

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ В СЕТИ ТЯГОВЫХ ПОДСТАНЦИЙ ШАХТНЫХ ЭЛЕКТРОВЗОВ

Н. И. Щуров¹, С. В. Мятёж¹, Б. В. Малозёмов¹, А. А. Штанг¹

¹ Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, Россия

Аннотация: приведены основные пути развития теории реактивной мощности и мощности искажений в сетях питания энергетического оборудования горных предприятий, шахтных (рудничных) контактных электровозов, которые получают энергию от преобразовательной подстанции через контактную сеть напряжения постоянного тока. Отмечено, что ошибки и противоречия в определении неактивных мощностей вызваны формальным переносом некоторых положений символического метода на электрические цепи с несинусоидальными напряжениями и токами, что негативно влияет на оценку реактивной мощности в сетях питания шахтных электровозов. На примерах волновых и векторных диаграмм исследуются условия возникновения составляющих неактивной мощности, которые известны как реактивная мощность и мощность искажений. Показано, что составляющие активной, реактивной мощности и мощности искажений взаимортогональны и образуют баланс мощностей, который может быть нарушен, главным образом, из-за методических ошибок при вычислении этих составляющих в условиях нестационарности параметров режимов. Установлено, что мощность искажения характеризует не степень искажения форм кривой тока нагрузки относительно напряжения, а степень деформации катетов известного прямоугольного треугольника мощностей относительно их средних значений. Полученные результаты позволят не только корректно определять долю и характер составляющих неактивных мощностей, что представляет ценность для решения задач оптимизации режимов в сетях переменного тока, но и создавать в дальнейшем эффективные технические средства компенсации выявленных неактивных мощностей, которые позволят корректнее определять и компенсировать реактивную мощность в сети тяговых подстанций шахтных электровозов.

Ключевые слова: реактивная мощность, ортогональность гармоник, баланс мощностей, мгновенная мощность, коррекция форм.

Для цитирования: Щуров Н. И., Мятёж С. В., Малозёмов Б. В., Штанг А. А. Определение реактивной мощности в сети тяговых подстанций шахтных электровозов // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2022. — № 12–2. — С. 284–300. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_122_0_284.

Determination of the reactive power of the ac network of the traction substations

N. I. Shchurov¹, S. V. Myatezh¹, B. V. Malozyomov¹, A. A. Shtang¹

¹ Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia

Abstract: The main ways of developing the theory of reactive power and power distortion of power equipment of mining enterprises, mine (mining) contact electric locomotives, which

receive energy from a converter substation through a direct current voltage contact network, are given. It is noted that errors and contradictions in the definition of inactive powers are caused by the formal transfer of some provisions of the symbolic method to electrical circuits with non-sinusoidal voltages and currents. It is shown that to study the operating modes of non-sinusoidal AC networks, it is necessary to represent voltages and currents on the complex plane in the form of generalized vectors. The materials of the works of modern researchers allow us to conclude that reactive power is determined by the sum of reactive powers formed by the interaction of all harmonics of voltage and current with the same numbers. Using examples of wave and vector diagrams, the conditions for the occurrence of inactive power components in an alternating current network, which are known as reactive power and distortion power, are investigated. It is shown that the components of active, reactive power and distortion power are mutually orthogonal and form a power balance, which can be violated, mainly due to methodological errors in calculating these components under conditions of non-stationary mode parameters. It has been established that the distortion power characterizes not the degree of distortion of the load current curve shapes relative to voltage, but the degree of deformation of the legs of the known right-angled power triangle relative to their average values. The results obtained will allow not only to correctly determine the proportion and nature of the components of inactive capacities, which is valuable for solving the problems of optimizing modes in AC networks, but also to create in the future effective technical means of compensating the identified inactive capacities.

Key words: reactive power, harmonic orthogonality, power balance, instantaneous power, shape correction.

For citation: Shchurov N. I., Myatezh S. V., Malozyomov B. V., Shtang A. A. Determination of the reactive power of the ac network of the traction substations. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022;(12-2):284–300. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_122_0_284.

1. Введение

Широкая электрификация современных предприятий горной промышленности и непрерывный рост мощностей отдельных электроустановок, шахтных (рудничных) контактных электровозов, питающихся от выпрямителей тяговых подстанций, служат причиной значительного увеличения удельного потребления и общего расхода электроэнергии, которая только по угольной отрасли достигает в настоящее время 49,6 млрд кВтч [1]. Присутствие большого количества потребителей электрической энергии с нелинейной вольтамперной характеристикой приводит к возникновению в сети высокочастотных нелинейных искажений тока нагрузки, которые инициируют появление в системе мощности искажений, в том числе и в сетях питания шахтных электровозов [2].

При этом актуальными становятся вопросы не только поиска новых источников энергии, но и рационального, эффективного использования существующих. В частности, в электроэнергетике это разработка комплекса энергосберегающих мероприятий, который помимо прочего включает в себя повышение качества электроэнергии в сети тяговых подстанций шахтных электровозов [3].

Основные положения по улучшению показателей качества электроэнергии закреплены на законодательном уровне [4]. Например, в «Энергетической стратегии России на период до 2030 года» ставится задача по разработке безопасных управляемых электроэнергетических систем, обеспечивающих необходимое качество электроэнергии, что особенно важно в горном деле [5].

Ключевыми проблемами данной сферы электроэнергетики являются [6]:

- низкие показатели коэффициента мощности подстанций питания горных электровозов;

- несинусоидальное потребление электроэнергии нелинейными нагрузками шахтного оборудования (газоразрядные и люминисцентные светильники, устройства с насыщающимися электромагнитными элементами трансформаторы и дроссели);

- высокие показатели реактивной мощности в сети электропотребителей горного оборудования;

- неравномерная загрузка фаз и др.

В этих условиях важное значение приобретают мероприятия, которые смогут обеспечить рациональное и экономичное электропотребление [7]. На горных предприятиях используют силовые трехфазные трансформаторы различного исполнения для питания тиристорных преобразователей, регулируемых электроприводом шахтных подъемных машин и другого силового оборудования [8].

Известно, что в сети переменного тока, питающего тяговые подстанции горных (рудничных) электровозов, в зависимости от формы кривой питающего напряжения и характера нагрузки кроме активной мощности образуются дополнительные компоненты мощности. Они не совершают полезной работы и воспринимаются в качестве балласта. Почти 100 лет продолжают дискуссии на тему определения терминологии, расчета и правильной трактовки физической природы компонент этих мощностей, не совершающих полезной работы [9].

