

Торайғыров университетінің хабаршысы
ҒЫЛЫМИ ЖУРНАЛЫ

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ
Вестник Торайғыров университета

Торайғыров университетінің ХАБАРШЫСЫ

Энергетикалық сериясы
1997 жылдан бастап шығады



ВЕСТНИК Торайғыров университета

Энергетическая серия
Издается с 1997 года

ISSN 2710-3420

№ 3 (2023)

ПАВЛОДАР

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ
Вестник Торайгыров университета

Энергетическая серия
выходит 4 раза в год

СВИДЕТЕЛЬСТВО

о постановке на переучет периодического печатного издания,
информационного агентства и сетевого издания

№ 14310-Ж

выдано

Министерство информации и общественного развития
Республики Казахстан

Тематическая направленность

публикация материалов в области электроэнергетики,
электротехнологии, автоматизации, автоматизированных и
информационных систем, электромеханики и теплоэнергетики

Подписной индекс – 76136

<https://doi.org/10.48081/YBCY7199>

Бас редакторы – главный редактор

Кислов А. П.
к.т.н., доцент

Заместитель главного редактора

Талипов О. М., *доктор PhD*

Ответственный секретарь

Калтаев А.Г., *доктор PhD*

Редакция алқасы – Редакционная коллегия

Клецель М. Я., *д.т.н., профессор*
Новожилов А. Н., *д.т.н., профессор*
Никитин К. И., *д.т.н., профессор (Россия)*
Никифоров А. С., *д.т.н., профессор*
Новожилов Т. А., *д.т.н., профессор*
Алиферов А.И., *д.т.н., профессор (Россия)*
Кошеков К.Т., *д.т.н., профессор*
Приходько Е.В., *к.т.н., профессор*
Оспанова Н. Н., *к.п.н., доцент*
Нефтисов А. В., *доктор PhD*
Омарова А.Р., *технический редактор*

За достоверность материалов и рекламы ответственность несут авторы и рекламодатели
Редакция оставляет за собой право на отклонение материалов
При использовании материалов журнала ссылка на «Вестник Торайгыров университета» обязательна

<https://doi.org/10.48081/DRVK7952>***Н. Ю. Колесниченко¹, С. Ф. Крутоус²**^{1,2}Екибастузский инженерно-технический институт

имени академика К. Сатпаева, Республика Казахстан, г. Екибастуз

e-mail : kolosnichenko-n-yu@eiti.edu.kz

ИССЛЕДОВАНИЕ ЯВЛЕНИЯ ФЕРРОРЕЗОНАНСА

В статье изложены понятия о феррорезонансной цепи, о причинах возникновения феррорезонансного явления происходящего в электрической сети. Исследованы электрические цепи, в которых последовательно подключены катушка содержащая ферромагнитный сердечник, конденсатор. Эти испытания проведены с помощью лабораторного комплекса «Теория электрических цепей», а также представлено описание этих устройств блочно-модульного типа. При проведении расчетов по напряжению и току устоявшегося переходящего режима в электрической цепи использован метод эквивалентных синусоид. Составлена схема замещения исследуемой цепи, показаны векторные диаграммы рассматриваемой электрической цепи, характеристики в нелинейной цепи с указанием на графиках зависимости. Представлены экспериментальные вольтамперные характеристики электрической цепи при увеличении и при уменьшении напряжения, выполнен расчет реактивного сопротивления, с последующей установкой закороченной перемычки в схеме участка электрической цепи с конденсатором. Используя экспериментальную характеристику катушки индуктивности и расчетную зависимость тока от напряжения высчитаны зависимости по формулам. И в завершении на одном поле графика построены экспериментальные вольтамперные характеристики цепи (при возрастании и убывании) и рассчитанная зависимость тока от напряжения. Исследованы и сделаны выводы по результатам проделанных измерений.

Ключевые слова: явление феррорезонанса, катушка индуктивности, ферромагнитный сердечник, электрическая цепь, схемы замещения, ток, напряжение.

Введение

Большое внимание представляет явление феррорезонанса, зачастую применяемое при разработке многочисленных приборов автоматики, а также в установке феррорезонансных стабилизаторов напряжения. Феррорезонансной цепью называют, цепь, состоящей из нелинейной катушки индуктивности с ферромагнитным сердечником и конденсатора.

