

Экспериментальное исследование частотных характеристик катушки-конденсатора при различных граничных условиях

МИХЕЕВ Д.В.

Представлены результаты экспериментального исследования в режимах холостого хода и короткого замыкания нового элемента электрических цепей – катушки-конденсатора (каткона). Статья представляет научный (с точки зрения теории электрических цепей) и практический интерес ввиду возможности использования катконов в фильтрокомпенсирующих устройствах, устройствах ограничения токов короткого замыкания, индуктивно-емкостных преобразователях и других электротехнических устройствах для снижения их массогабаритных показателей. Приведено описание эквивалентных параметров физической модели каткона, представлены данные о лабораторном оборудовании, построены экспериментальные частотные, вольт-амперные и нагрузочные характеристики. Результаты сравнения экспериментальных и теоретических зависимостей позволяют судить об адекватности и корректности предложенной математической модели. Подробно описан процесс экспериментальных исследований, при проведении которого использованы известные методы. Данные экспериментов не противоречат общепринятым теоретическим положениям и результатам исследований ведущих российских и зарубежных специалистов.

Ключевые слова: катушка-конденсатор, физическая модель, эксперимент, частотные характеристики, резонанс

Катушка-конденсатор (каткон) [1–5] является пассивным элементом электрической цепи и в общем случае может рассматриваться как нелинейная цепь с распределенными параметрами (рис. 1), которая описывается системой волновых уравнений [1]. При этом по первому и второму проводам протекают токи $i_1(x)$ и $i_2(x)$, в сумме дающие входной ток $i_{вх}$ ($i_{вх} = i_1(x) + i_2(x)$). На рис. 1 K_2 и H_1 – входные зажимы, подключенные к источнику напряжения $u_{пн}$, а K_1 и H_2 – выходные зажимы, между которыми протекает ток $i_{н}$ и возникает напряжение $u_{н}$. Первичные параметры элементов схемы на участке длиной dx [1, 6]: $L_{01} = L_{02} = L_0$ (Гн/м) – индуктивность на единицу длины; R_0 (Ом/м) – сопротивление, учитывающее потери в проводах и магнитопроводе, на единицу длины; C_0 (Ф/м) –

ёмкость между проводами на единицу длины; G_0 (См/м) – проводимость на единицу длины, учитывающая потери в изоляции между проводами.

Каткон может быть исследован в трех режимах – холостого хода (х.х.): $Z_{н} \rightarrow \infty$ (зажимы H_2 и K_1 разомкнуты, возможно достижение режима резонанса напряжений); короткого замыкания (КЗ): $Z_{н} = 0$ (зажимы H_2 и K_1 замкнуты, возможно достижение режима резонанса токов); произвольной нагрузки: $0 < Z_{н} < \infty$ [7]. В [1, 6] приведены синтезированные по входному сопротивлению (относительно зажимов H_1 и K_2) для режимов х.х. и КЗ эквивалентные схемы замещения каткона (рис. 2, а), ток и напряжение в нагрузке (между зажимами H_2 и K_1) определяются на основе метода эквивалентного генератора в соответствии с эквивалентной

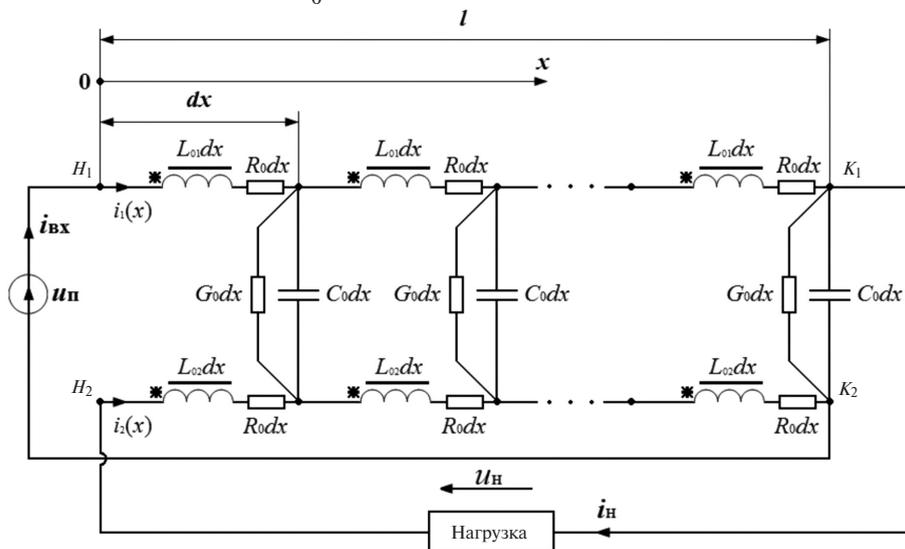


Рис. 1

схемой на рис. 2,б (все величины представлены в комплексной форме) [7].