Не вызывает сомнений определение активной мощности P , Вт через интегральную сумму мгновенных значений мощности нагрузки $p(t)$, вычисляемых как

$$p(t) = u(t) \cdot i(t), \quad (1)$$

приняв, что через нагрузку протекает ток $i(t)$, А, вызванный приложенным напряжением $u(t)$, В. В этом случае активная мощность P характеризуется как прямое преобразование электрической энергии в другие виды для совершения полезной работы [10] за период T , с:

$$P = \frac{1}{T} \int u(t) \cdot i(t) dt = \frac{1}{T} \int p(t) dt. \quad (2)$$

Для синусоидальной формы питающего напряжения $u(t) = U_m \sin(\omega t)$ в сети переменного тока, в которой нагрузка с реактивным характером образует ток $i(t) = I_m \sin(\omega t + \phi)$, но обладает линейной вольт-амперной характеристикой (ВАХ), мгновенная мощность вычисляется как

$$\begin{aligned} p(t) &= U_m \sin(\omega t) \cdot I_m \sin(\omega t + \phi) = \\ &= \frac{U_m I_m}{2} \cos(\phi) (1 - \cos(2\omega t)) + \\ &\quad + \frac{U_m I_m}{2} \sin(\phi) \sin(2\omega t). \end{aligned} \quad (3)$$

Определяя первое слагаемое выражения (3) как мощность P , практически все исследователи характеризуют второе слагаемое как реактивную мощность Q , величина которой пульсирует с частотой 2ω и рассчитывается через амплитудные U_m, I_m или действующие значения напряжения $U = U_m / \sqrt{2}$ и тока $I = I_m / \sqrt{2}$ [11].

$$Q = \frac{U_m I_m}{2} \sin(\phi) = UI \sin(\phi). \quad (4)$$

Корректность выражения (4) для расчета Q не подвергается сомнениям [7], только если рассматривается электрическая цепь с синусоидальной формой величин $u(t)$ и $i(t)$. Таким образом, необходимо более точно определять и компенсировать реактивную мощность в системе питания горного

электрооборудования, в том числе и повышать качество электроэнергии для шахтных (рудничных) контактных электровозов.

2. Методы

Для анализа реактивной составляющей в цепях питания горного (рудничного) оборудования, большую роль сыграло становление символического метода расчета [4], в котором использованы действующие значения U и I . Их произведение определяет полную или кажущуюся мощность в сети переменного тока:

$$S = UI, \quad (5)$$

которую для цепи с синусоидальными $u(t)$ и $i(t)$ с учетом свойств (3) и (4) можно легко представить известными компонентами P и Q :

$$\begin{aligned} S_{(1)} &= UI\sqrt{(\cos(\phi))^2 + (\sin(\phi))^2} = \\ &= \sqrt{U^2 I^2 (\cos(\phi))^2 + U^2 I^2 (\sin(\phi))^2} = \\ &= \sqrt{P^2 + Q^2} \quad , \quad (6) \end{aligned}$$

обладающими свойством ортогональности и образующими хорошо извест-

ный прямоугольный треугольник мощностей (рис. 1, а).

Однако по мере интенсивного развития электропотребителей, используемых в горном (рудничном) оборудовании, номенклатуры и роста мощностей преобразовательных устройств силовой электроники в электрических сетях переменного тока появлялось все больше нагрузок с нелинейными ВАХ. Первой массовой такой нагрузкой стали многочисленные выпрямители переменного тока, например, на шахтных (рудничных) контактных электровозах РН и РП [5]. Значительные по величинам мощности этих нагрузок уже вносили искажение в синусоидальную кривую $u(t)$ питающего напряжения [6].

Попытка исследователей перенести на сети питания рудничных электровозов определение Q и свойства нагрузок с нелинейными ВАХ и произвольными формами $u(t)$ и $i(t)$ встретила множество сложностей, так как образуемые в этом случае многочисленные компоненты дополнительных мощностей от разных гармоник не поддавались простому анализу, поскольку не имели единого определения и универсального

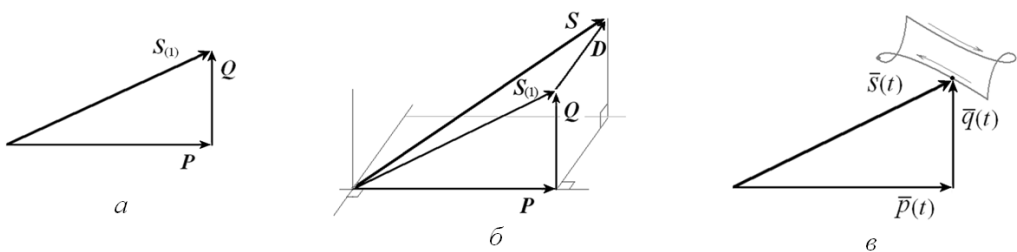


Рис. 1. Треугольники мощностей: а – для синусоидальной сети переменного тока (активная мощность P , реактивная мощность Q и полная мощность $S(1)$ по основной гармонике); б – для несинусоидальной сети переменного тока (дополнительно введена мощность искажений D); в – треугольник мгновенных мощностей (проекции мгновенной активной $\bar{p}(t)$ и реактивной $\bar{q}(t)$ мощности образуют мгновенную полную мощность $\bar{s}(t)$)

Fig. 1. Power triangles: а – for sinusoidal alternating current network (active power P , reactive power Q and total fundamental power $S(1)$ by fundamental harmonic); б – for non-sinusoidal alternating current network (additionally introduced distortion power D); в – triangle of instantaneous powers (projections of the instantaneous active $\bar{p}(t)$ and reactive $\bar{q}(t)$ power form the instantaneous full power $\bar{s}(t)$)

метода для их расчета. Это не позволяло получить баланс мощностей, подобный выражению (6), что послужило причиной некорректного определения реактивной мощности в сетях питания горного электротранспорта.

Частотные или спектральные методики расчета. Известно множество работ, в которых для совершенствования концепций представления Q использовался частотный или спектральный анализ в сетях питания тяговых подстанций горного (рудничного) электротранспорта.

Одна из первых теорий определения Q была предложена проф. Будеану в 1927 г., которая представляла результирующую реактивную мощность как

$$Q = \sum Q_i = \sum U_i I_i \sin(\phi_i) \quad (7)$$

где i — порядковые номера гармоник действующих значений напряжения U_i и тока I_i , а ϕ_i — углы сдвига между ними.

Возможный небаланс мощностей при разложении S на составляющие P и Q в данной теории был объяснен взаимодействием комбинаций различных гармоник U_i и I_j при условии $i \neq j$. Величина небаланса при этом названа как мощность искажения D

$$D = \sqrt{S^2 - P^2 - Q^2}, \quad (8)$$

и получила графическую интерпретацию как одна из взаимно ортогональных компонент по отношению к P и Q (рис. 1, б). В работе [9] величина Q объясняется появлением реактивных составляющих тока I_i разных частот, которые можно компенсировать соответствующей комбинацией реактивных элементов, а в работе [1 2] мощность Q определяется как результат большого числа ортогональных компонент токов и рассчитывается как

$$Q = U \sqrt{\sum I_i^2 (\sin(\phi_i))^2}. \quad (9)$$

Другое определение мощности Q [13, 14] основано на понятиях приведенной мощности, использующих соотношения частот основной и высших гармоник с порядковыми номерами k :

$$Q = \sum k \cdot Q_k = \sum k \cdot U_k I_k \sin(\phi_k). \quad (10)$$

Кроме того, известны работы [15], в которых понятие Q выводится путем эквивалентирования реактивного характера элементов сети. Для гармоник с порядковыми номерами n этот вывод дает выражение

$$Q = \sum \frac{1}{n} U_n I_n \sin(\phi_n) \sqrt{\frac{\sum U_n^2}{\sum \frac{U_n^2}{n}}}. \quad (11)$$

Нетрудно видеть, что выражения (9) — (11) по-разному характеризуют возникновение мощности Q и приведут к существенному расхождению вычисленных значений. В отдельных исследованиях [16] с использованием закона сохранения энергии или теоремы Теллегена [17] приводятся доказательства ошибочности вывода выражений, подобных (9) — (11). Результаты таких доказательств дают основание считать выражение (7) наиболее корректным для определения Q , если принять условие, что существуют прочие компоненты неактивных мощностей, не имеющие однозначной интерпретации в рамках теории мощностей Будеану.

