

УДК 621.319.4+621.3.064

**БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩЕЕ УСТРОЙСТВО ОГРАНИЧЕНИЯ ТОКОВ
КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ НА ОСНОВЕ КАТУШКИ-КОНДЕНСАТОРА**© 2021 г. П. А. Бутырин¹, *, Г. Г. Гусев¹, Д. В. Михеев^{1, 2}, М. В. Карпунина^{1, 2},
А. А. Кваснюк¹, Ф. Н. Шакирзянов¹¹Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
“Национальный исследовательский университет “МЭИ”, Москва, Россия²Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
“Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана
(национальный исследовательский университет)”, Москва, Россия

*e-mail: ButyrinPA@mpei.ru

Поступила в редакцию 15.07.2021 г.

После доработки 02.08.2021 г.

Принята к публикации 06.08.2021 г.

В работе изложены результаты исследования переходных процессов при ограничении токов короткого замыкания устройством на основе каткона (катушки-конденсатора). Предлагаемое токоограничивающее устройство (ТОУ) имеет компактное конструктивное исполнение и улучшенные массогабаритные показатели в сравнении со стандартными резонансными ТОУ. Разработана математическая модель ТОУ на базе каткона для анализа переходных процессов, базирующаяся на применении синтезированной схемы замещения с эквивалентными сосредоточенными параметрами и понятий глобального и локального времени. Получено аналитическое решение для переходных напряжений и тока при скачкообразном изменении граничных условий на выходе ТОУ на основе каткона с учетом потерь в режиме резонанса при резистивной согласованной нагрузке. Выражения постоянных интегрирования в найденных решениях являются функциями моментов коммутаций и позволяют установить оптимальные моменты коммутации для достижения необходимого быстродействия устройства и снижения ударного значения тока. На основе аналитического решения анализируются колебательный и критический переходные процессы ограничения тока короткого замыкания. Из полученных результатов устанавливаются соблюдения законов коммутаций и проводится сравнение найденных значений со значениями, полученными при альтернативном построении решения. Представлены результаты экспериментального исследования переходных процессов в физической модели ТОУ на базе каткона. Корректность математической модели и достоверность полученных аналитических решений подтверждается совпадением теоретических расчетов и опытных данных.

Ключевые слова: катушка-конденсатор, каткон, переходные процессы, токи короткого замыкания, токоограничивающее устройство, быстродействие

DOI: 10.31857/S0002331021040051

ВВЕДЕНИЕ

Катушка-конденсатор (каткон) – это элемент электрической цепи, представляющий собой высокочастотный четырехполюсник со своеобразной зависимостью реактивного сопротивления от частоты – вплоть до его знакопеременности [1–5]. Конструктивно каткон выполняется в виде бифилярной катушки (рис. 1а), но со специфическим соединением двух из четырех выводов обмоток (рис. 1б) [5] (выводы H_1 и K_2 – входные, а

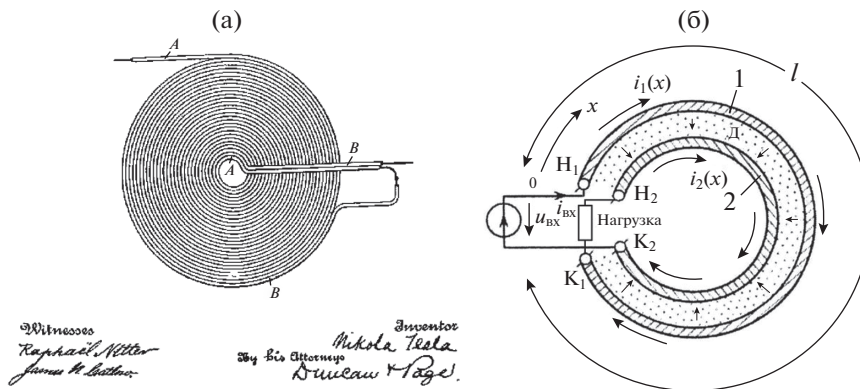


Рис. 1. Схематичное изображение бифилярной катушки и каткона. (а) Бифилярная катушка Н. Теслы [6]. (б) Общий принцип построения каткона [5].

K_1 и H_2 – выходные). Впервые бифилярную катушку в 1894 г. запатентовал Никола Тесла (патент № 512340 [6]). Он использовал подобные катушки для придания электрическим цепям большей емкости и снижения расходов на применение дорогостоящих конденсаторов.

Далее создавались иные конструкции данных элементов, которым давались новые названия: “индуктивно-емкостной гибрид” [7, 8], “индукон” [9], “декон” [10], “окон” [11], “спиральная полосковая линия” [12], “индуктор с самокомпенсацией реактивной мощности” [13], “многофункциональный интегрированный электромагнитный компонент” [14–18] и, непосредственно, “катушка-конденсатор (каткон)” [19].

Благодаря сочетанию индуктивно-емкостных свойств в едином техническом объекте сфера применения катконов достаточно широкая и разнообразная: электроиндукционные устройства с самокомпенсацией реактивной мощности [20], фильтры [21], фильтрокомпенсирующие устройства [22–25], индуктивно-емкостные преобразователи [4, 9, 10, 26, 27], электротехнологические установки [28, 29], токоограничивающие устройства [30, 31], магнитные диполи, трансформаторы и др.

Вопросы работы устройств на базе каткона в установившихся режимах достаточно хорошо изучены [32–36]. В целом неплохо проработаны и вопросы математического моделирования поведения каткона в переходных процессах [37–39]. Иное дело – возможность коррекции этих процессов за счет использования каткона. Здесь результаты скромнее [40]. Особенно актуальной эта проблема становится при применении каткона в качестве резонансного токоограничивающего устройства (ТОУ) [31], так как быстродействие является одним из важнейших требований, предъявляемых к ТОУ [41]. Ранее предложенное авторами в [30, 42] устройство ограничения токов короткого замыкания на базе каткона позволяет существенно снизить массогабаритные показатели стандартного резонансного ТОУ, но при этом не позволяет достичь желаемых результатов по критерию быстродействия.

В этой связи в настоящей работе ставятся следующие задачи:

- разработка функциональной схемы резонансного ТОУ на базе каткона, применение которой позволит снизить длительность протекания процесса ограничения тока короткого замыкания, т.е. улучшить показатели быстродействия ТОУ;
- разработка математической модели и формирование аналитического решения для расчета переходных процессов в электрических цепях с ТОУ на базе каткона, учитывающего моменты изменения граничных условий;
- экспериментальное исследование переходных процессов в физической модели резонансного ТОУ на базе каткона.

