

Г. Г. ЖЕМЕРОВ, докт. техн. наук, проф., НТУ «ХПИ»;

Д. В. ТУГАЙ, канд. техн. наук, доц., Харьковский национальный университет городского хозяйства.

ПЕРЕХОД ОТ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ К МОЩНОСТИ ПОТЕРЬ В ТРЕХФАЗНЫХ СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

Введение. Объяснение природы реактивной мощности остается темой непрекращающихся дискуссий на протяжении 95 лет. На сегодняшний день существует множество концептуальных подходов, предлагающих свои определения понятию «реактивная мощность». Совокупность таких подходов, сформировавшихся в отдельные теории, объединяется общей теорией мощности, которая не дает однозначного представления ни о природе реактивной мощности ни о способе ее оценки в несинусоидальных и несимметричных режимах. Часть исследователей пошли по пути объяснения физической природы реактивной мощности [1, 2, 5, 6], другие сконцентрировали свои усилия на создании методов ее расчета для решения конкретных практических задач без предоставления каких либо терминологических трактовок [3, 4, 11, 12].

Объединяющим все теории фактором в представлении о реактивной мощности, является ее связь с нежелательными энергетическими процессами, вызывающими потери энергии в элементах системы электроснабжения (СЭ).

Многообразие методов расчета реактивной мощности можно разбить на две большие группы: интегральные [1, 3, 4, 10] и частотные [2, 5, 6, 7, 8, 9]. В табл. 1 представлены наиболее известные из них. Как было отмечено в работе [13] интегральные методы оценки реактивной мощности в основном носят формальный характер и зачастую неприемлемы для практического использования, а частотные методы могут быть использованы лишь в некоторых конкретных случаях и не подлежат распространению на общий случай. Кроме того, ни интегральные, ни частотные методы расчета реактивной мощности не позволяют определить мощность потерь в элементах электрических сетей.

Таблица 1 – Интегральные и частотные методы расчета реактивной мощности

Методы расчета реактивной мощности			
Интегральные		Частотные	
S. Fryze	$Q_F = U I_r = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u^2(t) dt \cdot \frac{1}{T} \int_0^T i^2(t) dt - \left(\frac{1}{T} \int_0^T u(t) i(t) dt \right)^2} = \sqrt{S^2 - P^2}$	C. Budeanu	$Q_B = \sum_{n=1}^{\infty} U_n I_n \sin \varphi_n = \sum_{n=1}^{\infty} Q_n$
		D. Sharon	$Q_S = U \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} I_n^2 \sin^2 \varphi_n}$
		Kusters-Moore	$Q_{KM} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} U_n I_n \sin \varphi_n \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} U_n^2 / \sum_{n=1}^{\infty} \frac{U_n^2}{n}}$
Fryze-Buchholz-Depenbrock (FBD)	$Q_{FBD} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u_s^2 dt \cdot \frac{1}{T} \int_0^T i_s^2 dt - \left(\frac{1}{T} \int_0^T u_s i_s dt \right)^2}$	Czarnecki L.	$Q_C^2 = U^2 I_r^2 = U^2 \sum_{n=1}^{\infty} B_n^2 U_n^2 = U^2 \sum_{n=1}^{\infty} I_n^2 \sin^2 \varphi_n$
О.А.Маевский	$Q_M = \frac{1}{2\pi} \oint u di = -\frac{\pi}{2} \oint i du = -\frac{\pi}{4} \int_0^T \frac{dr(t)}{dt} i^2 dt$	Shepherd W. Zakikhani P.	$Q_{SZ} = \sum_{n=1}^{\infty} n U_n I_n \sin \varphi_n$

Определенный сдвиг в развитии представлений о реактивной мощности произошел в результате появления современной теории мгновенной активной и реактивной мощности [11, 12]. Согласно современной теории мощности мгновенная реактивная мощность равна модулю вектора мгновенной реактивной мощности, вычисляемому через векторное произведение обобщенных пространственных векторов напряжения \vec{u}_s и тока \vec{i}_s трехфазной системы [14]

$$q = |\vec{q}| = |\vec{u}_s \times \vec{i}_s| = \begin{bmatrix} q_a \\ q_b \\ q_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_{sb} & u_{sc} \\ i_{sb} & i_{sc} \\ u_{sa} & u_{sb} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_{sc} & u_{sa} \\ i_{sc} & i_{sa} \\ u_{sa} & u_{sb} \end{bmatrix}^T, \tag{1}$$

