

АНАЛИЗ И РАСЧЕТ НЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ В СЕТИ ПИТАНИЯ ЭЛЕКТРОПОТРЕБИТЕЛЕЙ РУДНИЧНОГО ТРАНСПОРТА

Н. И. Щуров¹, С. В. Мятаж¹, Б. В. Малоземов¹

¹ Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, Россия

Аннотация: Повышение качества электроэнергии рудничных электровозов, питание которых осуществляется через выпрямители тяговых подстанций, является важной прикладной проблемой. В статье разработана уточненная математическая модель оценки потерь неактивной энергии рудничной энергетики. Анализ материалов трудов основоположников современной теории неактивной мощности и приведенные проверочные численные расчеты подтвердили справедливость теории Fryze и Budeanu и позволили установить качественные и количественные различия между реактивной мощностью и мощностью искажений. Отмечено, что с развитием полупроводниковых преобразователей электрической энергии, переменного тока, применяемых в энергетических установках горного оборудования, прежде всего выпрямителей и инверторов, требуются уточнения в определениях компонент неактивных мощностей. Показано, что величина мощности искажения может быть не только косвенно определена через баланс активной, реактивной и полной мощности, но и вычислена непосредственно при помощи расчетных выражений, которые характеризуют диспропорции между амплитудами и фазовыми сдвигами соответствующих гармоник напряжений и токов в случае их отклонения от синусоидальной формы. На числовых примерах показаны причины, по которым мощность искажения может отсутствовать при явном искажении формы кривой тока относительно формы кривой напряжения и возникать при отсутствии искажений, когда форма кривой тока формально подобна форме кривой напряжения.

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

Для цитирования: Щуров Н. И., Мятаж С. В., Малоземов Б. В. Анализ и расчет неактивной мощности в сети питания электропотребителей рудничного транспорта // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2022. – № 12-2. – С. 270–283. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_122_0_270.

Analysis and calculation of inactive power in the power network of electric consumers of mining transport

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

¹ Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia

Abstract: Improving the quality of electric power of mining electric locomotives, which are powered through rectifiers of traction substations, is an important applied problem. The article develops a refined mathematical model for assessing the losses of inactive energy in

the mining industry. An analysis of the materials of the works of the founders of the modern theory of inactive power and the above numerical verification calculations confirmed the validity of the Fryze and Budeanu theory and made it possible to establish qualitative and quantitative differences between reactive power and distortion power. It is noted that with the development of semiconductor converters of electrical energy, alternating current, used in power plants of mining equipment, primarily rectifiers and inverters, clarifications are required in the definitions of the components of inactive powers. It is shown that the magnitude of the distortion power can not only be indirectly determined through the balance of active, reactive and apparent power, but also calculated directly using calculation expressions that characterize the disproportions between the amplitudes and phase shifts of the corresponding voltage and current harmonics in case they deviate from the sinusoidal shape.. Numerical examples show the reasons why distortion power may be absent when the current waveform is clearly distorted relative to the voltage waveform and occur in the absence of distortion, when the current waveform is formally similar to the voltage waveform.

Key words: non-sinusoidal current, reactive power, harmonic orthogonality, power balance, instantaneous power, shape correction.

For citation: Shchurov N. I., Myatezh S. V., Malozyomov B. V. Analysis and calculation of inactive power in the power network of electric consumers of mining transport. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022;(12-2):270–283. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_122_0_270.

1. Введение

Рост нагрузки систем электро-снабжения в горной промышленности сопровождается повышением единичной мощности электроприемников реактивной составляющей полной мощности, а также увеличением искажения формы токов и напряжения [1]. В связи с этим актуальность задачи компенсации реактивной мощности в электроэнергетических системах рудничного транспорта растет. Отсутствие строгой методологии для толкования понятия реактивной мощности привело к появлению различных методов оценки ее величины [2]. При этом на сегодняшний день не существует единой точки зрения на решение данной задачи.

Для вычисления мощности в синусоидальных цепях переменного тока в сетях питания рудничного транспорта существуют давно известные расчетные выражения [3]. Так, в электрической цепи переменного тока с частотой $\omega = 2\pi \cdot f$ (рад/сек), синусоидальным напряжением $u(t) = U_m \sin(\omega t)$ (В) и током $i(t) = I_m \sin(\omega t + \phi)$ (А), где ϕ –

угол сдвига тока относительно напряжения (рад) U_m (В) и I_m (А) – амплитудные величины, для которых действующие значения соотносятся, как $U = U_m / \sqrt{2}$ и $I = I_m / \sqrt{2}$, произведение $u(t) \cdot i(t)$ образует два слагаемых [4]