Интегральные методики расчета.

В качестве исходной информации данные методики используют мгновенные значения $u(t)$ и $i(t)$, которые определяют совокупный характер нагрузки, например в виде ВАХ. Это позволяет путем последующего интегрирования, как показано в [18], получить величину, которая, опираясь на геометрическое истолкование площади ВАХ нагрузки, определенной за период $T = 2\pi$, считается пропорциональной мощности Q :

$$Q = \pm \frac{S_{BAX}}{2\pi} = \pm \frac{\int_t^{t+T_0} u \frac{di}{dt} dt}{2\pi}. \quad (12)$$

Подобный подход изложен в работах [19,20], где мощность Q определена в ходе операции циклического интегрирования:

$$Q = \pm \frac{1}{2\pi} \oint i(u) du, \quad Q = \pm \frac{1}{2\pi} \oint u(i) du. \quad (13)$$

В данной методике мощность Q определяется как количественная мера процессов взаимодействия комбинаций $u(t)$ и $i(t)$. Она характеризуется как неактивная мощность, в которой можно выделить две составляющие: реактивная мощность сдвига Q_S (как аналог реактивной мощности Будеану) и искажения Q_D (как аналог компоненты D). Величина Q_S представляет количественную меру процессов взаимодействия комбинаций гармоник U_i и I_i с одинаковыми номерами, а Q_D — соответственно, количественную меру процессов взаимодействия комбинаций гармоник U_i и I_j с разными номерами, когда $i \neq j$. При этом считается, что

$$Q = Q_S + Q_D. \quad (14)$$

При сравнении выражения (14) и (8) уже на этом простом примере становятся очевидными принципиальные различия методик нахождения реактивной мощности.

Следует отметить, что вычисление мощности Q реальных нагрузок по выражениям (12)–(14) в сетях с несинусоидальными величинами $u(t)$ и $i(t)$ на практике не только затруднительно, но даже приводит к противоречивым и ошибочным результатам [2,10], не объясняющим природу взаимодействия и компенсации составляющих Q_S и Q_D .

Вместе с тем еще в ранних работах Фризе [21] определение неактивной мощности Q_q как

$$Q_q = UI_q = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u^2(t) dt \cdot \frac{1}{T} \int_0^T i^2(t) dt - \left(\frac{1}{T} \int_0^T u(t)i(t) dt \right)^2} = \sqrt{S^2 - P^2} \quad (15)$$

не противоречило результатам проводимых экспериментов и было основано на понятии разделения токов нагрузки на две составляющие: активную $i_a(t)$ и реактивную $i_r(t)$, таким образом, что $i(t) = i_a(t) + i_r(t)$. Составляющие токов $i_a(t)$ и $i_r(t)$ взаимно ортогональны, что определяет свойство

$$\int_0^T i_a(t)i_r(t) dt = 0 \quad (16)$$

и характеризует соотношения для действующих значений составляющих тока

$$I^2 = I_a^2 + I_r^2. \quad (17)$$

Это дает основание считать, что всегда существует такой мгновенный ток компенсации $-i_r(t)$, который позволяет достичь условия $i(t) - i_r(t) = i_a(t)$ и обеспечить результат $Q_q \rightarrow 0$, приводящий к желаемому режиму $S \rightarrow P$.

Несмотря на то, что теория мощности Фризе не позволила указать на неточности теории Будеану и ответить на вопросы определения составляющих всех неактивных мощностей, ее особенность использования мгновенных значений токов и напряжений и ортогональных компонент послужила основой для создания и последующего развития теории мгновенных мощностей.

Развитие теории мгновенных мощностей. Особенность данной теории заключается в оперировании мгновенными значениями мощностей, полученными непосредственно по мгновенным значениям напряжений и токов. Это дает преимущество, поскольку исключает промежуточные вычисления величин гармонических

составляющих, которые могли бы приводить к ошибкам в расчетах в силу неверного представления физической природы мощностей и потоков энергии в нелинейных цепях переменного тока.

Информация, которую несут мгновенные значения напряжений и токов, наиболее точно и полно отражает процессы взаимодействия всех без исключения компонент неактивных мощностей в процессе их генерирования и потребления, что дает основание считать данную теорию наиболее корректной при анализе режимов работы современных нагрузок, прежде всего выпрямителей и инверторов, применяемых на тяговых подстанциях горных (рудничных) электровозов.

Наиболее известной концепцией теории мгновенных мощностей является pq -теория, предложенная Акаги, которая определяет мгновенные значения активной $p(t)$ и реактивной $q(t)$ мощности через комбинации произведений величин проекций $u(t)$ и $i(t)$ на неподвижные (α и β) или вращающиеся (d и q) ортогональные оси [22]. В результате мгновенная полная мощность $s(t)$ характеризуется произведением мгновенных комплексных величин напряжения и тока, изображенных в виде соответствующих векторов $\vec{u}(t)$ и $\vec{i}(t)$ на комплексной плоскости. Это описывается комбинацией произведений проекций векторов $\vec{i}(t)$, например, на оси α и β , в аналитической форме:

$$\begin{aligned} s(t) &= (u_\alpha(t) + ju_\beta(t))(i_\alpha(t) - ji_\beta(t)) = \\ &= (u_\alpha(t) \cdot i_\alpha(t) + u_\beta(t) \cdot i_\beta(t)) + \\ &+ j(u_\beta(t) \cdot i_\alpha(t) - u_\alpha(t) \cdot i_\beta(t)) = \\ &= p(t) + jq(t) \end{aligned} \quad (18)$$

или матричной форме:

$$\begin{bmatrix} p(t) \\ q(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_\alpha(t) & u_\beta(t) \\ u_\beta(t) & -u_\alpha(t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha(t) \\ i_\beta(t) \end{bmatrix}, \quad (19)$$

где $\vec{i}^*(t)$ — комплексно сопряженный вектор тока, $u_\alpha(t)$, $u_\beta(t)$, $i_\alpha(t)$, $i_\beta(t)$ — проекции мгновенных значений векторов напряжения и тока соответственно на оси α и β .

Достоинство такой концепции заключается в использовании свойств ортогональности двухфазных систем координат, что устраняет перекрестные связи между фазами и облегчает анализ режимов работы. В общем случае каждая из полученных мощностей $p(t)$ и $q(t)$ может быть представлена двумя слагаемыми:

$$\begin{aligned} p(t) &= \bar{p} + \tilde{p}(t) \\ q(t) &= \bar{q} + \tilde{q}(t) \end{aligned}, \quad (20)$$

где \bar{p} , \bar{q} , $\tilde{p}(t)$, $\tilde{q}(t)$ — постоянные составляющие, которые представляют собой средние значения соответственно мгновенной активной и реактивной мощности в системе, $\tilde{p}(t)$, $\tilde{q}(t)$, \bar{p} , \bar{q} — переменные составляющие, которые характеризуют непродуктивные пульсации мощностей и имеют нулевые средние значения. Практическая применимость выражения (20) определяется поиском и составлением алгоритмов управления устройствами компенсации реактивной мощности и мощности искажений, при которых $\bar{q} \rightarrow 0$ и $\tilde{p}(t) \rightarrow 0$, $\tilde{q}(t) \rightarrow 0$.

