сравнение расчетных и экспериментальных значений напряжения холостого хода, входных сопротивлений и резонансных частот, подтверждена адекватность предлагаемой математической модели. Даны эквивалентные параметры физической модели устройства и проанализирован принцип ее действия. Построены амплитудно-частотные и фазочастотные характеристики, зависимости тока и активной мощности нагрузки от резистивного сопротивления нагрузки физической модели ИЕП. Выполнено сравнение экспериментальных и аналитических характеристик и зависимостей, представлена оценка точности математической модели и подтверждена ее корректность. Продемонстрировано, что каткон может быть эффективно использован в токоограничивающих устройствах.

Ключевые слова: катушка-конденсатор, каткон, индуктивно-емкостной преобразователь, метод активного двухполосника, математическая модель.

Для цитирования: 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. DOI: 10.24160/1993-6982-2018-4-81-88.

The Mathematical Model of a Katkon-based Inductive-Capacitive Converter and Specific Features of Its Operation Modes

P.A. Butyrin, G.G. Gusev, D.V. Mikheev, V.V. Sirenko, F.N. Shakirzyanov

The article discusses matters concerned with developing the mathematical model of an inductive-capacitive converter (ICC) based on a coil-capacitor (katkon) — a new element of electrical circuits. The ICC mathematical model, which is based on the one-port active network (Thevenin's) theorem, is constructed proceeding from the device equivalent circuit in the form of a nonlinear circuit with distributed parameters. An expression involving hyperbolic functions is obtained for determining the no-load voltage for the first boundary condition (with the output terminals opened) and the input impedance for the second boundary condition (with the output terminals closed) with respect to the device output terminals. To simplify the obtained expressions, the smallness of the parameters is estimated. A correlation between the device open-circuit voltage, power supply voltage, and the oscillatory circuit quality factor is established. It is shown that a katkon-based ICC can be used not only as a harmonic filtering and reactive power compensation device, but also as a step-up transformer. Expressions for finding the ICC input impedances

and resonance frequencies for the first and second boundary conditions are obtained, and it is demonstrated that the resonance frequencies for both the boundary conditions almost coincide with each other.

The calculated and experimental values of the open-circuit voltage, input impedances, and resonance frequencies are compared, and the adequacy of the proposed mathematical model is confirmed. The device physical model's equivalent parameters are presented, and the model operation principle is analyzed. The amplitude-frequency and phase-frequency responses, and the load current and active power dependencies on the ICC physical model load resistance are constructed. The experimental and analytical characteristics and dependencies are compared; the mathematical model's accuracy is evaluated, and the correctness of the model is confirmed. It is demonstrated that a katkon can be effectively used in current-limiting devices.

Key words: coil-capacitor, katkon, inductive-capacitive converter, active one-port method, mathematical model.

For citation: Butyrin P.A., Gusev G.G., Mikheev D.V., Sirenko V.V., Shakirzyanov F.N. The Mathematical Model of a Katkon-based Inductive-Capacitive Converter and Specific Features of Its Operation Modes. MPEI Vestnik. 2018;4:81—88. (in Russian). DOI: 10.24160/1993-6982-2018-4-81-88.

Введение

Катушка-конденсатор (каткон) является пассивным элементом электрических цепей с большим потенциалом эффективного практического применения [1 — 8]. Использование электротехнических устройств (фильтрокомпенсирующих, электротермических, токоограничивающих приборов, резонаторов, магнитных диполей, трансформаторов) на базе катконов позволяет улучшить их массогабаритные показатели, уменьшить расход материалов и снизить стоимость при одновременном расширении функциональных возможностей. Данные эффекты достигаются за счет того, что каткон обладает одновременно двумя рабочими параметрами: емкостью и индуктивностью [1].

Поставлена задача разработки математической модели индуктивно-емкостного преобразователя (ИЕП) на базе каткона на основе использования метода активного двухполюсника [9]. Для оценки адекватности и точности предлагаемой модели полученные аналитические зависимости сравниваются с экспериментальными частотными характеристиками на основе исследования физической модели устройства.

Принцип построения и конструктивное исполнение физической модели каткона

Каткон является двухзаходной намоткой катушки в виде сложенных вместе изолированных друг от друга диэлектриком проводов, расположенных на магнитном сердечнике с немагнитными зазорами [6].

Математическая модель каткона, в соответствии с рис. 1, предполагает подключение источника напряжения $u_{\text{н}}$ к выводам Н1, К2 первого и второго проводов и определяется нелинейной цепью с распределенными параметрами, представляемой элементарными ячейками [1, 6]. При этом по первому и второму проводам протекают токи $i_1(x)$, $i_2(x)$, в сумме дающие входной ток $i_{\text{вх}}$. Зажимы К1, Н2 могут быть рассмотрены как выходные, между которыми на нагрузке с сопротивлением $Z_{\text{н}}$ возникает напряжение $u_{\text{н}}$. Схема замещения цепи элементарной ячейки (рис. 1) содержит на участке длиной dx в качестве первичных параметров следующие элементы [1, 6]:

- $L_{01} = L_{02} = L_0$ — индуктивность на единицу длины, Гн/м;
- R_0 — сопротивление, учитывающее потери в проводах и магнитопроводе, на единицу длины, Ом/м;

