

УДК 621.3.519:620.9.001.5(04,07)

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В КАТУШКЕ-КОНДЕНСАТОРЕ

© 2020 г. П. А. Бутырин¹*, Г. Г. Гусев¹, Д. В. Михеев¹, Ф. Н. Шакирзянов¹, А. А. Кваснюк¹

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

*E-mail: ButyrinPA@mpei.ru

Поступила в редакцию 30.08.2019 г.

После доработки 16.09.2019 г.

Принята к публикации 28.10.2019 г.

Экспериментально исследованы режимы физической модели каткона (катушки-конденсатора) с подключенными к выходным зажимам конденсатором, индуктивной катушкой или резистором при импульсном воздействии источника напряжения на вход устройства. Обнаружен режим, при котором переходной процесс, судя по осциллограммы мгновенных значений входного тока каткона, практически отсутствует.

DOI: 10.31857/S0367676520020076

Каткон является пассивным элементом электрической цепи, представляющим четырехполюсник [1–3]. Принцип построения каткона заключается в следующем. Два сложенных вместе длинных проводника (как правило, в виде фольги) изолируются друг от друга диэлектриком, а источник питания подключается к началу первого проводника и к концу второго проводника (входные зажимы). В результате такого подключения источника в проводниках возникают токи проводимости, а в диэлектрике между проводниками — токи смещения, поэтому каткон обладает как индуктивными, так и емкостными свойствами [2]. Выходные зажимы каткона (начало второго проводника и конец первого проводника) могут быть разомкнуты, замкнуты, либо к ним может быть подключена произвольная нагрузка.

Идея создания различных устройств на базе каткона для их применения в электротехнике и радиоэлектронике возникла в 1970-х гг. [3]. В дальнейшем зарубежными и отечественными исследователями рассматривались новые сферы применения катконов: осветительные приборы с самокомпенсацией реактивной мощности, электротермические устройства, индуктивно-емкостные преобразователи, фильтры и т.д. [1–8].

В настоящее время существует множество вариантов практической реализации каткона для различных областей применения в электроэнергетике и электротехнике. Для решения ряда энергетических задач (компенсация реактивной мощности, фильтрация высших гармоник сети, ограничение токов короткого замыкания и т.д.) эффективной является конфигурация каткона, при которой обмотки каткона располагают на немагнитном или магнитном сердечнике, что обеспечивает надеж-

ность конструкции и возможность регулировать его свойства и характеристики [7, 9]. В частности, такое конструктивное исполнение каткона позволяет изменять значение его эквивалентной индуктивности, достигать необходимых резонансных частот и реализовывать различные схемотехнические решения для разнообразных инженерных задач [9].

Авторы статьи продолжительное время изучают возможность создания многофункциональных устройств с улучшенными массогабаритными показателями на базе каткона, что отражено в ряде авторских исследований [2, 9]. Однако данные исследования были направлены на анализ установившихся режимов работы каткона. Это, в свою очередь, делает актуальным изучение особенностей переходных процессов в катконе, поэтому в настоящей работе ставится задача исследования переходных процессов при импульсном воздействии на каткон при различных нагрузках.

Схема физической модели каткона, представленная на рис. 1, подробно описана в [9]. При исследовании переходных процессов ко входу устройства между зажимами H_1 и K_2 (рис. 1) подключался источник напряжения с импульсным сигналом (меандром) с частотой 15.5 Гц и максимальным значением напряжения $U_{max} = 1$ В, к выходным зажимам физической модели H_2 и K_1 подключалась нагрузка (конденсатор, индуктивная катушка, резистор). Для получения осциллограмм переходных процессов использовался программно-технический комплекс DeltaProfi [10], обеспечивающий цифровую обработку исследуемых сигналов. В результате были получены осциллограммы входного напряжения и тока (при подключении в качестве нагрузки конденсатора