Вместе с тем данное представление мощностей в pq -теории не отвечает на основные вопросы, которые в свое время были поставлены перед теорией Будаану. Особенно много вопросов и противоречий [2, 23] вызывает физический смысл составляющих $\tilde{p}(t)$ и $\tilde{q}(t)$, их взаимосвязь и количественные соотношения с введенными ранее понятиями мощностей Q и D , образованными взаимодействием гармоник U_i и I_i .

Основа таких противоречий заключается в принципиальной невозможности при помощи всего четырех пере-

менных \bar{p} , \bar{q} , $\tilde{p}(t)$, $\tilde{q}(t)$ однозначно описать состояния мгновенных значений пар векторов $\vec{u}(t)$ и $\vec{i}(t)$ для всех фаз трехфазной системы. Неопределенность в описании данных векторов в произвольный момент времени для любой фазы приводит к тому, что последующее разложение мгновенного фазного тока относительно напряжения на активную и неактивную составляющие теряет смысл. И в этом случае с точки зрения передачи энергии вместо одной активной и одной неактивной составляющей могут быть получены две активные составляющие [1,2]. Этим обстоятельством можно объяснить тот факт, что впоследствии *pq*-теория мгновенных мощностей многократно дорабатывалась.

Так, с 1995 г. получает развитие расширенная теория мгновенной мощности «*extensionpq*-теория», а также последующие разновидности, такие как «*Synchronous Reference Frame Theory*» или *dq*-теория [24, 25]. Они используют дополнительную информацию, которая позволяет учесть фактическую асимметрию напряжений в трехфазных сетях или нулевую последовательность в четырехпроводных трехфазных сетях, как это осуществлено в *p-q-r* теории [26].

Следствием развития теории мгновенных мощностей стало ее обобщение, которое подразумевает считать мгновенную активную мощность системы в виде скалярного произведения векторов тока и напряжения, а мгновенную реактивную мощность в виде их векторного произведения

$$\begin{aligned} p(t) &= \vec{u}(t) \cdot \vec{i}(t), \\ \bar{q}(t) &= \vec{u}(t) \times \vec{i}(t). \end{aligned} \quad (21)$$

В последующих исследованиях показано [27,28], что $\vec{u}(t)$ и $\vec{i}(t)$ в (21) представляют собой обобщенные пространственные вектора, причем их раз-

мерность должна определяться количеством фаз анализируемой системы переменного тока.

На этой концепции основана кросс-векторная теория мгновенной мощности, которая понимает $\bar{q}(t)$ как единую неактивную составляющую, представленную вектором мгновенной реактивной мощности [29]. Таким образом, появление расчетной реактивной мощности в системе переменного тока в данной теории связано с образованием угла $\phi(t)$ (рис. 2, а) между обобщенными пространственными векторами $\vec{u}(t)$ и $\vec{i}(t)$:

$$\phi(t) = \arccos \left(\vec{u}(t), \vec{i}(t) \right). \quad (22)$$

4. Обсуждение результатов

Развитие теории неактивных мощностей на основе двухкоординатного представления векторов напряжения и тока. Анализ режимов в электрических цепях питания горных (рудничных) электровозов с использованием выражения (22), несмотря на лаконичность математической записи, для большинства практических задач приводит к достаточно громоздким вычислениям, особенно в случае большого числа гармоник $u(t)$ или наличия нелинейных участков ВАР нагрузки. Кроме того, мгновенные мощности, определенные по выражениям (21), без дополнительного анализа не дают представления о характере протекания энергетических процессов в электрических цепях, оценке относительных величин пульсаций мощности и их искажений, как это ожидалось в свое время от введенных величин Q и D .

Поэтому для установления взаимосвязей между Q и D и упрощения процедуры решения практических задач целесообразно усовершенствовать теорию мгновенных мощностей

для общего случая, объединив базовые положения теории электротехники и концепции, предложенные Фризе и Будеану, но исключив при этом стереотипные представления символического метода относительно векторов токов и напряжений.

Действительно, если вектор $\vec{v}(t)$ характеризует чисто синусоидальную функцию, как в символическом методе, то по поведению только одной переменной $v(t)$, определяемой проекцией $\vec{v}(t)$ на ось, и ее производной $v(t)/dt$ для любого момента времени можно однозначно восстановить фактическое положение вектора $\vec{v}(t)$ на плоскости. Так, координаты (ρ, α) вектора $\vec{v}(t)$ (рис. 2, б) легко восстанавливаются, считая, что $\rho = |\vec{v}(t)|$ — модуль вектора, $\alpha = \arg\{\vec{v}(t)\}$ — аргумент вектора. Приняв модуль $\rho = U_{1m}$, находим аргумент вектора $\alpha = \arg\{\vec{u}(t)\}$ по условию: если $du(t)/dt > 0$, то $\alpha = \arccos(u(t))$, если $du(t)/dt < 0$, то $\alpha = \pi - \arccos(u(t))$.

Поэтому для таких векторов достаточно знать единственную проекцию в виде

$u(t) = U_{1m} \sin(\omega t)$ или $i(t) = I_{1m} \sin(\omega t)$, чтобы провести анализ энергетических процессов в цепях переменного тока, основанный на математическом аппарате интегрирования и дифференцирования полученных переменных $u(t)$ и $i(t)$. В символическом методе простая гармоническая функция $v(t) = \vec{v} \cdot \cos(\omega t + \phi)$ представляет только действительную часть $v(t) = \vec{v} \operatorname{Re}\{e^{j(\omega t + \phi)}\}$ от комплексной функции [7].

Однако если вектор $\vec{u}(t)$ или $\vec{i}(t)$ определяется набором гармонических составляющих или в общем виде не представляет собой строго периодическую функцию, то для вычисления положения такого вектора на плоскости в любой момент времени необходимо знать одновременно две координаты. Так, положение обобщенного вектора $\vec{u}(t)$ (рис. 2, в) однозначно задается двумя координатами в полярной $(\rho(t) = |\vec{u}(t)|, \alpha(t) = \arg\{\vec{u}(t)\})$ и в декартовой системе $u(t) = \operatorname{Re}(\vec{u}(t))$, $\hat{u}(t) = \operatorname{Im}(\vec{u}(t))$. Поэтому для анализа процессов в электрической цепи с токами и напряжениями произволь-