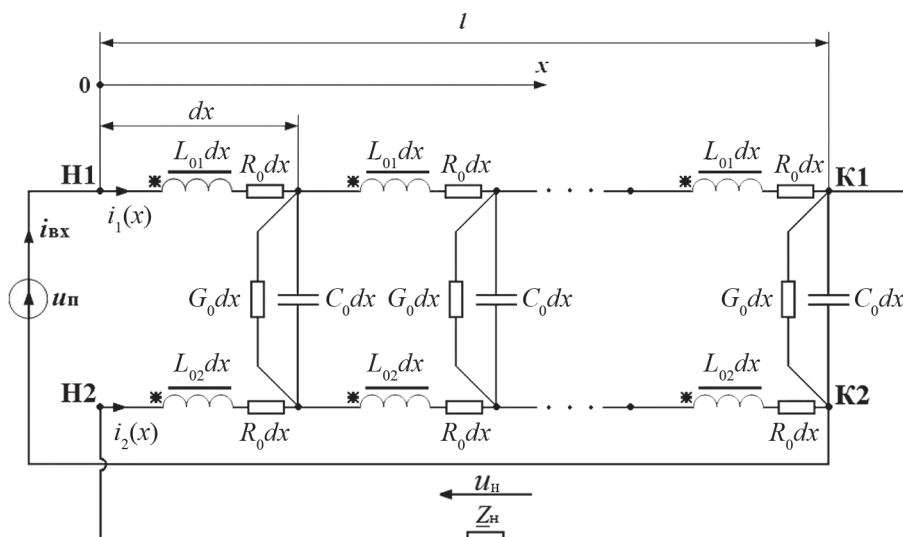


Рис. 1. Принцип построения математической модели каткона как цепи с распределенными параметрами [1, 6]

- C_0 — емкость между проводами на единицу длины, Ф/м;
- G_0 — проводимость на единицу длины, учитывающая потери в изоляции между проводами, См/м.

Коэффициенты связи между отдельными витками равны единице, что обусловлено сильной магнитной связью (рис. 1) [1, 6].

Каткон в общем случае может быть исследован в режимах холостого хода ($XХ$) ($Z_{\text{н}} = \infty$, зажимы Н2, К1 разомкнуты, возможно достижение режима резонанса напряжений), короткого замыкания (КЗ) ($Z_{\text{н}} = 0$, зажимы Н2, К1 замкнуты, возможно достижение режима резонанса токов) и произвольной нагрузки ($0 < Z_{\text{н}} < \infty$).

Описание и анализ электромагнитных процессов в катконе, результаты физического и математического моделирования, экспериментальных исследований, полученные эквивалентные схемы замещения приведены в [1, 6].

Схема исполнения исследуемой физической модели каткона, соответствующей [9], дана на рис. 2, а, фотография макета — на рис. 2, б. Физическая модель состоит из:

- двух секций в виде обмоток С1 и С2, каждая из которых имеет выводы Н1, К1, Н2, К2. Каждая из секций намотана двухзаходно алюминиевой фольгой толщиной 7 мкм, шириной 84 мм. Изоляция выполнена из двух листов полипропилена толщиной 10 мкм, шириной 95 мм.
- двух участков П-образного магнитопровода М1 и М2 (сечение $20 \times 20 \text{ мм}^2$) из аморфной стали марки 71 КНСР, разделенных двумя одинаковыми немагнитными зазорами НЗ длиной $(2 \times 2) = 4 \text{ мм}$.

Источник напряжения $u_{\text{н}}$ подключается к выводам Н1, К2 секций С1, С2, соединение секций выполнено согласно.

Параметры синтезированной относительно входного сопротивления эквивалентной схемы замещения каткона (рис. 3): $R_L = 2/3R_0l = 3,09 \text{ Ом}$; $L = L_0l = 0,0136 \text{ Гн}$; $C_{\text{пар}} = C_0l = 5,95 \cdot 10^{-6} \text{ Ф}$; $G_{\text{пар}} = G_0l = 107,2 \cdot 10^{-6} \text{ См}$; $C_{RL} = 0 \text{ Ф}$ [7]. Эквивалентная индуктивность L_0l каткона и магнитопровода учтена на схеме замещения (рис. 3) как нелинейный элемент. Значение L_0l определяется на основе метода гармонической линеаризации [6].

В соответствии с теоремой об активном двухполоснике (рис. 4) зависимость тока нагрузки в катконе $I_{\text{н}}(Z_{\text{н}})$ от сопротивления нагрузки $Z_{\text{н}}$ (между зажимами Н2 и К1) определяется по выражению:

$$I_{\text{н}}(Z_{\text{н}}) = \frac{U_{XX}}{Z_{\text{вхКЗ}} + Z_{\text{н}}} \quad (1)$$

Соответственно, для определения зависимости $I_{\text{н}}(Z_{\text{н}})$ предварительно следует найти выражения для напряжения холостого хода U_{XX} (зажимы Н2, К1 разомкнуты, $Z_{\text{н}} = \infty$) и входного сопротивления $Z_{\text{вхКЗ}}$ (зажимы Н2, К1 замкнуты, $Z_{\text{н}} = 0$) в аналитической форме (рис. 1).