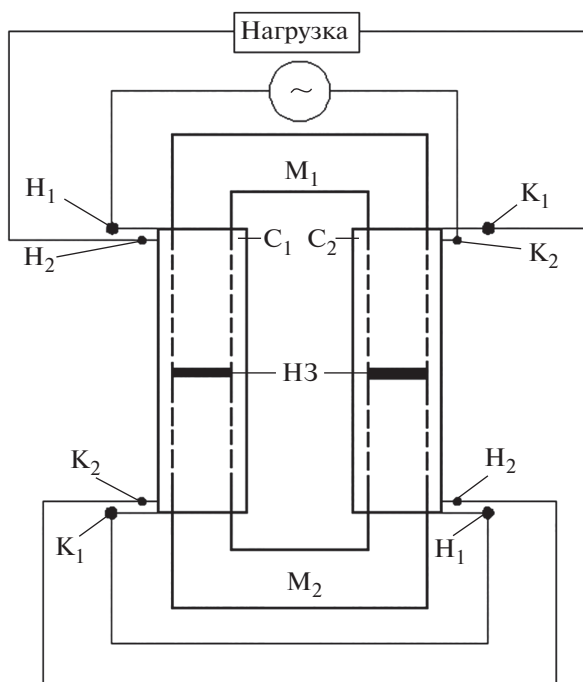


Рис. 1. Схема физической модели каткона (C_1 и C_2 – первая и вторая секции, выполненные из двух одинаковых проводов в виде алюминиевой фольги и соединенные между собой последовательно; H_1 , K_1 , H_2 , K_2 – выводы секций C_1 и C_2 ; M_1 и M_2 – П-образные участки магнитопровода; $HЗ$ – регулируемые по длине немагнитные зазоры (общая длина $HЗ$ в рамках эксперимента 1.2 мм)).

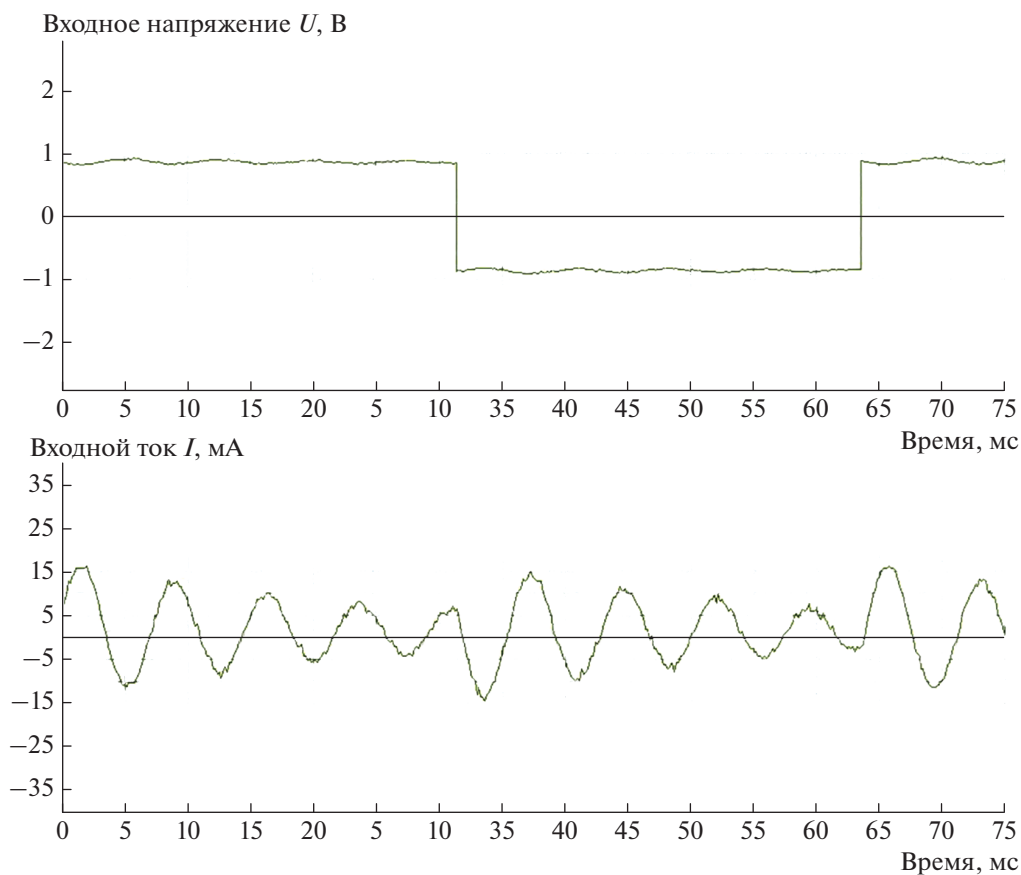


Рис. 2. Оциллограммы мгновенных значений входного напряжения и входного тока в физической модели каткона при импульсном воздействии источника напряжения (к выходным зажимам физической модели каткона подключен конденсатор емкостью $C_H = 4.7$ мкФ).