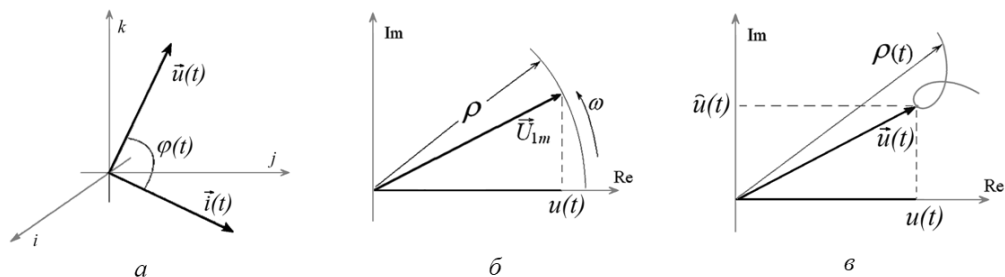


Рис. 2. Представления векторов в разных системах координат: а — обобщенные вектора напряжений $u(t)$ и токов $i(t)$ в пространстве с координатами i, j, k ; б — определение проекции $u(t)$ на ось действительных чисел Re вектора синусоидального напряжения \vec{U}_{1m} с модулем ρ , вращающегося на плоскости с угловой скоростью ω ; в — определение двух координат в виде проекций $u(t)$ и $\hat{u}(t)$ на оси Re и Im обобщенного вектора $\vec{u}(t)$ с модулем $\rho(t)$

Fig. 2. Representations of vectors in different coordinate systems: а — generalized vectors of voltages $u(t)$ and currents $i(t)$ in space with coordinates i, j, k ; б — definition of the projection $u(t)$ onto the axis of real numbers Re of the vector of sinusoidal voltage \vec{U}_{1m} with module ρ , rotating on the plane with angular velocity ω ; в — definition of two coordinates in the form of projections $u(t)$ and $\hat{u}(t)$ on axes Re and Im generalized vector with modulo $\rho(t)$

ной формы в общем случае может потребоваться 4 переменных: $u(t)$, $\hat{u}(t)$, $i(t)$, $\hat{i}(t)$, которые характеризуют соответствующие обобщенные векторы $\vec{u}(t)$ и $\vec{i}(t)$: $\vec{u}(t) = u(t) + j\hat{u}(t)$,

$$\vec{i}(t) = i(t) + j\hat{i}(t), \quad (23)$$

и будут получены как их проекции на ортогональные оси координат комплексной плоскости.

Переменные $\hat{u}(t)$ и $\hat{i}(t)$ ортогональны соответствующим переменным $u(t)$ и $i(t)$ и для общего случая могут быть получены при помощи известного преобразования Гильберта [7]

$$\hat{u}(t) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{u(\tau)}{t - \tau} d\tau, \quad \hat{i}(t) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{i(\tau)}{t - \tau} d\tau. \quad (24)$$

Для однофазной системы переменного тока скалярное произведение векторов $\vec{u}(t)$ и $\vec{i}(t)$ в матричной форме по выражению (19), где ось α ориентирована с осью действительных, а ось β соответственно с осью мнимых чисел, будет характеризовать мгновенные величины векторов мощностей $\vec{p}(t)$ и $\vec{q}(t)$.

Это отражает динамику изменения амплитуд мощностей $\vec{p}(t) = \pm |\vec{p}(t)|$, Вт, и $\vec{q}(t) = \pm |\vec{q}(t)|$, ВА, полученных одновременно по двойным проекциям значений векторов $\vec{u}(t)$ и $\vec{i}(t)$ на оси действительных и мнимых чисел:

$$\begin{aligned} \vec{p}(t) &= 0,5 (u(t)i(t) + \hat{u}(t)\hat{i}(t)) \\ \vec{q}(t) &= 0,5 (\hat{u}(t)i(t) - u(t)\hat{i}(t)). \end{aligned} \quad (25)$$

Ортогональность мощностей $\vec{p}(t)$ и $\vec{q}(t)$ выражения (25) позволяет определить мгновенную величину вектора полной мощности:

$$\vec{s}(t) = \sqrt{(\vec{p}(t))^2 + (\vec{q}(t))^2}. \quad (26)$$

Большой вклад в решение вопросов определения мощностей Q и D по значениям $s(t)$, $p(t)$ и $q(t)$ сделан в работе [30], в которой доказывается,

что величина Q представляет собой среднее за период значение мгновенных реактивных мощностей $q(t)$. Применительно к цепи однофазного переменного тока это характеризует Q как среднее значение величины вектора $\vec{q}(t)$ за период его обращения:

$$Q = \frac{1}{T} \int_0^T \vec{q}(t) dt. \quad (27)$$

Действительно, на основании свойств сопряженных переменных $u(t)$, $\hat{u}(t)$, $i(t)$, $\hat{i}(t)$

$$\int \hat{u}(t) i(t) dt = - \int u(t) \hat{i}(t) dt,$$

в соответствии с выражением (25)

$$\begin{aligned} Q &= \frac{1}{T} \left(\int_0^T \hat{u}(t) i(t) dt - \int_0^T u(t) \hat{i}(t) dt \right) = \\ &= \frac{1}{T} \int_0^T 2\hat{u}(t) i(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^T \vec{q}(t) dt. \end{aligned}$$

Динамический характер мгновенных значений величин векторов $\vec{s}(t)$, $\vec{p}(t)$ и $\vec{q}(t)$ в этом случае приводит к изменчивости во времени размеров сторон прямоугольного треугольника мощностей (см. рис. 1, в), который подобен треугольнику (см. рис. 1, а), но построен для несинусоидальных режимов.

Подобным образом осуществляется вывод мощности P :

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T \vec{p}(t) dt, \quad (28)$$

что оказывается тождественно выражению (2).

Результаты исследований, приведенные в работе [30], позволяют утверждать, что если мощность Q характеризует усредненное значение мощности $\vec{q}(t)$, то мощность D характеризует интенсивность отклонений мощностей $p(t)$ и $q(t)$ относительно их средних значений [31].

В данной работе предлагается использовать фактические значения

отклонений мгновенных значений полной мощности, найденные по выражению (26) для непосредственного определения результирующей величины мощности D .

Для любой электрической цепи можно определить существование средней величины полной мощности S , которая вычисляется по мгновенным значениям $\bar{s}(t)$ как

$$S = \frac{1}{T} \int_0^T \bar{s}(t) dt. \quad (29)$$

В этом случае разность, подобная выражению (8), составленному для средних значений ортогональных компонент мощностей, которые найдены по их мгновенным значениям, определит количественно отклонения $p(t)$ и $q(t)$ как искомую мощность искажения D .

Таким образом, используя совместно преобразования (24), систему (25) и выражения (26) – (29), получено окончательное выражение (30), по которому вычисляется мощность D для любых произвольных мгновенных значений напряжения и тока нагрузки, если представить их в виде обобщенных векторов, определенных в декартовой системе на комплексной плоскости четырьмя координатами $u(t)$, $\bar{u}(t)$, $i(t)$, $\bar{i}(t)$:

$$D = \frac{1}{2} \sqrt{\left(\frac{1}{T} \int_0^T \sqrt{(u(t)i(t) + \bar{u}(t)\bar{i}(t))^2 + (\bar{u}(t)i(t) - u(t)\bar{i}(t))^2} dt \right)^2 - \left(\frac{1}{T} \int_0^T (u(t)i(t) + \bar{u}(t)\bar{i}(t)) dt \right)^2 - \left(\frac{1}{T} \int_0^T (\bar{u}(t)i(t) - u(t)\bar{i}(t)) dt \right)^2}. \quad (30)$$

5. Заключение

1. Выявлены ценные аспекты теории реактивных мощностей, изложенные в ранних работах Фризе и Будеану [22,8], которые получили дальнейшее развитие в трудах D. Jeltsema [31,32] и других исследователей. Концепция разложения токов нагрузки на две ортогональные составляющие $i_a(t)$ и $i_r(t)$, предложенная Фризе на основе отличительного признака способности совершения работы, позволила отделить без перекрестных связей продуктивные компоненты мощностей P от непродуктивных Q . При этом мощность Q в несинусоидальных сетях, как это показано в работе Будеану, представляется совокупностью $Q = \sum Q_i$ реактивных мощностей $Q_i = U_i I_i \sin(\phi_i)$, обусловленных взаимодействием гармоник напряжения и тока с одинаковыми номерами. Материалы трудов D. Jeltsema и других исследователей позволяют заключить, что мощность искажений D характеризуют интенсивности отклонений мгновенных активных $p(t)$ и реактивных $q(t)$ мощностей в сети питания тяговых подстанций горных (рудничных) электровозов относительно их средних значений P и Q .