Ставится задача экспериментального исследования частотных характеристик физической модели каткона в режимах х.х. и КЗ с целью оценки адекватности и корректности ранее предложенной математической модели [6–8].

Конструктивное исполнение и эквивалентные параметры исследуемой физической модели. Конструкция исследуемой двухсекционной физической модели каткона, соответствующая патенту [9], приведена на рис. 3,а, фотография макета – на рис. 3,б. Секции C_1 и C_2 выполнены из двух одинаковых проводов в виде алюминиевой фольги (число витков каждой секции 150, толщина фольги 7 мкм, ширина 84 мм), которые изолированы друг от друга двумя листами полипропилена (толщина 10 мкм, ширина 95 мм). Секции намотаны на П-образные участки M_1 и M_2 магнитопровода (аморфная сталь марки 71 КНСР, сечение $20 \times 20 \text{ мм}^2$). Участки M_1 и M_2 отделены друг от друга двумя одинаковыми по длине немагнитными зазорами НЗ (длина каждого зазора 2 мм, общая длина 4 мм). Соединение секций C_1 и C_2 между собой выполнено последовательно согласно, источник напряжения подключается к выводу H_1 секции C_1 и выводу K_2 секции C_2 , нагрузка – к выводу K_1 секции C_2 и выводу H_2 секции C_1 .

Эквивалентные параметры синтезированной относительно входного сопротивления схемы замещения каткона были определены в [8]: $R_L = 2/3 R_0 l = 3,091801 \text{ Ом}$, $L = L_0 l = 0,013585 \text{ Гн}$, $C_{\text{пар}} = C_0 l = 5,95 \cdot 10^{-6} \text{ Ф}$, $G_{C_{\text{пар}}} = G_0 l = 107,1995 \cdot 10^{-6} \text{ См}$, $C_{RL} = 0$. Эквивалентная индуктивность $L = L_0 l$ каткона и магнитопровода учиты-

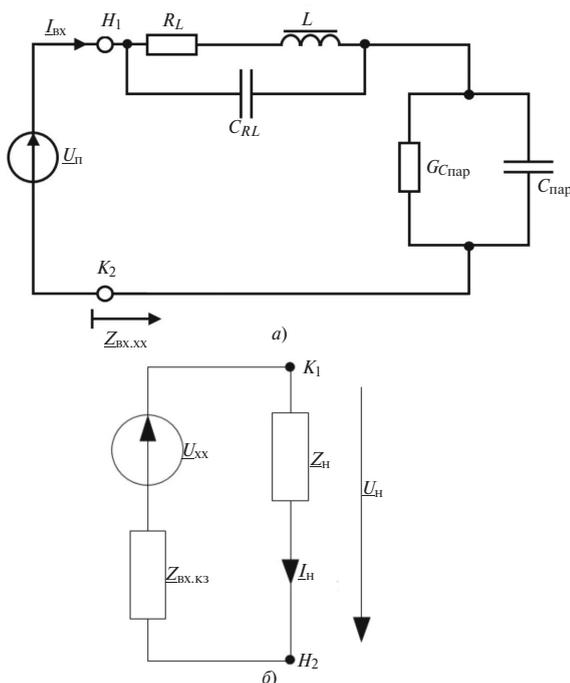


Рис. 2

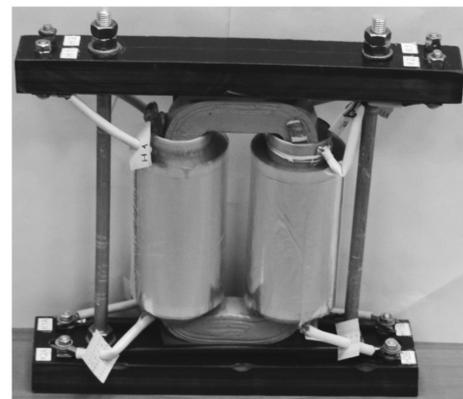
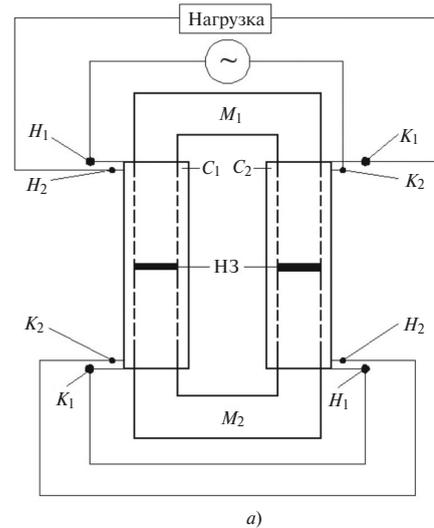


Рис. 3

вается на схеме замещения как нелинейный элемент, значение которой определяется на основе метода гармонической линеаризации [6].

