Нефтегазовое дело. 2021. Т. 19, № 6. С. 144–150. ISSN 2073-0128 (print)

Petroleum Engineering. 2021. Vol. 19, No. 6, P. 144–150. ISSN 2073-0128 (print)

Научная статья

УДК 621.317.382

doi: 10.17122/ngdelo-2021-6-144-150

МЕТОДЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ

Наиб Исмихан Гаджиев¹

¹Сумгаитский государственный университет, Сумгаит, Азербайджанская Республика, naib.haciyev@mail.ru

Аннотация. Одной из актуальных проблем энергосистем является определение реактивной мощности в электрических сетях. Несмотря на давнее использование термина «реактивная мощность», его значение остается неопределенным и противоречивым. С увеличением доли несинусоидальных нагрузок, увеличиваются вопросы по этой теме. Увеличение нагрузки систем электроснабжения сопровождается увеличением мощности приемников мощности, реактивного составляющего полной мощности, а также увеличением искажения формы токов и напряжений. В связи с этим вопрос компенсации реактивной мощности в энергосистемах становится все более актуальным. Отсутствие полного объяснения понятия реактивной мощности привело к появлению различных методов ее оценки. Однако на сегодняшний день нет единой точки зрения по этому вопросу. Увеличение составляющих гармоник приводит к необходимости использования различных методов расчета реактивной мощности.

Ключевые слова

электрическая сеть,
несинусоидальные режимы,
реактивная мощность,
дополнительные потери

Для цитирования

Гаджиев Н.И. Методы моделирования реактивной мощности // Нефтегазовое дело. 2021. Т. 19, № 6. С. 144–150. <https://doi.org/10.17122/ngdelo-2021-6-144-150>.

Original article

METHODS FOR MODELING THE REACTIVE POWER IN POWER GRIDS

Naib I. Hajiyev¹

¹Sumgayit State University, Sumgayit, Republic of Azerbaijan, naib.haciyev@mail.ru

Abstract. One of the main problems of power systems is the definition of reactive power in non-sinusoidal modes. Despite the long-standing use of the term «reactive power», its meaning remains uncertain and contradictory. With an increase in the proportion of non-sinusoidal loads, questions on this topic increase. An increase in the load of power supply systems is accompanied by an increase in the power of the power receivers, the reactive component of the total power, as well as an increase in the distortion of the shape of currents and voltages. In this regard, the issue of reactive power compensation in power systems is becoming more and more urgent. The lack of a complete explanation of the concept of reactive power has led to the emergence of various methods for its assessment. However, today there is no single point of view on this issue. An increase in harmonic components leads to the need to use various methods for calculating reactive power.

Keywords

power grids, systems,
non-sinusoidal modes,
reactive power, additional losses

For citation

Hajiyev N.I. Metody modelirovaniya reaktivnoi moshchnosti [Methods for Modeling the Reactive Power in Power Grids]. *Neftgazovoe delo — Petroleum Engineering*, 2021, Vol. 19, No. 6, pp. 144–150. [in Russian]. <https://doi.org/10.17122/ngdelo-2021-6-144-150>.

© Гаджиев Н.И., 2021

Введение

Интенсивный рост нагрузки систем электроснабжения обуславливает необходимость формализации понятия неактивной мощности и разработки алгоритмов расчета режимов электрических сетей при наличии несинусоидальных потребителей. Определение реактивной мощности является одной из главных задач в электрических сетях. Высшие гармоники тока не только снижают качество электроэнергии, но и влияют на стационарный режим работы электрической сети. Из-за несимметричности параметров и режимов работы сетевых элементов возникают также дополнительные потери. В настоящее время эти составляющие обычно не учитываются при подсчете потерь [1–6].

В [1] был моделирован реактивный эффект мощности при несинусоидальных режимах.

В [2] с использованием среды Simulink проведено моделирование несимметрии напряжения.

Несимметричные режимы также исследованы в [3, 4].