2. Установлено, что стремление исследователей осуществить формальный перенос представлений синусоидальных величин напряжений и токов в теоретических основах электротехники и связанных с ними выражений по определению баланса мощностей в символическом методе на электрические цепи с несинусоидальными напряжениями и токами вызывало основные ошибки и противоречия в определении мощностей Q и D . Показано, что способ выражения синусоидальных напряжений и токов в виде $u(t) = U_m \sin(\omega t)$ и $i(t) = I_m \sin(\omega t)$ как единствен-

ных координат, полученных путем проекции на ось действительных чисел вращающихся векторов \vec{U} и \vec{I} , и основанный на этом анализ электромагнитных процессов и последующее определение мощностей нельзя использовать для сетей переменного тока, используемых для питания тяговых подстанций горных (рудничных) электровозов РН и РП с произвольной формой $u(t)$ и $i(t)$.

3. Установлено, что наиболее полную информацию о процессах генерирования и потребления неактивных мощностей в несинусоидальной сети переменного тока можно получить, представив напряжения и токи на комплексной плоскости в виде обобщенных векторов $\vec{u}(t)$ и $\vec{i}(t)$. Поведение каждого из них характеризуется соответствующей парой координат $u(t)$ и $\hat{u}(t)$, $i(t)$ и $\hat{i}(t)$, полученной как проекции соответствующего обобщенного вектора на ортогональные оси действительных и мнимых чисел.

4. Получено выражение (30), вычисляющее мощность искажения D для любых режимов сети переменного тока по четырем координатам $u(t)$, $\hat{u}(t)$ и $i(t)$, $\hat{i}(t)$ обобщенных векторов напряжения $\vec{u}(t)$ и тока $\vec{i}(t)$. Показано, что величина D не образует пространственный треугольник мощностей, как это ошибочно считалось ранее, и при этом характеризует не степень искажения форм кривой $i(t)$ относительно $u(t)$, а степень деформации ортогональных катетов $p(t)$ и $q(t)$ прямоугольного треугольника мощностей относительно их средних значений P и Q на плоскости. Таким образом, это позволяет, в конечном итоге, более точно определять и компенсировать реактивную мощность в системе, что повышает качество электроэнергии для шахтных (рудничных) контактных электровозов, которые получают энергию от преобразовательной подстанции через контактную сеть напряжения постоянного тока.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Lin S., He S., Zhang H., Liu M., Tang Z., Jiang H., Song Y. Robust. Optimal Allocation of Decentralized Reactive Power Compensation in Three-Phase Four-Wire Low-Voltage Distribution Networks Considering the Uncertainty of Photovoltaic Generation // Energies. 2019, vol. 12,2479. DOI: 10.3390/en12132479.

2. Чижма С. Н. Совершенствование методов и средств контроля качества электроэнергии и составляющих мощности в электроэнергетических системах с тяговой нагрузкой: автореферат дис... докт. техн. наук: 05.14.02 / [Место защиты: Ом. гос. техн. ун-т]. — Омск, 2014. — 32 с.

3. Sharon D. Power factor definitions and power transfer quality in nonsinusoidal situations // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. 1996, vol. 45, pp.728–733. DOI: 10.1109/19.494589.

4. Callegari J. M. S., Silva M. P., de Barros R. C., Brito E. M. S., Cupertino A. F., Pereira H. A. Lifetime evaluation of three-phase multifunctional PV inverters with reactive power compensation // Electr. Power Syst. Res. 2019, vol. 175,105873. DOI: 10.1016/j.epsr.2019.105873.

5. Машкин А. Г. Мощность искажения в системах тягового электроснабжения // Электрика. — 2006. — № 6. — С. 29–33.

6. Жежеленко И. В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий: 6-е изд., перераб. и доп. — М.: Энергоатомиздат, 2010. — 375 с.

7. *Афанасьев Д. Е.* Символический метод: двойственности в формуле определения комплексной мощности и знаке ее мнимой составляющей нет // Вестник ЯГУ. — 2008. — Т. 5. — № 4. — С.20–26.

8. *Tenti P., Mattavelli P., and Tedeschi E.* Compensation techniques based on reactive power conservation // *Elect. Power Quality Utilisation J.* 2007, vol. XIII, no. 1, pp. 17–24.

9. *Hamrouni N., Younsi S., Jraidi M.* A Flexible Active and Reactive Power Control Strategy of a LV Grid Connected PV System // *Energy Procedia.* 2019, vol. 162, pp. 325–338. DOI: 10.1016/j.egypro.2019.04.034.

10. *Arnold D. B., Sankur M. D., Negrete-Pincetic M., Callaway D. S.* Model-Free Optimal Coordination of Distributed Energy Resources for Provisioning Transmission-Level Services // *IEEE Trans. Power Syst.* 2018, vol. 33, pp. 817–828. DOI: 10.1109/TPWRS.2017.2707405.

11. *Willems J. L.* Budeanu's reactive power and related concepts revisited // *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement.* 2011, vol.60(4), pp. 1182–1186.

12. *Dogga R.; Pathak M. K.* Recent trends in solar PV inverter topologies // *Sol. Energy.* 2019, vol. 183, pp. 57–73. DOI: 10.1016/j.solener.2019.02.065.

13. *Chai Y., Guo L., Wang C., Liu Y., Zhao Z.* Hierarchical Distributed Voltage Optimization Method for HV and MV Distribution Networks // *IEEE Trans. Smart Grid.* 2019, Volume: 11, Issue: 2, pp. 968 - 980. DOI: 10.1109/TSG.2019.2928701.

14. *Barrero-González F., Pires V. F., Sousa J. L., Martins J. F., Milanés-Montero M. I., González-Romera E., Romero-Cadaval E.* Photovoltaic Power Converter Management in Unbalanced Low Voltage Networks with Ancillary Services Support // *Energies.* 2019, vol. 12, p. 972. DOI: 10.3390/en12060972.

15. *Степаненко В. П., Белозеров В. И., Сорин Л. Н.* Перспективы применения комбинированных накопителей энергии на карьерном железнодорожном транспорте // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). — 2015. — № 5. — С. 317–322.