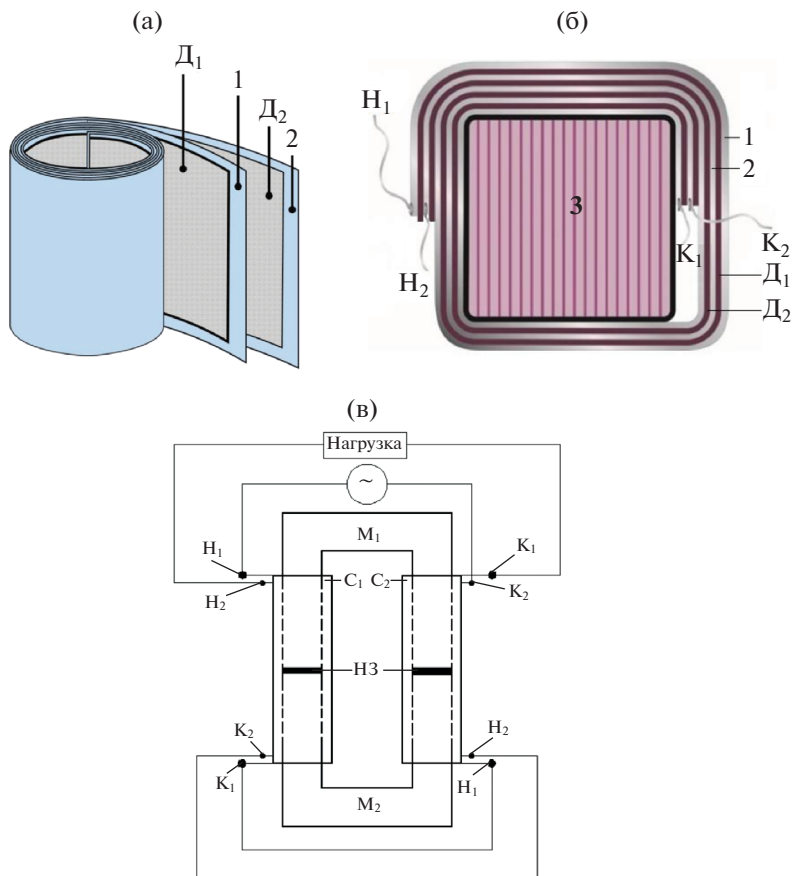


Рис. 2. Конструктивное исполнение токоограничивающего устройства на основе каткона: (а) Секция каткона, выполненная в виде спирально скрученных листов фольги 1 и 2, разделенных пленками диэлектрика D_1 и D_2 [42]; (б) Секция каткона, состоящая из проводников 1 и 2 с входными (H_1 , K_2) и выходными (K_1 , H_2) выводами, пленок диэлектрика D_1 и D_2 , помещенная на сердечник 3 (вид сверху в разрезе) [37, 42]; (в) Функциональная схема двухсекционного токоограничивающего устройства на основе каткона с магнитопроводом с немагнитными зазорами с подключенным источником (к входным выводам) и нагрузкой (к выходным выводам) [38, 41].

1. ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ СХЕМА ТОКООГРАНИЧИВАЮЩЕГО УСТРОЙСТВА НА ОСНОВЕ КАТКОНА

При разработке резонансных токоограничивающих устройств на базе каткона наиболее эффективной является конфигурация устройства, приведенная в [38]. В этом случае секции каткона выполняют из спирально скрученных проводников (листов фольги) 1 и 2, изолированных пленками диэлектрика D_1 и D_2 (рис. 2а), и располагают на магнитном сердечнике 3 (рис. 2б).

Для обеспечения надежности и устойчивости конструкции секции C_1 и C_2 , соединенные между собой последовательно согласно, располагают на двух П-образных участках магнитопровода M_1 и M_2 , отделенных друг от друга равными по длине немагнитными зазорами H_3 (рис. 2в). Источник питания подключается к входным выводам H_1

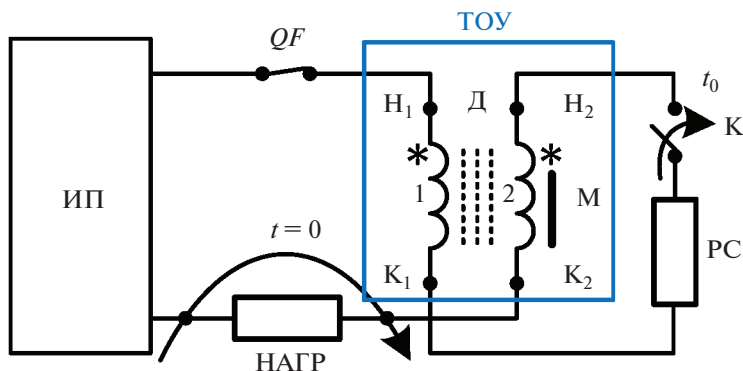


Рис. 3. Принципиально-условная схема соединения элементов устройства ограничения тока короткого замыкания на основе каткона с резистором согласования.

секции C_1 (проводник 1) и K_2 секции C_2 (проводник 2), а выходные выводы K_1 (проводник 1) и H_2 (проводник 2) могут быть разомкнуты, замкнуты или к ним может быть подключена нагрузка с произвольным сопротивлением [36]. Такое конструктивное исполнение ТОУ на базе каткона позволяет снижать нелинейность его характеристик, варьировать значение эквивалентной индуктивности и достигать необходимых резонансных частот [38].

II. ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ УСТРОЙСТВА ОГРАНИЧЕНИЯ ТОКОВ КРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ НА ОСНОВЕ КАТКОНА

На условно-принципиальной схеме, представленной на рис. 3, изображены источник питания ИП, выключатель QF , нагрузка НАГР и ТОУ на базе каткона с резистором согласования РС. ТОУ на основе каткона выполняется в соответствии со схемой, приведенной на рис. 2в, и содержит следующие элементы: магнитопровод М с немагнитными зазорами, проводники в виде листов фольги 1 и 2, пленки диэлектрика Д, изолирующие проводники 1 и 2 друг от друга. К входным выводам ТОУ H_1 и K_2 подключаются выключатель QF и нагрузка НАГР, обеспечивающие соединение входа устройства с источником питания ИП и образование соответствующего последовательного контура. К выходным выводам ТОУ K_1 и H_2 подключаются последовательно соединенные ключ К и резистор согласования РС.

На рисунке 4 приведена эквивалентная схема замещения ТОУ на базе каткона с резистором согласования, представляющая собой электрическую цепь с распределенными параметрами, содержащую совокупность элементарных ячеек на участке длиной dx . В каждой ячейке схемы первичные параметры R_0 (Ом/м) и G_0 (См/м) определяют соответственно потери в проводниках 1 и 2, магнитопроводе М и диэлектрике Д, первичные параметры C_0 (Ф/м) и L_0 (Гн/м) – значения емкости и индуктивности на единицу длины проводников l .