Экспериментальное исследование каткона. Эксперименты проводились на вышеописанной физической модели каткона (рис. 3,а и б) на лабораторном стенде Лаборатории электрических цепей им. К.А. Круга кафедры теоретических основ электротехники Московского энергетического института (рис. 4) для двух граничных условий: при разомкнутых выходных зажимах K_1 и H_2 ($Z_{\text{н}} \rightarrow \infty$, $I_{\text{н}} = 0$) и при замкнутых выходных зажимах K_1 и H_2 ($Z_{\text{н}} = 0$).

В первом случае к входным зажимам каткона H_1 и K_2 подключался источник питания с выходным напряжением $U_{\text{П}} = 1 \text{ В}$ (внутреннее сопротивление 5 Ом) и при изменении частоты питания источника ($f = \text{var}$) фиксировались входной ток $I_{\text{вх}}$ и напряжение х.х. $U_{\text{хх}}$ между зажимами K_1 и H_2 . В результате обработки полученных данных были построены амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) в диапазоне от 400 до 800 Гц: зависимости входного сопротивления каткона $Z_{\text{вх.хх}}(f)$ и напряжения $U_{\text{хх}}(f)$ от частоты (рис. 5), на которых кружочками отмечены экспериментальные точки. Значение резонансной частоты 560 Гц.

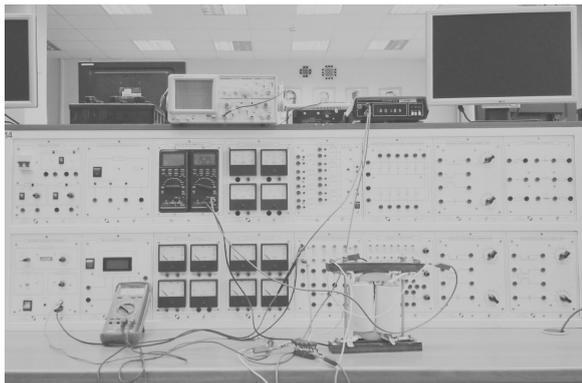


Рис. 4

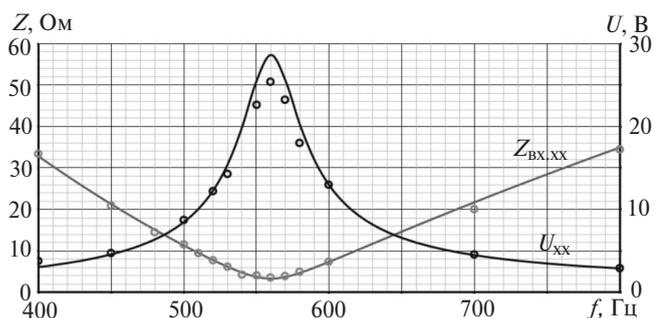


Рис. 5

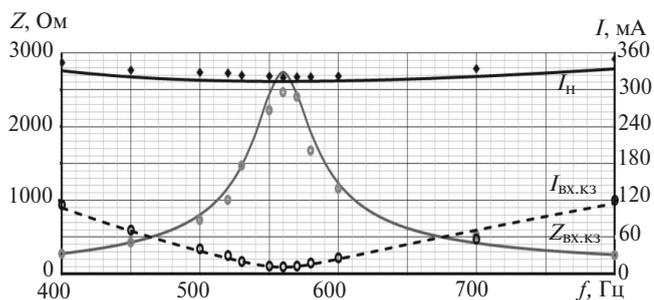


Рис. 6

Во втором случае к входным зажимам катушки H_1 и K_2 подключался источник питания с выходным напряжением $U_{\Pi} = 30$ В (внутреннее сопротивление 600 Ом). Были исследованы частотные характеристики катушки и построены экспериментальные зависимости входного сопротивления $Z_{BX,K3}(f)$, входного тока $I_{BX,K3}(f)$ и тока в нагрузке $I_N(f)$ от частоты источника питания (рис. 6), экспериментальные точки отмечены на сплошных кривых). Значение резонансной частоты – 560 Гц.

