

УДК 621.313

DOI: 10.24160/1993-6982-2019-5-62-67

Влияние характеристик трансформатора на качество автоматического регулирования в системах электроснабжения

Н.Г. Баженов, О.А. Филина, Е.Ю. Озерова

Обоснована необходимость применения основных законов и правил теории автоматического управления по отношению к процессам, происходящим в классическом трансформаторе. Отмечено, что трансформаторы можно отнести к классу самонастраивающихся систем автоматического управления. Рассмотрен трансформатор, работающий на активную нагрузку. Приведены уравнения, описывающие происходящие процессы. При решении уравнений в качестве магнитной характеристики использована основная кривая намагничивания материала магнитопровода. Решение уравнений основано на линейной части кривой намагничивания с учетом того, что намагниченность зависит от материала сердечника. Решение уравнений проведено в форме преобразований по Лапласу, построение структурно-динамических схем — на основе теории автоматического управления. Показано, что совершенствование магнитопровода является способом обеспечения линейности нелинейных характеристик трансформатора, позволяющим улучшить его технические характеристики.

По надёжности электроснабжения правила устройства электроустановок (ПУЭ) выделяют потребителей первой, второй и третьей категорий, для которых определяется допустимое время перерыва электроснабжения и конструктивные особенности питающей сети: число независимых источников энергии и питающих линий. В случае эксплуатации сети в послеварийном режиме, отклонения показателей качества электроэнергии (ПКЭ) не должны превышать предельно-допустимых значений, существование которых не может быть выше 5% рабочего времени.

Система электроснабжения страны состоит из многочисленных трансформаторов, расположенных в разных регионах и связанных единой электрической сетью. Для электрических сетей общепромышленного назначения установлены допустимые отклонения напряжения в пределах $\pm 5\%$, максимальные — $\pm 10\%$. Меняются пределы измерений и набор дополнительных функций, таких как измерение сопротивления реактивных элементов, частоты. Пределы измерения по току и напряжению устанавливаются отдельно. В производственных условиях, заключение о соответствии качества электрической энергии требованиям ГОСТ 13109—97 можно сделать только по результатам недельного исследования электрической сети. Встречное регулирование баланса реактивной мощности широко применяется для управления режимом работы сети.

Ключевые слова: магнитный поток, кривая намагничивания, трансформатор, магнитопровод.

Для цитирования: Баженов Н.Г., Филина О.А., Озерова Е.Ю. Влияние характеристик трансформатора на качество автоматического регулирования в системах электроснабжения // Вестник МЭИ. 2019. № 5. С. 62—67. DOI: 10.24160/1993-6982-2019-5-62-67.

The Influence of Transformer Characteristics on the Automatic Closed Loop Control Quality in Electric Power Supply Systems

N.G. Vazhenov, O.A. Filina, E.Yu. Ozerova

The necessity of applying the basic laws and rules of the automatic control theory with respect to the processes that take place in a classical transformer is substantiated. It is noted that transformers can be referred to the class of self-tuned automatic control systems. A transformer operating on an active load is considered, and the equations describing the processes occurring in this system are presented.

In solving the equations, the magnetic material main magnetization curve was used as the magnetic characteristic. The solution of the equations is based on using the magnetization curve linear part, taking into account that the magnetization depends on the core material. The equations were solved in the form of Laplace transforms, and the structural-dynamic schemes were constructed using the automatic control theory. It is shown that improvement of the magnetic circuit is a method for obtaining linearity of the transformer nonlinear characteristics, due to which its performance is improved.

In terms of power supply reliability, the Russian Electrical Installations Code (PUE) distinguishes consumers of the first, second and third categories, for which the permissible time of power supply interruption and the power supply network design features are determined: the number of independent power supply sources and feed lines. In case of network operation in the post-emergency mode, the deviations of electric power quality indicators shall not exceed the maximum permissible values, the duration of which cannot be more than 5% of the operation time.