Определение напряжения холостого хода U_{XX} индуктивно-емкостного преобразователя на основе каткона

Для получения выражения для напряжения XX U_{XX} можно воспользоваться выражениями распределения напряжений в первом и втором проводах цепи для установившегося режима при синусоидальном источнике питания $U_{\text{н}}$, которые в функциях ординаты x выглядят как [1]:

$$\begin{aligned} \underline{U}_1(x) = & -\frac{K_L}{2} \underline{I}_{\text{вх}}(x-l) + \\ & + \frac{\underline{I}_{\text{вх}}}{4} \frac{p[1 + \text{ch}pl - \text{ch}px - \text{ch}p(x-l)]}{(j\omega C_0 + G_0)\text{sh}pl}, \end{aligned} \quad (2)$$

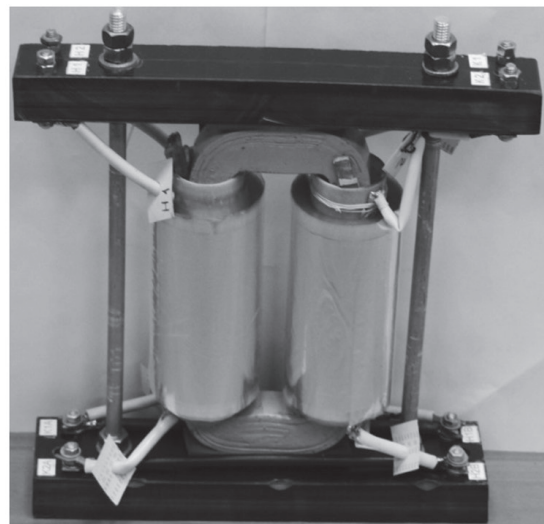
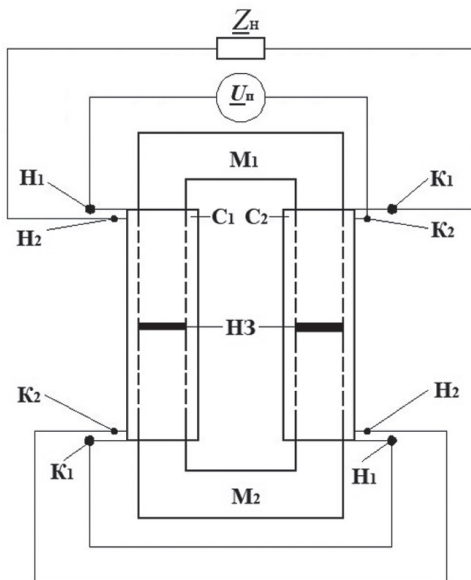


Рис. 2. Схема (а) и фотография (б) физической модели каткона [6, 10]

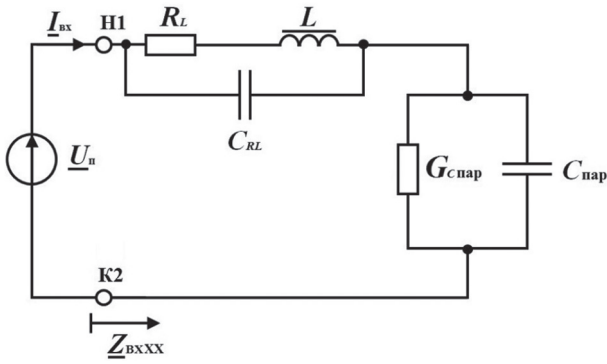


Рис. 3. Синтезированная по входному сопротивлению эквивалентная схема замещения каткона (при разомкнутых зажимах H2, K1)

$$\begin{aligned} \underline{U}_2(x) = & -\frac{K_L}{2} \underline{I}_{\text{вх}} (x-l) + \\ & + \frac{\underline{I}_{\text{вх}}}{4} \frac{p[1 + \text{ch}pl + \text{ch}px + \text{ch}p(x-l)]}{(j\omega C_0 + G_0) \text{sh}pl}, \end{aligned} \quad (3)$$

где $|p| = |[2R_0(j\omega C_0 + G_0)]^{0.5}l|$; $K_L = 2j\omega L_0 + R_0$ [1].

Выражение для напряжения XX $\underline{U}_{\text{XX}}$, определяемое разностью напряжений в начале первого и конце второго проводов $\underline{U}_{\text{XX}} = \underline{U}_1(0) - \underline{U}_2(l)$, после преобразований (2), (3) приобретает вид:

$$\begin{aligned} \underline{U}_{\text{XX}} = & \underline{U}_1(0) - \underline{U}_2(l) = \\ = & \left(\frac{K_L l}{2} \underline{I}_{\text{вх}} - \frac{\underline{I}_{\text{вх}}}{2} \frac{p[1 + \text{ch}pl]}{(j\omega C_0 + G_0) \text{sh}pl} \right) = \\ = & \underline{I}_{\text{вх}} \left(\frac{K_L l}{2} + \frac{1}{2} \frac{p[1 + \text{ch}pl]}{(j\omega C_0 + G_0) \text{sh}pl} - \frac{p[1 + \text{ch}pl]}{(j\omega C_0 + G_0) \text{sh}pl} \right). \end{aligned} \quad (4)$$

Выражение для входного сопротивления в режиме XX $\underline{Z}_{\text{вхXX}}$ как отношение напряжения питания \underline{U}_n и тока на входе цепи $\underline{I}_{\text{вх}}$ для режима XX получено в [1]:

$$\underline{Z}_{\text{вхXX}} = \frac{K_L l}{2} + \frac{1}{2} \frac{p[1 + \text{ch}pl]}{(j\omega C_0 + G_0) \text{sh}pl}. \quad (5)$$

С учетом (5) выражение (4) примет следующий вид:

$$\begin{aligned} \underline{U}_{\text{XX}} = & \underline{I}_{\text{вх}} \left(\underline{Z}_{\text{вхXX}} - \frac{p[1 + \text{ch}pl]}{(j\omega C_0 + G_0) \text{sh}pl} \right) = \\ = & \underline{U}_n - \frac{\underline{U}_n}{\underline{Z}_{\text{вхXX}}} \frac{p[1 + \text{ch}pl]}{(j\omega C_0 + G_0) \text{sh}pl}. \end{aligned} \quad (6)$$

