

УДК 621.31

DOI: 10.17212/1814-1196-2018-3-191-202

Энергетические процессы в простейшей электрической цепи*

А.Г. МАШКИН^а, С.Ю. МАШКИНА^б

672027, РФ, Забайкальский край, г. Чита, ул. Александрo-Заводская, 39, Забайкальский государственный университет

^а a78.vmashkin@arbitr.ru ^б mashkinasu@gmail.com

В работе представлен анализ электроэнергетических процессов на примере простейшей электрической цепи, состоящей из резистора, индуктивности и источника электрической энергии с синусоидальной ЭДС, проведенный на основе рассмотрения движения электрической энергии в элементах цепи, которое осуществлялось на основе сопоставления величин и знаков мгновенной мощности в узловых точках цепи. Для простоты анализа цепь построена таким образом, чтобы движение электрической энергии в ней происходило по одному проводу. Проведенное компьютерное моделирование электрических процессов в исходной цепи дало возможность получить графики мгновенных мощностей, токов и потенциалов в характерных точках цепи, а их сопоставление позволило выявить встречное движение электрической энергии в элементах цепи. В итоге установлено, что все мощности, развиваемые на элементах цепи, состоят из двух компонент, одна из которых определяется движением электрической энергии от источника, а вторая – движением электрической энергии из цепи к источнику. Для достоверности анализа электроэнергетических процессов в цепи, учитывающего движение электрической энергии в ней, было проведено разделение на эти два компонента полных, активных и реактивных мощностей. Такое двухкомпонентное разделение мощностей определяется токами и напряжениями, полученными в результате взаимно ортогонального разложения векторов токов и напряжений, питающих цепь. Составлена схема замещения цепи и найдены ее параметры для первого полупериода питающего тока и напряжения, установлена ее неэквивалентность для второго полупериода. Выяснена неэквивалентность электроэнергетических процессов в цепи для первого и второго полупериодов питающего тока и напряжения, которая определяется движением электрической энергии.

Ключевые слова: мгновенная мощность, движение электрической энергии, встречное движение электрической энергии, прямоугольная трапеция полных мощностей, полная мощность, активная мощность, реактивная мощность, электроэнергетические процессы, мгновенный потенциал и мгновенный ток

ВВЕДЕНИЕ

В электрических цепях синусоидального тока все электроэнергетические процессы проходят в определенной последовательности в течение периода питающего тока и напряжения. Принято осуществлять анализ электроэнерге-

* Статья получена 28 февраля 2018 г.

тических процессов в цепях по мгновенной мощности и значениям мощностей, определяемых через ее величину (активная, полная и реактивная мощности). Сам анализ осуществляется за первую половину периода питающего тока и напряжения, и считается, что электроэнергетические процессы в течение второго полупериода тождественны электроэнергетическим процессам в первом. Такая интерпретация, очевидно, обусловлена периодическим характером изменения мгновенной мощности с двойной частотой по сравнению с частотой питающего тока и напряжения.

Поэтому первый период мгновенной мощности описывает электроэнергетические процессы в цепи за первую половину периода питающего тока и напряжения, а он тождественен второму периоду мгновенной мощности. Это дает право утверждать, что энергетические процессы в течение второго полупериода тождественны электроэнергетическим процессам в первом. Хотя простое сопоставление тока и напряжения в первом полупериоде с током и напряжением во втором полупериоде говорит о принципиальной неэквивалентности электроэнергетических процессов в цепи в этих полупериодах. Для того чтобы уйти от этого противоречия, в работе использован анализ движения электрической энергии в элементах цепи на основе величин и знаков мгновенной мощности в узловых точках цепи, который стал основой при рассмотрении электроэнергетических процессов в цепи. Анализ движения электрической энергии в простейшей цепи был осуществлен на основе компьютерного моделирования цепи, а последующее рассмотрение движения электрической энергии за первый и второй полупериоды питающего тока и напряжения стало основой описания электроэнергетических процессов в ней.

1. КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

При анализе линейных цепей синусоидального тока возникают задачи, связанные с процессами встречного движения электрической энергии в элементах цепи [1–5]. Для анализа встречного движения электрической энергии рассмотрим простейшую электрическую цепь на рис. 1, состоящую из сопротивления R , индуктивности L и источника электрической энергии с мгновенным напряжением на зажимах u_e , величина которого определяется разностью мгновенных потенциалов φ_e, φ_0 в точках 1, 0. По элементам цепи протекает ток i .