The country's power supply system includes many transformers, which are located in different regions and interconnected by a unified electrical network. For general-purpose electrical networks, the permissible and maximum voltage deviations equal to ± 5 and $\pm 10\%$, respectively, have been established. Changes take place in the measurement limits and in the set of additional functions, such as measurement of reactive component impedances and frequency. The current and voltage measurement limits are established individually. Under field conditions, the conclusion about the compliance of electric power quality with the requirements of GOST 13109-97 can only be drawn from the results of electrical network examination during a week. Counterload control of reactive power balance is also widely used to control the network operation mode.

Key words: magnetic flux, magnetization curve, transformer, magnetic core.

For citation: Bazhenov N.G., Filina O.A., Ozerova E.Yu. The Influence of Transformer Characteristics on the Automatic Closed Loop Control Quality in Electric Power Supply Systems. Bulletin of MPEI. 2019;5:62—67. (in Russian). DOI: 10.24160/1993-6982-2019-5-62-67.

Рассмотрим случай, когда электрическая цепь (ЭЦ) (рисунок) подключена к источнику переменного напряжения (тока) [1, 2].

Обычно уравнение процессов в подобной системе представлено в виде:

$$L \frac{di}{dt} + iD = U_m \sin \omega t, \quad (1)$$

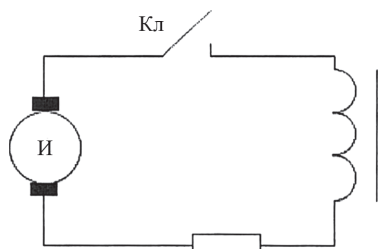
где $i(t)$, $u(t) = U_m \sin \omega t$ — переменный ток и напряжение; U_m — амплитудное значение напряжения; $\omega = 2\pi f$ — угловая частота вынужденных колебаний; f — частота вынужденных колебаний, Гц.

Уравнение (1) записано в предположении, что $L = \text{const}$. Его решение (табличное, или по справочнику [3, 4]) приведем в форме:

$$i(t) = \frac{U_m}{R} \left[\frac{e^{-\omega_0 t}}{1 + \omega_0^2 T_0^2} + \frac{1}{\sqrt{1 + \omega_0^2 T_0^2}} \sin(\omega t - \varphi) \right], \quad (2)$$

где $\omega_0 = R/L$ — частота собственных колебаний системы; $T_0 = 1/\omega_0$ — время системы в целом; φ — смещение по фазе тока по отношению к напряжению.

Оно, как и прежде, определяется соотношением $\varphi = \arctg \frac{R}{L\omega_0}$, тогда



Электрическая схема лабораторной установки М. Фарадея

$$\frac{di}{dt} = \frac{U_m}{R} \left[\frac{-\omega_0 e^{-\omega_0 t}}{1 + \omega_0^2 T_0^2} + \frac{\omega}{\sqrt{1 + \omega_0^2 T_0^2}} \cos(\omega t - \varphi) \right]. \quad (3)$$

В настоящее время решение уравнения записывают в виде (2), (3).

Согласно правилам теории автоматического управления (ТАУ), для систем, описываемых уравнениями вида (1) существуют соотношения параметров, при которых частоты собственных и вынужденных колебаний оказываются равными, т. е. $\omega_0 = \omega$. В этом случае отмечается автоколебательный режим работы, т. е. наложение собственных и вынужденных частот колебаний. Для выполнения данного условия необходимо повысить значение омического сопротивления, что в электротехнике не всегда приемлемо. В электронно-вычислительных машинах (ЭВМ) наоборот, подобные схемы используются довольно часто.

При выполнении указанных условий решения (1), (2) по форме существенно упрощаются:

$$i(t) = \frac{U_m}{R} \left[\frac{1}{2} e^{-\omega t} + \frac{1}{\sqrt{2}} \sin(\omega t - 45^\circ) \right]; \quad (4)$$

$$\frac{di}{dt} = \frac{U_m}{R} \omega_0 \left[\left[-\frac{1}{2} e^{-\omega_0 t} + \frac{1}{\sqrt{2}\omega_0} \cos(\omega t - 45^\circ) \right] \right]. \quad (5)$$

Приведенные решения для усложненного варианта схемы ничего нового не несут. Эффект последствия по Фарадею и скачки тока при подключении системы к источнику напряжения не просматриваются, хотя в процессе экспериментальных исследований отмечаются [5, 6].

