

УДК 621.319+621.3.064

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В КАТУШКЕ-КОНДЕНСАТОРЕ ПРИ ПОДКЛЮЧЕНИИ К ИСТОЧНИКУ СИНУСОИДАЛЬНОГО НАПРЯЖЕНИЯ

© 2021 г. П. А. Бутырин^{1, *}, Г. Г. Гусев¹, Ф. Н. Шакирзянов¹,
Д. В. Михеев^{1, 2}, А. А. Кваснюк¹, М. В. Карпунина^{1, 2}

¹Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования
“Национальный исследовательский университет “МЭИ”, Москва, Россия

²Федеральное 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 21.06.2021 г.

После доработки 05.07.2021 г.

Принята к публикации 28.07.2021 г.

Представлены результаты теоретического и экспериментального исследования переходных процессов в катушке-конденсаторе (катконе) при его подключении к источнику синусоидального напряжения. Показано, что переходные процессы в этом случае протекают так же, как и в RLC -цепи с сосредоточенными параметрами, т.е. возможны резонансный режим, режимы биений, сверхнапряжений и сверхтоков.

DOI: 10.31857/S0367676521110089

ВВЕДЕНИЕ

Катушка-конденсатор (каткон) является пассивным элементом электрической цепи, обладающим одновременно индуктивными, емкостными и резистивными свойствами [1, 2]. В общем случае для создания каткона используют два длинных проводника, которые изолируются друг от друга слоем диэлектрика. Однако в отличие от обычного конденсатора источник переменного напряжения подсоединяют к началу первого проводника и к концу второго проводника (входные выводы), вследствие чего в них возникают токи проводимости, а в диэлектрике – токи смещения [3]. К выходным выводам каткона (начало второго проводника и конец первого проводника) может быть подключена произвольная нагрузка, либо они могут оставаться разомкнутыми (режим холостого хода) или замкнутыми (режим короткого замыкания).

При практической реализации каткона его выполняют в виде бифилярной катушки [4, 5], проводники которой не имеют электрической связи и изолированы друг от друга диэлектриком, и располагают на магнитопроводе с немагнитным зазором для настройки его характеристик (например, резонансных частот) [6]. Применение такой конфигурации позволяет создавать различные устройства с улучшенными массогабаритными и энергетиче-

скими показателями для радиоэлектроники, электротехники и электроэнергетики [7].

Электромагнитные процессы в катконе в стационарных режимах экспериментально и теоретически достаточно хорошо изучены [3, 6–11], поэтому актуальным предметом дальнейших исследований является анализ поведения каткона в нестационарных режимах. В этой связи в работе ставится задача экспериментального исследования переходных режимов работы каткона при его подключении к источнику синусоидального напряжения. Решение данной задачи позволит изучить свойства данного элемента и оценить корректность предложенной в [7] математической модели каткона.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

В рамках экспериментального исследования рассматриваются процессы подключения и отключения каткона от источника синусоидального напряжения при различных амплитудах, частотах и начальных фазах. Для этого используется лабораторный комплекс, включающий:

- генератор синусоидального напряжения с регулируемой амплитудой E_m и частотой f с внутренним сопротивлением, близким к нулю (Γ);

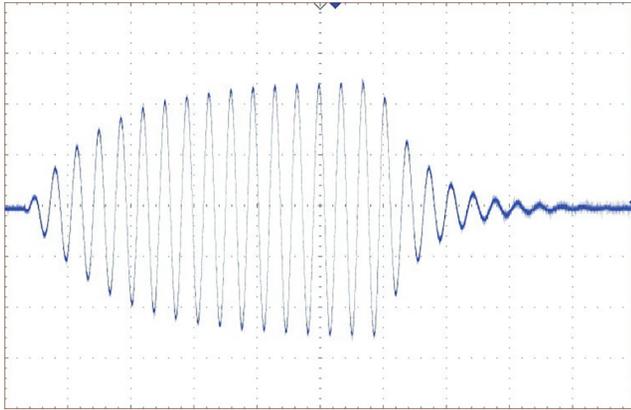


Рис. 1. Экспериментальная осциллограмма переходного напряжения $u(t)$ на добавочном резисторе при $\omega = \omega_{св}$ (масштаб: ОУ – 500 мВ/дел.; ОХ – 200 мкс/дел.).