Из курса электротехники известно, что независимо от формы кривых тока и напряжения, активная мощность определяется однозначно [5]:

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T u(t) \cdot i(t) dt = UI \cos(\psi_u - \psi_i) = UI \cos \varphi, \quad (1)$$

$$Q = UI \sin \varphi, \quad (2)$$

$$S^2 = P^2 + Q^2, \quad (3)$$

где $u(t)$, $i(t)$ — мгновенные значения напряжения, тока;

ψ — фаза;

P — активная мощность;

Q — реактивная мощность;

S — полная, т.е., максимально возможная передача активной мощности при заданном значении тока и напряжения.

В [6] приведены результаты влияния высших гармоник на качество электроэнергии при несинусоидальных режимах.

Исследования методов анализа и повышения качества электроэнергии широко проводятся во всем мире. В [7] описаны свойства систем, работающих в условиях несинусоидальных напряжений и токов, и исследованы вопросы, связанные с методами повышения качества электроэнергии, в частности с использованием активных компенсаторов.

Сравнения различных определений реактивной мощности приведены в [8–10].

Реактивная мощность синусоидального режима в линейной цепи

Отсутствие прочной методологической основы для определения реактивной мощности привело к различным определениям этой величины. В электротехнике реактивная мощность аналогично активной мощности для несинусоидального режима в линейной электрической цепи определяется как:

$$Q = \sum_{n=0}^{\infty} Q_n = U_1 I_1 \sin \varphi_1 + U_2 I_2 \sin \varphi_2 + \Lambda. \quad (4)$$

Это выражение не описывает физику обменного процесса. В несинусоидальных режимах полная мощность и мощность искажений в цепи рассчитываются следующим образом:

$$S = UI = \sqrt{U_0^2 + U_1^2 + U_2^2 + \Lambda} \times \sqrt{I_0^2 + I_1^2 + I_2^2 + \Lambda}, \quad (5)$$

$$D = \sqrt{S^2 - P^2 - Q^2}. \quad (6)$$

В несинусоидальном и несимметричном режимах это уравнение неверно. В зависимости от используемого математического аппарата известные методы поиска и расчета составляющей полной мощности можно условно разделить на методы расчета реактивной мощности в несинусоидальных условиях.

Далее везде следует учесть, что:

Реактивная мощность скольжения — это часть реактивной мощности, которая характеризует процессы, вызванные взаимодействием гармоник тока и напряжения одной и той же частоты.

Мощность искажения — это доля реактивной мощности, которая характеризует процессы, вызванные взаимодействием гармоник тока и напряжения различных частот.

Неактивная мощность (общая реактивная мощность) — это часть реактивной мощности, которая вызвана взаимодействием всех гармоник.

Расчет реактивной мощности в синусоидальных нагрузках производится тремя основными способами.

Спектральные методы

В этих методах — составляющие мощности определяются по гармоникам тока и напряжения.

Реактивная мощность по К. Будеану. Согласно классической теории, представленной К. Будеану, полная мощность S состоит из трех ортогональных составляющих: активной мощности P , реактивной мощности Q и мощности искажения D :

$$S^2 = (\Sigma P_k)^2 + (\Sigma Q_k)^2 + (\Sigma D_k)^2. \quad (7)$$

В своем исследовании К. Будаану представил основные выражения мощности в линейных цепях с синусоидальным напряжением и несинусоидальным током. Реактивная мощность для k -гармонического сигнала определяется следующим образом:

$$Q = \Sigma Q_k = \sum_{k=1}^K U_k I_k \sin \varphi_k. \quad (8)$$

Кроме того, эта формула не соответствует формуле $S^2 = P^2 + Q^2$, поэтому для полной мощности, определяемой среднеквадратичным значением напряжения и тока, мы можем записать:

$$S^2 = \sum_n U_n^2 \cdot \sum_n I_n^2 \geq \left(\sum_n U_n \cdot I_n \cos \varphi \right)^2 + \left(\sum_n U_n \cdot I_n \sin \varphi \right)^2. \quad (9)$$

К. Будаану ввел понятие мощности искажения, определяемое следующей формулой:

$$D^2 = S^2 - P^2 - Q^2. \quad (10)$$

Это приводит к следующему уравнению:

$$S^2 = P^2 + Q^2 + D^2. \quad (11)$$

Мощность искажения состоит в основном из смешанных произведений гармоник напряжения и тока, и в случае отсутствия этих гармоник D становится равной нулю.