Граничные условия на выходе ТОУ определяются положением ключа К. При разомкнутом ключе К ($R_H \rightarrow \infty$), т.е. в режиме холостого хода, относительно входных выводов H_1 и K_2 устройство представляется синтезированной схемой замещения с эквивалентными сосредоточенными параметрами ($R_x = 2/3R_0l$; $C = C_0l$; $L = L_0l$; $G = G_0l$) [37]. В рассматриваемом режиме значение входного сопротивления ТОУ $Z_{вх}$ при резонансной частоте f_0 с учетом пренебрежения потерями в диэлектрике Д ($G_0l \approx 0$) может быть вычислено по выражению [5]:

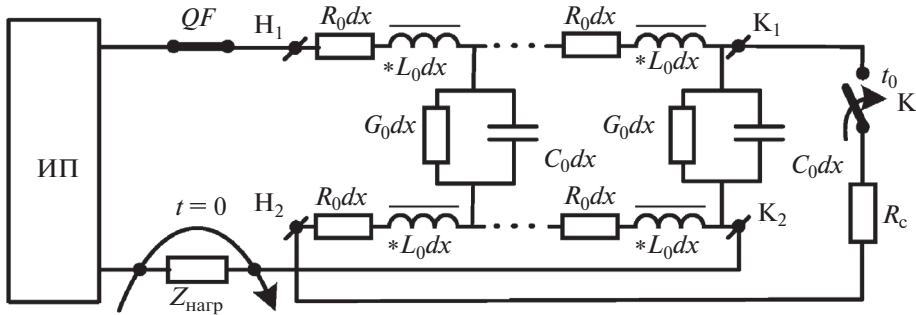


Рис. 4. Эквивалентная схема замещения устройства ограничения токов короткого замыкания на основе каткона с резистором согласования [41].

$$Z_{\text{вх}} \Big|_{f=f_0, R_n \rightarrow \infty} = \frac{2}{3} R_0 l + G_0 l \frac{L_0}{C_0} \approx R_x, \text{ Ом.} \quad (1)$$

Таким образом, значение эквивалентного резистивного сопротивления R_x определяется потерями в проводниках 1, 2 и в магнитопроводе М.

Из условия $\text{Im}\{Z_{\text{вх}}\} = 0$ определяется резонансная частота [5]:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{L_0 C_0 l^2} - \frac{G_0^2}{C_0^2}} \approx \frac{1}{2\pi \sqrt{L_0 C_0 l^2}}, \text{ Гц.} \quad (2)$$

При замыкании ключа К к выходным выводам ТООУ K_1 и H_2 подключается резистор согласования с чисто активным сопротивлением R_c , т.е. возникает режим безразличного резонанса [37]. Значение сопротивление резистора согласования R_c равно волновому сопротивлению ТООУ на базе каткона и определяется в соответствии с [37]:

$$R_c = 2 \sqrt{\frac{L_0}{C_0}}, \text{ Ом.} \quad (3)$$

В нормальном режиме в соответствии с приведенными схемами (рис. 3 и 4) выключатель QF замкнут, ключ К разомкнут, ТООУ настраивается в режим резонанса напряжений за счет выбора соответствующих значений эквивалентной емкости и индуктивности. Под действием источника питания ИП на резонансной частоте f_0 ток нагрузки проходит по замкнутому контуру, содержащему источник питания ИП, замкнутый выключатель QF , ТООУ в режиме холостого хода ($R_n \rightarrow \infty$) и нагрузку НАГР с сопротивлением $Z_{\text{нагр}}$. При этом входное сопротивление ТООУ относительно выводов H_1 и K_2 R_x по модулю много меньше сопротивления нагрузки $Z_{\text{нагр}}$: $R_x \ll Z_{\text{нагр}}$. Таким образом, потери в ТООУ, определяющиеся значением эквивалентного сопротивления R_x , минимальны, а напряжение между входными выводами H_1 и K_2 устройства существенно меньше напряжения источника питания ИП.

При возникновении короткого замыкания ($Z_{\text{нагр}} = 0$) в момент $t = 0$ в соответствии с приведенными схемами (рис. 3 и 4) напряжение источника питания ИП приложено ко входу ТООУ. Ток короткого замыкания циркулирует через замкнутый контур, содержащий источник питания ИП, замкнутый выключатель QF и ТООУ в режиме холостого хода ($R_n \rightarrow \infty$). С целью ограничения тока короткого замыкания в момент времени t_0 замыкается ключ К, обеспечивая подключение к выходным выводам ТООУ резистора согласования РС с сопротивлением R_c , что приводит к возникновению режима согласованной

нагрузки и безразличного резонанса. В этом случае входное сопротивление ТОО без учета потерь теоретически должно быть равно сопротивлению резистора согласования R_c [37]:

$$Z_{вх}|_{f=f_0, R_H=R_c} = \frac{1}{R_H \frac{C_0}{4L_0}} = \frac{4\rho^2}{R_H} = R_c, \text{ Ом.} \quad (4)$$

В реальности в режиме согласованной нагрузки входное сопротивление ТОО R по значению немного меньше, чем сопротивление R_c , что обусловлено потерями в магнитопроводе и в проводниках устройства [37].

Таким образом в результате изменения граничных условий на выходе каткона ток короткого замыкания в контуре ограничивается из-за резкого увеличения входного сопротивления ТОО со значения R_x до значения $R \approx R_c$. При этом в результате данной коммутации практически отсутствует переходной процесс в цепи [38, 39].

III. ПОСТРОЕНИЕ АНАЛИТИЧЕСКОГО РЕШЕНИЯ ДЛЯ НАХОЖДЕНИЯ ПЕРЕХОДНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ И ТОКА С ПОСТОЯННЫМИ ИНТЕГРИРОВАНИЯ, УЧИТЫВАЮЩИМИ МОМЕНТЫ ИЗМЕНЕНИЯ ГРАНИЧНЫХ УСЛОВИЙ

Для расчета переходного процесса в электрической цепи с ТОО на базе каткона используется эквивалентная схема с сосредоточенными параметрами (рис. 5а). Для построения решения введено понятие локального (t') и глобального времени (t) (рис. 5б). Под локальным временем понимается время после момента коммутации t_0 , тогда глобальное время выражается через время локальной системы $t = t' + t_0$.

Рассматривается режим работы электрической цепи рис. 5а при $t \geq t_0$. В установившемся режиме имеет место резонанс напряжений: $\omega L = 1/\omega C$.