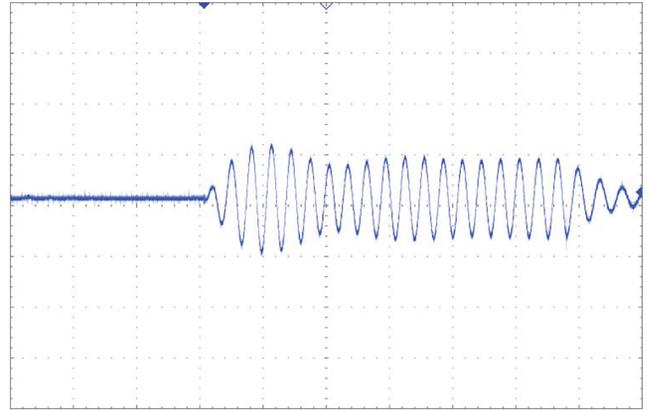


Рис. 2. Экспериментальная осциллограмма переходного напряжения $u(t)$ на добавочном резисторе при $\omega \approx \omega_{св}$ ($\omega > \omega_{св}$) (масштаб: ОУ – 500 мВ/дел.; ОХ – 200 мкс/дел.).

- электронный ключ с управляемым моментом коммутации для регулирования начальной фазы ψ синусоидального напряжения (ЭК);
- добавочный резистор ($R = 50 \text{ Ом}$);
- балластный резистор ($R_6 = 100 \text{ Ом}$);
- физическая модель каткона (в режиме холостого хода) с эквивалентными сосредоточенными параметрами: $L_{э\text{кв}} = 16 \text{ мГн}$; $C_{э\text{кв}} \approx 8 \text{ нФ}$; $R_{э\text{кв}} = 28.8 \text{ Ом}$; $G_{э\text{кв}} \approx 0$ (определены в соответствии с [8]);
- запоминающий цифровой осциллограф (ОСЦ).

При включении ЭК образуется колебательный контур, состоящий из генератора, добавочного резистора R и физической модели каткона. Балластный резистор R_6 подключен параллельно к генератору и не оказывает качественного влияния на процессы в катконе. По достижению установившегося режима происходит размыкание ЭК, отключение генератора от пассивной цепи и возникает затухающий переходный процесс в колебательном контуре, состоящем из добавочного резистора R , физической модели каткона и балластного резистора R_6 , который используется для защиты ЭК.

ОСЦ подключается к добавочному резистору R и фиксирует кривую напряжению $u(t)$ на нем, что позволяет оценивать характер изменения переходного тока $i(t) = u(t)/R$ на входе физической модели каткона.

В общем случае каткон представляется электрической цепью с распределенными параметрами и математически описывается системой сложения волновых уравнений [3, 7]. Гипотеза исследования состоит в том, что данный элемент в режиме холостого хода с учетом разложения гиперболических функций в ряд Маклорена [3] может быть представлен относительно входных выводов

простой синтезированной схемой замещения с эквивалентными сосредоточенными параметрами ($L_{э\text{кв}}$; $C_{э\text{кв}}$; $R_{э\text{кв}}$; $G_{э\text{кв}}$) [7]. В этом случае ему должны быть присущи такие же качественные особенности, как и простейшей RLC -цепи.

В этой связи в работе наблюдаются переходные процессы при следующих соотношениях частот установившихся ($\omega = 2\pi f$) и свободных ($\omega_{св} = 2\pi f_{св}$) колебаний: $f = 15.7 \text{ кГц} = f_{св}$; $f = 14.1 \text{ кГц} \approx f_{св}$; $f = 39 \text{ кГц} \gg f_{св}$; $f = 4.9 \text{ кГц} \ll f_{св}$.