Основное преимущество приведенного выше определения состоит в том, что оно удовлетворяет свойствам

— сумма реактивных сил, протекающих к точке в энергосистеме, равна нулю;

— реактивная мощность, заданная этим определением, может быть полностью компенсирована индуктивностью или емкостным сопротивлением в сети.

Определение реактивной мощности по Шарону. Шарон предложил найти среднюю активную мощность как Фризе, а полная реактивная мощность находится из следующего выражения:

$$S_Q = U \sqrt{\sum_{n \in N} I_n^2 \sin^2 \varphi_n},$$

а оставшаяся дополнительная мощность

$$S = \sqrt{S^2 - P^2 - S_Q^2}.$$

Определение реактивной мощности, предложенное Кастерсом и Муром. Это определение реактивной мощности снова основано на анализе во временной области Фризе. В этом случае ток повторно делится на составляющие, и метод распределения зависит от харак-

тера нагрузки, т.е. от того, является ли нагрузка индуктивной или емкостной. Полученные в этом случае три тока называются активным i_p , индуктивным реактивным током i_{gl} , или остаточным реактивным током i_{qcr} или i_{qlr} . Эти токи находятся в следующих соотношениях:

$$i_p = \frac{P}{U^2} \cdot u = \frac{1}{T} \int \frac{u i dt}{U^2} \cdot u,$$

$$i_{qc} = u_{dcr} \cdot \frac{1}{T} \int \frac{u_{dcr} i dt}{U_{dcr}^2},$$

$$i_{ql} = u_{int} \cdot \frac{1}{T} \int \frac{u_{int} i dt}{U_{int}^2},$$

$$i_{qcr} = i - i_p - i_{qc},$$

$$i_{qlr} = i - i_p - i_{ql}$$

$$P = UI_p,$$

$$Q_c = UI_{qc} = \frac{U}{U_{dcr}} \cdot \frac{1}{T} \int u_{dcr} i dt,$$

$$Q_l = UI_{ql} = \frac{U}{U_{int}} \cdot \frac{1}{T} \int u_{int} i dt.$$

Можно показать, что токи i_{qc} и i_{ql} ортогональны (перпендикулярны) токам i_p , i_{qcr} и i_{qlr} , поэтому P , Q_c и Q_l могут быть заданы как:

$$P = UI_p,$$

$$Q_c = UI_{qc},$$

$$Q_l = UI_{ql}.$$

Здесь отмечены реактивные мощности Q_c и Q_l . Если они отрицательные, их можно компенсировать емкостью или индуктивностью.

Определение реактивной мощности по Шеферду и Закихани. Эти авторы показали, что при подключении нелинейной нагрузки к идеальному источнику возникают гармоники тока без соответствующих гармоник напряжения. Для удобства гармоники тока и напряжения разделены на «общие» и «необщие» части. Для обычных гармоник n -го порядка эффективные значения U_n и I_n отличны от нуля. Для необычных гармоник только одно из действующих значений U_n и I_n отличается от нуля.

В этом случае активная мощность определяется следующим выражением

$$P = \sum_n U_n I_n \cos \varphi_n,$$

а полная мощность по выражению

$$S^2 = \left(\sum_{n \in N} U_n^2 + \sum_{m \in M} U_m^2 \right) \cdot \left(\sum_{n \in N} I_n^2 + \sum_{p \in P} I_p^2 \right).$$

Здесь N — набор гармоник любого порядка, а M и K — наборы гармоник разного порядка тока и напряжения. Точнее, M — это набор гармоник напряжения, так что соответствующие гармоники тока равны нулю, а K определяется таким же образом для ненулевых гармоник тока.