Для определения в локальной системе независимых начальных условий (ННУ) предварительно приведем выражения для тока и напряжений на конденсаторе и индуктивной катушке в режиме до коммутации:

$$i(t) = I_{mX} \sin \omega t(t' + t_0) = \frac{U_m}{R_x} \sin \omega t(t' + t_0), \text{ А;}$$

$$u_C(t) = -U_{CmX} \cos \omega t(t' + t_0) = -\frac{I_{mX}}{\omega C} \cos \omega t(t' + t_0) = -\frac{U_m}{R_x \omega C} \cos \omega t(t' + t_0), \text{ В;}$$

$$u_L(t) = U_{LmX} \cos \omega t(t' + t_0) = I_{mX} \omega L \cos \omega t(t' + t_0) = \frac{U_m \omega L}{R_x} \cos \omega t(t' + t_0), \text{ В.}$$

Определим ННУ ($t' = 0$): $u_C(0) = -U_{CmX} \cos \omega t_0$; $i(0) = I_{mX} \sin \omega t_0$.

Составим характеристическое уравнение и определим его корни:

$$p^2 + \frac{R}{L} p + \frac{1}{LC} = 0; \quad p_{1,2} = -\frac{R}{2L} \pm \sqrt{\frac{R^2}{4L^2} - \frac{1}{LC}} = -\alpha \pm j\omega_{св},$$

где α (1/с) – коэффициент затухания, а $\omega_{св}$ (рад/с) – угловая частота собственных колебаний.

Так как сопротивление контура меньше критического ($R < R_c$), то корни характеристического уравнения – комплексно-сопряженные, а рассматриваемый переходный процесс имеет колебательный характер.

Решение для переходного напряжения на конденсаторе в общем виде находится в виде суммы установившейся ($u_{Cуст}$) и преходящей ($u_{Cпрех}$) составляющих:

$$u_C(t') = u_{Cуст} + u_{Cпрех} = -U_{Cуст} \cos \omega(t' + t_0) + Ae^{-\alpha t'} \sin(\omega_{св} t' + \varphi), \text{ В,} \quad (5)$$

где $U_{Cуст} = U_m/R\omega C$.

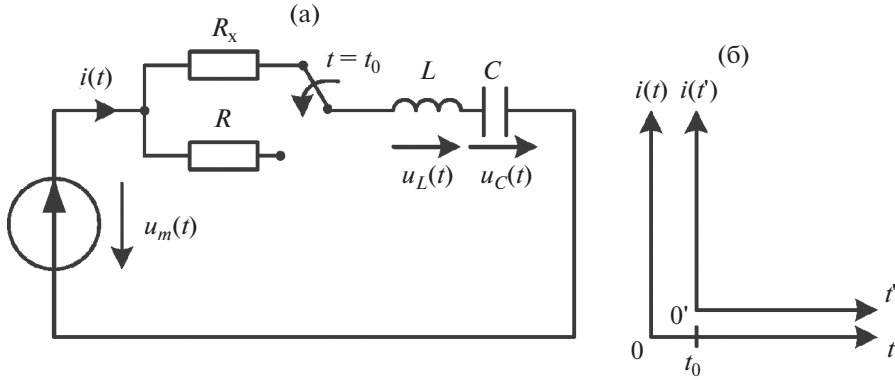


Рис. 5. Модель для анализа переходных процессов в цепи с ТОУ на базе каткона: (а) Эквивалентная расчетная схема замещения; (б) Системы глобального и локального времени.

Для определения постоянных A и φ учитываются найденные ранее ННУ. Дополнительное уравнение для производной:

$$\frac{du_C}{dt'} = \omega U_{C_{\text{муст}}} \sin \omega(t' + t_0) - \alpha A \sin(\omega_{\text{св}} t' + \varphi) e^{-\alpha t'} + A \omega_{\text{св}} \cos(\omega_{\text{св}} t' + \varphi) e^{-\alpha t'}, \text{ В/с.} \quad (6)$$

Значение напряжения на конденсаторе и производной в момент времени $t' = 0$:

$$u_C(0) = -U_{C_{\text{муст}}} \cos \omega t_0 + A \sin \varphi, \text{ В;} \quad (7)$$

$$\left. \frac{du_C}{dt'} \right|_{t'=0} = \omega U_{C_{\text{муст}}} \sin \omega t_0 - \alpha A \sin \varphi + A \omega_{\text{св}} \cos \varphi, \text{ В/с.} \quad (8)$$

Подставив в (7) и (8) ранее найденные ННУ, при этом учитывая, что $i(t') = C \frac{du_C}{dt'}$, получим:

$$-U_{C_{\text{мх}}} \cos \omega t_0 = -U_{C_{\text{муст}}} \cos \omega t_0 + A \sin \varphi, \text{ В;} \quad (9)$$

$$\frac{I_{\text{мх}} \sin \omega t_0}{C} = \omega U_{C_{\text{муст}}} \sin \omega t_0 - \alpha A \sin \varphi + A \omega_{\text{св}} \cos \varphi, \text{ В/с.} \quad (10)$$

Исходя из (9) и (10), запишем выражение для определения A и φ как функций от t_0 :

$$A(t_0) = \frac{(U_{C_{\text{муст}}} - U_{C_{\text{мх}}}) \cos \omega t_0}{\sin \varphi} = (U_{C_{\text{муст}}} - U_{C_{\text{мх}}}) \cos \omega t_0 \sqrt{1 + \left(\frac{\alpha}{\omega_{\text{св}}} - \frac{\omega}{\omega_{\text{св}}} \text{tg} \omega t_0 \right)^2}, \text{ В;} \quad (11)$$

$$\varphi(t_0) = \text{arccctg} \left(\frac{\alpha}{\omega_{\text{св}}} - \frac{\omega}{\omega_{\text{св}}} \text{tg} \omega t_0 \right), \text{ }^\circ. \quad (12)$$

Тогда можно записать выражение для тока:

$$i(t, t_0) = \frac{U_m}{R_x} \sin \omega t - A(t_0) C \sqrt{\alpha^2 + \omega_{\text{св}}^2} e^{-\alpha(t-t_0)} \sin [\omega_{\text{св}}(t - t_0) + \varphi(t_0) + \psi], \text{ А.} \quad (13)$$

где $\psi = \text{arctg}(-\omega_{\text{св}}/\alpha)$.

Выражение для напряжения на конденсаторе будет иметь следующий вид:

$$u_C(t, t_0) = -U_{C_{\text{муст}}} \cos \omega t + A(t_0) e^{-\alpha(t-t_0)} \sin [\omega_{\text{св}}(t - t_0) + \varphi(t_0)], \text{ В.} \quad (14)$$

Таким образом, получено аналитическое выражение для тока в цепи и напряжения на конденсаторе с постоянными $A(t_0)$, $\varphi(t_0)$ как функциями от момента коммутации t_0 (при $t \geq t_0$).