где $\vec{u}_s = \vec{i} \cdot u_{sa} + \vec{j} \cdot u_{sb} + \vec{k} \cdot u_{sc}$, $\vec{i}_s = \vec{i} \cdot i_{sa} + \vec{j} \cdot i_{sb} + \vec{k} \cdot i_{sc}$, $u_{sa}, u_{sb}, u_{sc}, i_{sa}, i_{sb}, i_{sc}$ – соответственно мгновенные фазные напряжения и токи трехфазной СЭ (см. рис. 1); $\vec{i}, \vec{j}, \vec{k}$ – орты по осям a, b, c декартовой системы координат.

Соотношение (1) удовлетворяет условиям расчета реактивной мощности для любых, в том числе, несинусоидальных, режимов и позволяет осуществить переход от реактивной мощности к мощности потерь [14].

Целью статьи является установление однозначной связи между реактивной мощностью и потерями энергии для любого режима работы трехфазной системы электроснабжения в контексте развития положений современной теории мгновенной активной и реактивной мощностей.

Причины появления расчетной реактивной мощности трехфазной СЭ. Традиционно реактивная мощность ассоциировалась с колебаниями энергии электромагнитного поля – энергетическим процессом обмена

энергией между реактивными элементами цепи и источником энергии. В синусоидальных режимах такой процесс сопровождается наличием сдвига между кривыми мгновенных напряжений и токов. В нелинейных цепях при активном характере нагрузки также возможно появления угла сдвига между основными гармониками напряжения и тока, что свидетельствует о наличии реактивной мощности. В трехфазных несимметричных системах с резистивными нагрузками реактивная мощность может возникать даже в синусоидальных режимах. Подобные примеры порождают противоречия в объяснении физической природы реактивной мощности и провоцируют многих исследователей отказаться от использования термина «реактивная мощность», заменив его нейтральным термином «неактивная мощность».

Чтобы получить общее представление о причинах возникновения расчетной реактивной мощности, рассмотрим упрощенную эквивалентную схему трехфазной системы электроснабжения, представленную на рис. 1.