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

Первое слагаемое выражения (2) характеризует активную мощность, среднее значение которой вычисляется как

$$P = \frac{U_m I_m}{2} \cos(\phi) = UI \cos(\phi) \quad . (2)$$

а второе слагаемое имеет название «реактивная мощность», которая пульсирует с частотой 2ω и вычисляется как

$$Q = \frac{U_m I_m}{2} \sin(\phi) = UI \sin(\phi) \quad . (3)$$

Большую роль в развитии анализа и упрощении расчетов для синусои-

дальних цепей переменного тока в свое время сыграло становление символического метода [5], в котором используются действующие значения U и I . Их произведение определяет полную или кажущуюся мощность S :

$$S = U \cdot I. \quad (4)$$

которая для цепей с синусоидальными $u(t)$ и $i(t)$, как это видно из выражений (1)–(4), образована компонентами мощностей P и Q :

$$\begin{aligned} S &= UI\sqrt{(\cos(\phi))^2 + (\sin(\phi))^2} = \\ &= \sqrt{U^2 I^2 (\cos(\phi))^2 + U^2 I^2 (\sin(\phi))^2} = \\ &= \sqrt{P^2 + Q^2}. \end{aligned} \quad (5)$$

Представив, что вектор i_1 тока нагрузки в общем случае отстает или опережает вектор питающего напряжения U_1 на угол ϕ , в символическом методе рассматривают мощность Q формально через небаланс ортогональных мощностей S и P , а именно $Q = \sqrt{S^2 - P^2}$ в соответствии с выражением (5).

Однако большинство современных нагрузок, включая крупные потребители горной промышленности и рудничный электрический транспорт [6], в реальных условиях содержат мощные статические полупроводниковые преобразователи — выпрямители или инверторы [7], которые обладают резко нелинейными вольт-амперными характеристиками (ВАХ) [8]. Они вызывают дополнительное искажение кривой питающего напряжения $u(t)$ в электрических сетях переменного тока, которые питают тяговые подстанции рудничного транспорта [9]. При вычислении мощности в данных условиях необходимо учитывать взаимодействие несинусоидальных напряжений $u(t)$ (В) и несинусоидальных токов $i(t)$ (А).

Очевидно, что взаимодействие гармоник несинусоидального напряжения [10]

$$\begin{aligned} u(t) &= \sqrt{2}U_1 \sin(\omega t + \alpha_1) + \\ &+ \sqrt{2}U_2 \sin(2\omega t + \alpha_2) + \dots \end{aligned}$$

и тока

$$\begin{aligned} i(t) &= \sqrt{2}I_1 \sin(\omega t + \beta_1) + \\ &+ \sqrt{2}I_2 \sin(2\omega t + \beta_2) + \dots, \end{aligned}$$

где α_i и β_i — фазовые сдвиги гармоник напряжений и токов, создаст от каждой гармоники в отдельности свои компоненты реактивных мощностей

$$\begin{aligned} Q_1 &= U_1 I_1 \sin(\beta_1 - \alpha_1), \\ Q_2 &= U_2 I_2 \sin(\beta_2 - \alpha_2) \text{ и т. д.} \end{aligned}$$

Превышение полной мощности S над активной мощностью P в таких условиях уже нельзя объяснить возникновением только одной реактивной мощности Q , поскольку в электрической цепи, кроме того, будут возникать взаимодействия гармоник напряжений и токов с разными порядковыми номерами, что характеризуется произведениями вида $U_i I_j \sin(\beta_j - \alpha_i)$.

2. Неактивная мощность в работах Fryze и Budeanu

Одно из первых объяснений механизма возникновения небаланса мощностей при питании рудничного транспорта при разложении мощности S на ортогональные компоненты P и Q и определения Q_Σ как совокупности реактивных мощностей Q_i от отдельных гармоник

$$Q = \sum Q_i = \sum U_i I_i \sin(\phi_i). \quad (6)$$

где i — порядковые номера гармоник действующих значений напряжений U_i и токов I_i , а ϕ_i — углы сдвига между ними, изложено в работе Budeanu [6]. Именно в этой теории баланс мощностей достигнут введением дополнительной компоненты неактивной

мощности D , названной как мощность искажений (*Distortion*) и взаимно ортогональной по отношению к уже известным компонентам P и Q . Ее величина призвана обеспечить равенство

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2 + D^2}. \quad (7)$$

и чаще всего выражение (7) используется для того, чтобы вычислять мощность D как значение

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

при котором сохраняется баланс мощностей.

Величина D изначально в работе [6] была представлена как мера взаимного искажения кривых $u(t)$ и $i(t)$, однако впоследствии было обнаружено [7,8], что в сетях переменного тока с определенными комбинациями высших гармоник на уровне мгновенных мощностей может происходить взаимодействие компонент Q и D таким образом, что $D = 0$ даже в условиях искаженной формы кривой $i(t)$ относительно $u(t)$, либо наоборот, $D \neq 0$ при условии, когда форма кривой $i(t)$ имеет подобие относительно формы кривой $u(t)$. Это послужило поводом для сомнений в справедливости теории *Budeanu* и поиска иных подходов к определению неактивной мощности, которые не противоречат результатам проводимых экспериментов [9, 10].