Далее представим результаты аналитического решения для переходного тока на входе ТОО на базе каткона и переходных напряжений на конденсаторе и индуктивной катушке, учитывающие протекание переходных процессов до и после замыкания ключа К.

Выражение для тока до коммутации (R_x - L - C -цепь):

$$i(t) = I_{mX} \sin \omega t - \left[\frac{\omega}{\omega_{CBX}} I_{mX} e^{\alpha_x t} \sin(\omega_{CBX} t) \right], \text{ А.} \quad (15)$$

Выражение для тока после коммутации (R - L - C -цепь):

$$i(t, t_0) = \frac{U_m}{R} \sin \omega t + D_1(t_0) e^{\alpha(t-t_0)} \sin[\omega_{CB}(t-t_0)] + D_2(t_0) e^{\alpha(t-t_0)} \cos[\omega_{CB}(t-t_0)], \text{ А,} \quad (16)$$

$$\text{где } D_1(t_0) = \frac{D(t_0)}{\omega_{CB} L} - \frac{I_{mX} \omega}{\omega_{CB}} \cos \omega t_0 - \frac{\alpha}{\omega_{CB}} D_2(t_0); D(t_0) = -U_C(t_0); D_2(t_0) = i(t_0) - \frac{U_m}{R} \sin \omega t_0.$$

Выражение для напряжения на конденсаторе до коммутации (R_x - L - C -цепь):

$$u_C(t) = -U_{C_{\text{мустх}}} \cos \omega t + A_3 e^{\alpha_x t} \sin(\omega_{CBX} t) + A_4 e^{\alpha_x t} \cos(\omega_{CBX} t), \text{ В,} \quad (17)$$

$$\text{где } A_3 = \left(\frac{\alpha_x}{\omega_{CBX}} \right) U_{C_{\text{мустх}}}; A_4 = U_{C_{\text{мустх}}}.$$

Выражение для напряжения на конденсаторе после коммутации (R - L - C -цепь):

$$u_C(t, t_0) = -U_{C_{\text{муст}}} \cos \omega t + A_1(t_0) e^{\alpha(t-t_0)} \sin(\omega_{CB}(t-t_0)) + A_2(t_0) e^{\alpha(t-t_0)} \cos(\omega_{CB}(t-t_0)), \text{ В,} \quad (18)$$

$$\text{где } A_1(t_0) = \frac{i(t_0)}{\omega_{CB} C} - \frac{\omega}{\omega_{CB}} U_{C_{\text{муст}}} \sin \omega t_0 - \frac{\alpha}{\omega_{CB}} [U_{C_{\text{муст}}} \cos \omega t_0 - u_C(t_0)];$$

$$A_2(t_0) = U_{C_{\text{муст}}} \cos \omega t_0 + u_C(t_0).$$

Выражения для напряжения на катушке до коммутации (R_x - L - C -цепь) и после коммутации (R - L - C -цепь) соответственно определяются с учетом найденных решений (15)–(18) для тока и напряжения на конденсаторе:

$$u_L(t) = U_m \sin \omega t - R_x i(t) - u_C(t) \text{ В;} \quad (19)$$

$$u_L(t, t_0) = U_m \sin \omega t - R i(t, t_0) - u_C(t, t_0), \text{ В.} \quad (20)$$

В соответствии с полученными аналитическими решениями (15)–(20) на рис. 6 представлены результаты построения кривых переходного тока $i(t)$, напряжения на конденсаторе $u_C(t)$ и напряжения на катушке $u_L(t)$ при подключении ТОО на базе каткона ($t = 0$ мс) к источнику напряжения $u_m(t) = 0.45 \sin 1570t$ В и последующем замыкании его выходных выводов через ключ К на резистор $R = 55.4$ Ом ($t_0 = 50$ мс) с целью ограничения тока в цепи.

Следует отметить, что в условиях реальной работы ТОО на базе каткона имеется возможным экспериментально наблюдать только входной ток ввиду того, что с конструктивной точки зрения каткон является единым техническим объектом, а конденсатор и катушка, изображенные на схеме рис. 5а, являются лишь эквивалентными элементами.

В рамках настоящей работы было также получено аналитическое решение для критического (предельно-апериодического) переходного процесса ($R = R_c$). При этом аналитическое решение, полученное для колебательного процесса [(5)–(20)], приводит к схожему результату для входного тока ТОО на базе каткона (рис. 7).

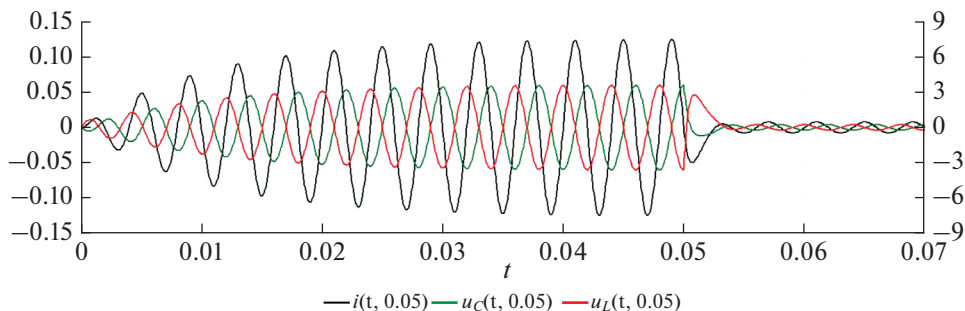


Рис. 6. Кривые переходного тока $i(t)$, напряжения на конденсаторе $u_C(t)$ и напряжения на катушке $u_L(t)$ при подключении ТОО на базе каткона к источнику напряжения $u_m(t)$ ($t = 0$ мс) и последующем замыкании выходных выводов через ключ К на резистор R ($t_0 = 50$ мс).

На основе анализа полученных аналитических решений отметим, что при ограничении тока короткого замыкания оптимальным по уровню тока, напряжений и длительности протекания переходных процессов является момент коммутации, при котором мгновенная мощность на входе каткона равна нулю. Таким образом, применение предлагаемой математической модели (рис. 5а) позволяет корректно анализировать переходные процессы на входе рассматриваемого ТОО при $R \approx R_c$, а также оптимизировать их протекание по критериям энергоэффективности и быстродействия за счет выбора момента коммутации.