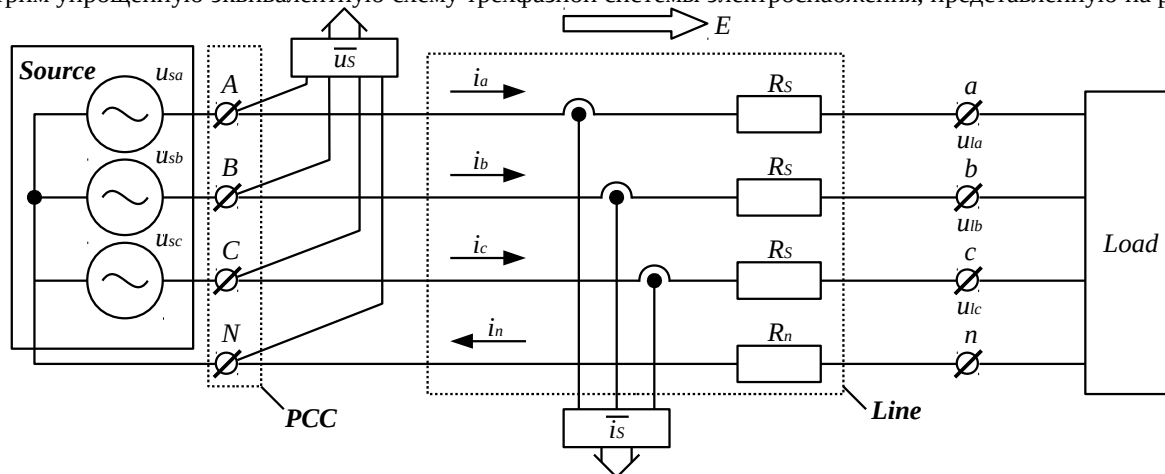


Рис. 1. Эквивалентная схема трехфазной СЭ

Схема состоит из трех элементов: трехфазного источника (Source), нагрузки (Load) и четырехпроводной питающей линии с активным сопротивлением линейных проводов R_s , соединяющей источник с нагрузкой, и активного сопротивления нулевого провода R_n . Напряжения источника могут быть как синусоидальными так и несинусоидальными, как симметричными так и несимметричными. Нагрузка может быть как линейной (активной, активно-реактивной) так и нелинейной (НЛ), как симметричной так и несимметричной. Будем рассматривать квазиустановившийся режим работы эквивалентной схемы трехфазной СЭ при одностороннем потоке энергии из источника в нагрузку. Для анализа электромагнитных процессов выберем период повторяемости (T), равный периоду повторяемости напряжения источника.

В соответствии с положениями современной теории мощности появление расчетной реактивной мощности трехфазной СЭ связано с наличием угла сдвига между обобщенными пространственными векторами тока и напряжения

$$\varphi = \arccos \left(\frac{u_{sa} \cdot i_{sa}}{|\vec{u}_s| \cdot |\vec{i}_s|} + \frac{u_{sb} \cdot i_{sb}}{|\vec{u}_s| \cdot |\vec{i}_s|} + \frac{u_{sc} \cdot i_{sc}}{|\vec{u}_s| \cdot |\vec{i}_s|} \right) \neq 0 . \quad (2)$$

При соблюдении этого условия в СЭ возникает мгновенная реактивная мощность, которую можно рассчитать по соотношению (1), используя информацию, получаемую от датчиков напряжения, установленных на зажимах трехфазного источника и датчиков тока линии (см. рис. 1). Размещение датчиков напряжения в начале питающей линии позволит избежать методической ошибки расчета реактивной мощности, связанной с протеканием реактивных токов.

Кроме мгновенной реактивной мощности дополнительным фактором, влияющим на возникновение потерь энергии, являются пульсации мгновенной активной мощности, появление которых связано как с асимметрией фазных напряжений и нагрузок, так и с наличием высших гармонических составляющих в кривых напряжений и токов трехфазной системы. Переменная составляющая мгновенной активной мощности может быть рассчитана с использованием скалярного произведения обобщенных пространственных векторов напряжения и тока

$$p_{puls} = p - P = |\vec{u}_s| \cdot |\vec{i}_s| \cdot \cos \varphi - \frac{1}{T} \int_t^{t+T} |\vec{u}_s| \cdot |\vec{i}_s| \cdot \cos \varphi dt . \quad (3)$$

Matlab-модель эквивалентной схемы трехфазной СЭ. Для анализа энергетических процессов в разных режимах работы трехфазной СЭ разработана компьютерная Matlab-модель эквивалентной схемы трехфазной СЭ с параллельным силовым активным фильтром (САФ), представленная на рис. 2.

Модель состоит из блоков пяти типов:

1. Блоки силовой схемы: регулируемые источники напряжения (U_a, U_b, U_c); нерегулируемые источники напряжения (U_{sa}, U_{sb}, U_{sc}); симметричная резистивная нагрузка (R_{la}, R_{lb}, R_{lc}); регулируемые источники тока (J_a, J_b, J_c); активные сопротивления четырехпроводной линии (R_a, R_b, R_c, R_n); силовой активный фильтр, выполненный на основе регулируемых источников тока (SAF).