Возникновение феррорезонансного явления происходит в электрической сети при оперативном переключении, при неполнофазном включении, при перемежающейся дуговой замыкании на землю в момент взаимодействия нелинейной индуктивности намагничивания магнитопровода трансформатора с ёмкостью электроустановок электрической сети. При прохождении феррорезонанса появляется продолжительное перенапряжение на шине распределительного устройства, небезопасное для разрядника, ограничителя перенапряжения, а также перегрузка по току в обмотках электромагнитного трансформатора, под воздействием которого происходит повреждение изоляции и возникновение витковых замыканий, что влечет к взрыву трансформатора и пожарному очагу в распределительных устройствах электростанций и подстанций [1,2].

В нашем государстве вопросу повреждаемости электрооборудования в электрических сетях согласно обстоятельству феррорезонансного явления уделяется интерес со времен прошлого столетия. Причинами феррорезонансного явления послужило повышение нагрузок потребителей, обусловившее строительство и увеличение существующих электрических распределительных сетей, в которых возможно возникновение режимов работы, приводящих к существованию феррорезонансных явлений [3-5].

В зарубежных странах этой важной проблеме по повреждению электрооборудования в электрической сети из-за феррорезонансного явления подтверждено разработками, проведенные в США, Канаде, Франции: Soudack A.C., Marti J.R., Mozzaffari S., Henschel S. [6,7].

Материалы и методы

Исследования электрической цепи, в которых последовательно подключены катушка содержащая ферромагнитный сердечник, конденсатор проводились с помощью лабораторного комплекса «Теория электрических цепей». Источником синусоидального напряжения частотой $f=50$ Гц является блок «Функциональный генератор». Необходимые параметры для измерения электрической цепи расположены в блоке «Измеритель фазы». Катушка с ферромагнитным сердечником находится в блоке «Нелинейные элементы», а конденсатор - «Реактивные элементы».

При расчетах напряжений и токов установившегося периодического режима в электрической цепи используем метод эквивалентных синусоид.

Пренебрегая потоками рассеяния, примем схему замещения катушки в виде, показанном на рисунке 1 [8].

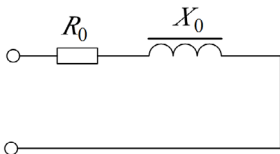


Рисунок 1– Схема замещения катушки

Тогда, схема замещения исследуемой цепи примет вид, показанный на рисунке 2.

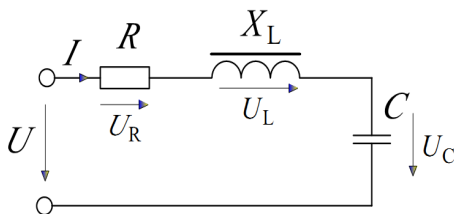


Рисунок 2– Схема замещения исследуемой цепи

Определим реактивные сопротивления катушки в соответствии принятому допущению:

$$X_L(I) = U_L(I)/I. \quad (1)$$

Согласно рисунку 3 взаимосвязь $U_L(I)$ представляет нелинейную функцию тока I . Тогда зависимость $X_L(I)$ равным образом иллюстрирует нелинейную функцию тока.

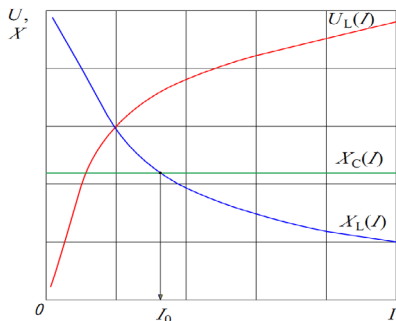


Рисунок 3 – Характеристики в нелинейной цепи

Изменяя входное напряжение, имеется возможность добиться тока $I=I_0$, при котором $X_L(I_0)=X_C(I_0)$. В цепи возникает резонанс. В отличие от линейной цепи, состояние резонанса достигается изменением величины приложенного напряжения. Это явление называется феррорезонансом [8].

На рисунке 4 показана векторная диаграмма цепи.