Направление движения электрической энергии и ее величину в любой точке электрической цепи можно определить величиной и знаком мгновенной мощности p в этой точке, если она определяется с учетом потенциала для данной точки [6–8]. Так, при принятых знаках мгновенного тока и мгновенных потенциалов в электрической цепи (рис. 1) при $p > 0$ энергия движется от источника через точку, в которой непрерывно определяется потенциал; при $p < 0$ энергия движется к источнику, при $p = 0$ движение электрической энергии в данной точке отсутствует. В анализируемой цепи движение электрической энергии определялось в точках 1 и 2, так как через заземленную точку 0 движение электрической энергии отсутствует, потому что потенциал этой точки всегда равен нулю, и поэтому мгновенная мощность $p = 0$.

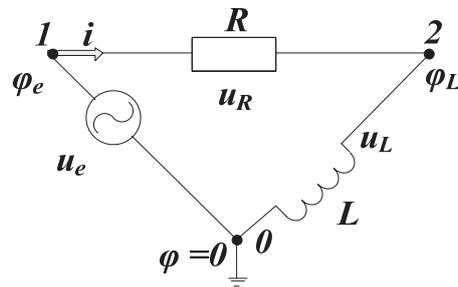


Рис. 1. Простейшая цепь R-L

Fig. 1. The simplest R-L circuit

При моделировании в цепи определяли ток i , который протекает по элементам цепи: источнику электрической энергии u_e , сопротивлению R и индуктивности L , а также мгновенные потенциалы и мгновенные мощности в точках 1 и 2 [9, 10]. В этих точках имеет место встречное распространение электрической энергии в сопротивление R , которое можно определить по временным диаграммам результатов моделирования, приведенных на рис. 2.

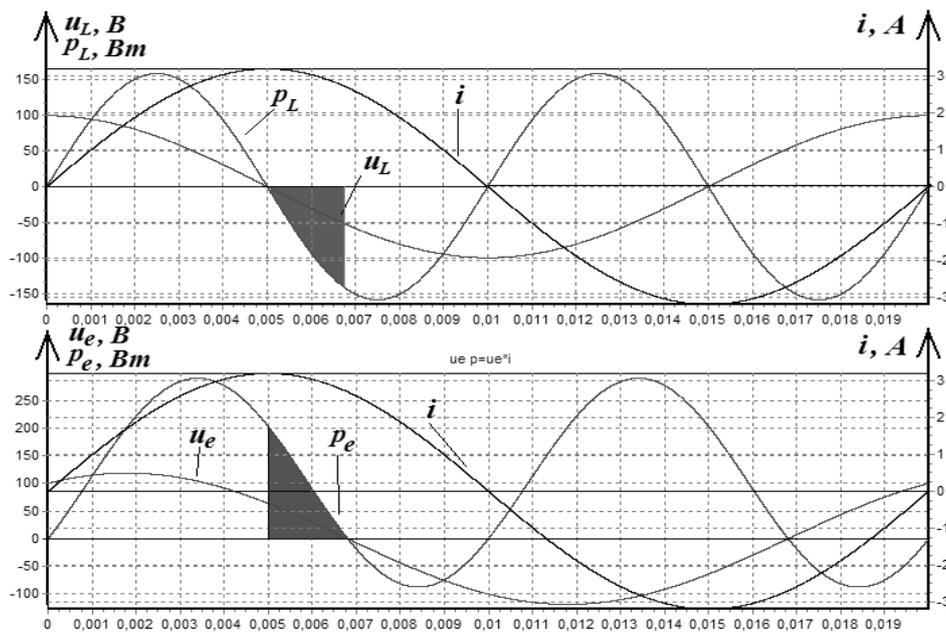


Рис. 2. Представление встречного распространения электрической энергии в сопротивление R

Fig. 2. Representation of counter propagation of electric energy in the R resistance

Моделирование было реализовано в интегрированной среде разработки программного обеспечения Delphi [11] для семейства операционных систем Microsoft Windows на объектно ориентированном языке программирования Object Pascal [12].

В таблице приведены входные параметры моделирования.

Входные параметры моделирования

Input parameters of modeling

Наименование величины, единица измерения	Значение величины
Сопротивление R , Ом	10
Напряжение источника u_e , В	100
Индуктивность L , Гн	0,1
Несущая частота f , Гц	50

Графики тока и напряжения были представлены в виде гармонического сигнала.

На рис. 2 площадь заштрихованных областей определяется величинами электрической энергии, поступающей встречно в сопротивление R . На верхнем графике электрическая энергия поступает от индуктивности L , на нижнем графике – от источника энергии. Временной интервал встречного движения энергии в сопротивление R начинается с момента перехода через 0 мгновенной мощности на индуктивности (верхний график) до момента достижения 0 мгновенной мощностью от источника энергии (нижний график).