IV. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ТОКОГРАНИЧИВАЮЩЕГО УСТРОЙСТВА НА БАЗЕ КАТКОНА

Для проведения экспериментального исследования используется лабораторный комплекс, содержащий:

- источник синусоидального напряжения ИСН (амплитудное значение – $U_m = 0.45$ В; частота – $f \approx 250$ Гц);
- физическую модель каткона (рис. 8) с эквивалентными сосредоточенными параметрами: $C = 22$ мкФ; $L = 18.4$ мГн; $R_x = 3.6$ Ом; $G = 0$ (рассчитаны на основе [43]);
- коммутационный ключ с управляемым моментом коммутации (КК);
- измерительный резистор ($R_{изм} \approx 1$ Ом);
- резистор согласования ($R \approx 55$ Ом);
- запоминающий цифровой осциллограф (ОСЦ).

Схема опыта представляет собой цепь, состоящую из последовательного соединения источника ИСН, измерительного резистора $R_{изм}$ и физической модели каткона, которая подключается в цепь за счет соединения входных выводов H_1 секции C_1 и K_2 секции C_2 (рис. 2в) с источником и измерительным резистором. Резистор согласования R подключается к выходным выводам H_2 секции C_1 и K_1 секции C_2 (рис. 2в) физической модели через коммутационный ключ КК. Запоминающий цифровой осциллограф ОСЦ подключается параллельно к источнику ИСН и измерительному резистору $R_{изм}$ и фиксирует кривые напряжений $u_m(t)$ и $u_{R_{изм}}(t)$ соответственно. Характер изменения переходного тока в исследуемой цепи оценивается в соответствии со следующим выражением: $i(t) = u_m(t)/R_{изм}$.

Первоначально цепь настраивается в режим резонанса и рассматривается установившийся режим работы ТОО при разомкнутых выходных выводах физической модели (непосредственно переходной процесс, возникающий при подключении каткона к

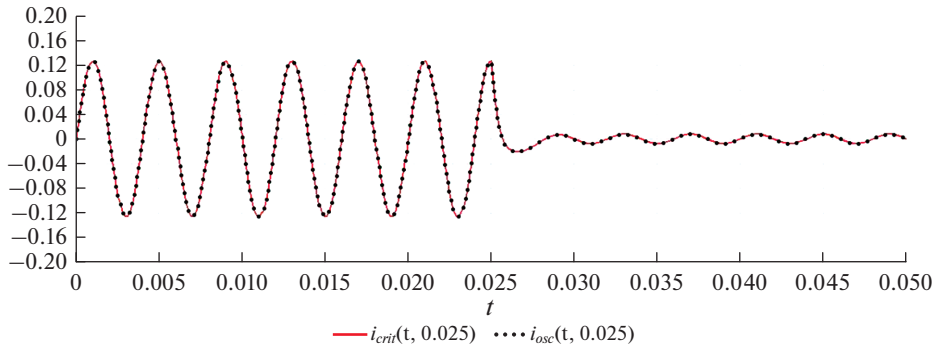


Рис. 7. Сравнение значений переходного тока в решениях для критического и колебательного переходных процессов при ненулевых начальных условиях: $i_{crit}(t, t_0)$ и $i_{osc}(t, t_0)$.



Рис. 8. Фотографии физических моделей каткона, используемых для проведения экспериментального исследования.

источнику, в опыте не рассматривается). Затем в момент времени t_0 для ограничения тока в рассматриваемой цепи осуществляется замыкание коммутационного ключа КК:

- в первом опыте выходные выводы модели замыкаются накоротко;
- во втором опыте к выходным выводам модели подключается резистор R .

Экспериментальные осциллограммы входного напряжения $u_m(t)$ и напряжения на измерительном резисторе $u_{Rизм}(t)$ для двух рассматриваемых опытов приведены на рис. 9 и рис. 10а. На рисунке 10б приведены теоретические кривые входного тока $i(t)$ для второго опыта, построенные на основе приведенных ранее аналитических выражений.

Полученные экспериментальные и теоретические зависимости (рис. 9–10) свидетельствуют о следующем:

- в обоих опытах (рис. 9 и рис. 10а) обеспечивается ограничение тока в цепи за счет изменения граничных условий в физической модели устройства, что свидетельствует о работоспособности обеих функциональных схем ТОО;
- подключение к выходным выводам ТОО резистора согласования (второй опыт) позволяет повысить быстродействие устройства при ограничении тока в цепи и снизить проявление инерционности переходного процесса в режиме резонанса (рис. 10а);

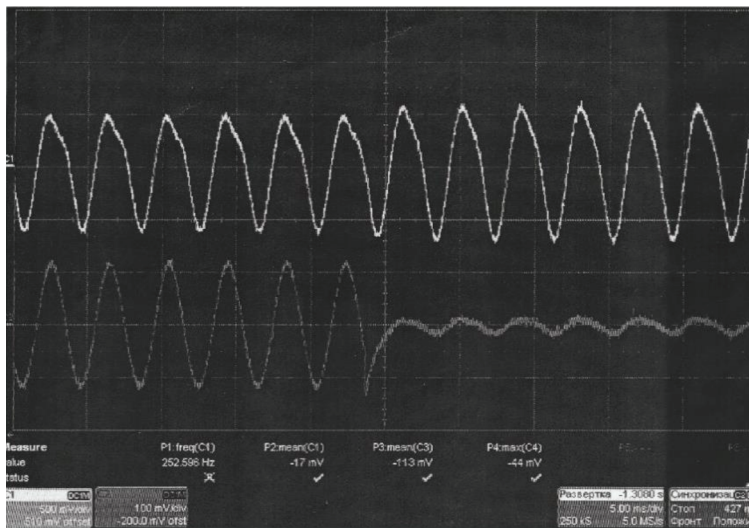
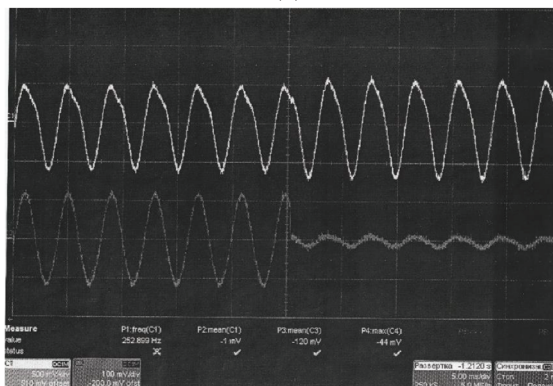


Рис. 9. Экспериментальные осциллограммы входного напряжения $u_m(t)$ (сверху) и входного тока $i(t)$ (снизу) при замыкании выходных выводов ТОО на базе каткона накоротко при ограничении тока в цепи.