В таблице представлены значения коэффициентов усиления по току ($K_y = I_N / I_{BX,K3}$) [10], определенные по результатам эксперимента ($K_{y,экспер}$) и теоретических расчетов ($K_{y,теор}$) в соответствии с [7]:

f , Гц	400	450	500	520	530	550	560	570	580	600	700	800
$I_{BX,K3}$, мА	113	71,5	41,2	30,0	20,5	13,5	12,5	12,2	18,0	26,0	57,0	120,0
I_N , мА	344	332	328	327	323	322	321	320	321	322	334	350
$K_{y,экспер}$, отн. ед.	3,0	4,6	8,0	10,9	15,8	23,9	26,2	25,7	17,8	12,4	5,9	2,9
$K_{y,теор}$, отн. ед.	3,1	4,6	8,5	12,3	15,4	25,5	28,6	25,5	20,2	12,9	4,5	2,9

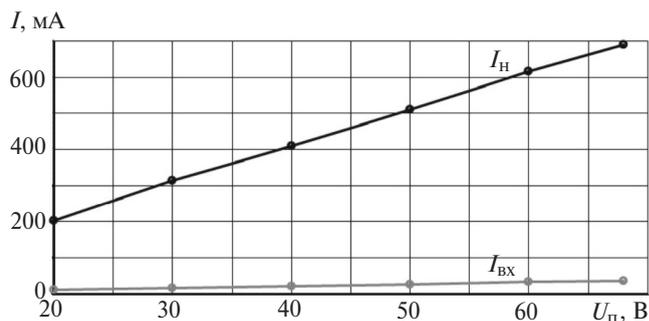


Рис. 7

Результаты, представленные в статье, свидетельствуют о достаточно точном совпадении экспериментальных данных и теоретических расчетов, что подтверждает корректность ранее предложенной математической модели катушки [6–8].

При изменении значения источника питания ($U_{\Pi} = \text{var}$) были получены входная вольт-амперная и нагрузочная характеристики катушки $I_{BX,K3}(U_{\Pi})$ и $I_N(U_{\Pi})$ (рис. 7).

Выводы. 1. В рассматриваемых случаях нелинейность катушки слабо проявляется ввиду небольших значений напряжения источника питания и наличия немагнитного зазора в магнитопроводе.

2. Катушки могут быть эффективно применены не только в качестве устройств индукционного нагрева, фильтрокомпенсирующих устройств, токоограничивающих устройств и индуктивно-емкостных преобразователей, но и в качестве трансформаторов.

3. Дальнейший интерес представляет исследование катушки при подключении произвольной нагрузки (активной, реактивной и комплексной) и при несимметричном подключении источника питания.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 17-08-00842 А.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Демирчян К.С., Гусев Г.Г. Синтез схем замещения катушки индуктивности с самокомпенсацией реактивной мощности. – Изв. АН СССР. 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.... докт. техн. наук. Алматы: Алматинский институт энергетики и связи, 2007, 41 с.
4. Захарова Е.И., Ижикова А.Д., Захаров И.В., Утегулов Б.Б. Моделирование электрических катушек с самокомпенсацией реактивной мощности. – Изв. вузов. Физика, 2009, т. 52, № 12–2, с. 51–54.

5. Конесев С.Г., Кириллов Р.В., Хазиева Р.Т. Анализ энергетических и частотных характеристик многофункциональных интегрированных электромагнитных компонентов. — «Энергетические и электротехнические системы». Сб. научных трудов/Под ред. С.И. Лукьянова, Н.В. Швидченко, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, 2014, с. 65–75.

6. 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.

7. Бутырин П.А., Гусев Г.Г., Михеев Д.В., Сиренко В.В., Шакирзянов Ф.Н. Катушка-конденсатор для индуктивно-емкостного преобразователя. Материалы XXV Международ. конф. «Электромагнитное поле и материалы (фундаментальные физические исследования)». М.: ИНФРА-М, 2017, с. 751–761, ISBN 978-5-16-013673-8.

8. 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.

9. Пат. 128033 (РФ). Фильтрокомпенсирующее устройство/П.А. Бутырин, Г.Г. Гусев, В.В. Кужман, О.В. Толчеев. — БИ, 2013, № 13, 5 с.

10. Конесев С.Г., Хазиева Р.Т. Анализ стабилизационных свойств индуктивно-емкостных преобразователей при различных способах подключения гибридных электромагнитных элементов. — Электротехнические системы и комплексы, 2017, № 1(34), с. 49–55.