2. АНАЛИЗ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Встречное распространение электрической энергии в теории цепей не рассматривается, что ведет к неопределенности при решении ряда задач. Например, нельзя разделить мощности в цепи на мощности, которые возникают при движении энергии от источника энергии, и мощности при ее обратном движении. Всё это относится как к полным S , так и к реактивным Q и активным P мощностям.

Чтобы решить эту задачу, надо найти мощности в цепи при движении энергии от источника и мощности в цепи при ее обратном движении к источнику. Нахождение этих мощностей будем искать с помощью компонент токов и напряжений, полученных на основе взаимно ортогональных разложений аналитических представлений напряжения и тока [13, 14]. Такое разложение позволяет представить электрический процесс в анализируемой цепи как результат наложение двух процессов – процесса «действия» (генераторного) и процесса «отклика» (реактивного). На рис. 3 для наглядности представлено взаимно ортогональное разложение тока и напряжения в векторной форме на комплексной плоскости.

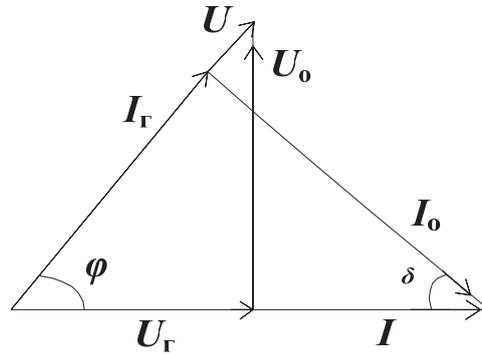


Рис. 3. Ортогональное разложение токов и напряжений в векторной форме

Fig. 3. Orthogonal expansion of currents and voltages in a vector form

Представление ортогонального разложения тока и напряжения в тригонометрической форме:

$$\begin{aligned}
 i &= I_m \sin(\omega t), & u &= U_m \sin(\omega t + \varphi), \\
 u_\Gamma &= U_m \cos(\varphi) \sin(\omega t), & u_0 &= U_m \sin(\varphi) \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right), \\
 i_\Gamma &= I_m \cos(\varphi) \sin(\omega t + \varphi), & i_0 &= I_m \sin(\varphi) \sin\left(\omega t + \varphi - \frac{\pi}{2}\right),
 \end{aligned} \tag{1}$$

или в комплексной форме

$$\begin{aligned}
 \dot{I} &= \frac{I_m}{\sqrt{2}} e^{i0}, & \dot{U} &= \frac{U_m}{\sqrt{2}} e^{i\varphi}, \\
 \dot{I}_\Gamma &= \frac{I_m}{\sqrt{2}} \cos \varphi e^{i\varphi}, & \dot{U}_\Gamma &= \frac{U_m}{\sqrt{2}} \cos \varphi e^{i0}, \\
 \dot{I}_0 &= \frac{I_m}{\sqrt{2}} \sin \varphi e^{i\left(\varphi - \frac{\pi}{2}\right)}, & \dot{U}_0 &= \frac{U_m}{\sqrt{2}} \sin \varphi e^{i\frac{\pi}{2}},
 \end{aligned} \tag{2}$$

где U_m, I_m – амплитудные значения напряжения и тока; φ – разность фаз.

На рис. 4 приведены графики изменения мгновенных токов и напряжений (1). Для выражения (1) можно составить систему мгновенных мощностей: $p = ui$, $p_\Gamma = u_\Gamma i_\Gamma$, $p_{00} = u_0 i_0$, $p_{0\Gamma} = u_0 i_\Gamma$, $p_{\Gamma 0} = u_\Gamma i_0$. Все эти мгновенные мощности изменяются с удвоенной частотой напряжения цепи.

На рис. 5 приведены графики изменения мгновенных мощностей $p, p_\Gamma, p_{00}, p_{0\Gamma}, p_{\Gamma 0}$.