Шеферд и Закихани предложили найти активную S_R , реактивную S_X , полную мощности S_D и остаточный предел по следующими формулам:

$$\begin{aligned} S_R^2 &= \sum_{n \in N} U_n^2 \sum_{n \in N} I_n^2 \cos^2 \Phi_n, \\ S_X^2 &= \sum_{n \in N} U_n^2 \sum_{n \in N} I_n^2 \sin^2 \Phi_n, \\ S_D^2 &= \sum_{n \in N} U_n^2 \sum_{p \in P} I_p^2 + \sum_{m \in M} U_m^2 \cdot \left(\sum_{n \in N} I_n^2 + \sum_{p \in P} I_p^2 \right). \end{aligned}$$

$$Q = -\frac{1}{\omega T} \int_0^T i \frac{du}{dt} dt = \frac{1}{\omega T} \int_0^T u \frac{di}{dt} dt,$$

Результатом является следующее выражение:

$$S^2 = S_R^2 + S_X^2 + S_D^2.$$

Фризе предложил следующее определение реактивной мощности:

$$Q_f = \sqrt{U^2 \sum_{i=1}^n \left(\frac{Q_i}{U_i} \right)^2}.$$

Реактивная мощность по стандарту IEEE. В несинусоидальном режиме уравнения напряжения и тока делятся на две составляющие: основную и гармоническую:

$$u = u_1 + u_H, \quad i = i_1 + i_H,$$

$$u_1 = \sqrt{2} U_1 \sin(\omega t - \alpha_1), \quad i_1 = \sqrt{2} I_1 \sin(\omega t - \beta_1), \quad (6)$$

$$\begin{aligned} u_H &= u_0 + \sqrt{2} \sum_{h \neq 1} U_h \sin(h\omega t - \alpha_h), \\ i_H &= i_0 + \sqrt{2} \sum_{h \neq 1} I_h \sin(h\omega t - \beta_h), \end{aligned} \quad (7)$$

$$U^2 = \frac{1}{KT} \int_{\tau}^{\tau+KT} u^2 dt = U_1^2 + U_H^2, \quad (8)$$

$$I^2 = \frac{1}{KT} \int_{\tau}^{\tau+KT} i^2 dt = I_1^2 + I_H^2,$$

$$U_H^2 = U_0^2 + \sum_{h \neq 1} U_h^2 = U^2 - U_1^2, \quad (9)$$

$$I_H^2 = I_0^2 + \sum_{h \neq 1} I_h^2 = I^2 - I_1^2.$$

Коэффициенты гармонических искажений кривых напряжения и тока:

$$THD_U = \frac{U_H}{U_1} = \sqrt{\left(\frac{U}{U_1} \right)^2 - 1}, \quad (10)$$

$$THD_I = \frac{I_H}{I_1} = \sqrt{\left(\frac{I}{I_1} \right)^2 - 1}.$$

Гармоническое искажение кривых напряжения и тока определяется отношением среднеквадратичных значений гармоник к основным составляющим:

$$P = \frac{1}{KT} \int_{\tau}^{\tau+KT} p dt = P_1 + P_H, \quad P_{11} = U_1 I_1 \cos \theta_1.$$

Интегральные методы

В этих методах расчет реактивной мощности производится путем интегрирования мгновенных значений тока и напряжения.

В методе Илиовиси предлагается реактивную мощность определить по площади вольт-амперной характеристики по нижеследующим уравнениям:

$$\begin{aligned} Q &= \frac{S}{2\pi}, \\ S &= \int_t^{t+\tau_0} u(t) \frac{di(t)}{dt} dt. \end{aligned}$$

Определение реактивной мощности Маевского. Маевский также предлагает реактивную мощность определить по площади вольт-амперных характеристик:

$$Q = -\frac{1}{\omega T} \int_0^T i \frac{du}{dt} dt = \frac{1}{\omega T} \int_0^T u \frac{di}{dt} dt. \quad (12)$$

Согласно теореме Умова-Пойнтинга, реактивная мощность может быть определена путем интегрирования мгновенной мощности:

$$-\int \text{P} \partial s = p_0 + \frac{\partial w}{\partial t} = p = ui. \quad (13)$$

Методы энергетических потоков

Методы энергетических потоков основаны на разделении токов.