Такие подходы имелись в ранних работах *Fryze* [11]. В них общая неактивная мощность Q_q , которая не совершает полезной работы, не разделена на компоненты Q и D или подобные им, а определена через небаланс полной и активной мощности

$$Q_q = \sqrt{S^2 - P^2} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u^2(t) dt \cdot \frac{1}{T} \int_0^T i^2(t) dt - \left(\frac{1}{T} \int_0^T u(t)i(t) dt \right)^2}. \quad (9)$$

Таким образом, в представлении теории *Fryze* для мощности Q_q нет явной физической интерпретации, как это сделано для синусоидальных цепей.

Общепринятого выражения для непосредственного определения величины D и однозначного истолкования ее физического смысла [6, 10], как это сделано для мощностей P и S , не существует до сих пор. Более того, среди отдельных научных школ нет четкого понимания физического смысла суммарной реактивной мощности для электрических сетей, в которых действуют несинусоидальные напряжения и токи. Об этом свидетельствует принятый стандарт IEEE 1459 [12], который непосредственно характеризует качество электроэнергии в энергетических сетях горного оборудования и в котором введено понятие неактивной мощности N , однако определение мощности Q ограничено только первой гармоникой.

В результате этого в последнее время в теории неактивных мощностей доминирует тенденция непосредственного анализа мгновенных значений $u(t)$ и $i(t)$, ставшая основой отдельного направления теории мгновенных мощностей. Преимущество такой теории заключается в устранении промежуточных понятий и вычислений, которые применительно к нелинейным и несинусоидальным цепям переменного тока способны привести к принципиальным ошибкам в определениях и расчетах в силу неверного истолкования физической природы возникновения отдельных компонент мощностей. Однако теория мгновенных мощностей не оперирует понятиями средних значений мощностей и не объясняет связь между взаимным искажением кривых $u(t)$ и $i(t)$ и появлением дополнительных компонент мощностей в составе величины S .

Известные научные работы по энергетике горной промышленности, осно-

ванные на спектральных, интегральных методах оценки мощностей Q и D , оказываются противоречивы в отношении определения неактивных мощностей, что на практике приводит к ошибкам как при их вычислении, так и при учете электрической энергии, потребляемой рудничным транспортом [13–15].

3. Реактивная мощность и мощность искажений в составе неактивных мощностей

Если в сети переменного тока кривая $u(t)$ оказывается несинусоидальной, что создает несинусоидальный ток нагрузки $i(t)$, или сама нагрузка обладает нелинейной ВАХ, то в этом случае возникнет взаимодействие гармоник напряжения U_i и тока I_j с разными порядковыми номерами $i \neq j$. В силу свойства ортогональности этих гармоник с кратными частотами $j/i = n$ за период T работа совершена быть не может, поскольку в этом случае мощность

$$P_{ij} = \frac{1}{T} \int_0^T u_i(t) \cdot i_j(t) dt = 0. \quad (10)$$

Однако из выражения (9) следует, что полная мощность для действия этих гармоник в этом случае составит ненулевую величину $S_{ij} = U_i I_j \neq 0$, которую принято считать мощностью искажений $S_{ij} = D_{ij}$.

Таким образом, в сети переменного тока для питания горного (рудничного) транспорта даже с синусоидальным источником напряжения нагрузка с чисто активным характером способна образовывать мощности D_{ij} , если эта нагрузка обладает нелинейной ВАХ. Даже простая искусственная задержка открытия электронного ключа в однофазной сети переменного тока, питающей чисто активную нагрузку, уже создает спектр высших гармоник тока.

В качестве простого примера приведены осциллограммы (рис. 1)

и спектральный состав (таблица) тока нагрузки при $R = 1$ о.е. в сети с синусоидальным источником напряжения $U = 100$ о.е. и частотой $f = 50$ Гц, для которой задержка в 0,007 с открытия электронного ключа в составе выпрямительного устройства будет равна 70%.

Простой анализ показывает, что чисто активный характер нагрузки вызывает фазовый сдвиг основной гармоники тока $-54,8^\circ$ в сети с синусоидальным напряжением $u(t)$ источника питания, как если бы электрическая цепь питания рудничной тяговой подстанции содержала индуктивный элемент, реактивная мощность которого формально определяется по выражению (3).

Однако считать, что в подобных цепях имеются реактивные элементы, производящие с источником питания обмен мощности, разумееется, ошибочно. Поэтому, как это справедливо отмечено в ряде работ [10,14], понятие реактивной мощности, которая «характеризует энергию, перекачиваемую от источника на реактивные элементы приемника, а затем возвращаемую этими элементами обратно в источник в течение одного периода колебаний, отнесенную к этому периоду» по мере развития средств полупроводниковой техники с нелинейными ВАХ, утрачивает физический смысл.