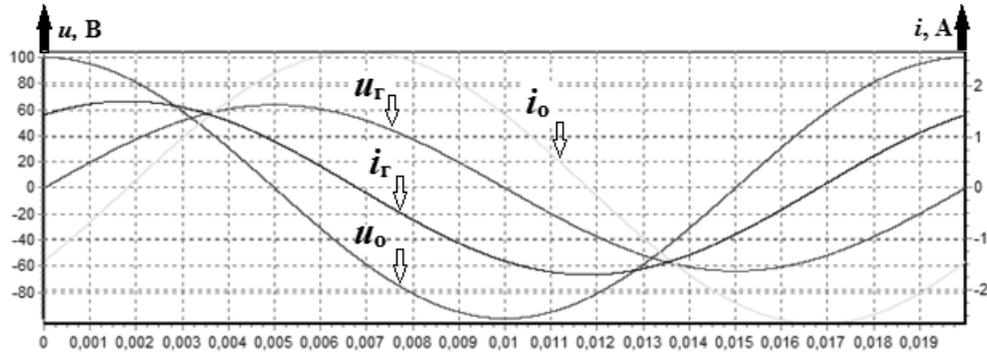


Рис. 4. Графики мгновенных значений токов и напряжений при ортогональном разложении

Fig. 4. Graphs of instantaneous values of currents and voltages in orthogonal expansion

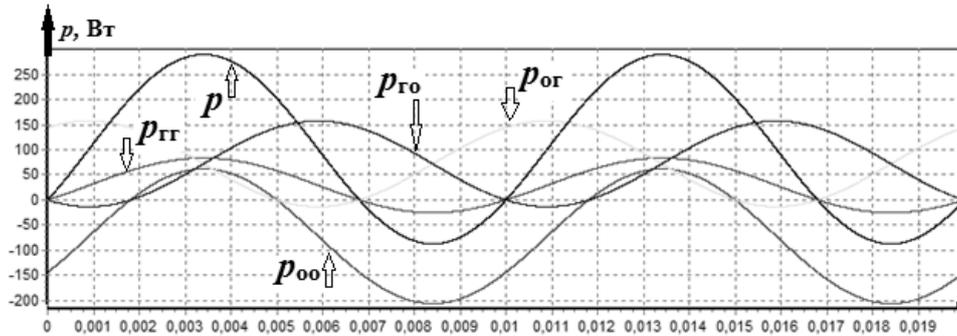


Рис. 5. Графики изменения мгновенных мощностей

Fig. 5. Graphs of instantaneous power changes

Очевидно, что для ортогонального разложения комплексных векторов токов и напряжений (2) можно составить систему полных комплексных мощностей:

$$\begin{aligned} \tilde{S}_{ГГ} &= \dot{U}_{Г} I_{Г}^* = U_{Г} I_{Г} e^{-j\varphi}, & \tilde{S}_{оГ} &= \dot{U}_{о} I_{Г}^* = U_{о} I_{Г} e^{j\left(\frac{\pi}{2}-\varphi\right)}, \\ \tilde{S}_{Го} &= \dot{U}_{Г} I_{о}^* = U_{Г} I_{о} e^{j\left(\frac{\pi}{2}-\varphi\right)}, & \tilde{S}_{оо} &= \dot{U}_{о} I_{о}^* = U_{о} I_{о} e^{j(\pi-\varphi)}, \end{aligned} \quad (3)$$

Сумма этих полных мощностей будет равна результирующей полной мощности S и результирующим активной P и реактивной Q мощностям электрической цепи, так как

$$\tilde{S} = \dot{U} I^* = (\dot{U}_{Г} + \dot{U}_{о})(I_{Г} + I_{о})^* = P + jQ. \quad (4)$$

На рис. 6 представлен четырехугольник (прямоугольная трапеция) полных мощностей цепи (3).

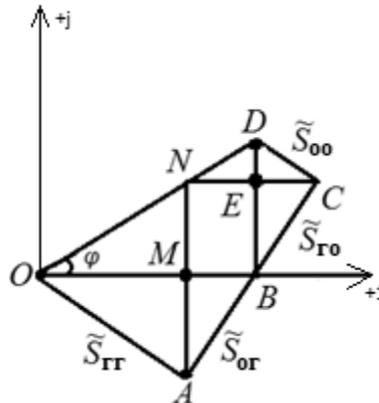


Рис. 6. Прямоугольная трапеция полных мощностей простейшей цепи

Fig. 6. a rectangular trapezoid of full powers of the simplest circuit

Прямоугольная трапеция полных мощностей $OACD$ (рис. 6) надстроена над треугольником мощностей OBD . Этот треугольник и трапеция построены на комплексной плоскости в осях активной мощности: ось $O+1$ – действительная ось, продолжение отрезка OB (активная мощность цепи) и мнимая ось $O+j$ – параллельная отрезку BD (реактивная мощность цепи). Значения величин полных мощностей, составляющих данную трапецию, позволяет выявить характер и последовательность электрических процессов в цепи и установить между ними причинно-следственные связи. Этот подход основывается на локализации мест приложения всех четырех полных мощностей согласно задаваемой цепи, а затем на сопоставлении и анализе знаков и величин активных и реактивных компонент этих полных мощностей (3) с учетом направления распространения электрической энергии.