[06.06.2018]

А в т о р: Михеев Дмитрий Владимирович окончил Институт электротехники «НИУ «МЭИ» в 2014 г. В 2017 г. защитил кандидатскую диссертацию «Организационно-экономический механизм управления энергоэффективностью для обеспечения устойчивого развития промышленных предприятий» МГТУ «СТАНКИН». Аспирант, старший преподаватель кафедры Теоретических основ электротехники «НИУ «МЭИ».

Elektrichestvo, 2018, No. 9, pp. 52–55

DOI:10.24160/0013-5380-2018-9-52-55

Experimental Investigation of Coil-Capacitor Frequency Responses for Different Boundary Conditions

MIKHEYEV Dmitry V. (National Research University «MPEI», Moscow, Russia) — Senior lecturer of the Department, Post-graduate student

The article presents the results from experimental investigations of a coil-capacitor (also known as katkon), which is a new component of electric circuits, under no-load and short-circuit conditions. The article is of scientific (from the viewpoint of the electric circuit theory) and practical interest due to the possibility of using katkons in harmonic filtering and reactive power compensation devices, in short-circuit current limiting devices, in inductive-capacitive converters, and other electrical devices for making them more compact and light. The katkon physical model parameters are given, data on the laboratory equipment are presented, and the experimental frequency responses, volt-ampere and loading characteristics are constructed. The results from comparison of the experimental and theoretical dependences make it possible to estimate the adequacy and correctness of the proposed mathematical model. The course of experimental investigations is described in detail, for carrying out of which well-known methods were used. The experimental data do not contradict the commonly adopted theoretical statements or study results carried out by leading Russian and foreign specialists.

Key words: coil-capacitor, physical model, experiment, frequency responses, resonance

REFERENCES

1. Demirchan K.C., Gusev G.G. *Izv. AN SSSR. Energetika i transport — in Russ. (News of the USSR Academy of Sciences Energetics and Transport)*, 1987, No. 2, pp. 3–10.

2. Volkov I.V., Zakrevskiy S.I. *Elektrichestvo — in Russ. (Electricity)*, 1984, No. 10, pp. 40–43.

3. Zakharov I.V. *Razvitiye teorii, razrabotka metodov i sredstv povysheniya effektivnosti induktorov s samokompensatsiyey ewaktivnoi moshchnosti: Avtorf. Diss.... d-ra tekhn. nauk (Development of the theory, development of methods and means for increasing the efficiency of inductors with self-compensation of reactive power: Author s abstract. Diss.... Dr. Sci. (Eng.)).* Almaty: Almatinskii Institute Energetiki i svyazi, 2007, 41 p.

4. Zakharova Ye.I., Izhikova A.D., Zakharov I.V., Utegutov B.B. *Izv. vuzov. Fizika — in Russ. (News of higher education institutions. Physics)*, 2009, vol. 52, No. 12–2, pp. 51–54.

5. Konesev S.G., Kirillov R.V., Khaziyeva R.T. *Sb. nauchnykh trudov «Energeticheskiye i elektrotekhnicheskiye sistemy»/Pod. Red. S.I. Luk'yanova, N.V. Shvidchenko (The Collection «Power and electrical systems/Edit by S.I. Luk'yanov, N.V. Shvidchenko).* Magnitogorsk State Technical University named G.I. Moscow, 2014, pp. 65–75.

6. Butyrin P.A., Gusev G.G., Kuzhman V.V., Mikheyev D.V., Shakirzyanov F.N. *Vestnik MEI — in Russ. (Bulletin of MPEI)*, 2015, No. 5, pp. 79–84.

7. Butyrin P.A., Gusev G.G., Mikheyev D.V., Sirenko V.V., Shakirzyanov F.N. *Materialy XXV Mezhdunarod. konf. «Elektromagnitnoe pole i materialy (Fundamental'nye fizicheskiye issledovaniya)» — in Russ. (Proc. of XXV Intern. conf. «Electromagnetic field and materials) (Fundamental physical research)*. Moscow, INFRA-M, 2017, pp. 751–761, ISBN 978-5-16-03673-8.

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

9. Pat. RF No. 128033. *Fil'trokompensiruyushcheye ustroystvo (Pat. Of the Russian Federation No. 128033. Filter-compensating device)/P.A. Butyrin, G.G. Gusev, V.V. Kuzhman, O.V. Tolcheyev. Bulletin of inventions*, 2013, No. 13.

10. Konesev S.G., Khaziyeva R.T. *Elektrotekhnicheskiye sistemy i komplekсы — in Russ. (Electrical Systems and Complexes)*, 2017, No. 1(34), pp. 49–55.