Действие каждой гармоники (см. таблицу) возможно проанализировать по отдельности. Так, из рис. 2, а видно, что вектор третьей гармоники тока I_3 за один период T трижды опередит вектор напряжения единственной гармоники $\bar{U} = \bar{U}_1$. Взаимодействие векторов \bar{U}_1 и \bar{I}_3 создаст мгновенную мощность $p_3(t)$, знакопеременные пульсации которой (рис. 2, б) в силу свойств выражения (10) распределяются таким образом, что суммарная площадь, ограниченная

кривой $p_3(t)$ с положительными значениями, окажется равной суммарной площади, ограниченной этой кривой с отрицательными значениями. При этом $P_{13} = 0$, в то время как полная мощность в этом случае составит

$$S_{13} = U_1 I_3 = D_{13} = 711,8 \text{ (ВА)}.$$

Аналогичным образом происходит взаимодействие остальных j -х высших гармоник тока с напряжением \bar{U}_1 , что сопровождается появлением соответствующих мощностей, а именно: $P_{15} = 0$, $D_{15} = 664 \text{ (ВА)}$, $P_{17} = 0$, $D_{17} = 358 \text{ (ВА)}$ и т. д.

Действия мгновенных значений составляющих $p_i(t)$ в интервалы времени $0 \dots 0,007 \text{ с}$, когда электронный

ключ разомкнут, взаимно полностью нейтрализуются при учете всех высших гармоник (рис. 3).

Фактически взаимодействие мощности Q_1 с составляющими мощности D_{ij} происходит на уровне перераспределения мгновенных значений $p(t)$ в разные моменты времени, при этом сами значения составляющих Q_1 и D_{ij} остаются неизменными. Это легко доказать тем, что одна гармоника, характеризующая определенную составляющую мощности, не может быть целиком получена или скомпенсирована, как это следует из свойств рядов Фурье [16], совокупностью других гармоник.

Следовательно, мощность $Q_1 = U_1 I_1 \sin(\phi_1)$ от первой гармоники

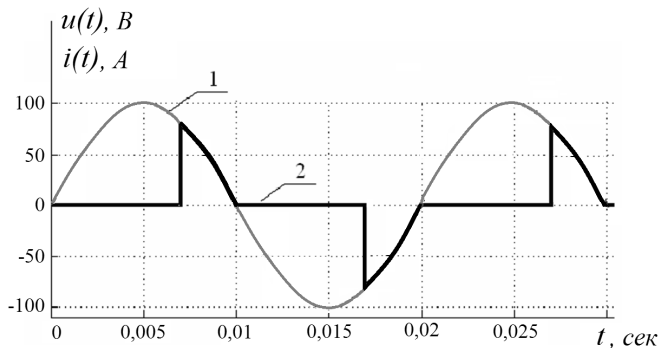


Рис. 1. Осциллограммы питающего напряжения (кривая 1) и тока активной нагрузки (кривая 2)
Fig. 1. Oscillograms of the supply voltage (curve 1) and active load current (curve 2)

Таблица
Характеристики гармоник
Characteristics of harmonics

№ гармоники	Частота гармоники, f_n , Hz	Амплитуда I_{mi} , А	Фазовый сдвиг, ϕ_i
1	50	24.46	-54.8°
3	150	20.11	16.9°
5	250	13.28	94.2°
7	350	7.16	188.5°
9	450	5.03	-51.6°
11	550	5.02	53.8°
13	650	4.12	150.8°
15	750	3.12	260.0°

тока в общем случае не является прерогативой проявления свойств реактивных элементов в сети переменного тока, а может рассматриваться как небаланс мгновенных значений $p_i(t)$.

Совокупность мощностей D_{ij} с ортогональными свойствами гармоник запишется в виде

$$D_{\Sigma} = \sqrt{\sum_{i=2}^{\infty} D_i^2}. \quad (11)$$

Поскольку $\bar{U} = \bar{U}_1$, то $D_{\Sigma} = \sqrt{\sum_{i=2}^{\infty} D_i^2} = \sqrt{\sum_{i=2}^{\infty} U_1^2 I_i^2}$, и с учетом данных таблицы

$$\text{получаем } D_{\Sigma} = \frac{100}{\sqrt{2}} \sqrt{\left(\frac{20,11}{\sqrt{2}}\right)^2 + \left(\frac{13,28}{\sqrt{2}}\right)^2 + \left(\frac{7,16}{\sqrt{2}}\right)^2 + \left(\frac{5,03}{\sqrt{2}}\right)^2 + \dots} \approx 1347,4.$$