Из трапеции полных мощностей при анализе схемы (см. рис. 1) следует, что пара полных мощностей $\tilde{S}_{ГГ}$, $\tilde{S}_{Го}$ развивается на активном сопротивлении R , так как к нему приложено напряжение U_o . Вторая пара полных мощностей $\tilde{S}_{оо}$, $\tilde{S}_{ог}$ развивается на индуктивности L , потому что к ней приложено напряжение U_o . Активные компоненты первой пары полных мощностей $\tilde{S}_{ГГ}$, $\tilde{S}_{Го}$ и второй пары $\tilde{S}_{оо}$, $\tilde{S}_{ог}$ имеют разную электрофизическую природу. На рис. 6 это отрезки OM , MB на оси активной мощности для первой пары и один и тот же отрезок EC , параллельный оси активной мощности для второй пары. Активные мощности первой пары полных мощностей определяют джоулевы потери в сопротивлении R при поступательном движении носителей электрических зарядов от источника энергии – мощность $P_{ГГ}$ и при их обратном поступательном движении от индуктивности L к источнику электрической энергии – мощность $P_{Го}$ (отрезки OM и MB). Компоненты полных мощностей второй пары, параллельные оси активных мощностей (отрезок EC), т. е. средние мощности $P_{ог}$ и $P_{оо}$, определяются кинетическими энергиями разнонаправленного вращательного движения носителей электрического

заряда за единицу времени. Это связано с тем, что в катушке индуктивности L происходит энергообменный процесс, при котором электрическая энергия, движущаяся от источника энергии $P_{ог}$, преобразуется в электрическую энергию, движущуюся обратно к источнику $P_{оо}$ [15]. Это преобразование обусловливается тем, что переменный ток с действующим значением $I_{г}$ создает в витках катушки ЭДС самоиндукции, которая, в свою очередь, вызывает протекание в катушке индуктивности переменного тока с действующим значением $I_{о}$. Тем самым в катушке индуктивности происходит разворот движения электрической энергии от источника энергии обратно к источнику.

Очевидно, все три компоненты, параллельные оси активных мощностей, самосогласованы друг с другом, так как равны между собой: $P_{ог} = P_{оо} = P_{го}$. Это имеет ясный электротехнический смысл, который поясняется следующим образом: поступающая в катушку индуктивности L электрическая энергия связана с кинетической энергией вращения носителей электрического заряда в витках катушки, равняется средней мощности $P_{го}$ и полностью за счет ЭДС самоиндукции преобразуется в кинетическую энергию вращательного движения носителей заряда $P_{оо}$. Это определяет обратное (к источнику энергии) движение электрической энергии, которая сбрасывается во внешнюю цепь и затем расходуется уже при поступательном движении носителей заряда от L к источнику.

Для анализируемой схемы полные мощности $\tilde{S}_{гг}$, $\tilde{S}_{го}$ определяются движением электрической энергии от источника электрической энергии u_e в цепь и развиваются соответственно на сопротивлении R и индуктивности L (ортогональные отрезки OA и BC). Мощности $\tilde{S}_{оо}$, $\tilde{S}_{ог}$ определяются движением к источнику электрической энергии u_e в индуктивности L и в сопротивлении R (ортогональные отрезки CD и BA):

$$R_{г} = \frac{P_{гг}}{I_{г}^2} = \frac{U_{г}^2}{P_{гг}}, \quad R_{о} = \frac{P_{ог}}{I_{о}^2} = \frac{U_{г}^2}{P_{ог}}; \quad (5)$$

$$L_{г} = \frac{Q_{го}}{\omega I_{г}^2} = \frac{U_{о}^2}{\omega Q_{го}}, \quad L_{о} = \frac{Q_{оо}}{\omega I_{о}^2} = \frac{U_{о}^2}{\omega Q_{оо}}. \quad (6)$$

Всё представленное выше: описание электрических процессов, их интерпретация прямоугольной трапецией полных электрических мощностей, а также схемой замещения и направлениями протекания токов и напряжений (рис. 7) применительно только к временному интервалу от 0 с до 0,01 с (см. рис. 4 и 5) – соответствует первому полупериоду тока и напряжения источника и соответственно первому периоду мгновенной мощности и всем последующим ее нечетным периодам.

На основе изложенного находим параметры для более развернутой схемы замещения, показанной на рис. 7.