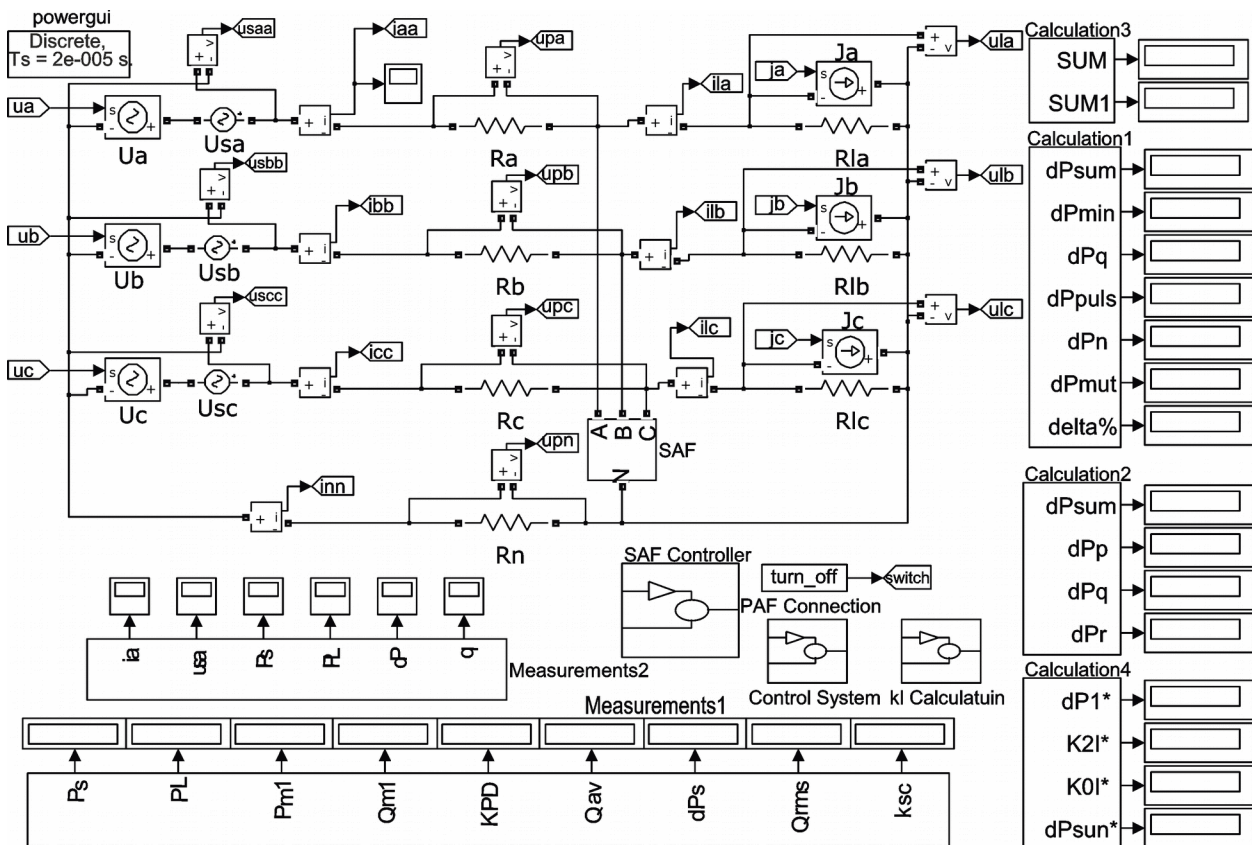


Рис. 2. Matlab-модель для исследования режимов работы эквивалентной схемы трехфазной СЭ

2. Датчики тока и напряжения.

3. Подсистемы обработки измерительной информации (Calculation 1 – Calculation 4).

4. Подсистемы управления и контроля состояния СЭ: система управления САФ (SAF Controller), подсистема задания сигналов управления трехфазным источником тока и трехфазным источником несинусоидальных напряжений (Control System), подсистема расчета коэффициента коррективы (kl Calculation), блок подключения САФ (PAF Connection).

5. Виртуальные измерительные приборы.

В табл. 2 представлены кривые мгновенной реактивной мощности, соответствующие возможным сочетаниям характеристик и режимов работы трехфазного источника и нагрузки, полученные с помощью имитационной модели для трехфазной трехпроводной СЭ с однонаправленным потоком энергии в линии.