Мощности P_1 , Q_1 и S_1 , по выражениям (2) – (4) и таблице, составят значения

$$P_1 = U_1 I_1 \cos(\phi_1) = \frac{100}{\sqrt{2}} \cdot \frac{24,46}{\sqrt{2}} \cos(54,7) \approx 712 \text{ Вт},$$

$$Q_1 = U_1 I_1 \sin(\phi_1) = \frac{100}{\sqrt{2}} \cdot \frac{24,46}{\sqrt{2}} \sin(54,7) \approx 1005 \text{ ВА},$$

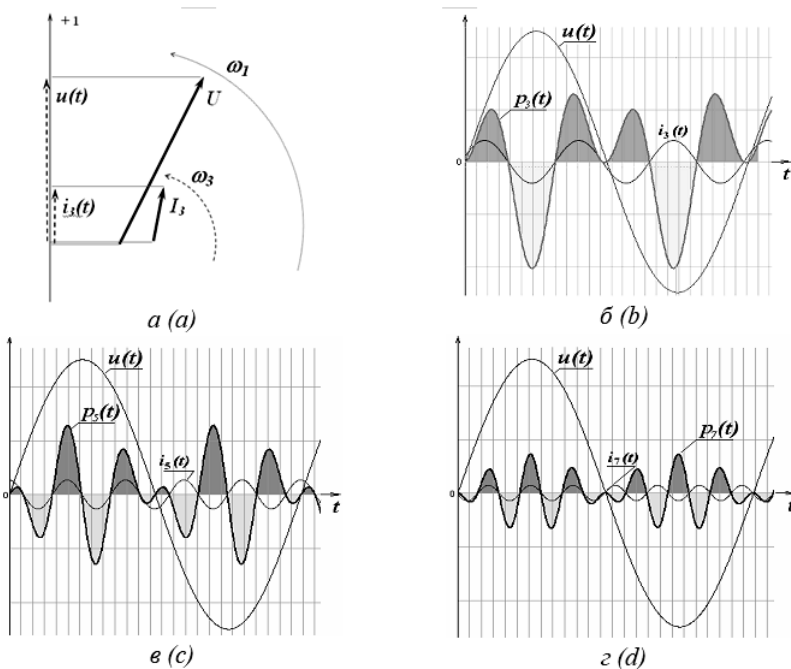


Рис. 2. Векторные и волновые диаграммы: а – вращающийся вектор напряжения источника питания и третьей гармоники тока нагрузки; волновые диаграммы мгновенных напряжений, токов и мощностей для третьей (б), пятой (в) и седьмой (г) гармоник

Fig. 2. Vector and wave diagrams: а – the rotating vector of the power supply voltage and the third harmonic of the load current; wave diagrams of instantaneous voltages, currents and powers for the third (b), fifth (c) and seventh (d) harmonics

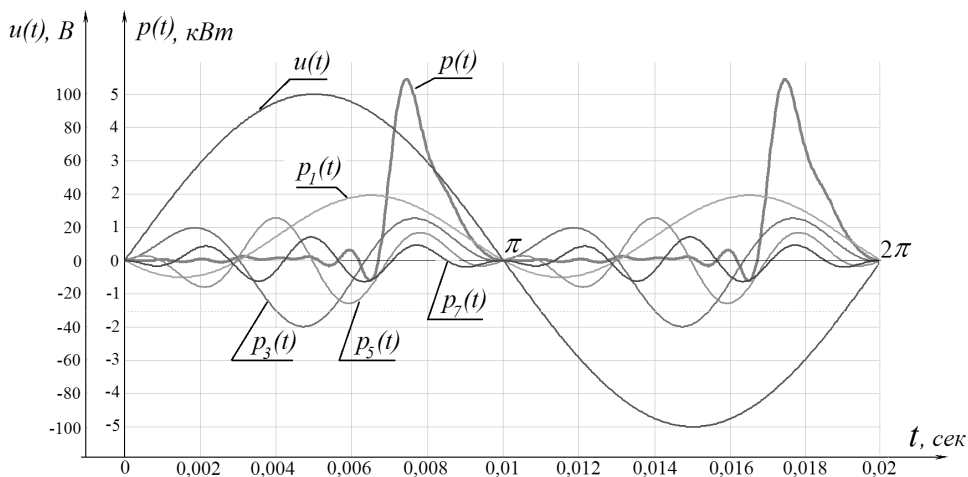


Рис. 3. Синтез гармоник мгновенных мощностей нагрузки
 Fig. 3. Synthesis of harmonics of instantaneous load powers

$$S = U \cdot I = \frac{100}{\sqrt{2}} \sqrt{\left(\frac{24,46}{\sqrt{2}}\right)^2 + \left(\frac{20,11}{\sqrt{2}}\right)^2 + \left(\frac{13,28}{\sqrt{2}}\right)^2 + \left(\frac{7,16}{\sqrt{2}}\right)^2 + \left(\frac{5,03}{\sqrt{2}}\right)^2 + \dots} \approx 1825,46 \text{ ВА.}$$

В результате подтверждается представление теории *Budeanu* [6] о том, что мощности P , Q и D взаимно ортогональны и, по выражению (7), должны обеспечивать баланс, как в данном случае:

$$\sqrt{712^2 + 1005^2 + 1347,4^2} \approx 1825,46 \text{ , (ВА).}$$

Таким образом, в несинусоидальных цепях переменного тока существуют отдельно мощности Q и D , которые следует различать при определении, расчете или приборном учете неактивных мощностей.