Для переменного тока, так же как и для постоянного, работает функция смещения. Отличие состоит лишь в том, что скорости изменения тока и индуктивности

(при переменном токе) в установившемся режиме не равны нулю. В связи с этим сами величины (индуктивность и ток) и их скорости изменения оказываются связанными на полупериоде вынужденных колебаний. Поэтому запишем выражения для индуктивности и скорости её изменения.

Если приложенное к цепи напряжение меняется по закону $u(t) = U_m \sin \omega t$, то согласно закону индукции скорость изменения индуктивности (поскольку она оказывает противодействие напряжению), выражения для тока и скорости его изменения в переходном процессе выглядят как:

$$\frac{dL_x}{d\tau} = -L_0 \omega_0 \sin \omega_0 \tau, \quad \text{где } 0 \leq \omega_0 \tau \leq 90^\circ; \quad (6)$$

$$L_x = -L_0 \omega_0 \int_0^\tau \sin \omega_0 \tau d\tau = L_0 (\cos \omega_0 \tau - 1), \quad 0 \leq \omega_0 \tau \leq \pi; \quad (7)$$

$$I(\tau) = I_m (1 - \cos \omega_0 \tau); \quad di/d\tau = I_m \omega_0 \sin \omega_0 \tau. \quad (8)$$

Уравнения (6) — (8) работают с момента времени подключения электромагнитной (ЭМ) системы к источнику напряжения.

Например, при $\tau = 0$, ток и индуктивность, а также их скорости изменения равны нулю. При $\omega_0 \tau = 90^\circ$ скорости изменения величин имеют наибольшее, а сами величины принимают установившиеся значения. Сравнивая данные решения с решением для ЭМ систем постоянного тока, нетрудно видеть их сходство по форме записи, когда в ЭМ системах постоянного тока вводится смещение ($+45^\circ$) [7, 8].

Сравнивая выражения (4), (5) (8), описывающие одни и те же величины, можно увидеть существенные различия по форме их записи. Если (4), (5) переписать в общем виде:

$$i(\tau) = \frac{U_m}{R} [e^{-\omega t} + \sin(\omega \tau - \varphi)];$$

$$\frac{di}{d\tau} = \frac{U_m}{R} [[-\omega_0 e^{-\omega_0 t} \omega \cos(\omega \tau - \varphi)]],$$

то указанная связь просматривается достаточно чётко. Во-первых, среднее значение переходной составляющей $e^{-\omega_0 t}$ в пределах $0 \leq t \leq \infty$ равно единице. Во-вторых, отмечается некоторая особенность, связанная с присутствием частот ω и ω_0 , но указанная связь может быть выражена через смещение по фазе, т. е. φ .

Согласно (6) индуктивность и скорость её изменения (параметры, которые определяют намагниченность МП и должны быть зависимы, прежде всего, от низкочастотной составляющей ω_0) реально оказываются зависимыми и от высокочастотной составляющей ω вынужденного процесса.

Иными словами, в ЭМ системах переменного тока наблюдаются низко- и высокочастотные процессы. Исходя из приведённых решений, наложение частот не отмечено. Следовательно, можно предположить, что за счёт переменности смещения фазы тока по отношению

к напряжению в переходном процессе происходит изменение частот, т. е. преобразование одной частоты в другую [5].

Экспериментальные исследования показали, что в установившемся процессе колебания в системе происходят на вынужденной частоте ω .

В этой связи вернёмся к анализу выражений (8) и перепишем их применительно для переходного процесса:

$$i(\tau) = \frac{U}{R} [e^{-\omega t} + \sin(\omega \tau - \varphi)];$$

$$\frac{di}{d\tau} = \frac{U}{R} [[-\omega_0 e^{-\omega_0 t} + \omega \cos(\omega \tau - \varphi)]], \quad (9)$$

где $U = \frac{U_m}{\sqrt{2}}$ — действующее значение переменного напряжения.

Введение U объясняется тем, что в обоих выражениях имеются низкочастотные, связанные с ω_0 , и высокочастотные ω члены. В переходном процессе переход от низкочастотной составляющей к высокочастотной должен быть непрерывным. В инерционных системах скачки невозможны. Чтобы не допустить этого (в математическом плане) следует от амплитудного значения напряжения перейти к действующему значению, что и было сделано.