Определение реактивной мощности по Зарнецкому. Согласно Зарнецкому, мгновенные значения напряжения и тока определяются порядком Фурье:

$$\begin{aligned} u &= u_1 + u_H, \quad i = i_1 + i_H, \\ u_1 &= \sqrt{2} U_1 \sin(\omega t - \alpha_1), \\ i_1 &= \sqrt{2} I_1 \sin(\omega t - \beta_1), \\ u_H &= u_0 + \sqrt{2} \sum_{h \neq 1} U_h \sin(h\omega t - \alpha_h), \\ i_H &= i_0 + \sqrt{2} \sum_{h \neq 1} I_h \sin(h\omega t - \beta_h). \end{aligned} \quad (14)$$

В этом случае активная мощность P совпадает с определением Фризе. Действующее значение напряжения в энергосистеме можно понимать как падение напряжения на n -й гармонике и можно описать как $Y_n = G_n + jB_n$, где G_n и B_n — активная и реактивная проводимости в этой гармонике соответственно. Тогда ток будет таким:

$$i = \sqrt{2} \sum_{k=1}^K U_k (G_k + jB_k) \cos(2\pi k f_0 t - \psi_k).$$

В этом случае предполагается, что вся активная мощность, как во Фризе, поглощается определением любой проводимости G_e , которую можно описать как $G_e = P/U^2$.

Под действием напряжения U ток, протекающий по этому проводнику, будет равен активному току i_a , а остаточный предел будет рассчитываться следующим образом:

$$i - i_a = \sqrt{2} \sum_{k=1}^K U_k (G_k - G_e + jB_k) \cos(2\pi k f_0 t - \psi_k).$$

Позже Зарнецкий разделил этот ток на ток рассеяния и реактивный ток:

$$i_s = \sqrt{2} \sum_{k=1}^K U_k (G_k - G_e) \cos(2\pi k f_0 t - \psi_k),$$

$$i_r = \sqrt{2} \sum_{k=1}^K U_k B_k \cos(2\pi k f_0 t - \psi_k).$$

Поскольку все эти токи ортогональны, эффективное значение тока и активной мощности можно найти следующим образом:

$$I^2 = I_a^2 + I_s^2 + I_r^2 = \frac{P}{U^2} + \sum_{k=1}^K (G_k - G_e)^2 U_k^2 + \sum_{k=1}^K B_k^2 U_k^2.$$

$$S^2 = P^2 + D_s^2 + Q_r^2,$$

где D_s и D_r — силы рассеяния и реакции соответственно.

Кроме того, согласно определению b , линии Q_r и S_x равны для нагрузок, D_s и Q_r равны S_c и S_Q согласно определению Шарона.

Определение реактивной мощности по Фризе. Определение, предложенное Фризе, основано на анализе во временной области. Ток делится на две части. Фазовый угол первой части равен фазовому углу напряжения и равен активной мощности $I_a U$. Вторая часть состоит из ошибки и называется I_r . Тогда два тока определяются следующими соотношениями:

$$i_a = \frac{P}{U^2} u; \quad i_r = i - i_a.$$

Основная причина этого деления в том, что I_a представляет собой чисто резистивный ток. В таком случае I_r можно компенсировать. Легко видеть, что I_r и I_a ортогональны (перпендикулярны) и их среднеквадратические значения связаны следующим образом:

$$I^2 = I_a^2 + I_r^2.$$

Тогда полная мощность определяется как произведение среднеквадратических значений ортогонального напряжения и тока:

$$S^2 = U^2 I^2 = U^2 (I_a^2 + I_r^2) = P^2 + Q^2.$$

Фризе использовал P_b вместо Q . В другой литературе по этому определению реактивная мощность называется фиктивной мощностью

Q_F . Преимущество этого аспекта в том, что он не требует включения четвертой составляющей мощности. Соответствует характеристике, когда реактивная мощность снижается до нуля, коэффициент мощности равен единице. Основным недостатком данного определения реактивной мощности является то, что оно не соответствует свойству, когда реактивная мощность в узле энергосистемы равна нулю, Q_F не участвует в уравнениях фиксированного режима. Это определение реактивной мощности для синусоидального сигнала совпадает с условной реактивной мощностью.

Фризе предложил следующее определение реактивной мощности:

$$Q_f = \sqrt{U^2 \sum_{i=1}^n \left(\frac{Q_i}{U_i} \right)^2}.$$

Преимущество метода Кастера-Мура перед методом Фризе состоит в том, что он позволяет найти часть тока, которая может быть компенсирована конденсатором или индуктором.