Таким образом, для всех рассматриваемых случаев общее аналитическое решение для переходного тока на входе каткона при подключении источника синусоидального напряжения будет иметь следующий вид:

$$i(t) = I_{m \text{уст}} \sin(\omega t + \psi - \varphi) + Ae^{-\alpha t} \sin(\omega_{св} t + \psi_A), A, \quad (1)$$

где $I_{m \text{уст}}$ (А) – амплитудное значение тока в установившемся режиме; ψ ($^\circ$) – начальная фаза напряжения источника; φ ($^\circ$) – начальная фаза аргумента комплексного сопротивления контура на частоте ω ; $\alpha \pm j\omega_{св}$ – корни характеристического уравнения; A , ψ_A – постоянные интегрирования.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 1–4 представлены экспериментальные осциллограммы переходного напряжения $u(t)$ на добавочном резисторе R при включении и отключении генератора G при следующих мгновенных значениях напряжения источника:

- рис. 1: $e(t) = 2.3\sin(88605t - 90^\circ) \text{ В}$;
- рис. 2: $e(t) = 2.3\sin(98646t) \text{ В}$;
- рис. 3: $e(t) = 5\sin(245044t + 80^\circ) \text{ В}$;
- рис. 4: $e(t) = 2.8\sin(30788t - 90^\circ) \text{ В}$.

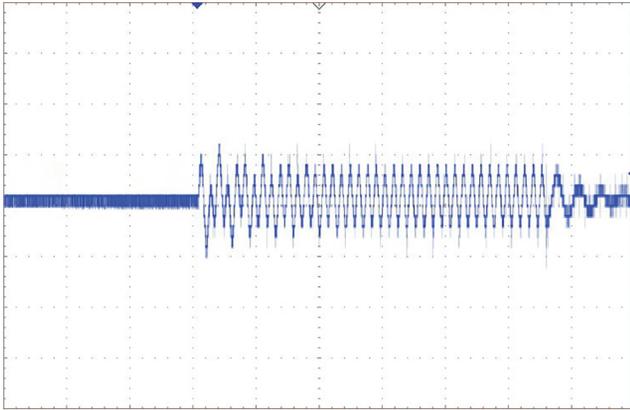


Рис. 3. Экспериментальная осциллограмма переходного напряжения $u(t)$ на добавочном резисторе при $\omega \geq \omega_{св}$ (масштаб: ОУ – 100 мВ/дел.; ОХ – 200 мкс/дел.).

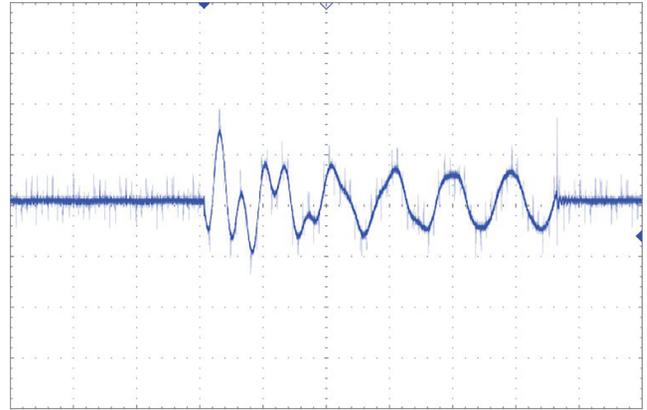


Рис. 4. Экспериментальная осциллограмма переходного напряжения $u(t)$ на добавочном резисторе при $\omega \leq \omega_{св}$ (масштаб: ОУ – 100 мВ/дел.; ОХ – 200 мкс/дел.).

При включении каткона на источник синусоидального напряжения для переходного тока $i(t)$ с учетом приведенных ранее эквивалентных сосре-

доточенных параметров физической модели каткона в соответствии с (1) были получены следующие решения:

- рис. 1 ($f = f_{св}$): $i(t) = 26.7\sin(88605t - 88^\circ) + 28.7e^{-2466t}\sin(88604t + 93^\circ)$ мА;
- рис. 2 ($f \approx f_{св}$): $i(t) = 7.2\sin(98646t - 76^\circ) + 7.2e^{-2466t}\sin(88604t + 105^\circ)$ мА;
- рис. 3 ($f \gg f_{св}$): $i(t) = 1.45\sin(245044t + 9^\circ) + 0.57e^{-2466t}\sin(88604t - 158^\circ)$ мА;
- рис. 4 ($f \ll f_{св}$): $i(t) = 0.79\sin(30788t) + 2.27e^{-2466t}\sin(88604t)$ мА.

Результаты эксперимента и полученного теоретического решения для первого случая (рис. 1) свидетельствуют о том, что в цепи наблюдается переходной процесс в режиме резонанса ($\omega = \omega_{св} = 88604$ рад/с; $I_{муст} \approx A$).

Во втором случае (рис. 2) наблюдается режим биений, что соответствует полученному теоретическому решению ($I_{муст} = A = 7.2$ мА).