Таблица дает наглядное представление о том, что мгновенная реактивная мощность будет отсутствовать в трехфазной СЭ только в симметричном режиме с чисто резистивной нагрузкой. В симметричном режиме трехфазной СЭ с активно-реактивной нагрузкой в кривой мгновенной реактивной мощности отсутствует переменная составляющая. Во всех остальных режимах мгновенная реактивная мощность меняется по периодическому закону, а значит, появляется возможность перехода от мгновенных к интегральным значениям.

В работе [15] была предложена расчетная формула для представления суммарной мощности потерь через сумму составляющих мощности потерь, обусловленных особенностями электромагнитных процессов, происходящих в трехфазной СЭ

$$\Delta P_{\Sigma^*} = \Delta P_{min^*} + \Delta P_{Q^*} + \Delta P_{puls^*} + \Delta P_{n^*} + \Delta P_{mut^*} \Big|_{P_{usf} = const} \quad (4)$$

где

$$\Delta P_{min^*} = \frac{\Delta P_{min}}{P_{usf}} = \left(\frac{1}{2} - \sqrt{\frac{1}{4} - \frac{1}{k_{sc}}} \right) / \left(\frac{1}{2} + \sqrt{\frac{1}{4} - \frac{1}{k_{sc}}} \right) - \quad (5)$$

относительная, в долях средней полезной мощности нагрузки P_{usf} , минимально возможная мощность потерь, соответствующая постоянной скорости передачи энергии из источника в нагрузку; $k_{sc} = P_{SC}/P_{usf}$, P_{SC} – мощность трехфазного резистивного короткого замыкания;

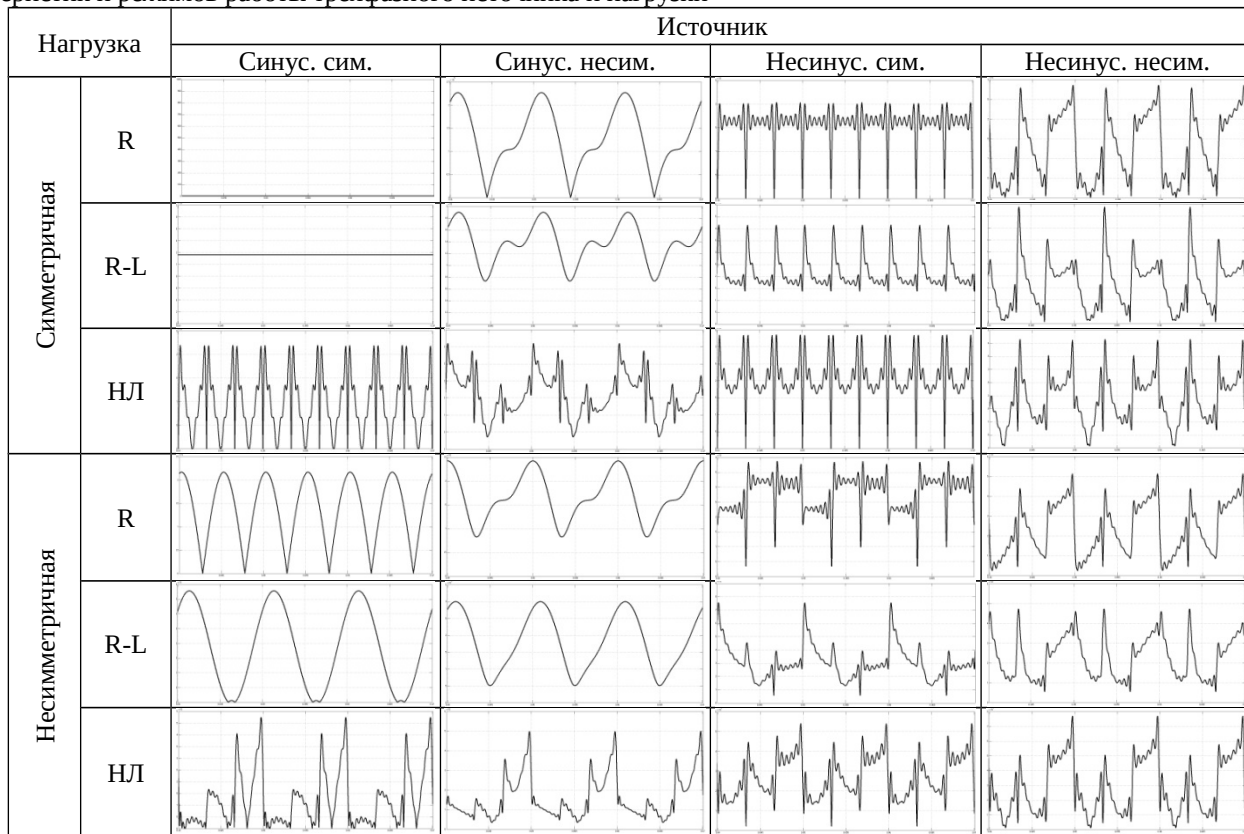
$$\Delta P_{Q^*} = \frac{\Delta P_{min^*}}{P_{usf}^2 \cdot T} \cdot \int_t^{t+T} |\tilde{q}|^2 dt - \quad (6)$$