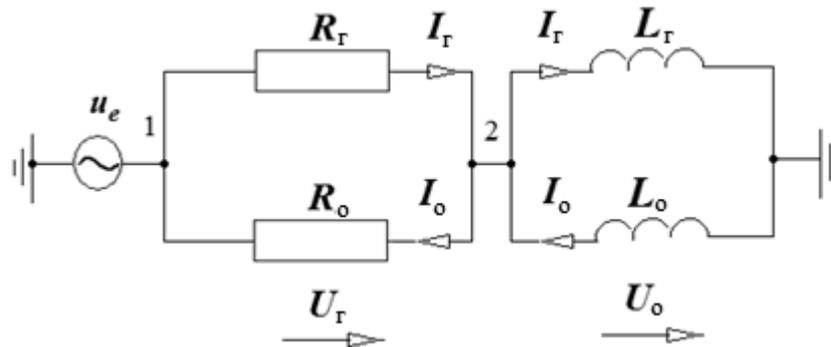


Рис. 7. Схема замещения, соответствующая прямоугольной трапеции полных мощностей простейшей цепи для первого полупериода

Fig. 7. An equivalent circuit corresponding to a rectangular trapezoid of full powers of the simplest circuit for the first half-period

Для временного интервала от 0,01с до 0,02 с электрические процессы и их интерпретация прямоугольной трапецией полных мощностей, а также направления токов и напряжений схемы замещения рис. 7 будут иными из-за изменения направления основных потоков электрической энергии. Это связано с тем, что через точку 0 электрическая энергия не может поступать в цепь. В этом случае полные мощности $\tilde{S}_{ГГ}$, $\tilde{S}_{Г0}$ будут определяться движением электрической энергии к источнику электрической энергии из цепи, это следует также и из того, что напряжение $u_r < 0$ с момента 0,01 с до 0,02 с (см. рис. 4), а мощности \tilde{S}_{00} , $\tilde{S}_{0Г}$ будут обусловлены движением электрической энергии в цепи от источника (см. рис. 4 и 5).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенное описание энергетических процессов в простейших электрических цепях позволяет все мощности цепи представлять состоящими из двух компонент. Эти компоненты определяются разнонаправленными движениями электрической энергии. Так, полная мощность равна $S = S_{ГГ} + S_{00}$; активная мощность $P = P_{ГГ} + P_{0Г}$; реактивная мощность $Q = Q_{00} + Q_{Г0}$, где $S_{ГГ}$, $P_{ГГ}$, $Q_{Г0}$ – полная, активная и реактивная мощности, обусловленные движением электрической энергии от источника энергии в цепь для нечетных периодов мгновенной мощности и движением электрической энергии к источнику энергии из цепи – для четных периодов мгновенной мощности; S_{00} , $P_{0Г}$, Q_{00} – полная, активная и реактивная мощности, обусловленные движением электрической энергии к источнику энергии из цепи для нечетных периодов мгновенной мощности и движением электрической энергии от источника энергии в цепь – для четных периодов мгновенной мощности.

Полное и достоверное описание энергетических процессов в цепи возможно только на основе анализа всей совокупности электрических явлений, связанных с движением электрической энергии, которые возникают в цепи в течение двух последовательных периодов мгновенной мощности. Эти два

последовательных периода мгновенной мощности описывают принципиально разные электроэнергетические процессы в цепи, которые определяются движением электрической энергии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРА

1. *Крон Г.* Исследование сложных систем по частям – диакоптика. – М.: Советское радио, 1972. – 453 с.
2. *Крон Г.* Тензорный анализ сетей. – М.: Советское радио, 1978. – 720 с.
3. *Соколов В.С.* Проблемы мониторинга качества электроэнергии // Промышленная энергетика. – 2004. – № 1. – С. 25–29.
4. *Соколов В.С.* Контроль, мониторинг и управление качеством электрической энергии // Электро. – 2003. – № 5. – С. 3–8.
5. *Машкин А.Г.* Отклик в простейших линейных системах // Научное обозрение. – 2006. – № 1. – С. 53–57.
6. Теоретические основы электротехники. В 3 т. Т. 1. Линейные электрические цепи с сосредоточенными постоянными / под общ. ред. К.М. Поливанова. – М.: Энергия, 1972. – 240 с.
7. Мощность переменного тока / А. Крогерис, К. Рашевиц, Э. Трейманис, Я. Шинка. – Рига: Физ.-энерг. ин-т Латв. АН, 1993. – 294 с.
8. *Малыгин В.М.* Вектор плотности потока энергии в R- и RL – электрических цепях постоянного и переменного тока // Электрика. – 2006. – № 9. – С. 26–30.
9. *Машкин А.Г.* Совершенствование методов анализа и средств повышения качества электрической энергии и эффективности электропотребления в точках общего присоединения тяговых подстанций: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.14.02. – Красноярск, 2012. – 40 с.
10. *Машкин А.Г., Машкин В.А.* Расчет электрических цепей методом кватернионов // Научное обозрение. – 2008. – № 3. – С. 43–50.
11. *Бакнелл Л.* Фундаментальные алгоритмы и структуры данных в Delphi. – СПб.: Питер, 2006. – 560 с. – (Библиотека программиста). – ISBN 5-93772-087-3.
12. *Тейксейра П., Пачеко С.* Borland Delphi 6: руководство разработчика. – М.: Вильямс, 2002. – 1120 с. – ISBN 5-8459-0305-X.
13. Теоретические основы электротехники. В 3 т. Т. 1 / К.С. Демирчян, Л.Р. Нейман, Н.В. Коровкин, В.Л. Чечурин. – 4-е изд. – СПб.: Питер, 2004. – 463 с. – ISBN 5-94723-620-6.
14. *Петров А.Е.* Тензорный метод двойственных сетей. – М.: Центр информационных технологий в природопользовании, 2007. – 496 с. – ISBN 5-9751-0036-4.
15. *Машкин А.Г.* Реактивная мощность в простейших линейных системах // Электрика. – 2015. – № 4. – С. 23–26.

Машкин Анатолий Геннадьевич, кандидат технических наук, доцент кафедры ИВТиПМ Забайкальского государственного университета. Основное направление научных исследований – повышение качества электрической энергии в системах общего и тягового электроснабжения. Имеет более 70 научных трудов, в том числе авторские свидетельства, патенты, а также две монографии. E-mail: a78.vdashkin@arbitr.ru

Машкина Светлана Юрьевна, старший преподаватель кафедры ИВТиПМ Забайкальского государственного университета, инженер-программист. Основное направление исследований – математическое моделирование. Имеет более 15 научных трудов, в том числе патенты и свидетельства на программы ЭВМ. E-mail: mashkinasu@gmail.com

Energy processes in the simplest electrical circuit***A.G. Mashkin ^a, S.Yu. Mashkina ^b***Zabaykalsky State University, 39, Aleksandro-Zavodskaya st, Chita, Zabaykalsky krai, 672027*^a *a78.vmashkin@arbitr.ru* ^b *mashkinasu@gmail.com***Abstract**

The paper presents an analysis of electric power processes using an example of a simple electric circuit consisting of a resistor, inductance and a source of electric energy with a sinusoidal EMF based on the electric energy motion in the elements of the circuit, which was performed on the basis of comparison of magnitudes and signs of instantaneous power at the node points of the circuit. For simplicity of analysis, the circuit is constructed in such a way that the motion of electric energy in it occurs along one wire. The computer simulation of electric processes in the initial circuit made it possible to obtain graphs of instantaneous powers, currents, and potentials at the characteristic points of the circuit, and their comparison made it possible to detect the oncoming movement of electric energy in the elements of the circuit. As a result, it is revealed that all the capacities developed on the elements of the chain consist of two components, the first of which is determined by the movement of electric energy from the source, and the second one -by the movement of electric energy from the circuit to the source. To validate the analysis of electric power processes in the circuit, taking into account the movement of electric energy in it, the separation of these two components into full, active, and reactive capacities was carried out. This two-component power separation is determined by the currents and voltages obtained as a result of mutually orthogonal decomposition of the current and voltage vectors supplying the circuit. A circuit for replacing the circuit is constructed and its parameters for the first half-cycle of the supply current and voltage are found, and its nonequivalence is revealed for the second half-period. The nonequivalence of electric power processes in the circuit for the first and second half-periods of the supply current and voltage is determined, which is determined by the movement of electric energy.