Однако поскольку до настоящего времени многие исследователи [7, 9, 13] скептически относятся к теории *Budeanu* [6] и представляют неактивные мощности в виде неразделяемой на отдельные компоненты совокупности, как аналог величины Q_q по выражению (9), то необходимо найти ответ на основной вопрос скептиков данной теории, который формулируется следующим образом.

Почему мощность D может возникать в условиях, когда кривая $i(t)$ подобна кривой $u(t)$, и наоборот, почему бывает $D = 0$ при условии явного искажения кривой $i(t)$ относительно кривой $u(t)$?

Для ответа на этот вопрос необходимо проанализировать условия появления $D \neq 0$ при подобии кривых $u(t)$ и $i(t)$, и $D = 0$ при искажении кривой $i(t)$ относительно кривой $u(t)$.

4. Связь мощности искажений с несинусоидальностью кривых $u(t)$ и $i(t)$

Условие $D = 0$ при явном различии спектрального состава высших гармоник в кривой $i(t)$, искаженной относительно $u(t)$, однозначно указывает на компенсацию составляющих в выражении (11), что возможно только в том случае, когда каждая компонента $D_{ij} = 0$.

Пусть для примера кривые $u(t)$ и $i(t)$ образованы двумя гармониками напря-

жения U_m, U_n и тока I_m, I_n . В этом случае гармоники m и n по выражению (2) создадут активные мощности

$$P_m = U_m I_m \cos(\phi_m) \text{ и } P_n = U_n I_n \cos(\phi_n).$$

а по выражению (3), кроме того, реактивные мощности

$$Q_m = U_m I_m \sin(\phi_m) \text{ и } Q_n = U_n I_n \sin(\phi_n).$$

Из выражения (8) получаем, что

$$D^2 = S^2 - (P^2 + Q^2),$$

причем $S^2 = (U \cdot I)^2 = (U_m^2 + U_n^2) \cdot (I_m^2 + I_n^2)$,

Отсюда мощность искажения выразится как

$$D = \sqrt{U_m I_n (U_m I_n - 2U_n I_m \cos \phi_m \cdot \cos \phi_n) + U_n I_m (U_n I_m - 2U_m I_n \sin \phi_m \cdot \sin \phi_n)}. \quad (12)$$

Следовательно, условие $D = 0$ будет выполнено, если

$$U_m I_n (U_m I_n - 2U_n I_m \cos \phi_m \cdot \cos \phi_n) = -U_n I_m (U_n I_m - 2U_m I_n \sin \phi_m \cdot \sin \phi_n).$$

Это в общем случае возможно при условии одновременного достижения тождества отношений действующих значений для гармоник напряжений и токов

$$\frac{U_m}{U_n} = \frac{I_m}{I_n} \quad (13)$$

и равенства фазовых сдвигов гармоник напряжений и токов

$$\varphi_m = \varphi_n. \quad (14)$$

Если представить гармоники U_m, U_n, I_m, I_n , которые соответствуют условиям (13) и (14), в виде вращающихся векторов на комплексной плоскости, то развернутые во времени проекции результирующих векторов напряжения $\bar{U} = \bar{U}_m + \bar{U}_n$ и тока $\bar{I} = \bar{I}_m + \bar{I}_n$ образуют (рис. 4, в) искаженную кривую $u(t)$ относительно кривой $i(t)$, в то время как годографы $u(t)$ и $i(t)$ результирующих векторов будут подобны и взаимно сдвинуты на $\pi/2$ (рис. 4, а).

Вместе с тем кривая $i(t)$, имеющая явное искажение относительно кривой $u(t)$, принадлежит нагрузке, которая в сети переменного тока обладает чисто реактивной мощностью $S = Q = Q_m + Q_n$.

Попытка обеспечить формальное подобие кривых $u(t)$ и $i(t)$ при сохранении тождества амплитуд их гармонического состава (рис. 4, б, г) нарушает условия (13) и (14) и приведет к тому, что в сети переменного тока помимо реактивной мощности Q появляется мощность искажений D , что легко проверяется числовыми расчетами по выражениям (2) – (4) и (6) – (12).