Учитывая (5), напряжение XX $\underline{U}_{\text{XX}}$ окончательно можно представить выражением, определяемым только напряжением \underline{U}_n и параметрами элементов цепи с распределенными параметрами (рис. 1)

$$\begin{aligned} \underline{U}_{\text{XX}} = \\ = & \underline{U}_n \left(1 - \frac{2}{[K_L l(j\omega C_0 + G_0) / \text{cth}(pl/2)] + 1} \right). \end{aligned} \quad (7)$$

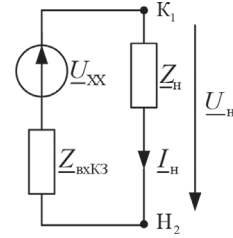


Рис. 4. Схема эквивалентного генератора для определения тока нагрузки в катконе (на участке цепи между зажимами K1, H2)

С целью упрощения (7) в предположении малости затухания ($|p| \sim 0$) при разложении гиперболического котангенса в ряд Маклорена ограничимся слагаемым первого порядка малости:

$$\frac{1 + \text{ch}pl}{\text{sh}pl} = \text{cth}\left(\frac{pl}{2}\right) \cong \frac{2}{pl} + \frac{pl}{6}, \quad (8)$$

тогда после преобразований с учетом $K_L = 2j\omega L_0 + R_0$, $|p| = |[2R_0(j\omega C_0 + G_0)]^{0.5}l|$ и принятого разложения в ряд Маклорена, (7) можно записать в виде:

$$\begin{aligned} \underline{U}_{\text{XX}} = \\ = & \underline{U}_n \left(1 - \frac{6 + R_0 G_0 l^2 + j\omega C_0 R_0 l^2}{[2R_0 G_0 l^2 + j\omega(2R_0 C_0 l^2 + 3L_0 G_0 l^2)]} \right). \end{aligned} \quad (9)$$

Рассматривая значения исходных параметров изготовленной физической модели ИЕП, выражение для напряжения XX $\underline{U}_{\text{XX}}$ будет иметь вид:

$$\underline{U}_{\text{XX}} = \underline{U}_n (1 + 2jQ), \quad (10)$$

где $Q = [(L_0/C_0)^{0.5}]/[2/3R_0l]$ — добротность колебательного контура, о. е.

Таким образом, напряжение XX $\underline{U}_{\text{XX}}$ при резонансе напряжений по модулю превышает напряжение \underline{U}_n практически в $2Q$ раз, а по фазе находится с ним в квадратуре. При анализе режима резонанса напряжений $f = f_{0\text{XX}}$ входное сопротивление $\underline{Z}_{\text{вхXX}}|_{f=f_{0\text{XX}}}$ и значение резонансной частоты $f_{0\text{XX}}$ определяются согласно [1]:

$$\begin{aligned} \underline{Z}_{\text{вхXX}}|_{f=f_{0\text{XX}}} = & \frac{2}{3} R_0 l + G_0 l \frac{L_0}{C_0}; \\ f_{0\text{XX}} = & \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{L_0 C_0 l^2} - \frac{G_0^2}{C_0^2}}. \end{aligned}$$

При достижении режима резонанса (опытное значение резонансной частоты — $f_{0\text{XX}} = 560$ Гц, расчетное — $560,1$ Гц) в физической модели (рис. 2, б) при $\underline{U}_n = 1$ В получены следующие расчетные и опытные данные: $\underline{U}_{\text{XXрaсч}} = 28,65$ В, $\underline{U}_{\text{XXопыт}} = 25,4$ В. Отличие расчетного и экспериментального значений напряжения XX обусловлено пренебрежением потоками рассеяния, что является предметом дальнейших исследований.

Выражение (7) считается «точным» для определения напряжения XX $\underline{U}_{\text{XX}}$, (9) — «приближенно развернутым», а (10) — «приближенно компактным».

Определение входного сопротивления $Z_{\text{вхКЗ}}$ индуктивно-емкостного преобразователя на основе каткона

Анализ режима КЗ в катконе (выводы Н2, К1 замкнуты, $Z_{\text{н}} = 0$) (рис. 2, а) позволяет найти выражение для определения входного сопротивления пассивного двухполюсника $Z_{\text{вхКЗ}}$ (рис. 4) в соответствии с [1]:

$$Z_{\text{вхКЗ}} = \frac{2K_L l p [1 + \text{ch}pl]}{K_L l (j\omega C_0 + G_0) \text{sh}pl + p(1 + \text{ch}pl)}. \quad (11)$$

Выполнив преобразования в (11), получим

$$Z_{\text{вхКЗ}} = \frac{2K_L l p \text{cth}(pl/2)}{K_L l (j\omega C_0 + G_0) \text{sh}pl + p \text{cth}(pl/2)}. \quad (12)$$

С учетом (8) после преобразования (12)

$$Z_{\text{вхКЗ}} = \frac{2K_L l (12 + p^2 l^2)}{6K_L l^2 (j\omega C_0 + G_0) + 12 + p^2 l^2}. \quad (13)$$

Исходя из того, что $K_L = 2j\omega L_0 + R_0$ выражение (13) можно представить в общем виде:

$$\begin{aligned} Z_{\text{вхКЗ}} &= \frac{D_1 + j\omega M_1}{D_2 + j\omega M_2} = \\ &= \frac{D_1 D_2 + \omega^2 M_1 M_2 + j\omega(M_1 D_2 - M_2 D_1)}{D_2^2 + \omega^2 M_2^2}, \end{aligned} \quad (14)$$