Согласно (6), (8) при $\tau = 0$ ток и скорость его изменения также равны нулю. Тогда из (9) следует, что $1 + \sin(-\varphi) = 0$; $-\omega_0 + \omega \cos \varphi = 0$, откуда $\varphi = \pi/2$; $\varphi = \arccos \omega_0/\omega$. При собственной частоте, приближающейся к вынужденной частоте, т. е. $\omega_0 \rightarrow \omega$, смещение по фазе стремится к нулю. Следовательно, смещение по фазе в переходном процессе действительно является переменной величиной $0 \leq \varphi \leq 90^\circ$. В начале переходного процесса $\varphi = 90^\circ$, по его окончанию, когда $\omega_0 \rightarrow \omega$, смещение по фазе стремится к нулю [9, 10].

Поскольку угловая частота ω вынужденного процесса величина постоянная, то в переходном процессе может меняться только собственная частота ω_0 .

Таким образом, в интервале времени переходного процесса происходит изменение фазы смещения в пределах $0 \leq \omega_0 \tau \leq \varphi$, где $\varphi = 90^\circ$. За счёт изменения φ частоты вынужденных и собственных колебаний выравниваются.

Поскольку собственная частота всегда больше вынужденной частоты, знак начальной фазы смещения зависит от начальной фазы вынужденных колебаний.

Другими словами, если смещение по фазе меняется в интервале $0 \leq \varphi \leq 90^\circ$, то собственная частота ω_0 — от нуля до значения ω . Это означает, что по окончании переходного процесса угол смещения по фазе между током и напряжением равен нулю, а собственная частота ω_0 оказывается равной вынужденной частоте ω .

Согласно равенствам (9), при $\omega_0 \tau = 0$ и $\varphi = 90^\circ$ ток равен нулю, а $di/d\tau = U/R [[-\omega_0]]$. Подставив $\omega_0 \tau = 0$ в (8), имеем $i(\tau) = 0$; $di/d\tau = 0$.

Сравнив полученные результаты, можно увидеть, что по токам зависимости (8) и (9) совпадают, но расходятся по скоростям изменения. Другими словами, по аналогии с ЭМ системой постоянного тока единой системы отчёта по времени пока установить не удаётся [11, 12]. Вместе с тем, при анализе выражений (9) не принималось во внимание начальное смещение по фазе $\varphi = 90^\circ$ и $\omega = 0$, поскольку тогда уравнения (9) примут вид:

$$(\tau) = \frac{U}{R} \left[\left[e^{-\omega_0 \tau} - \cos(\omega_0 \tau) \right] \right];$$

$$\frac{di}{d\tau} = \frac{U}{R} \left[\left[-\omega \sin \omega_0 \tau \right] \right].$$

При $\omega_0 \tau = 0$ и ток, и скорость его изменения равны нулю. Таким образом, в отличии от ЭМ системы постоянного тока в рассматриваемом случае единое время отсчёта, т. е. $\tau = t$, где $0 \leq t \leq \infty$, устанавливается автоматически. Тем не менее, правило, сформулированное для постоянного тока, каким-либо образом должно проявить себя и при переменном токе.

Используя методику решения задачи применительно для постоянного тока, составим уравнение баланса напряжений $di/dt = dU/dt$. Поскольку ток и индуктивность связаны между собой единым законом изменения, то перепишем указанное выражение в форме $\frac{dLi}{d\tau} = \frac{dU}{dt} dt$, или, подставив значения производных, получим:

$$L_m I_m \left[\omega^2 \sin^2 \omega t \right] = U_m \sin \omega t dt;$$

$$L_m I_m dt = \frac{U_m}{\omega^2} \frac{dt}{\sin \omega t}.$$

Проинтегрировать последнее выражение в пределах $0 \leq \omega t \leq \pi$ не представляется возможным. Подобный интеграл существует только в пределах $0 \leq \omega t \leq 90^\circ$. Это означает, что в указанном пределе формируется постоянная составляющая магнитного потока, которая открывает путь току в витках катушки [13, 14]. Чтобы исключить из решения указанный момент, следует вернуться к анализу выражения (7), т. е. $L_x = -L_0(1 - \cos \omega t)$. В нем постоянная составляющая отражает начальную намагнитченность МП, когда открывается путь для тока по виткам катушки. Ещё в течение оставшегося времени переходного процесса, т. е. $0 \leq \omega t \leq 90^\circ$, оно будет интегрироваться, но после этого получит установившееся значение (L_0), которое хранится до момента отключения ЭМ системы от источника энергии. Поэтому уравнение баланса напряжения на момент времени установившегося процесса выглядит как:

$$L_0 \frac{di}{dt} = U_m \sin \omega t;$$

$$di = \frac{U_m}{L_0} \sin \omega t dt.$$

Интегрируя последнее равенство от нуля до t , получим:

$$i(t) = \frac{U_m}{L_0 \omega} [1 - \cos \omega t]. \quad (10)$$

При сравнении выражений (8) и (10) можно видеть их полную аналогию, хотя они записаны в разных системах отсчёта по времени.

Таким образом, анализируя методики решения задач для ЭМ систем постоянного и переменного токов, нетрудно заметить, что они аналогичны, достаточно просты и позволяют раскрыть физику процессов.

Авторы настоящей статьи не ставили перед собой цели разработки методики решения задач, они хотели лишь разобраться в физической сущности процессов, происходящих в ЭМ системах, и связать физику с математикой [15].

В этой связи нет оснований для отказа от традиционных методов решений уравнений, необходимо только понять физическую сторону процессов.

Ясно, что индуктивность — переменная величина, она однозначна с током и по кривой намагнитченности с материалом МП, поэтому в любой ЭМ системе необходимо подбирать соответствующий материал МП и рассчитывать значение тока. В одних случаях понадобится вариант, когда в пределах изменения тока обеспечивалась бы линейность, т. е. $L_0 = K_0 I$, однако возможны и другие варианты, например $L_0 \text{const}$.

Приведем выражение для переменного тока:

$$L_0 \frac{di}{dt} + 1 \left(R - \frac{dL}{dt} \right) = U_m \sin \omega t, \quad (11)$$

где L_0 — расчётное (постоянное) значение индуктивности; $dL/dt = \omega_0 L$ — динамическое индуктивное сопротивление.

В (11) выполняется функции самонастройки системы. За счёт изменения динамического индуктивного сопротивления в переходном процессе собственная частота принимает значение вынужденной, т. е. $(\omega_0 \rightarrow \omega)$.

При равенстве $R = \omega_0 L_0$ выражение (11) примет вид $di = \frac{U_m}{L_0} \sin \omega t dt$, откуда:

$$i(t) = \frac{U_m}{L_0 \omega} [1 - \cos \omega t] = \frac{U_m}{L_0 \omega} \left[1 + \sin \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right) \right].$$

Полученное решение соответствует (8) и удовлетворяет условиям оптимальности.

Закключение

Начальная намагнитченность МП (импульсом магнитного потока) и последующее интегрирование в переходном процессе намагнитченности свидетельствуют о том, что ЭМ система переменного тока обладает выразительными (демодуляционными) и суммирующими свойствами.

Получены классические решения с учётом оптимальности процесса в более простом варианте.

Исходя из проведенных исследований, можно сделать следующие выводы:

— в ЭМ системах переменного тока так же, как в ЭМ системах постоянного тока, индуктивность и скорость её изменения в переходном процессе имеют переменное значение;

— для ЭМ систем характерно общее правило, что реакцией систем на подключение их к источникам напряжения являются появление импульсов тока и ин-

дуктивности, поскольку они формируют начальное намагничивание магнитного провода, открывая дорогу току по виткам катушки;

— в ЭМ системах переменного (синусоидального) тока при выполнении условия $\omega_0 \tau = 90^\circ$ отмечается оптимальный переходной процесс, где $\omega_0 = R/L_0$;

— в ЭМ системах, независимо от вида тока, протекающего по виткам обмотки (катушки), всегда присутствуют постоянные составляющие тока и индуктивности [16, 17].