относительная мощность потерь, обусловленная мгновенной реактивной мощностью;

$$\Delta P_{puls^*} = \Delta P_{min^*} \cdot \frac{P_{min^*}}{P_{usf}^2 \cdot T} \cdot \int_t^{t+T} p_{puls}^2 dt - \quad (7)$$

относительная мощность потерь, обусловленная пульсациями мгновенной активной мощности;

Таблица 2 – Кривые мгновенной реактивной мощности, соответствующие возможным сочетаниям характеристик и режимов работы трехфазного источника и нагрузки



$$\Delta P_{n*} = \frac{\Delta P_n}{P_{usf}} = \frac{R_n}{P_{usf} \cdot T} \int_t^{t+T} i_n^2 dt \quad (8)$$

среднее за период повторяемости относительное значение мощности потерь в нулевом проводе четырехпроводной СЭ;

$$\Delta P_{mut*} = \Delta P_{n*} \cdot (\Delta P_{min*}^2 + 2 \cdot \Delta P_{min*}) \quad (9)$$

относительная мощность потерь, обусловленная взаимным влиянием энергетических процессов, проходящих в линейных проводах и нулевом проводе трехфазной четырехпроводной СЭ; R_n – сопротивление нулевого провода; i_n – мгновенный ток нулевого провода.

Из соотношения (6) видно, что мощность потерь, обусловленная мгновенной реактивной мощностью, прямо пропорциональна квадрату среднеквадратического значения реактивной мощности, вычисленному в периоде повторяемости T . Однако разный характер появления реактивной мощности, описываемый вариантами табл. 2, не указывает на эквивалентность расчета по (6) для всех рассматриваемых случаев.

Наиболее простым способом доказательства однозначного соответствия между реактивной мощностью и мощностью потерь в любых режимах СЭ является компьютерное моделирование с использованием разработанной Matlab-модели (см. рис. 3). Для исключения влияния прочих причин возникновения потерь в трехфазной СЭ в модели задействован блок SAF, выполняющий роль идеального параллельного силового активного фильтра. Система управления SAF Controller выделяет составляющие мгновенной мощности и отфильтровывает мгновенную реактивную мощность. В результате суммарные потери в трехфазной СЭ складываются из двух составляющих: минимально возможной мощности потерь и мощности потерь, обусловленной реактивной мощностью, которые могут быть найдены из соотношений (5) и (6) соответственно.

Моделирование проводилось при следующих параметрах эквивалентной схемы: $P_{usf} = \text{const} = 400.1 \text{ kW}$; $U_m = 311.13 \text{ V}$, $f_s = 50 \text{ Hz}$; $R_s = 0.01815 \ \Omega$; $R_{load} = 0.3256 \ \Omega$; $k_{sc} = 20$.