где

$$\begin{aligned} D_1 &= 6R_0 l + R_0^2 G_0 l^3 - 2\omega^2 L_0 C_0 R_0 l^3; \\ M_1 &= 12L_0 l + 2L_0 R_0 G_0 l^3; \\ D_2 &= 3 + 2R_0 G_0 l^2 - 3\omega^2 L_0 C_0 l^2; \\ M_2 &= 2R_0 C_0 l^2 + 3L_0 G_0 l^2. \end{aligned}$$

Резонансная частота $f_{\text{окЗ}}$ получена из условия $\text{Im}\{Z_{\text{вхКЗ}}\} = 0$. С учетом исключения тривиального решения $f_{\text{окЗ}} = 0$ из (14) очевидно, что $M_1 D_2 - M_2 D_1 = 0$. Подставив значения M_1, M_2, D_1, D_2 в данное условие, после преобразований и оценки малости отдельных слагаемых имеем:

$$f_{\text{окЗ}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{L_0 C_0 l^2 - \frac{L_0 C_0 R_0 G_0 l^4}{6}}}. \quad (15)$$

Второе слагаемое в (15), учитывающее потери в цепи, определяемые значениями R_0 и G_0 , приводит к некоторому увеличению резонансной частоты $f_{\text{окЗ}}$ при режиме КЗ в катконе, приведенных параметрах физической модели и $U_{\text{н}} = 1$ В, расчетное значение $f_{\text{окЗ}} = 560,1$ Гц.

Таким образом, с учетом малости G_0 и ввиду незначительности расхождения значений $f_{\text{окХ}}$ и $f_{\text{окЗ}}$, они могут быть приняты равными:

$$f_{\text{окХ}} \approx f_{\text{окЗ}} \approx f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{L_0 C_0 l^2}}.$$

Входное сопротивление $Z_{\text{вхКЗ}}|_{f=f_{\text{окЗ}}}$ на резонансной частоте $f_{\text{окЗ}}$ может быть найдено из условия $Z_{\text{вхКЗ}} = \text{Re}\{Z_{\text{вхКЗ}}\}$ из (14):

$$Z_{\text{вхКЗ}}|_{f=f_{\text{окЗ}}} = \frac{D_1 D_2 + \omega M_1 M_2}{D_2^2 + \omega^2 M_2^2}.$$

Подставив в данное выражение значения из (14), после преобразований и оценки малости каждого из слагаемых получим:

$$Z_{\text{вхКЗ}}|_{f=f_{\text{окЗ}}} = \frac{6L_0}{R_0 l C_0}.$$

При приведенных параметрах физической модели и $U_{\text{н}} = 1$ В расчетное значение $Z_{\text{вхКЗ}}|_{f=f_{\text{окЗ}}} = 2739$ Ом.

Определение зависимости тока в нагрузке от сопротивления нагрузки $I_{\text{н}}(Z_{\text{н}})$

Выражение для зависимости $I_{\text{н}}(Z_{\text{н}})$ в развернутой форме можно получить, подставив полученные выражения для $U_{\text{ХХ}}$ и $Z_{\text{вхКЗ}}$ в (1). Стабилизация тока при изменении сопротивления нагрузки $Z_{\text{н}}$ достигается, если на интервале изменения $Z_{\text{н}}$ выполняется условие $|Z_{\text{вхКЗ}}| \gg |Z_{\text{н}}|$.

При резистивной нагрузке $Z_{\text{н}} = R_{\text{н}}$ значение тока нагрузки $I_{\text{н}}$ на резонансной частоте $\text{Im}\{Z_{\text{вхКЗ}}\} = 0$ определяется выражением

$$I_{\text{н}}(R_{\text{н}}) = \frac{U_{\text{ХХ}}}{\text{Re}\{Z_{\text{вхКЗ}}\} + R_{\text{н}}}.$$

Экспериментальные исследования

Экспериментальные исследования проводились на физической модели (рис. 2, б). Выполнены опыты по определению:

- амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) физической модели ИЕП на основе каткона в режиме КЗ (зависимости входного сопротивления и проводимости при $Z_{\text{н}} = 0$ от частот $Z_{\text{вхКЗ}}(f)$ и $Y_{\text{вхКЗ}}(f)$ в соответствии с (14) (рис. 5));
 - АЧХ физической модели ИЕП на основе каткона в режиме ХХ (зависимости входного сопротивления и напряжения ХХ при $Z_{\text{н}} \rightarrow \infty$ от частот $Z_{\text{вхХХ}}(f)$ в соответствии с (5) с учетом (8) и $U_{\text{ХХ}}(f)$ в соответствии с (9) (рис. 6));
 - фазочастотных характеристик (ФЧХ) $\varphi(f)$ физической модели ИЕП на основе каткона при $Z_{\text{н}} = 0$ и $Z_{\text{н}} \rightarrow \infty$ (рис. 7);
 - зависимостей тока и активной мощности нагрузки от сопротивления резистивной нагрузки $I_{\text{н}}(R_{\text{н}})$ в соответствии с (1) и $P_{\text{н}}(R_{\text{н}}) = I_{\text{н}}^2 R_{\text{н}}$ при $f = 560$ Гц (рис. 8, 9).
- Стоит отметить, что при анализе зависимости $I_{\text{н}}(R_{\text{н}})$ и $P_{\text{н}}(R_{\text{н}})$ при $Z_{\text{вхКЗ}} = R_{\text{н}}$ наблюдается режим передачи