Моделирование

Для моделирования реактивной мощности разными методами разработано программное обеспечение в среде MATCAD. Был рассмотрен случай несинусоидального напряжения и тока, уравнения которых приведены в примере.

Пример:

$$u(t) = 400 + 200 \cdot \sin(2\omega t) + 100 \cdot \sin(3\omega t),$$

$$i(t) = 3.75 \cdot \sin(\omega t - 55 \frac{\pi}{180}) + 0.75 \cdot \sin(2\omega t - 70 \frac{\pi}{180}) + 0.5 \cdot \sin(3\omega t - 75 \frac{\pi}{180}).$$

Как следует из уравнений, напряжение и ток содержат и четные, и нечетные гармоники. Графики изменения напряжения и тока со временем представлены на рисунках 1 и 2 соответственно.

На рисунке 3 приведена вольт-амперная характеристика рассмотренного режима. Как известно, в некоторых методах расчет реактивной мощности основан на вычислении площади этой характеристики.

Результаты моделирования реактивной мощности некоторыми методами приведены в таблице 1.

Из результатов моделирования реактивной мощности, приведенных в таблице 1, следует, что по разным методам могут получиться разные значения. В настоящее время нет единого мнения по этой проблеме.

Рисунок 1. График изменения напряжения при несинусоидальном случае

Figure 1. Graph of voltage change in a non-sinusoidal case

Рисунок 2. График изменения тока при моделировании несинусоидальности

Figure 2. The graph of the current change in the simulation of non-sinusoidality

Рисунок 3. Вольт-амперная характеристика примера

Figure 3. Current-voltage characteristic of an example

Выводы

Значения реактивной мощности, определенные по разным теориям, могут существенно различаться. Разнообразие методов определения реактивной мощности в несинусоидальной сети показывает, что в настоящее время нет единой позиции по этому вопросу.

Установлено, что высшие гармоники тока не только снижают качество электроэнергии,

Таблица 1. Результаты моделирования реактивной мощности разными методами

Table 1. Results of modeling reactive power by different methods

Реактивная мощность по					
Будеану	Шарону	Кастере-Муру	Шеферду и Закихани	Илиовиси	Масвскому
1417	1461	1457	1461	828	828

но и влияют на стационарный режим работы электрической сети.