Keywords: instantaneous power, electric energy, counter-motion of electric energy, rectangular trapezoid of full powers, total power, active power, reactive power, electric power processes, instantaneous potential and instantaneous current

REFERENCES

1. Kron G. *Issledovanie slozhnykh sistem po chastyam – diakoptika* [Investigation of complex systems in parts – diakoptika]. Moscow, Sovetskoe radio Publ., 1972. 453 p.
2. Kron G. *Tensor analysis of networks*. New York, London, Macdonald, 1965 (Russ. ed.: Kron G. *Tenzorniy analiz setei*. Moscow, Sovetskoe radio Publ., 1978. 720 p.).
3. Sokolov V.S. Problemy monitoringa kachestva elektroenergii [Problems of monitoring the quality of electricity]. *Promyshlennaya energetika – Industrial power engineering*, 2004, no. 1, pp. 25–29.
4. Sokolov V.S. Kontrol', monitoring i upravlenie kachestvom elektricheskoi energii [Monitoring, monitoring and management of electrical energy quality]. *Elektro. Elektrotehnika, elektroenergetika, elektrotekhnicheskaya promyshlennost' – Elektro. Elektrotehnika, elektroenergetika, elektrotekhnicheskaya promyshlennost'*, 2003, no. 5, pp. 3–8.
5. Mashkin A.G. Otklik v prosteishikh lineinykh sistemakh [Response in the simplest linear systems]. *Nauchnoe obozrenie – Science Review*, 2006, no. 1, pp. 53–57.

* Received 28 February 2018.

6. Polivanov K.M., ed. *Teoreticheskie osnovy elektrotehniki*. V 3 t. T. 1. *Lineinye elektricheskie tsepi s sosredotochenymi postoyannymi* [Theoretical foundations of electrical engineering. In 3 vol. Vol. 1.]. Moscow, Energiya Publ., 1972. 240 p.
7. Krogeris A., Rashevits K., Treymanis E, Shinka Ya. *Moshchnost' peremennogo toka* [Power alternating current]. Riga, Institute of Physical Energetics Publ., 1993. 294 p. (In Russian).
8. Malygin V.M. Vektor plotnosti potoka energii v R- i RL – elektricheskikh tsepyakh postoyannogo i peremennogo toka [The vector of energy flux density in R- and RL-electric circuits of direct and alternating current]. *Elektrika – Electrics*, 2006, no. 9, pp. 26–30.
9. Mashkin A.G. *Sovershenstvovanie metodov analiza i sredstv povysheniya kachestva elektricheskoi energii i effektivnosti elektropotrebleniya v tochkakh obshchego prisoedineniya tyagovykh podstantsii*. Avtoref. diss. dokt. tekhn. nauk [Improvement of methods of analysis and means to improve the quality of electrical energy and the efficiency of power consumption at the points of general connection of traction substations. Author's abstract of Dr. eng. sci. diss.]. Krasnoyarsk, 2012. 40 p.
10. Mashkin A.G., Mashkin V.A. Raschet elektricheskikh tsepei metodom kvaternionov [Calculation of electric circuits by the quaternion method *Nauchnoe obozrenie – Science Review*, 2008, no. 3, pp. 43–50.
11. Bucknall J. *The Tomes of Delphi : algorithms and data structures*. Plano, Tex., Wordware Publishing, 2001. 525 p. (Russ. ed.: Baknell L. *Fundamental'nye algoritmy i struktury dannykh v Delphi*. St. Petersburg, Piter Publ., 2006. 560 p.).
12. Teixeira S., Pacheco X. Borland Delphi 6 developer's guide. Indianapolis, Ind., SAMS, 2002. 1169 p. (Russ. ed.: Teikseira P., Pacheko S. *Borland Delphi 6: rukovodstvo razrabotchika*. Moscow, Vil'yams Publ., 2002. 1120 p.).
13. Demirchyan K.S., Neyman L.R., Korovkin N.V., Chechurin V.L. *Teoreticheskie osnovy elektrotehniki*. V 3 t. T. 1 [Theoretical foundations of electrical engineering. In 3 vol. Vol. 1]. 4th ed. St. Petersburg, Piter Publ., 2004. 463 p. ISBN 5-94723-620-6.
14. Petrov A.E. *Tenzornyi metod dvoistvennykh setei* [Tensor method of dual networks]. Moscow, Tsentr informatsionnykh tekhnologii v prirodopol'zovanii Publ., 2007. 496 p.
15. Mashkin A.G. Reaktivnaya moshchnost' v prosteishikh lineinykh sistemakh [Reactive power in the simplest linear systems]. *Elektrika – Electrics*, 2015, no. 4, pp. 23–26.

Для цитирования:

Машкин А.Г., Машкина С.Ю. Энергетические процессы в простейшей электрической цепи // Научный вестник НГТУ. – 2018. – № 3 (72). – С. 191–202. – doi: 10.17212/1814-1196-2018-3-191-202.

For citation:

Mashkin A., Mashkina S. Energeticheskie protsessy v prosteishei elektricheskoi tsepi [Energy processes in the simplest electrical circuit]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 2018, no. 3 (72), pp. 191–202. doi: 10.17212/1814-1196-2018-3-191-202.