16. *Xiao Y., Wang Y., Sun Y.* Reactive Power Optimal Control of a Wind Farm for Minimizing Collector System Losses // *Energies.* 2018, vol. 11, p. 3177. DOI: 10.3390/en1113177

17. *Журавлев А. Г.* Вопросы оптимизации параметров транспортных систем карьеров // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2020. — № 3–1. — С. 583–601. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-31-0-583-601.

18. *Данилевич О. И.* Реактивная мощность при несинусоидальных напряжениях и токе // Технічна електродинаміка. Тематичний випуск, Силова електроніка та енергоефективність: наук.-прикл. журн. Нац. акад. наук України, Від-няфіз.-техн. проблем енергетики. 2009, part 5, pp. 75–79.

19. *Sarkar M. N. I., Meegahapola L. G., Datta M.* Reactive Power Management in Renewable Rich Power Grids // A Review of Grid-Codes, Renewable Generators, Support Devices, Control Strategies and Optimization Algorithms. *IEEE Access.* 2018, vol. 6, pp. 41458–41489. DOI: 10.1109/ACCESS.2018.2838563.

20. *Тимофеев И. П., Большунов А. В., Столярова М. С., Авдеев А. М.* Особенности работы тягового устройства на криволинейных участках рельсового пути // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2019. — № 1. — С. 171–178. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-01-0-171-178.

21. *Сулайманов А. О., Гольдштейн Е. И.* Определение неактивной мощности и ее составляющих по массивам мгновенных значений токов и напряжений // Известия Томского политехнического университета. — 2005. —Т. 308. № 7. — С. 44–47.

22. Abramov E. Y., Dedov S. I. Laboratory facility development for studying the heavy charge and discharge modes effect on the degradation of lithium-ion batteries // *Journal of Physics: Conference Series*. 2021, vol. 2032, no. 1, pp. 012092. DOI: 10.1088/1742-6596/2032/1/012092.

23. Галанина Т. В., Баумгартэн М. И., Королева Т. Г. Эколого-экономическое моделирование техногенного воздействия горнодобывающего региона на окружающую среду и человека // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. – 2019. – № 4. – С. 88–97. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-04-0-88-97.

24. Petrov A. A., Shchurov N. I. Reactive power compensation and high-frequency distortions correction in Metro // *Advances in Engineering Research. Actual Issues of Mechanical Engineering, AIME 2017: proc.*, Tomsk Polytechnic University, Tomsk. 2017, pp. 604–608, <https://doi.org/10.2991/aime-17.2017.98>.

25. Gandhi O., Rodriguez-Gallegos C. D., Gorla N. B. Y., Bieri M., Reindl T., Srinivasan D. Reactive Power Cost from PV Inverters Considering Inverter Lifetime Assessment // *IEEE Trans. Sustain. Energy*. 2019, vol. 10, pp. 738–747. – DOI: 10.1109/TSTE.2018.2846544.

26. Benysek G., Pasko M. *Power Theories for Improved Power Quality*. Springer-Verlag, London. 2012, 214 p.

27. Shchurov N. I., Dedov S. I., Malozyomov B. V., Shtang A. A., Martyushev N. V., Klyuev R. V., Andriashin S. N. Degradation of Lithium-Ion Batteries in an Electric Transport Complex // *Energies*. 2021, vol. 14, 8072. <https://doi.org/10.3390/en14238072>.

28. Сиротин Ю. А. Ортогональные составляющие трехфазного тока при ассиметричной активно-реактивной нагрузке в четырехпроводной цепи // *Электротехника і Електромеханіка, Electricalengineering & Electromechanics*. 2016, no. 3, pp.62–66.

29. Жемеров Г. Г., Тугай Д. В. Зависимость дополнительных потерь в трехфазных системах электроснабжения от реактивной мощности и пульсаций мгновенной активной мощности // *Технічна електродинаміка*. 2015, no. 4, pp. 66–70.

30. Shchurov N. I., Myatezh S. V., Malozyomov B. V., Shtang A. A., Martyushev N. V., Klyuev R. V., Dedov S. I. Determination of Inactive Powers in a Single-Phase AC Network // *Energies*. 2021, vol. 14, 4814, doi:10.3390/en14164814.

31. Сычев Ю. А., Аладьин М. Е., Зимин Р. Ю. Многофункциональные фильтрокомпенсирующие устройства в комбинированных системах электроснабжения предприятий минерально-сырьевого комплекса // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. – 2022. – № 7. – С. 164–179. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_7_0_164.

32. Абрамов Б. И., Иванов А. Г., Шленков В. А., Кузьмин И. К., Швырев Ю. В. Электропривод современных шахтных подъемных машин // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. – 2022. – № 5–2. – С. 145–162. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_52_0_145. **ПЛАБ**

REFERENCES

1. Lin S., He S., Zhang H., Liu M., Tang Z., Jiang H., Song Y. Robust Optimal Allocation of Decentralized Reactive Power Compensation in Three-Phase Four-Wire Low-Voltage Distribution Networks Considering the Uncertainty of Photovoltaic Generation. *Energies*. 2019, vol. 12, 2479. DOI: 10.3390/en12132479.

2. Chizhma S. N. Improvement of methods and means of monitoring the quality of electricity and power components in electric power systems with traction load: Abstract of the thesis. Doctor of Technical Sciences: 05.14.02 [Place of protection: Om. state tech. university]. – Omsk, 2014. – 32s.

3. Sharon D. Power factor definitions and power transfer quality in nonsinusoidal situations. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. 1996, vol. 45, pp. 728–733. DOI: 10.1109/19.494589.

4. Callegari J. M. S., Silva M. P., de Barros R. C., Brito E. M. S., Cupertino A. F., Pereira H. A. Lifetime evaluation of three-phase multifunctional PV inverters with reactive power compensation. *electr. Power System. Res.* 2019, vol. 175,105873. DOI: 10.1016/j.epr.2019.105873.

5. Mashkin A. G. Distortion power in traction power supply systems. *Electricity.* 2006, no. 6, pp. 29–33.

6. Zhezhelenko I. V. Higher harmonics in power supply systems of industrial enterprises, 6th ed., revised. and additional. Moscow, Energoatomizdat. 2010, 375 p.

7. Afanasiev D. E. Symbolic method: there is no duality in the formula for determining the complex power and the sign of its imaginary component. *Vestnik YSU.* 2008, vol. 5, no. 4, pp. 20–26.

8. Tenti P., Mattavelli P., and Tedeschi E. Compensation techniques based on reactive power conservation. *Elect. Power Quality Priorisation J.* 2007, vol. XIII, no. 1, pp. 17–24.

9. Hamrouni N., Younsi S., Jraidi M. A Flexible Active and Reactive Power Control Strategy of a LV Grid Connected PV System. *Energy Procedia.* 2019, vol. 162, pp. 325–338. DOI: 10.1016/j.egypro.2019.04.034.

10. Arnold D. B., Sankur M. D., Negrete-Pincetic M., Callaway D. S. Model-Free Optimal Coordination of Distributed Energy Resources for Provisioning Transmission-Level Services. *IEEE Trans. Power System.* 2018, vol. 33, pp. 817–828. DOI: 10.1109/TPWRS.2017.2707405.

11. Willems J. L. Budeanu's reactive power and related concepts revisited. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement.* 2011, vol. 60(4), pp. 1182–1186.