Третий случай (рис. 3) характеризуется возникновением режима сверхнапряжений. Однако для его иллюстрации экспериментально не может быть отдельно получена кривая напряжения на емкостном элементе, так как каткон не является дискретным элементом, но его необходимо учитывать при оценке электрической прочности изоляции каткона. При этом в опыте наблюдается незначительное превышение максимального значения переходного тока над амплитудным значением тока в установившемся режиме (~1.5 раза), что также является особенностью этого режима.

В четвертом случае (рис. 4) наблюдается режим сверхтоков, характерным признаком которого является превышение максимального значения переходного тока над амплитудным значением тока в установившемся режиме (более чем в 2 раза), а также равенство начальной фазы напряжения источ-

ника и аргумента комплексного сопротивления контура ($\psi - \varphi = 0$).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Впервые экспериментально исследованы и теоретически описаны переходные процессы при воздействии источника синусоидального напряжения на катушку-конденсатор при различных частотах источника. Полученные экспериментальные осциллограммы для всех случаев имеют вид, характерный для режимов резонанса, биений, сверхтоков и сверхнапряжений в RLC -цепи при ее подключении к источнику синусоидального напряжения. Таким образом, переходные процессы в цепи с катконом принципиально не отличаются от переходных процессов в обычной цепи второго порядка с сосредоточенными параметрами за исключением условий наблюдения (отсутствует возможность экспериментального наблюдения напряжений на дискретных элементах).

Подтверждена адекватность и корректность математической модели каткона для анализа переходных процессов, которая предполагает применение синтезированной схемы замещения с эквивалентными сосредоточенными параметрами. Расчет нестационарных режимов может осуществляться на основе любых известных методов, ис-

пользуемых в теории электрических цепей. Значения рассчитанных переходных токов на входе катушки достаточно точно совпадают с результатами экспериментального исследования.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ (проект № 19-08-00730-а).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Reeves R.* // Proc. IEE. 1975. V. 122. No. 10. P. 1151.
2. *Murgatroyd P.N.* // Electrocomp. Sci. Technol. 1976. V. 3. No. 2. P. 97.
3. *Демирчян К.С., Гусев Г.Г.* // Изв. АН СССР. Сер. Энерг. и трансп. 1987. № 2. С. 3.
4. *Tesla N.* Coil for electro-magnets. US Patent No. 512340, cl. H01F41/098. 1894.
5. *Tesla N.* Coil for electro-magnets. US Patent No. 10928157, cl. F41B6/003. 2019.
6. *Бутырин П.А., Гусев Г.Г., Михеев Д.В. и др.* // Изв. РАН. Сер. физ. 2020. Т. 84. № 2. С. 157; *Butyrin P.A., Gusev G.G., Mikheev D.V. et al.* // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2020. V. 84. No. 2. P. 118.
7. *Бутырин П.А., Михеев Д.В., Гусев Г.Г. и др.* // Изв. РАН. Сер. физ. 2020. Т. 84. № 5. С. 755; *Butyrin P.A., Mikheev D.V., Gusev G.G. et al.* // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2020. V. 84. No. 5. P. 623.
8. *Бутырин П.А., Гусев Г.Г., Михеев Д.В. и др.* // Электричество. 2017. № 10. С. 55.
9. *Neugebauer T.C., Phinney J.W., Perreault D.J.* // IEEE T. Ind. Appl. 2004. V. 40. No. 2. P. 483.
10. *Konesev S.G., Khazieva R.T., Kirillov R.V.* // J. Phys. Conf. Ser. 2019. V. 1210. No. 1. Art. No. 012068.
11. *Milutinov M., Kistic M., Zlebic C. et al.* // Proc. 43rd ISSE (Demanovska Valley, 2020). Art. No. 9120946.

Experimental study of transient processes in a coil-capacitor connected to a sinusoidal voltage source

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

^aNational Research University "MPEI", Moscow, 111250 Russia

^bBauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005 Russia

*e-mail: ButyrinPA@mpei.ru

The results of a theoretical and experimental study of transient processes in a coil-capacitor (coilcap) when it is connected to a sinusoidal voltage source are presented. It is shown that transient processes in this case take place in the same way as in an *RLC* electrical circuit with lumped parameters, i.e. resonant, beat, overvoltage's and overcurrent's modes are possible.