Разработано программное обеспечение для моделирования реактивной мощности разными методами. Выполнено моделирование реактивной мощности разными методами с помощью разработанной программы.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Баламетов А.Б., Халилов Э.Д., Исаева Т.М. О моделировании реактивного эффекта мощности при не-синусоидальных режимах // Современные проблемы информатизации, кибернетики и информационных технологий: тр. II Республиканской науч. конф. Баку: 2004. Т. 3. С. 41-43.
2. Kholiddinov I.Kh., Musinova G.F., Yulchiev M.E., Tychiev Z.Z., Kholiddinova M.M. Modeling of Calculation of Voltage Unbalance Factor Using Simulink (Matlab) // The American Journal of Engineering and Technology. 2020. Vol. 2. Issue 10. P. 33-37. DOI: 10.37547/tajet/Volume02Issue10-07.
3. Гринкруг М., Митин И. Несимметричные режимы работы электрических сетей. Кишинев: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2011. 124 с.
4. Косоухов Ф.Д., Наумов И.В. Несимметрия напряжений и токов в сельских распределительных сетях. Иркутск: Иркут. гос. с.-х. акад., 2003. 257 с.
5. Касаткин А.С., Немцов М.В. Электротехника. М.: Высшая школа, 2000. 538 с.
6. Жежеленко И.В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий. М.: Энергоатомиздат, 2004. 331 с.
7. Pasko M., Benysek G. Power Theories for Improved Power Quality. London: Springer-Verlag London Limited, 2012. 214 p. DOI: 10.1007/978-1-4471-2786-4.
8. Balci M., Hocaoglu M. Comparison of Power Definitions for Reactive Power Compensation in Nonsinusoidal Conditions // «Harmonics and Quality of Power»: Materials of IEEE 11th International Conference. Lake Placid, NY, USA. 2004. Accession No. 8332136. DOI: 10.1109/ICHQP.2004.1409408.
9. Al-Bayat H., Ambroze M., Zaki Ahmed M. New Effective Power Terms And Right-Angled Triangle (RAT) Power Theory // International Journal of Electrical Power and Energy Systems. 2017. Vol. 88. P. 133-140. DOI: 10.1016/j.ijepes.2016.12.009.
10. Czarnecki L.S. Comparison of the Conservative Power Theory (CPT) with Budeanu's Power Theory // Annals of the University of Craiova, Electrical Engineering Series. 2016. Vol. 40. Issue 40. P. 1-8.
- nesinusoidal'nykh rezhimakh [Modeling the Reactive Power Effect in Non-Sinusoidal Modes]. *Trudy II Respublikanskoi nauchnoi konferentsii «Sovremennye problemy informatizatsii, kibernetiki i informatsionnykh tekhnologii»* [Proceedings of the II Republican Scientific Conference «Modern Problems of Informatization, Cybernetics and Information Technologies»]. Baku, 2004, Vol. 3, pp. 41-43. [in Russian].
2. Kholiddinov I.Kh., Musinova G.F., Yulchiev M.E., Tychiev Z.Z., Kholiddinova M.M. Modeling of Calculation of Voltage Unbalance Factor Using Simulink (Matlab). *The American Journal of Engineering and Technology*, 2020, Vol. 2, Issue 10, pp. 33-37. DOI: 10.37547/tajet/Volume02Issue10-07.
3. Grinkrug M., Mitin I. *Nesimmetrichnye rezhimy raboty elektricheskikh setei* [Asymmetrical Modes of Operation of Electrical Networks]. Chisinau, LAP LAMBERT Academic Publishing, 2011. 124 p. [in Russian].
4. Kosoukhov F.D., Naumov I.V. *Nesimetriya napryazhenii i tokov v sel'skikh raspredelitel'nykh setyakh* [Voltage and Current Unbalance in Rural Distribution Networks]. Irkutsk, Irkut. gos. s.-kh. akad. Publ., 2003. 257 p. [in Russian].
5. Kasatkin A.S., Nemtsov M.V. *Elektrotehnika* [Electrical Engineering]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 2000. 538 p. [in Russian].
6. Zhezhelenko I.V. *Vysshie garmoniki v sistemakh elektrosnabzheniya prompredpriyatii* [Higher Harmonics in Industrial Power Supply Systems]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 2004. 331 p. [in Russian].
7. Pasko M., Benysek G. *Power Theories for Improved Power Quality*. London, Springer-Verlag London Limited, 2012. 214 p. DOI: 10.1007/978-1-4471-2786-4.
8. Balci M., Hocaoglu M. Comparison of Power Definitions for Reactive Power Compensation in Nonsinusoidal Conditions. *Materials of IEEE 11th International Conference «Harmonics and Quality of Power»*. Lake Placid, NY, USA, 2004, Accession No. 8332136. DOI: 10.1109/ICHQP.2004.1409408.
9. Al-Bayat H., Ambroze M., Zaki Ahmed M. New Effective Power Terms And Right-Angled Triangle (RAT) Power Theory. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 2017, Vol. 88, pp. 133-140. DOI: 10.1016/j.ijepes.2016.12.009.
10. Czarnecki L.S. Comparison of the Conservative Power Theory (CPT) with Budeanu's Power Theory. *Annals of the University of Craiova, Electrical Engineering Series*, 2016, Vol. 40, Issue 40, pp. 1-8.

REFERENCES

1. Balametov A.B., Khalilov E.D., Isaeva T.M. О моделировании реактивного эффекта мощности при

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Гаджиев Наиб Исмихан, проректор, старший преподаватель кафедры электромеханики, Сумгаитский государственный университет, Сумгаит, Азербайджанская Республика

Naib I. Hajiyev, Vice-Rector, Senior Lecturer of Electromechanics Department, Sumgayit State University, Sumgayit, Republic of Azerbaijan

naib.haciyev@mail.ru

Статья поступила в редакцию 29.06.2021; одобрена после рецензирования 22.07.2021; принята к публикации 01.11.2021.

The article was submitted 29.06.2021; approved after reviewing 22.07.2021; accepted for publication 01.11.2021.