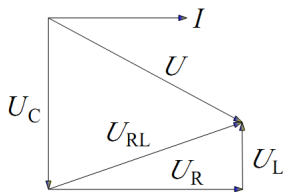


Рисунок 4 – Векторная диаграмма цепи

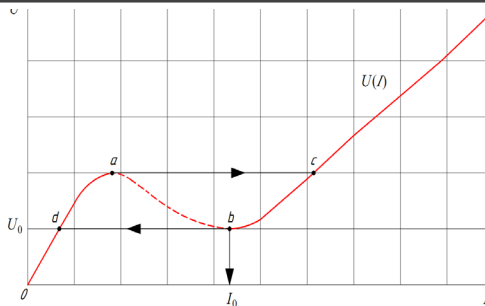
На основе этой диаграммы получим соотношения, связывающие токи и напряжения исследуемой цепи:

$$U_L(I)=\sqrt{(I \cdot R)^2-(U_{RL}(I))^2}, \tag{2}$$

$$U_{LC}(I)=|U_L(I)-I X_C|, \tag{3}$$

$$U(I)=\sqrt{(U_{LC}(I))^2-(I \cdot R)^2}. \tag{4}$$

На рисунке 5 представлен график взаимосвязи $U(I)$.

Рисунок 5 – График зависимости $U(I)$

Промежуток ab кривой $U(I)$ имеет отрицательное дифференциальное сопротивление, в результате чего считается неустойчивым. Когда изменяют, входное напряжение появляются в виде скачков перемены тока от точек: a к c или b к d . Режиму феррорезонанса будет соответствовать точка b , при этом входное активное сопротивление цепи $R=U_0/I_0$ [8].

Схема исследуемой цепи показана на рисунке 6. С помощью регулятора «Частота» модуля «Функциональный генератор», получим значение частоты $f=50$ Гц. Выставим ручкой «Амплитуда» входное напряжение $U=0$ В. В модуле «Реактивные элементы» переключим на конденсаторе ёмкость $C=69$ мкФ.

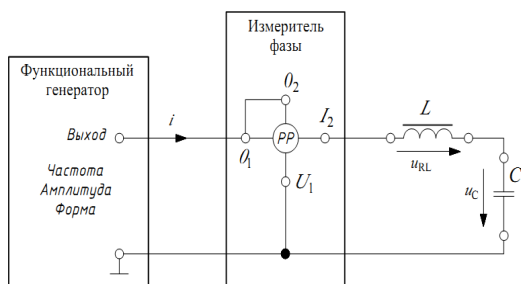


Рисунок 6 – Схема исследуемой цепи

Экспериментальные вольтамперные характеристики цепи при увеличении и при уменьшении напряжения представлены в таблице 1.

Таблица 1– Результаты измерений

При увеличении напряжения								
$I_1, \text{мА}$	0	20	30	40	53	61	226	255
$U_1, \text{В}$	0	0,8	1,9	2,8	3,4	3,6	3,8	4,3
При уменьшении напряжения								
$I_2, \text{мА}$	245	228	212	200	182	50	41	0
$U_2, \text{В}$	4,1	3,8	3,6	3,4	3,3	3,2	2,8	0

Выполним расчет реактивного сопротивления по формуле:

$$X_C = 1 / (2 \pi \cdot f \cdot C), \quad (5)$$

$$X_C = 1 / (2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 69 \cdot 10^{-6}) = 46,155 \text{ Ом.}$$

Закоротим в схеме участок цепи с конденсатором. Плавно увеличивая величину приложенного напряжения, получим зависимости $U_{RL}(I)$, $P_{RL}(I)$, которые представлены в таблице 2.

Таблица 2- Результаты измерений

$I, \text{мА}$	0	21	41	61	71	82	98	129	166	229
$U_{RL}, \text{В}$	0	1,5	4	5,5	6,1	6,6	7,1	7,9	8,6	9,5
$P_{RL}, \text{Вт}$	0	0,01	0,09	0,16	0,19	0,22	0,26	0,33	0,41	0,55

Рассчитаем зависимость $R(I)$ по формуле:

$$R(I) = P_{RL} / (I)^2. \quad (6)$$

Результаты расчета запишем в таблицу 3.