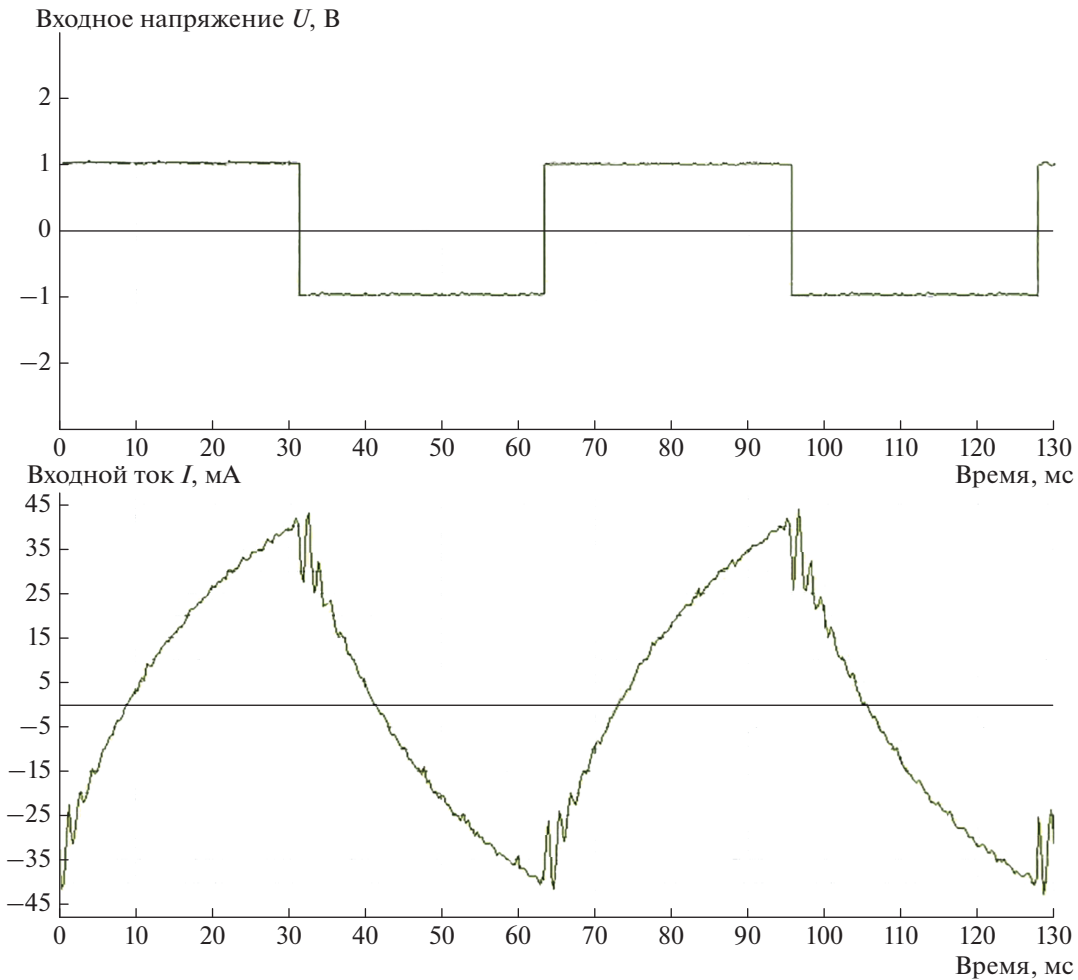


Рис. 3. Осциллограммы мгновенных значений входного напряжения и входного тока в физической модели каткона при импульсном воздействии источника напряжения (к выходным зажимам физической модели каткона подключена индуктивная катушка индуктивностью $L_H = 65$ мГн).