Литература

1. Матвеев В.А., Подчерзцев В.П., Фатеев В.В. Гиропические стабилизаторы на динамически настраиваемых вибрационных гироскопах. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014.
2. Валеев И.М. Современные проблемы электроэнергетики: краткий курс лекций. Казань: Изд-во КГЭУ, 2008.
3. Ушаков В.Я. История и современные проблемы электроэнергетики и высоковольтной электрофизики. Томск: Изд-во Томского политехн. ун-та, 2010.
4. Баженов Н.Г., Филина О.А., Валеева П.Н., Ермакова Е.Ю. Интерпретация классического трансформатора как системы автоматического управления // Вестник Астраханского гос. техн. ун-та. Серия «Управление, вычислительная техника и информатика». 2017. № 2. С. 136—144.
5. Баженов Н.Г., Филина О.А., Ермакова Е.Ю. Принцип определения ориентирных направлений с помощью вибрационных гироскопов // Вестник гос. ун-та морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова. 2017. Т. 9. № 5. С. 1104—1112.
6. Баженов Н.Г., Филина О.А. Анализ работы гиросtabilизатора с ротором, имеющим перемещающиеся массы // Известия высших учебных заведений. Серия «Проблемы энергетики». 2012. № 3—4. С. 135—138.
7. Баженов Н.Г., Филина О.А., Озерова Е.А. Использование одноосного гиросtabilизатора для системы гироскопической стабилизации в автономных системах управления // Вестник Московского авиационного института. 2018. Т. 25. № 4. С. 202—206.
8. ГОСТ 32144—2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения.
9. Леготкина Т.С., Данилова С.А. Методы идентификации систем: Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2008.
10. Дорофеев В.В., Макаров А.А. Активно-адаптивная сеть — новое качество ЕЭС России // Энергоэксперт. 2009. № 4. С. 28—34.
11. Александров Д.С. Надёжность и качество электроснабжения предприятий. Ульяновск, Изд-во УлГТУ, 2010.
12. Карташев И.И. и др. Управление качеством электроэнергии. М.: Издат. дом МЭИ, 2006.

References

1. Matveev V.A., Podchertsev V.P., Fateev V.V. Giroskopicheskie Stabilizatory na Dinamicheski Nastraivayemykh Vibratsionnykh Giroskopakh. M.: Izd-vo MGTU im. N.E. Bauman, 2014. (in Russian).
2. Valeev I.M. Sovremennye Problemy Elektroenergetiki: Kratkiy Kurs Lektsiy. Kazan': Izd-vo KGEU, 2008. (in Russian).
3. Ushakov V.Ya. Istoriya i Sovremennye Problemy Elektroenergetiki i Vysokovol'tnoy Elektrofiziki. Tomsk: Izd-vo Tomskogo Politekhn. Un-ta, 2010. (in Russian).
4. Bazhenov N.G., Filina O.A., Valeeva P.N., Ermakova E.Yu. Interpretatsiya Klassicheskogo Transformatora kak Sistemy Avtomaticheskogo Upravleniya. Vestnik Astrakhanskogo Gos. Tekhn. Un-ta. Seriya «Upravlenie, Vychislitel'naya Tekhnika i Informatika». 2017;2:136—144. (in Russian).
5. Bazhenov N.G., Filina O.A., Ermakova E.Yu. Printsip Opredeleniya Orientirnykh Napravleniy s Pomoshch'yu Vibratsionnykh Giroskopov. Vestnik Gos. Un-ta Morskogo i Rechnogo Flota im. Admirala S.O. Makarova. 2017;9:5:1104—1112. (in Russian).
6. Bazhenov N.G., Filina O.A. Analiz Raboty Girostabilizatora s Rotorom, Imeyushchim Peremeshchayushchiesya Massy. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. Seriya «Problemy Energetiki». 2012;3—4:135—138. (in Russian).
7. Bazhenov N.G., Filina O.A., Ozerova E.A. Ispol'zovanie Odnoosnogo Girostabilizatora dlya Sistemy Giroskopicheskoy Stabilizatsii v Avtonomnykh Sistemakh Upravleniya. Vestnik Moskovskogo Aviatsionnogo Instituta. 2018;25:4:202—206. (in Russian).
8. GOST 32144—2013. Elektricheskaya Energiya. Sovmestimosť Tekhnicheskikh Sredstv Elektromagnitnaya. Normy Kachestva Elektricheskoy Energii v Sistemakh Elektrosnabzheniya Obshchego Naznacheniya. (in Russian).
9. Legotkina T.S., Danilova S.A. Metody Identifikatsii Sistem: Perm': Izd-vo Perm. Gos. Tekhn. Un-ta, 2008. (in Russian).
10. Dorofeev V.V., Makarov A.A. Aktivno-adaptivnaya Set' — Novee Kachestvo EES Rossii. Energoekspert. 2009;4:28—34. (in Russian).
11. Aleksandrov D.S. Nadezhnost' i Kachestvo Elektrosnabzheniya Predpriyatiy. Ul'yanovsk, Izd-vo UIGTU, 2010. (in Russian).
12. Kartashev I.I. i dr. Upravlenie Kachestvom Elektroenergii. M.: Izdat. Dom MEI, 2006. (in Russian).