Таблица 3- Результаты измерений

$I, \text{мА}$	0	21	41	61	71	82	98	129	166	229
$R, \text{Ом}$	0	22,7	53,5	42,9	37,7	32,7	27,1	19,8	14,9	10,5

Используя экспериментальную характеристику катушки URL(I) и расчетную зависимость R(I) высчитаем зависимости по формулам (2-4). Результаты расчета приведены в таблице 4.

Таблица 4- Результаты расчетов

$I, \text{мА}$	0	21	41	61	71	82	98	129	166	229
----------------	---	----	----	----	----	----	----	-----	-----	-----

$U_1, \text{В}$	0	1,42	3,35	4,83	5,48	6,03	6,58	7,47	8,23	9,19
$U_{1c}, \text{В}$	0	0,45	1,45	2,02	2,2	2,25	2,06	1,52	0,58	1,38
$U, \text{В}$	0	0,66	2,63	3,31	3,47	3,5	3,36	2,98	2,54	2,77

На одном поле графика построим экспериментальную $U_1(I_1)$ (при возрастании), $U_2(I_2)$ (при убывании) по данным таблицы 1 и рассчитанную $U(I)$ зависимость по данным таблицы 4 согласно рисунку 7.

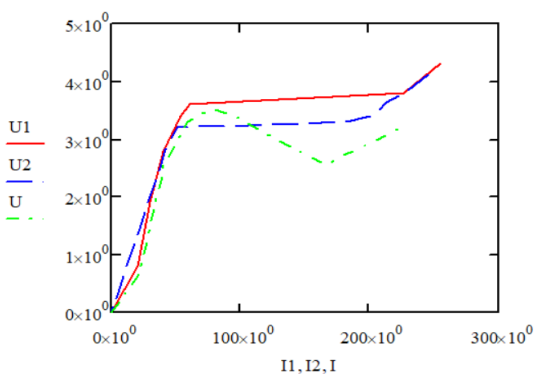


Рисунок 7 – Графики зависимости

Результаты и обсуждение

Как мы видим из табличных данных, в нелинейной электрической цепи, содержащей катушку с ферромагнитным сердечником, наблюдается резко выраженная зависимость индуктивности этой катушки от значения напряжения в ней.

Можно судить по построенным экспериментальным вольтамперным характеристикам при увеличении и уменьшении напряжения, где феррорезонансные явления иллюстрируются в виде скачкообразного перехода из состояния мощного насыщения катушки индуктивности в малонасыщенное состояние, а также в обратном порядке. А при рассчитанной зависимости $U(I)$ можно наблюдать форму технической кривой намагничивания материала сердечника.

Выводы

Таким образом, теоретически и экспериментально исследованы основные закономерности явления феррорезонанса. Используя свойства таких цепей, как показано в работе, можно создать ещё более оригинальные схемы стабилизаторов тока, не критичные в широком диапазоне, ни к

изменениям сопротивления нагрузки, ни к отклонениям питающего напряжения.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 **Евсюков, А. А.** Электротехника : Учеб. пособие для студентов физ. спец. пед. ин-тов. – М. : Просвещение, 1979. – 248 с.
- 2 **Зевеке, Г. В., Ионкин, П. А., Нетушил, А. В., Страхов, С. В.** Основы теории цепей. – М. : Энергоатомиздат, 1989. – 528 с.
- 3 **Сиротинский, Л. И.** Перенапряжения и защита от перенапряжений в электрических установках. – М., Л. : Госэнергоиздат, 1932. – 463 с.
- 4 **Кадомская, К. П., Лавров, Ю. А., Рейхердт, А.** Перенапряжения в электрических сетях различного назначения и защита от них : Учебник. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2004. – 319 с.
- 5 **Лотрейчук, Е. А.** Теоретические основы электротехники : Учебник. – М.: ФОРУМ: ИНФРА–М, 2006. – 316 с.
- 6 **Soudack, A. C., Marti, J. R.** Ferroresonance in Power Systems : Fundamental Solutions // IEE Proceedings-C. – 1991. – Vol.138. – No. 4. – P. 321–329.
- 7 **Mozzaffari, S., Henschel, S., Soudack, A.C.** Chaos in Power Transformers // BEE Proceedings-C. – 1995. – Vol.142. – No. 3. – P. 247–250.
- 8 **Непопалов, В. Н., Сафонов, В. И., Шулдяков, В. В.** Исследование электрических цепей : Методические указания к проведению лабораторных работ на стенде «Теория электрических цепей». Часть 2. – Челябинск : Учтех–Профи, 2018. – 64 с.
- 9 **Матвиенко В. А.** Основы теории цепей: учебное пособие для вузов. – Екатеринбург : УМЦ УПИ, 2016. – 162 с.
- 10 **Бессонов Л. А.** Нелинейные электрические цепи. – М. : Высшая школа, 1977. – 343 с.