с емкостью $C_H = 4.7$ мкФ, индуктивной катушки с индуктивностью $L_H = 65$ мГн и резистора с сопротивлением $R_H = 200$ Ом), представленные на рис. 2–4. Кроме того, были получены осциллограммы входных и выходных напряжений и токов и при других значениях C_H, L_H, R_H .

Результаты эксперимента и анализ полученных осциллограмм позволили определить характер и особенности переходных процессов на входе физической модели каткона:

- при $0 < R_H < 200$ Ом – аperiodический переходной процесс (цепь второго порядка); на входе и выходе кривые тока изменяются скачком;
- при $R_H = 200$ Ом (сопротивление нагрузки равно волновому сопротивлению каткона) – переходной процесс практически не наблюдается (цепь второго порядка);
- при $R_H > 200$ Ом – колебательный переходной процесс (цепь второго порядка); на входе кривая тока не изменяется скачком, на выходе кривые тока и напряжения изменяются скачком;

– при $R_H \rightarrow \infty$ – колебательный переходной процесс (цепь второго порядка); на входе кривая тока не изменяется скачком, на выходе кривые напряжения и тока изменяются скачком;

– при $R_H \rightarrow 0$ – аperiodический переходной процесс (цепь второго порядка); кривые тока на входе и выходе не изменяются скачком;

– при увеличении значения емкости конденсатора C_H в диапазоне от 3.3 до 82 мкФ на входе физической модели каткона наблюдается увеличение максимального значения тока и периода свободных колебаний (цепь третьего порядка, выражение для преходящей составляющей входного тока в общем виде: $i_{\text{прех}} = Ae^{-\alpha t} \sin(\omega_{\text{св}} t + \Psi_{\text{св}}) + Be^{pt}$, при этом $\omega_{\text{св}}, \alpha$ и p по модулю примерно одного порядка; $A, B, \Psi_{\text{св}} (^{\circ})$ – постоянные интегрирования, $\omega_{\text{св}}$ (рад \cdot с $^{-1}$) – циклическая частота свободных колебаний, α (с $^{-1}$) и p (с $^{-1}$) – коэффициент затухания и вещественный корень характеристического уравнения); кривая тока на входе и кривая напряжения на выходе не изменяются скачком;