13. **Волков Н.Г.** Качество электроэнергии в системах электроснабжения. Томск: Изд-во ТПУ, 2010.

14. **Лукутин Б.В., Муравлев И.О., Муравлев А.И.** Качество электрической энергии. Лабораторный практикум. Томск: Изд-во ТПУ, 2010.

15. **Савина Н.В.** Системы электроснабжения. Благовещенск: Изд-во Амурского гос. ун-та, 2008.

16. **Магомедов А.М., Герейханов Р.К.** Способ увеличения показателей качества электроэнергии на предприятиях и распределительных сетях // Технические науки: проблемы и перспективы: Материалы III Междунар. науч. конф. СПб.: Свое издательство, 2015. С. 62—67.

17. **ГОСТ Р 51317.4.30—2008 (МЭК 61000-4-30:2008).** Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Методы измерений показателей качества электрической энергии.

13. **Volkov N.G.** Kachestvo Elektroenergii v Sistemakh Elektrosnabzheniya. Tomsk: Izd-vo TPU, 2010. (in Russian).

14. **Lukutin B.V., Muravlev I.O., Muravlev A.I.** Kachestvo Elektricheskoy Energii. Laboratornyy Praktikum. Tomsk: Izd-vo TPU, 2010. (in Russian).

15. **Savina N.V.** Sistemy Elektrosnabzheniya. Blagoveshchensk: Izd-vo Amurskogo Gos. Un-ta, 2008. (in Russian).

16. **Magomedov A.M., Gereykhonov R.K.** Sposob Uvelicheniya Pokazateley Kachestva Elektroenergii na Predpriyatiyakh i Raspredelitel'nykh Setyakh. Tekhnicheskie Nauki: Problemy i Perspektivy: Materialy III Mezhdunar. Nauch. Konf. SPb.: Svoe Izdatel'stvo, 2015:62—67. (in Russian).

17. **GOST R 51317.4.30—2008 (MEK 61000-4-30:2008).** Elektricheskaya Energiya. Sovmestimost' Tekhnicheskikh Sredstv Elektromagnitnaya. Metody Izmereniy Pokazateley Kachestva Elektricheskoy Energii. (in Russian).

Сведения об авторах:

Баженов Николай Георгиевич — кандидат технических наук, доцент Казанского государственного энергетического университета, e-mail: kgey-et@yandex.ru

Филина Ольга Алексеевна — старший преподаватель, соискатель Казанского государственного энергетического университета, e-mail: olga_yuminova83@mail.ru

Озерова Екатерина Юрьевна — аспирант Казанского государственного энергетического университета

Information about authors:

Bazhenov Nikolay G. — Ph.D. (Techn.), Assistant Professor of Kazan State Power Engineering University, e-mail: kgey-et@yandex.ru

Filina Olga A. — Senior Lecturer, Applicant of Kazan State Power Engineering University, e-mail: olga_yuminova83@mail.ru

Ozerova Ekaterina Yu. — Ph.D.-student of Kazan State Power Engineering University

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

Conflict of interests: the authors declare no conflict of interest

Статья поступила в редакцию: 14.01.2019

The article received to the editor: 14.01.2019