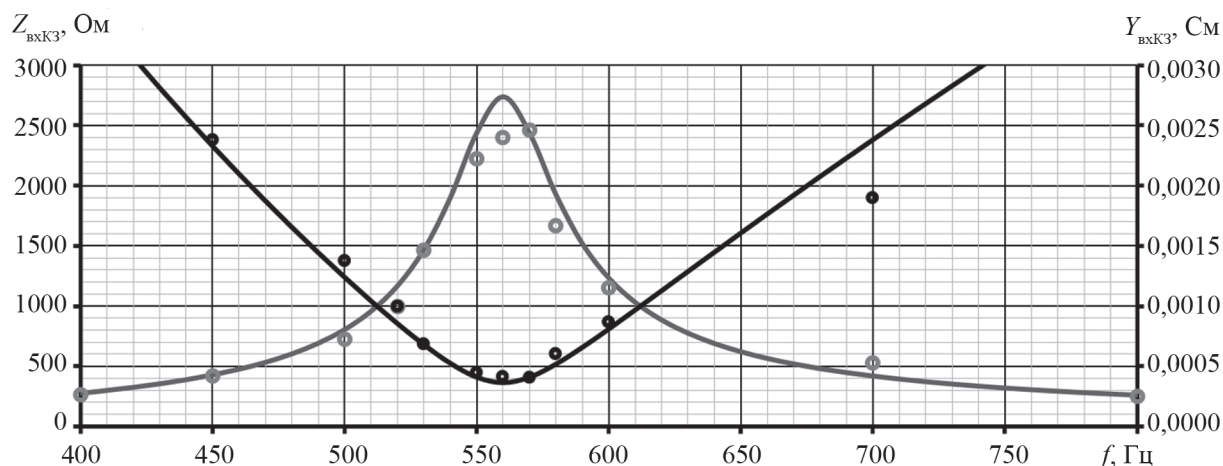


Рис. 5. Аналитические и экспериментальные АЧХ физической модели ИЕП на основе каткона в режиме КЗ:

—, ○ — аналитическая и экспериментальная зависимости входного сопротивления от частоты $Z_{\text{вхКЗ}}(f)$; —, ● — аналитическая и экспериментальная зависимости входной проводимости $Y_{\text{вхКЗ}}(f)$

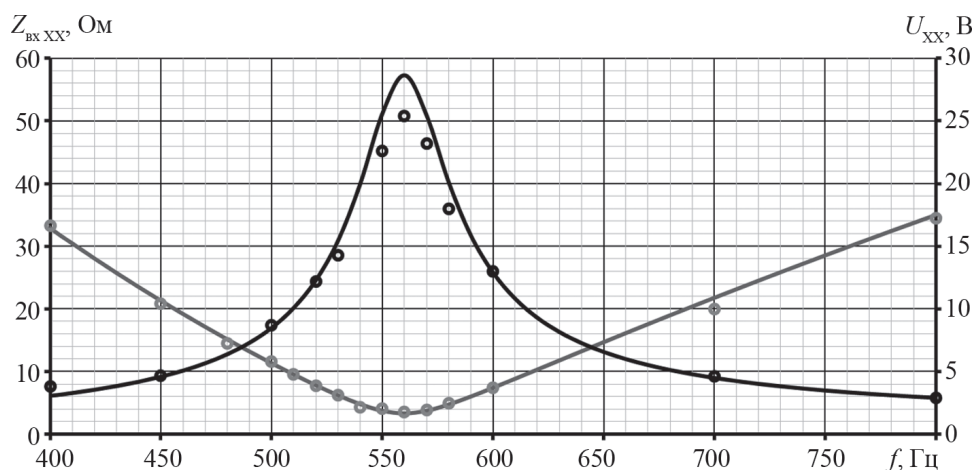


Рис. 6. Аналитические и экспериментальные АЧХ физической модели ИЕП на основе каткона в режиме XX:

—, ○ — аналитическая и экспериментальная зависимости входного сопротивления от частоты $Z_{\text{вхXX}}(f)$; —, ● — аналитическая и экспериментальная зависимости входной проводимости $Y_{\text{вхXX}}(f)$