(a)



(б)

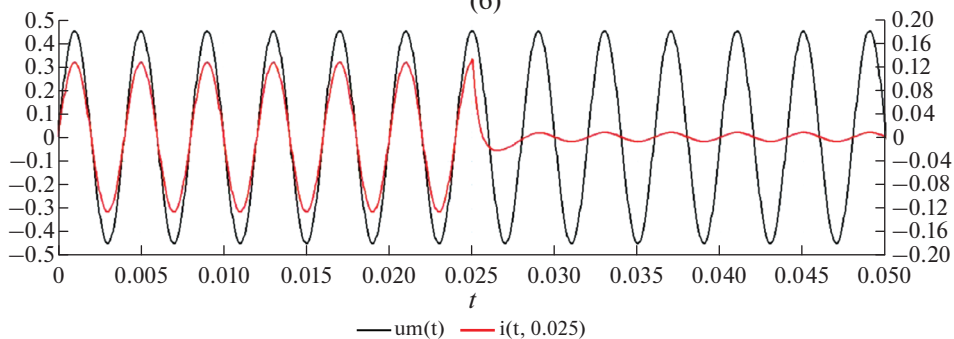


Рис. 10. Теоретические (а) и экспериментальные (б) кривые входного напряжения $u_m(t)$ и входного тока $i(t)$ при подключении резистора согласования к выходным выводам ТОО на базе каткона при ограничении тока в цепи.

• теоретическая кривая входного тока (рис. 10б) достаточно точно совпадает с экспериментальной кривой (рис. 10а), что свидетельствует о корректности полученного аналитического решения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Предложен новый принцип реализации устройства ограничения токов короткого замыкания на базе каткона. В сравнении с известными аналогами предлагаемое устройство имеет более простое схемотехническое решение и улучшенные массогабаритные показатели благодаря многофункциональному применению проводников и диэлектриков в едином техническом объекте. Использование в одном и том же устройстве режимов резонанса напряжений и режима согласования обеспечивает возможность компактного конструктивного исполнения токоограничивающего устройства.

2. Разработана математическая модель устройства ограничения токов короткого замыкания на основе каткона, базирующаяся на использовании расчетной синтезированной схемы замещения устройства с эквивалентными сосредоточенными параметрами и применении классического метода расчета переходных процессов. Отличительной особенностью модели является введение системы глобального и локального времени, а также возможность учета моментов изменения граничных условий в выражениях для постоянных интегрирования переходных напряжений и тока. Применение данной модели упрощает анализ переходных процессов в устройстве.

3. Получены аналитические решения для переходных напряжений и тока на интервалах короткого замыкания в цепи и режима ограничения тока короткого замыкания. Найденные в процессе решения постоянные интегрирования являются функциями моментов времени коммутаций как параметров, что упрощает исследование их влияния на переходный процесс. Определено условие для определения оптимального момента коммутации для ограничения тока короткого замыкания в цепи.

4. Результаты экспериментального исследования подтверждают работоспособность предлагаемой функциональной схемы ТОУ на базе каткона при ограничении токов короткого замыкания и корректность предложенной математической модели.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-08-00730 А.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Reeves R.* Choke-capacitor hybrid as a fluorescent-lamp ballast // Proceedings of the Institution of Electrical Engineers. 1975. V. 122. № 10. P. 1151–1152.
2. *Kemp R.J., Murgatroyd P.N., Walker N.J.* Self-resonance in foil inductors // Electronics Letters. 1975. V. 11. № 15. P. 337–338.
3. *Задедей Г.П.* Многофункциональные магнитные радиокомпоненты // М.: Советское радио, 1980. 136 с.
4. *Волков И.В., Закревский С.И.* Преобразователь с распределенными параметрами для стабилизации тока в переменной нагрузке // Электричество. 1984. № 10. С. 40–43.
5. *Демирчян К.С., Гусев Г.Г.* Синтез схем замещения катушки индуктивности с самокомпенсацией реактивной мощности // Известия АН СССР. Сер. Энергетика и транспорт. 1987. № 2. С. 3–10.
6. *Tesla N.* Coil for electro-magnets. US Patent № 512340, cl. H01F41/098. 1894.
7. *Reeves R.* Inductor-capacitor hybrid // Proceedings of the Institution of Electrical Engineers. 1975. V. 122. № 11. P. 1323–1326.
8. *Murgatroyd P.N., Walker N.J.* Lumped-circuit model for inductor-capacitor hybrid // Electron. Lett. 1976. V. 12. P. 2–3.
9. *Милях А.Н., Кубышин Б.Е., Волков И.В.* Индуктивно-емкостные преобразователи источников напряжения в источники тока // Киев: изд-во Наукова думка, 1964. 299 с.
10. *Кащин Ю.А., Сивагатуллин Р.С., Тухватуллин Р.А., Хомяков И.М.* Деконные системы преобразования электромагнитной энергии // Проблемы преобразовательной техники: тез. док. Всесоюз. науч.-техн. конф. Киев, 1983. 2 с.
11. А.с. № 345601 СССР, МПК H03K3/335. Генератор импульсов тока // Гейзер А.А., Чехлов В.Л., Чехлов Г.Л.; заявитель и патентообладатель НИИ ядерной физики, электроники и автома-