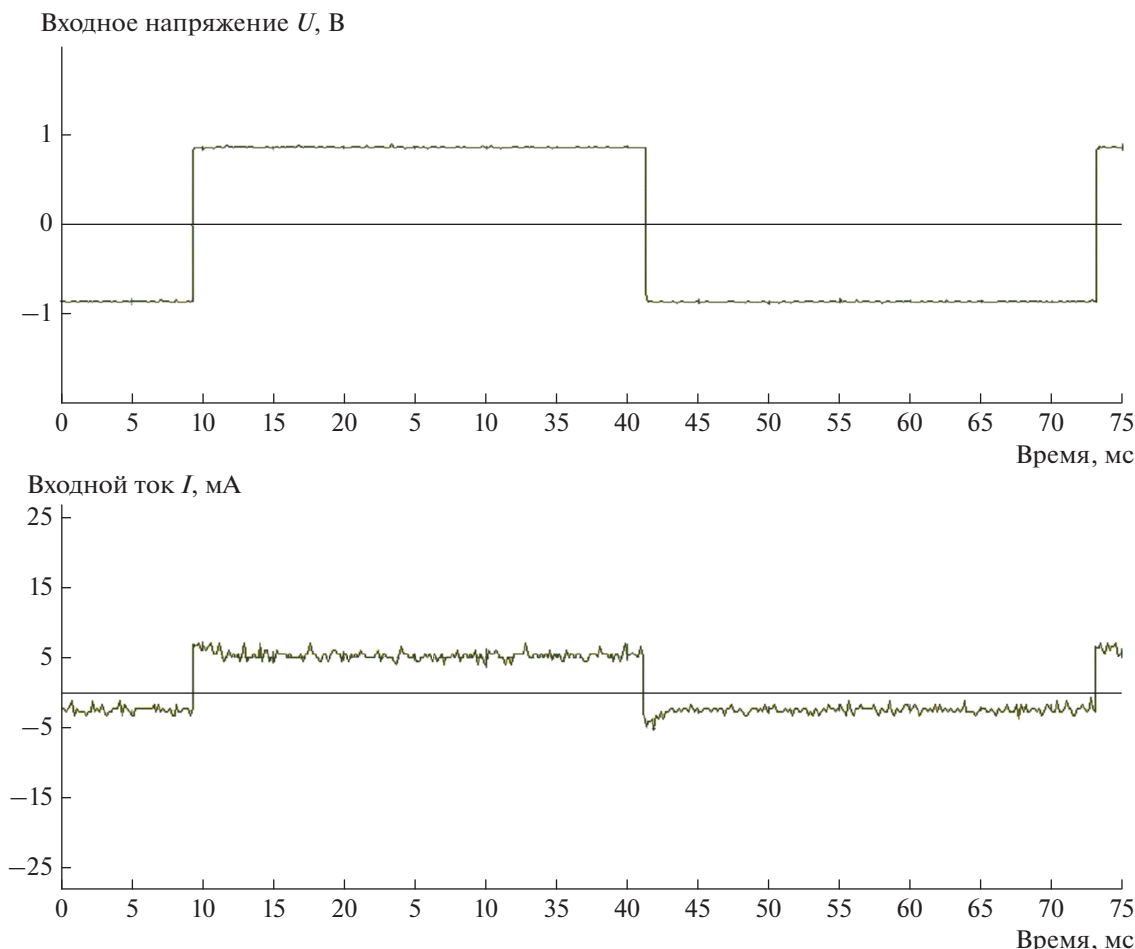


Рис. 4. Осциллограммы мгновенных значений входного напряжения и входного тока в физической модели каткона при импульсном воздействии источника напряжения (к выходным зажимам физической модели каткона подключен резистор сопротивлением $R_H = 200$ Ом).

— при увеличении значения индуктивности индуктивной катушки L_H в диапазоне от 43.3 до 130 мГн на входе физической модели каткона наблюдается увеличение максимального значения тока и периода свободных колебаний (цепь третьего порядка, выражение для преходящей составляющей входного тока в общем виде: $i_{\text{прех}} = Ae^{-\alpha t} \sin(\omega_{\text{св}} t + \Psi_{\text{св}}) + Be^{pt}$, при этом по модулю $\omega_{\text{св}} \gg \alpha$ и $\omega_{\text{св}} \gg p$); кривая тока на входе не изменяется скачком, а кривая напряжения на выходе изменяется скачком.

В заключение отметим, что в рамках настоящей работы впервые были получены экспериментальные осциллограммы кривых тока и напряжения на входе и выходе каткона при импульсном воздействии источника напряжения, описаны характер и особенности переходных процессов в катконе при различных видах нагрузки, подключенной к нему.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Reeves R. // Proc. Inst. Electr. Engin. 1975. V. 122. P. 1151.
2. Демурьян К.С., Гусев Г.Г. // Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт. 1987. № 2. С. 3.
3. Волков И.В., Закревский С.И. // Электричество. 1984. № 10. С. 40.
4. Ehsani M., Stielau O.H., van Wyk J.D. // IEEE Trans. Power Electron. 1993. V. 8. P. 208.
5. Кувалдин А.Б., Андриюшин Н.Ф., Захаров И.В. // Электричество. 1995. № 7. С. 47.
6. Neugebauer T.C., Phinney J.W., Perreault D.J. // IEEE Trans. Ind. Appl. 2004. V. 40. P. 483.
7. Konesev S.G., Khazieva R.T., Kirillov R.V. // Proc. 10-th IEEE Int. Conf. on Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines. (Omsk, 2016). P. 1.
8. Coulibaly S., Loum G., Diby K.A. // IOSR J. Electr. Electron. Engin. 2015. V. 10. P. 35.
9. Бутырин П.А., Гусев Г.Г., Мухеев Д.В. и др. // Изв. РАН. Сер. физ. 2018. Т. 82. С. 1017; Butyrin P.A., Gusev G.G., Mikheev D.V. et al. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2018. V. 82. P. 918.
10. Alexeychik L.V., Zhokhova M.P., Mikheev D.V. et al. // Proc. 4-th Int. Conf. on Inform. Technol. in Engineer. Educ. Inform. 2018. (Moscow, 2018). P. 387.