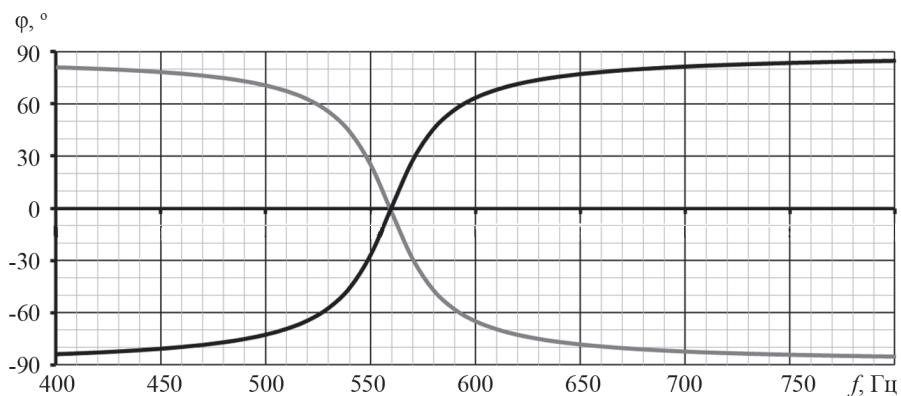
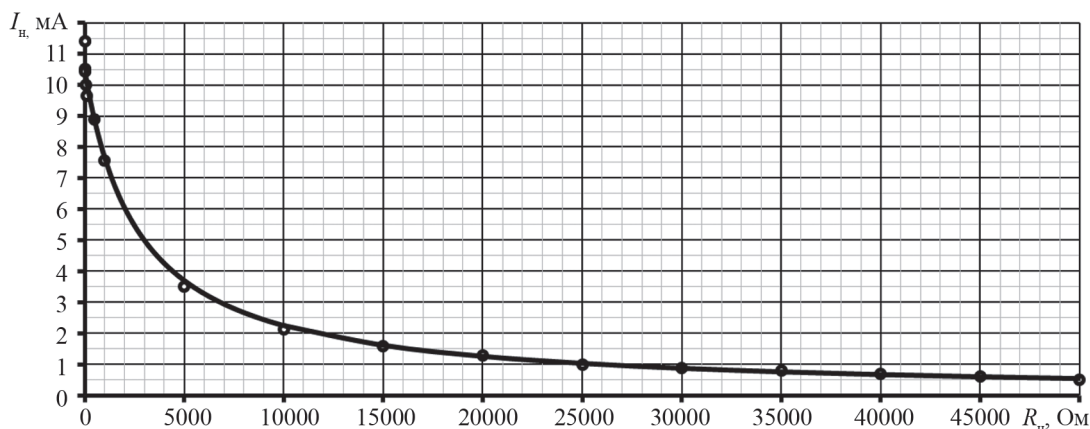
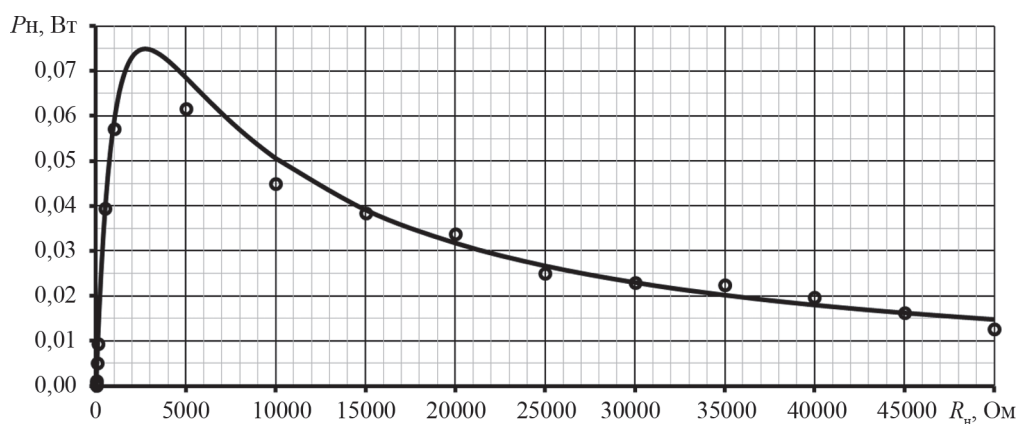


Рис. 7. Аналитическая ФЧХ $\varphi(f)$ физической модели ИЕП на основе каткона для режимов КЗ (—) и XX (—)

Рис. 8. Аналитический (—) и экспериментальный (●) графики зависимости тока от сопротивления нагрузки $I_n(R_n)$ Рис. 9. Аналитический (—) и экспериментальный (●) графики активной мощности нагрузки от сопротивления нагрузки $P_n(R_n)$

максимума активной мощности $P_n = P_{\max} = 74,914$ мВт, $I_n = I_{\max}/2 = 5,23$ мА.

Значения относительных погрешностей в диапазоне частот 400...800 Гц не превышают приемлемых значений, что свидетельствует о допустимых отклонениях аналитических значений от экспериментальных.

Заключение

Предложена математическая модель ИЕП на базе каткона на основе использования метода активного двухполюсника, применение которой упрощает процесс изучения возможных режимов устройства.

Аналитически установлена связь напряжения на выходе устройства с добротностью Q резонансного контура эквивалентной цепи относительно входа. Показано, что данное напряжение превышает напряжение питания в $\sim 2Q$ раз, т. е. $U_{\text{вых}} = 2QU_n$.

Адекватность математической модели ИЕП подтверждается совпадением проведенных расчетов и результатов экспериментальных исследований на физической модели устройства.

Исследование выполнено при поддержке РФФИ (научный проект № 17-08-00842 А).

Литература

1. Демирчян К.С., Гусев Г.Г. Синтез схем замещения катушки индуктивности с самокомпенсацией реактивной мощности // Известия АН СССР. Серия «Энергетика и транспорт». 1987. № 2. С. 3—10.
2. Волков И.В., Закревский С.И. Преобразователь с распределенными параметрами для стабилизации тока в переменной нагрузке // Электричество. 1984. № 10. С. 40—43.
3. Захаров И.В. Развитие теории, разработка методов и средств повышения эффективности индукторов с самокомпенсацией реактивной мощности: автореф. дисс. ... доктора техн. наук. Алматы, 2007.
4. Кувалдин А.Б., Андришин Н.Ф., Захаров И.В. Расчет электрических и энергетических параметров многослойного индуктора с самокомпенсацией реактивной мощности // Электричество. 1995. № 7. С. 47—53.
5. 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.
6. Бутырин П.А. и др. Математическая модель фильтрокомпенсирующих устройств на основе гармо-

нической линеаризации характеристики магнитопровода каткона // Вестник МЭИ. 2015. № 5. С. 79—84.

7. **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.

8. **Butyrin P.A., Gusev G.G., Mikheev D.V., Shakirzianov F.N.** Algorithm of Definition of Parameters of Katkon – Element of Optimization of Electrical Networks Modes // Thermal Eng. 2015. V. 62. No. 13. Pp. 946—949.