- тики при Томском политехническом институте им. С.М. Кирова. № 1488149/26-9; заявл. 27.10.1970; опубл. 14.07.1972. Бюл. № 22.
12. А.с. № 1492453 СССР, МПК H03K3/53. Спиральный генератор импульсов напряжения // Конесев С.Г., Мельников В.И., Осинцев С.В., Тухватуллин Р.А.; заявитель патентообладатель УАИ им. Серго Орджоникидзе. № 4261577; заявл. 15.06.1987; опубл. 07.07.1989. Бюл. № 25.
 13. *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.
 14. *Хазиева Р.Т.* Системы стабилизации тока на основе индуктивно-емкостных преобразователей: дисс. ... канд. техн. наук: 05.09.03. Уфа, 2018. 190 с.
 15. *Конесев С.Г.* Многофункциональные интегрированные элементы для управляемых систем питания устройств специального назначения: дисс. канд. техн. наук: 05.09.03. УАИ, 1992. 182 с.
 16. *Ehsani M., Stielau O.H., van Wyk J.D.* Integrated reactive components in power electronic circuits // *IEEE Trans. Power Electron.* 1993. V. 8. P. 208–215.
 17. *Zhao L., Strydom J., van Wyk J.* A planar multicell structure for advanced integrated reactive power modules // *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2003. V. 39. № 6. P. 1656–1664.
 18. *Liu W.* Alternative Structures for Integrated Electromagnetic Passives // *Dissertation for PhD in Electrical Engineering*. Virginia Polytechnic Institute and State University, 2006.
 19. *Бутырин П.А., Гусев Г.Г., Толчеев О.В., Шакирзянов Ф.Н., Кужман В.В.* Катушка-конденсатор для фильтрокомпенсирующих устройств // *Изв. РАН. Энергетика*. 2013. № 4. С. 72–74.
 20. А.с. 1683082 СССР. Электроиндукционное устройство, H01F27/28 // Волков И.В., Закревский С.И., Смолянский И.И.; заявитель и патентообладатель Институт электродинамики АН УССР. № 4708963/07; заявл. 22.06.1989; опубл. 07.10.1991. Бюл. № 37.
 21. *Neugebauer T.C., Phinney J.W., Perreault D.J.* Filters and Components with Inductance Cancellation // *IEEE Trans. on Ind. Applicat.* 2004. V. 40. № 2. P. 483–491.
 22. *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.
 23. *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.
 24. *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 МЭИ*. 2015. № 5. С. 79–84.
 25. Патент 128033 Российская Федерация, МПК H02J 3/01 (2006.01). Фильтрокомпенсирующее устройство // Бутырин П.А., Гусев Г.Г., Кужман В.В., Толчеев О.В., заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО “НИУ “МЭИ”. № 2012145928/20; заявл. 29.10.2012; опубл. 10.05.2013. Бюл. № 13.
 26. *Конесев С.Г., Хазиева Р.Т.* Математическое и физическое моделирование индуктивно-емкостных преобразователей // *Электричество*. 2020. № 1. С. 32–38.
 27. *Бутырин П.А., Гусев Г.Г., Михеев Д.В., Шакирзянов Ф.Н.* Катушка-конденсатор для индуктивно-емкостного преобразователя // *Известия РАН. Серия физическая*. 2018. Т. 82. № 8. С. 1017–1022.
 28. *Захаров И.В.* Развитие теории, разработка методов и средств повышения эффективности индукторов с самокомпенсацией реактивной мощности: автореферат дисс. докт. техн. наук: 05.09.10. Алматы, 2007. 41 с.
 29. *Ижикова А.Д.* Индукторы с самокомпенсацией реактивной мощности систем электроснабжения электротехнологического назначения: дисс. ... канд. техн. наук: 05.09.03. Челябинск, 2007. 172 с.
 30. Патент 2660177 Российская Федерация, МПК H02H 9/02 (2006.01). Устройство ограничения токов короткого замыкания // Бутырин П.А., Гусев Г.Г., Михеев Д.В., Сиренко В.В., Шакирзянов Ф.Н., заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО “НИУ “МЭИ”. № 2017131883; заявл. 12.09.2017, опубл. 05.07.2018. Бюл. № 19.
 31. *Mikheev D.V., Ryzhkova Y.N., Udaratin A.V., Salikhova R.* Experimental study of the operating modes of the resonant current-limiting device // *E3S Web of Conferences*. V. 220 (2020). Sustainable Energy Systems: Innovative Perspectives (SES-2020). Saint-Petersburg, Russia, October 29–30, 2020. Art. № 01049. P. 1–5.
 32. *Murgatroyd P.N.* Field and circuit models for the wound foil inductor // *Electrocomponent Sci. Technol.* 1976. V. 3. № 2. P. 97–102.
 33. *Zhao L.* Generalised Frequency Plane Model of Integrated Power Electromagnetic Power Passives // *Dissertation for PhD in Electrical Engineering*. Virginia Polytechnic Institute and State University, 2004.
 34. *Демирчян К.С., Димитренко Б.И., Гусев Г.Г., Ефременко А.Л.* Анализ согласования устройств с самокомпенсацией реактивной мощности // *Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт*. 1991. № 3. С. 47–53.
 35. *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.

36. *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.
37. *Бутырин П.А., Гусев Г.Г., Михеев Д.В., Карпунина М.В., Кваснюк А.А., Шакирзянов Ф.Н.* Моделирование переходных процессов в катушке-конденсаторе при импульсном воздействии // Изв. РАН. Энергетика. 2019. № 1. С. 109–122.
38. *Бутырин П.А., Гусев Г.Г., Михеев Д.В., Шакирзянов Ф.Н., Кваснюк А.А.* Экспериментальное исследование переходных процессов в катушке-конденсаторе // Известия РАН. Серия физическая. 2020. Т. 84. № 2. С. 157–160.
39. *Бутырин П.А., Михеев Д.В., Гусев Г.Г., Шакирзянов Ф.Н., Карпунина М.В.* Математическое и физическое моделирование нестационарных электромагнитных процессов в элементах с самокомпенсацией реактивной мощности // Известия РАН. Серия физическая. 2020. Т. 84. № 5. С. 755–760.
40. *Михеев Д.В.* Математическое и физическое моделирование электротехнических комплексов на основе каткона (катушки-конденсатора): дис. ... канд. техн. наук: 05.09.03. М., 2019. 217 с.
41. *Александров Г.Н., Смоловик С.В.* Переходные процессы в сетях с резонансным токоограничивающим устройством // Электричество. 2002. № 1. С. 15–19.
42. *Butyrin P.A., Gusev G.G., Mikheev D.V., Shakirzianov F.N.* Coil-capacitor as a basis for creating efficient devices for distribution power networks // Conference on Sustainable Energy Supply and Energy Storage Systems – NEIS 2018. September 20–21, 2018, Hamburg, Germany. P. 173–178.
43. *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.

Fast Acting Short-Circuit Current Limiting Device Based on a Coil-Capacitor

**P. A. Butyrin^{a,*}, G. G. Gusev^a, D. V. Mikheev^{a,b}, M. V. Karpunina^{a,b},
A. A. Kvasniuk^a, and F. N. Shakirzianov^a**

^a*National Research University “MPEI”, Moscow, Russia*

^b*Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia*

**e-mail: ButyrinPA@mpei.ru*

The paper presents the results of a study of transient processes when short-circuit currents are limited by a device based on a coilcap (coil-capacitor). The proposed current-limiting device (CLD) has a compact design and improved weight and dimensions in comparison with standard resonant CLD. The mathematical model based on the use of a synthesized equivalent circuit with equivalent lumped parameters and concepts of global and local time of CLD based on a coilcap for the analysis of transient processes is developed. An analytical solution is obtained for transient voltages and currents with a jump-like change in the boundary conditions at the output of a CLD based on a coilcap taking into account losses in the resonance mode with a resistive matched load. Expressions for integration constants in found solutions are functions of the switching moments and allow to set optimal switching moments to achieve the required speed of the device and reduce the surge current. On the basis of the analytical solution oscillatory and critical transients of the short-circuit current limitation are analyzed. The observance of the commutation laws is established and found values are compared with values received in the alternative construction of the solution from obtained results. The results of an experimental study of transient processes in a physical model of CLD based on a coilcap are presented. The correctness of the mathematical model and the reliability of obtained analytical solutions are confirmed by the coincidence of theoretical calculations and experimental data.

Keywords: coil-capacitor, coilcap, transient process, short-circuit currents, current-limiting device, high-speed performance