12. Dogga R., Pathak M. K. Recent trends in solar PV inverter topologies. *Sol. Energy.* 2019, vol. 183, pp. 57–73. DOI: 10.1016/j.solener.2019.02.065.

13. Chai Y., Guo L., Wang C., Liu Y., Zhao Z. Hierarchical Distributed Voltage Optimization Method for HV and MV Distribution Networks. *IEEE Trans. Smart Grid.* 2019. DOI: 10.1109/TSG.2019.2928701.

14. Barrero-González F., Pires V. F., Sousa J. L., Martins J. F., Milanés-Montero M. I., González-Romera E., Romero-Cadaval E. Photovoltaic Power Converter Management in Unbalanced Low Voltage Networks with Ancillary Services Support. *Energies.* 2019, vol. 12,972. DOI: 10.3390/en12060972.

15. Stepanenko V. P., Belozarov V. I., Sorin L. N. Prospects for the use of combined energy storage devices in quarry railway transport. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2015, no. 5, pp. 317–322.

16. Xiao Y., Wang Y., Sun Y. Reactive Power Optimal Control of a Wind Farm for Minimizing Collector System Losses. *Energies.* 2018, vol. 11,3177. DOI: 10.3390/en1113177.

17. Zhuravlev A. G. Issues of optimizing the parameters of open pit transport systems. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2020, no. 3–1, pp. 583–601. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-31-0-583-601.

18. Danilevich O. I. Reactive power at non-sinusoidal voltages and current. *Tekhnichnaelektrodinamika. Thematic entry, Power electronics and energy efficiency: sci.-applied. Journal. National acad. Sciences of Ukraine, Vid-nyafiz.-tekhn. energy problems. Kiev, Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine.* 2009, part 5, pp. 75–79.

19. Sarkar M. N. I.; Meegahapola L. G.; Datta M. Reactive Power Management in Renewable Rich Power Grids. A Review of Grid-Codes, Renewable Generators, Support Devices, Control Strategies and Optimization Algorithms. *IEEE Access.* 2018, vol. 6, pp. 41458–41489. DOI: 10.1109/ACCESS.2018.2838563.

20. Timofeev I. P., Bolshunov A. V., Stolyarova M. S., Avdeev A. M. Peculiarities of operation of a traction device on curved sections of a rail track. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2019, no. 1, pp. 171–178. DOI: 10.25018 / 0236-1493-2019-01-0-171-178.

21. Sulaimanov A. O., Goldstein E. I. Determination of inactive power and its components from arrays of instantaneous values of currents and voltages. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*. 2005, vol. 308, no. 7, pp. 44–47.

22. Abramov E. Y., Dedov S. I. Laboratory facility development for studying the heavy charge and discharge modes effect on the degradation of lithium-ion batteries. *Journal of Physics: Conference Series*. 2021, vol. 2032, no. 1, p. 012092. DOI: 10.1088/1742-6596/2032/1/012092.

23. Galanina T. V., Baumgarten M. I., Koroleva T. G. Ecological and economic modeling of the technogenic impact of a mining region on the environment and humans. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2019, no. 4, pp. 88–97. — DOI: 10.25018/0236-1493-2019-04-0-88-97.

24. Petrov A. A., Shchurov N. I. Reactive power compensation and high-frequency distortions correction in Metro. *Advances in Engineering Research. Actual Issues of Mechanical Engineering, AIME 2017: proc., Tomsk Polytechnic University*. 2017, pp. 604–608, <https://doi.org/10.2991/aime-17.2017.98>.

25. Gandhi O., Rodríguez-Gallegos C. D., Gorla N. B. Y., Bieri M., Reindl T., Srinivasan D. Reactive Power Cost from PV Inverters Considering Inverter Lifetime Assessment. *IEEE Trans. Sustain. Energy*. 2019, vol. 10, pp. 738–747. DOI: 10.1109/TSTE.2018.2846544.

26. Benysek G. Pasko M. Power Theories for Improved Power Quality. Springer-Verlag, London. 2012, 214 p.

27. Shchurov N. I., Dedov S. I., Malozyomov B. V., Shtang A. A., Martyushev N. V., Klyuev R. V., Andriashin S. N. Degradation of Lithium-Ion Batteries in an Electric Transport Complex. *Energies*. 2021, vol. 14, 8072. <https://doi.org/10.3390/en14238072>.

28. Sirotin Yu. A. Orthogonal components of a three-phase current with an asymmetric active-reactive load in a four-wire circuit. *Electrotechnics Electromechanics, Electricalengineering & Electromechanics*. 2016, no. 3, pp. 62–66.

29. Zhemerov G. G., Tugay D. V. Dependence of additional losses in three-phase power supply systems on reactive power and instantaneous active power pulsations. *Технічна електродинаміка*. 2015, no. 4, pp. 66–70.

30. Shchurov N. I., Myatezh S. V., Malozyomov B. V., Shtang A. A., Martyushev N. V., Klyuev R. V., Dedov S. I. Determination of Inactive Powers in a Single-Phase AC Network. *Energies*. 2021, vol. 14, 4814, doi:10.3390/en14164814.

31. Sychev Yu. A., Alad'in M. E., Zimin R. Yu. Multifunctional filter-compensating devices in combined power supply systems of enterprises of the mineral resource complex. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022, no. 7, pp. 164–179. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_7_0_164.

32. Abramov B. I., Ivanov A. G., Shilenkov V. A., Kuzmin I. K., Shevyrev Yu. V. Electric drive of modern mine hoisting machines. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022, no. 5–2, pp. 145–162. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_52_0_145.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

*Щуров Николай Иванович*¹ — профессор, докт. техн. наук, заведующий кафедрой, e-mail: shhurov@corp.nstu.ru;

*Мятеж Сергей Владимирович*¹ — доцент, канд. техн. наук, e-mail: serg_y_7578@mail.ru;

*Малоземов Борис Витальевич*¹ — доцент, канд. техн. наук, e-mail: mbv5@mail.ru;

*Штанг Александр Александрович*¹ — доцент, канд. техн. наук, e-mail: shtang@corp.nstu.ru,

ORCID ID: 0000-0001-9772-1784;

¹ Новосибирский государственный технический университет.

Для контактов: Малоземов Борис Витальевич, e-mail: mbv5@mail.ru.

Конфликт интересов авторов отсутствует.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

*Shhurov N. I.*¹, Professor, Dr. Sci. (Eng.), Head of the department,

e-mail: shhurov@corp.nstu.ru;

*Myatezh S. V.*¹, Associate Professor, Cand. Sci. (Eng.),

e-mail: serg_y_7578@mail.ru;

*Malozymov B. V.*¹, Associate Professor, Cand. Sci. (Eng.),

e-mail: mbv5@mail.ru;

*Shtang A. A.*¹, Associate Professor, Cand. Sci. (Eng.),

e-mail: shtang@corp.nstu.ru,

ORCID ID: 0000-0001-9772-1784;

¹ Novosibirsk State Technical University.

For contacts: *Malozymov B. V.*, e-mail: mbv5@mail.ru.

Получена редакцией 24.01.2022; получена после рецензии 27.09.2022; принята к печати 10.11.2022.

Received by the editors 24.01.2022; received after the review 27.09.2022; accepted for printing 10.11.2022.