9. **Демирчян К.С., Нейман Л.Р., Коровкин Н.В., Чечурин В.Л.** Теоретические основы электротехники. СПб.: Питер, 2003. Т. 1.

10. **Пат. № 128033 РФ.** Фильтрокомпенсирующее устройство / П.А. Бутырин, Г.Г. Гусев, В.В. Кужман, О.В. Толчеев // Бюл. изобрет. 2013. № 13.

References

1. **Demirchyan K.S., Gusev G.G.** Sintez Skhem Zameshcheniya Katushki Induktivnosti s Samokompensatsiyey Reaktivnoy Moshchnosti. Izvestiya AN SSSR. Seriya «Energetika i Transport». 1987;2:3—10. (in Russian).

2. **Volkov I.V., Zakrevskiy S.I.** Preobrazovatel' s Raspredeleennymi Parametrami dlya Stabilizatsii Toka v Peremennoy Nagruzke. Elektrichestvo. 1984;10:40—43. (in Russian).

3. **Zaharov I.V.** Razvitie Teorii, Razrabotka Metodov i Sredstv Povysheniya Effektivnosti Induktorov s Samokompensatsiyey Reaktivnoy Moshchnosti: Avtoref. Diss. ... Doktora Tekhn. Nauk. Almaty, 2007. (in Russian).

4. **Kuvaldin A.B., Andryushin N.F., Zaharov I.V.** Raschet Elektricheskikh i Energeticheskikh Parametrov Mnogosloynogo Induktora s Samokompensatsiyey Reaktivnoy Moshchnosti. Elektrichestvo. 1995;7:47—53. (in Russian).

5. **Kuvaldin A.B., Utegulov B.B., Zaharov I.V., Izhikova A.D.** Analiz Poter' Aktivnoy Moshchnosti v Mnogosloynom Induktore s Samokompensatsiyey Reaktivnoy Moshchnosti. Elektrichestvo. 2005;2:53—56. (in Russian).

6. **Butyrin P.A. i dr.** Matematicheskaya Model' Fil'trokompensiruyushchih Ustroystv na Osnove Garmonicheskoy Linearizatsii Harakteristiki Magnitoprovoda Katkona. Vestnik MPEI. 2015;5:79—84. (in Russian).

7. **Butyrin P.A., Gusev G.G., Miheev D.V., Shakirzyanov F.N.** Identifikatsiya Matematicheskoy Modeli Fil'trokompensiruyushchego Ustroystva na Osnove Katkona s Uchetom Nelineynoy Harakteristiki Magnitoprovoda. Elektrichestvo. 2017;10:55—60. (in Russian).

8. **Butyrin P.A., Gusev G.G., Mikheev D.V., Shakirzianov F.N.** Algorithm of Definition of Parameters of

Katkon – Element of Optimization of Electrical Networks Modes. Thermal Eng. 2015;62;13:946—949.

9. **Demirchyan K.S., Neyman L.R., Korovkin N.V., Chechurin V.L.** Teoreticheskie Osnovy Elektrotekhnik. SPb.: Piter, 2003;1. (in Russian).

10. **Pat № 128033 RF.** Fil'trokompensiruyushchee Ustroystvo / P.A. Butyrin, G.G. Gusev, V.V. Kuzhman, O.V. Tolcheev. Byul. Izobret. 2013;13. (in Russian).

Сведения об авторах

Бутырин Павел Анфимович — доктор технических наук, чл.-корр. РАН, заведующий кафедрой теоретических основ электротехники НИУ «МЭИ», e-mail: ButyrinPA@mpei.ru

Гусев Геннадий Григорьевич — доктор технических наук, профессор кафедры теоретических основ электротехники НИУ «МЭИ», e-mail: gusev_g_g@bk.ru

Михеев Дмитрий Владимирович — кандидат экономических наук, аспирант кафедры теоретических основ электротехники, ассистент кафедры электроснабжения промышленных предприятий и электротехнологий НИУ «МЭИ», e-mail: MikheevDV@mpei.ru

Сиренко Василий Витальевич — аспирант, ассистент кафедры теоретических основ электротехники НИУ «МЭИ», e-mail: vsirenko71@gmail.com

Шакирзянов Феликс Нигматзянович — кандидат технических наук, профессор кафедры теоретических основ электротехники НИУ «МЭИ», e-mail: 3728049@mail.ru

Information about authors

Butyrin Pavel A. — Dr.Sci. (Techn.), Corresponding Member of RAS, Head of Theoretical Fundamentals of Electrical Engineering Dept., NRU MPEI, e-mail: ButyrinPA@mpei.ru

Gusev Gennadiy G. — Dr.Sci. (Techn.), Professor of Theoretical Fundamentals of Electrical Engineering Dept., NRU MPEI, e-mail: gusev_g_g@bk.ru

Mikheev Dmitriy V. — Ph.D. (Economics), Ph.D.-student of Theoretical Fundamentals of Electrical Engineering Dept., Assistant of Electric Supply of Industrial Enterprises and Electrotechnologies Dept., NRU MPEI, e-mail: MikheevDV@mpei.ru

Sirenko Vasily V. — Ph.D.-student, Assistant of Theoretical Fundamentals of Electrical Engineering Dept., NRU MPEI, e-mail: vsirenko71@gmail.com

Shakirzyanov Feliks N. — Ph.D. (Techn.), Professor of Theoretical Fundamentals of Electrical Engineering Dept., NRU MPEI, e-mail: 3728049@mail.ru

Статья поступила в редакцию 15.08.2017