5. Обсуждение результатов

В случае большого количества гармоник в сети переменного тока тяговых подстанций горных (рудничных) электровозов выражение (12) для непосредственного вычисления величины D по действующим значениям гармоник напряжений и токов приобретет более громоздкий вид [17]:

$$D = \sqrt{\sum_i \sum_{\substack{j \\ i \neq j}}^{\infty} U_i I_j (U_i I_j - 2U_j I_i \cos \phi_i \cdot \cos \phi_j) + \sum_i \sum_{\substack{j \\ i \neq j}}^{\infty} U_j I_i (U_j I_i - 2U_i I_j \sin \phi_i \cdot \sin \phi_j)}.$$

однако это принципиально не влияет на физический смысл и поведение мощностей P, Q и D в сети переменного тока.

Таким образом, мощность D , несмотря на не совсем удачное ее название, характеризует не степень искажения формы кривой $i(t)$ относительно $u(t)$, а указывает на нерациональные с энергетической точки зрения соотношения в гармоническом составе этих кривых амплитуд и фазовых сдвигов [18, 19]. В таких случаях взаимодействия гармоник U_i и I_j с разными порядковыми номерами $i \neq j$ будут создавать дополнительные балластные мощности, не способные совершать полезной работы. Поэтому применение автоматических компенсирующих устройств с нулевой активной мощностью [20] и соответствующими алгоритмами работы может оптимизировать гармонический состав несинусоидальной кривой $i(t)$ относительно кривой $u(t)$ таким образом, чтобы нейтрализовать не только Q , но и D [21, 22].

6. Заключение

1. На основе анализа волновых и векторных диаграмм показано, что неактивная мощность $\sqrt{S^2 - P^2}$ в несинусоидальных сетях переменного тока для питания рудничных электровозов однозначно разделяется на мощность искажений D и реактивную мощность Q , которую не следует считать количественным показателем скорости обмена энергией между реактивными элементами электрической сети, как это ранее приводилось в научной литературе.

2. Показано, что мощность Q образуется в ходе взаимодействия гармоник напряжений и токов с одинаковыми порядковыми номерами $Q_\Sigma = \sum Q_i$, а мощность D образуется в ходе взаимодействия гармоник напряжений и токов с разными порядковыми номерами, в силу ортогональных свойств

которых $D_\Sigma = \sqrt{\sum_{i=2}^{\infty} D_i^2}$. На уровне мгно-

венных значений $p(t) = u(t) \cdot i(t)$ взаимодействие этих мощностей позволяет корректировать форму питающих токов и напряжений в сети переменного тока, однако средние значения мощностей Q_Σ и D_Σ за рабочий период должны оставаться нулевыми.

3. Проведенный анализ и расчеты подтверждают справедливость основ теории *Fryze* и *Budeanu* относительно понятий активных и неактивных мощностей в цепях питания рудничных тяговых подстанций, ортогональности компонент P , Q , D и достижения баланса мощностей в сети с нелинейной ВАХ нагрузки. Однако отсутствие строгого определения мощности D и соответствующих расчетных выражений усложняет подсчет и приборный учет фактических значений неактивных мощностей Q и D , приводит к ошибкам при последующих расчетах режимов работы электрических сетей переменного тока с реальными потребителями (рудничные электровозы типов РН и РП).

4. Показано, что визуальное подобие кривых $u(t)$ и $i(t)$ не может служить критерием отсутствия мощности искажений D . Мощность D фактически не характеризует степень искажения формы кривой $i(t)$ относительно $u(t)$, а указывает на нерациональные с энергетической точки зрения соотношения в гармоническом составе этих кривых амплитуд и фазовых сдвигов. Такие нерациональные соотношения, кроме известной мощности Q , создают дополнительные балластные мощности D , также не способные совершать полезной работы. Алгоритмы работы автоматических компенсирующих устройств с нулевой активной мощностью должны быть направлены на оптимизацию гармонического состава кривой $i(t)$ относительно ставшей в настоящее время несинусоидальной кривой $u(t)$