REFERENCES

- 1 **Evsyukov, A. A.** Ehlektrotekhnika : Ucheb. posobie dlya studentov fiz. spec. ped. in-tov [Electrical engineering : Textbook for students of physical specialties of pedagogical universities]. – Moscow : Prosveshchenie, 1979. – 248 p.
- 2 **Zeveke, G. V., Ionkin, P. A., Netushil, A. V., Strakhov, C.V.** Osnovy teorii cepej [Fundamentals of circuit theory]. – Moscow : Energoatomizdat, 1989. – 528 p.

3 **Sirofinskiy, L. I.** Perenapryazheniya i zashchita ot perenapryazhenij v ehlektricheskikh ustanovkakh [Overvoltage and surge protection in electrical installations]. – Moscow, Leningrad : Gosenergoizdat, 1932. – 463 p.

4 **Kadomskaya, K. P., Lavrov, Yu. A. Rejkhherdt, A.** Perenapryazheniya v ehlektricheskikh setyakh razlichnogo naznacheniya i zashchita ot nikh : Uchebnik [Overvoltages in electrical networks for various purposes and protection against them : Textbook]. – Novosibirsk : Izd-vo NGTU, 2004. – 319 p.

5 **Lotrejkhuk, E. A.** Teoreticheskie osnovy ehlektrotekhniki : Uchebnik [Theoretical foundations of electrical engineering : Textbook]. – Moscow : FORUM : INFRA-M, 2006. – 316 p.

6 **Soudack, A. C., Marti, J. R.** Ferroresonance in Power Systems : Fundamental Solutions // IEE Proceedings-C. – 1991. – Vol.138. – No. 4. – P. 321–329.

7 **Mozzaffari, S., Henschel, S., Soudack, A.C.** Chaos in Power Transformers // BEE Proceedings-C. – 1995. – Vol.142. – No. 3. – P. 247–250.

8 **Nepopalov, V. N., Safonov, V. I., Shuldyakov, V. V.** Issledovanie ehlektricheskikh cepej : Metodicheskie ukazaniya k provedeniyu laboratornykh rabot na stende «Teoriya ehlektricheskikh cepej». Chast 2 [Study of electrical circuits: Guidelines for laboratory work at the stand “Theory of electrical circuits”. Part 2]. – Chelyabinsk : Uchtekh-Profi, 2018. – 64 p.

9 **Matvienko, V. A.** Osnovy teorii cepej: uchebnoe posobie dlya vuzov [Fundamentals of circuit theory: a textbook for universities]. – Ekaterinburg : UMC UPI, 2016. – 162 p.

10 **Bessonov, L. A.** Nelinejnye ehlektricheskie cepi [Nonlinear electrical circuits]. – Moscow : Vysshaya shkola, 1977. – 343 p.

Принято к изданию 18.09.23.

**Н. Ю. Колесниченко, С. Ф. Крутоус*
Академик Қ. Сәтбаев атындағы Екібастұз
инженерлік-техникалық институты
Қазақстан Республикасы, Екібастұз қ.
Басып шығаруға 18.09.23 қабылданды.