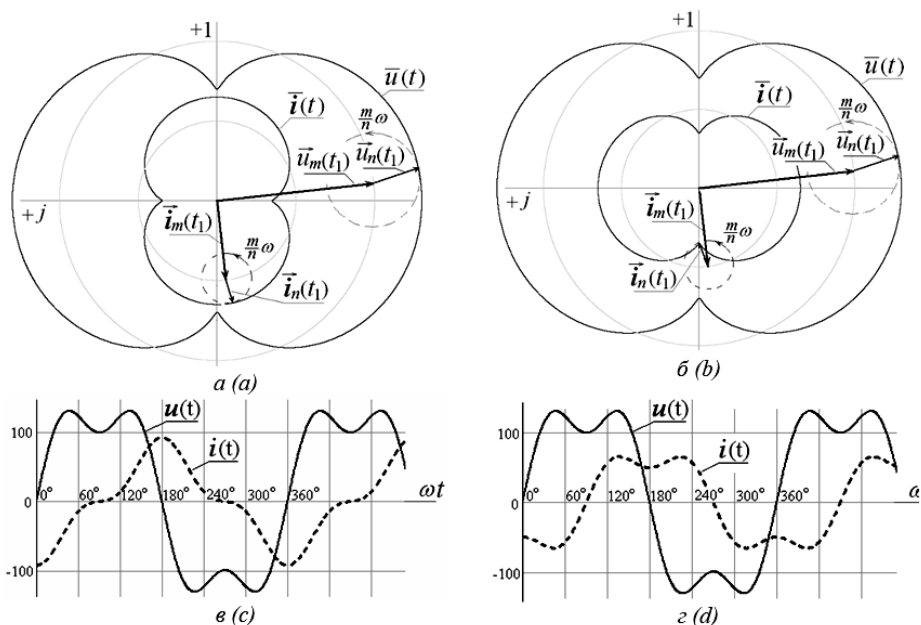


Рис. 4. Векторные (а, б) и волновые (в, г) диаграммы напряжений и токов в несинусоидальной сети переменного тока, содержащей гармоники m и n
 Fig. 4. Vector (a, b) and wave (c, d) diagrams of voltages and currents in a non-sinusoidal AC network containing harmonics m and n

таким образом, чтобы нейтрализовать не только Q , но и D , что позволяет повысить качество электроэнергии рудничных электровозов, питание которых осуществляется через выпрямители

тяговых подстанций. Таким образом, разработана уточненная математическая модель оценки потерь неактивной энергии рудничных потребителей электроэнергии, включая шахтные электровозы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абрамович Б. Н. Система бесперебойного электроснабжения предприятий горной промышленности // Записки Горного института. — 2018. — Т. 229. — С. 31–40. DOI: 10.25515/PMI.2018.1.31.
2. Жемеров Г. Г., Тугай Д. В. Переход от реактивной мощности к мощности потерь в трехфазных системах электроснабжения // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». 2017, № 27, с. 182–186.
3. 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/en11113177.
4. 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.
5. Жежеленко И. В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий. — М.: Энергоатомиздат, 2010. — 375 с.
6. 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 1,012092. DOI: 10.1088/1742-6596/2032/1/012092.

7. 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.

8. 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.

9. 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.

10. 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.

11. 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>.

12. 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.

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

14. 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.

15. 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.

16. 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.

17. 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.

18. Akagi H., Kanazawa Y., Nabae A. Instantaneous reactive power compensator's comprising switching device without energy storage components // IEEE Trans. Ind. Applications. 1984, vol. IA-20, pp. 625–630.

19. 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.

20. Абрамов Б. И., Иванов А. Г., Шиленков В. А., Кузьмин И. К., Шевырев 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.

21. Myatezh S. V., Novolodskiy M. V., Kitova E. T. Definition of distortion power in AC network and analysis of its reasons // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019, vol. 560, art.012113 (7 p.).

22. 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. **MIAB**

REFERENCES

1. Abramovich B. N. Uninterrupted power supply system for mining enterprises. *Zapiski Gornogo instituta*. 2018, vol. 229, pp. 31–40. [In Russ]. DOI: 10.25515/PMI.2018.1.31
2. Zhemerov G. G., Tugay D. V. Transition from reactive power to power losses in three-phase power supply systems. *Bulletin of the National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”*. 2017, no. 27. pp.182–86. [In Russ].
3. 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/en11113177.
4. 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.
5. Zhezhelenko I. V. Higher harmonics in power supply systems of industrial enterprises. Moscow, Energoatomizdat. 2010,375 p. [In Russ].
6. 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 1,012092. DOI: 10.1088/1742-6596/2032/1/012092.
7. 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.
8. 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.
9. 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.
10. 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. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-04-0-88-97.
11. Shchurov N. I., Dedov S. I., Malozyomov B. V., Shtang A. A., Martyshev 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>.
12. 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.
13. Benysek G. Pasko M. Power Theories for Improved Power Quality. Springer-Verlag, London,2012,214 p.
14. 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. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-31-0-583-601.
15. Zhemerov G. G., Tugai D. V. Dependence of additional losses in three-phase power supply systems on reactive power and pulsations of instantaneous active power. *Tekhnichna elektrodinamika*. 2015, no. 4, pp. 66–70. [In Russ].

16. 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.

17. 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. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_7_0_164

18. Akagi H., Kanazawa Y., Nabae A. Instantaneous reactive power compensator's comprising switching device without energy storage components. *IEEE Trans. Ind. Applications*. 1984, vol. IA-20, pp. 625–630.

19. 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.

20. 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. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_52_0_145.

21. Myatezh S. V., Novolodskiy M. V., Kitova E. T. Definition of distortion power in AC network and analysis of its reasons. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019, vol. 560, art.012113 (7 p.).

22. 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.

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;

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;

*Malozyomov B. V.*¹, Associate Professor, Cand. Sci. (Eng.), e-mail: mbv5@mail.ru;

¹ Novosibirsk State Technical University.

For contacts: *Malozyomov 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.