ФЕРРОРЕЗОНАНС ҚҰБЫЛЫСЫН ЗЕРТТЕУ

Мақалада феррорезонанстық тізбек туралы, электр желісінде болып жатқан феррорезонанстық құбылыстың себептері туралы түсініктер берілген. Тізбектей қосылған электр тізбектері зерттелді катушка құрамында ферромагниттік ядро, конденсатор бар. Бұл

сынақтар «Электр тізбектерінің теориясы» зертханалық кешенінің көмегімен жүргізілді, сондай-ақ осы блоктық-модульдік типтегі құрылғылардың сипаттамасы ұсынылды. Электр тізбегіндегі белгіленген ауысу режимінің кернеуі мен тогы бойынша есептеулер жүргізу кезінде эквивалентті синусоидалар әдісі қолданылды. Зерттелетін тізбекті ауыстыру схемасы жасалды, қарастырылып отырған электр тізбегінің векторлық диаграммалары, сызықтық емес тізбектегі сипаттамалар графиктерде тәуелділікті көрсете отырып көрсетілген. Кернеудің жоғарылауы мен төмендеуі кезінде электр тізбегінің эксперименттік вольтамперлік сипаттамалары ұсынылған, реактивтілік есептелген, содан кейін конденсаторы бар электр тізбегінің учаскесінің схемасында қысқа секіргіш орнатылған. Индуктордың эксперименттік сипаттамасын және токтың кернеуге есептелген тәуелділігін қолдана отырып, формулалар бойынша тәуелділіктер есептеледі. Соңында графиктің бір өрісінде тізбектің эксперименттік вольтамперлік сипаттамалары (осы және кему кезінде) және токтың кернеуге есептелген тәуелділігі салынған. Жүргізілген өлшеулер нәтижелері бойынша зерттеулер мен қорытындылар жасалды.

Кілтті сөздер: феррорезонанс құбылысы, индуктор, ферромагниттік ядро, электр тізбегі, ауыстыру тізбектері, ток, кернеу

*N. Yu. Kolesnichenko, S. F. Krutous
Akkademik K. Satpayev Ekibastuz
Institute of engineering and technology
Republic of Kazakhstan, Ekibastuz
Accepted for publication on 18.09.23

INVESTIGATION OF THE PHENOMENON OF FERRORESONANCE

The article describes the concepts of the ferroresonance circuit, the causes of the occurrence of the ferroresonance phenomenon occurring in the electrical network. Electrical circuits in which a coil containing a ferromagnetic core and a capacitor are connected in series are investigated. These tests were carried out using the laboratory complex "Theory of electrical circuits", and a description of these block-modular devices is also presented. When performing calculations on the voltage and current of the established transient mode in an electrical circuit, the method of equivalent

sinusoids was used. A replacement circuit of the circuit under study is drawn up, vector diagrams of the electrical circuit under consideration are shown, characteristics in a nonlinear circuit are indicated on the dependence graphs. Experimental current-voltage characteristics of an electric circuit with increasing and decreasing voltage are presented, the reactance is calculated, followed by the installation of a short-circuited jumper in the circuit section of an electric circuit with a capacitor. Using the experimental characteristic of the inductor and the calculated dependence of current on voltage, the dependences are calculated according to the formulas. And finally, experimental voltage characteristics of the circuit (with increasing and decreasing) and the calculated dependence of current on voltage are plotted on one field of the graph. The results of the measurements were investigated and conclusions were drawn.

Keywords: ferroresonance phenomenon, inductor, ferromagnetic core, electrical circuit, substitution circuits, current, voltage

Теруге 18.09.2023 ж. жіберілді. Басуға 29.09.2023 ж. қол қойылды.

Электронды баспа

29.9 Мб RAM

Шартты баспа табағы 22,2. Таралымы 300 дана. Бағасы келісім бойынша.

Компьютерде беттеген: А. К. Мыржикова

Корректор: А. Р. Омарова, Д. А. Кожас

Тапсырыс №4140

Сдано в набор 18.09.2023 г. Подписано в печать 29.09.2023 г.

Электронное издание

29.9 Мб RAM

Усл. печ. л. 22,2. Тираж 300 экз. Цена договорная.

Компьютерная верстка: А. К. Мыржикова

Корректор: А. Р. Омарова, Д. А. Кожас

Заказ № 4140

«Toraighyrov University» баспасынан басылып шығарылған

Торайғыров университеті

140008, Павлодар қ., Ломов к., 64, 137 каб.

«Toraighyrov University» баспасы

Торайғыров университеті

140008, Павлодар қ., Ломов к., 64, 137 каб.

67-36-69

E-mail: kereku@tou.edu.kz

www.vestnik-energy.tou.edu.kz