Результаты компьютерного моделирования представлены в табл. 3. В таблице приняты обозначения: $\Delta P_{1\Sigma*}$ – относительная суммарная мощность потерь, рассчитанная традиционным способом; $\Delta P_{2\Sigma*}$ – относительная суммарная мощность потерь, рассчитанная с использованием реактивной мощности. Сравнение результатов, представленных в табл. 3, позволяет сделать вывод, что значения мощности потерь от наличия в трехфазной СЭ реактивной мощности при неизменном значении средней активной мощности нагрузки одинаковы для разных режимов СЭ и разных способов возникновения реактивной мощности.

Выводы. 1. Современные теории мощности позволяют осуществить переход от мгновенной реактивной мощности к интегральной мощности потерь, оценивающей вклад реактивной мощности в общие потери в трехфазной СЭ. **2.** Разные причины появления расчетной реактивной мощности – при одном и том же среднеквадратичном значении активной мощности.

тическом ее значении приводят к равнозначным потерям энергии в трехфазной четырехпроводной СЭ при условии постоянства средней, вычисленной в периоде повторяемости, полезной активной мощности нагрузки. **3.** Согласно положениям современной теории мощности, реактивная мощность – это расчетная величина, определяющая скорость обмена энергией между элементами СЭ, отношение квадрата среднеквадратического значения которой к квадрату полезной активной мощности нагрузки, умноженное на минимально возможную мощность потерь равно одной из составляющих мощности потерь в трехфазной четырехпроводной СЭ.

Список литературы: **1.** Маевский О.А. Энергетические показатели вентильных преобразователей / О.А. Маевский. – М.: Энергия, 1978. – 320 с. **2.** Budeanu C.I. Puissances réactives et fictives / C.I. Budeanu // Ins. Bucharest. Romaine de Energie. – 1927. **3.** Fryze S. Active and Apparent power in non-sinusoidal systems / S. Fryze // Przegląd Elektrot. – 1931. – No. 7. – P. 193-203. **4.** Depenbrock M. The FBD-method, a generally applicable tool for analyzing power relations / M. Depenbrock // IEEE Transactions on Power Systems. – 1993. – Vol. 8. – No. 2. – P. 381-387. **5.** Czarnecki L. S. Orthogonal decomposition of the currents in a 3-phase nonlinear asymmetrical circuit with a nonsinusoidal voltage source / L. S. Czarnecki // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. – 1988. – Vol. 37. – No. 1. – P. 30-34. **6.** Czarnecki L. S. Power theories of periodic non-sinusoidal systems / L. S. Czarnecki // Rozprawy Elektrotechniczne. – 1985. – Vol. 31. – No. 3-4. – P. 659-685. **7.** Shepherd W. Suggested definition of reactive power for nonsinusoidal systems / W. Shepherd, P. Zakikhani // Proceedings of the Institution of Electrical Engineers. – IET, 1972. – Vol. 119. – No. 9. – P. 1361-1362. **8.** Sharon D. Reactive-power definitions and power-factor improvement in nonlinear systems / D. Sharon // Proceedings of the Institution of electrical Engineers. – IET, 1973. – Vol. 120. – No.6. – P. 704-706. **9.** Kusters N. L. On the definition of reactive power under non-sinusoidal conditions / N. L. Kusters, W. J. M. Moore // IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems. – 1980. – No. 5. – P. 1845-1854. **10.** Buchholz F. Die drehstrom-scheinleistung bei ungleichmassiger belastung der drei zweige / F. Buchholz // Licht und Kraft. – 1922. – Vol. 2. – P. 9-11. **11.** Akagi H. Generalized theory of the instantaneous power in three phase circuits / H. Akagi, Y. Kanazava, A. Nubae // Int. Power Electronics Conf. Tokio. Japan. – 1983. – P.1375-1386. **12.** Akagi H. Instantaneous reactive power compensations comprising switching devices without energy storage components / H. Akagi, Y. Kanazava, A. Nubae // IEEE Trans. Ind. Applicat. – 1984. – Vol. 20. – P. 625-630. **13.** Жежеленко И. В. Современная концепция реактивной мощности / И.В. Жежеленко, Ю.Л. Саенко // Вісник Приазовського державного технічного університету : зб. наукових праць / ПДТУ. – Маріуполь, 1995. – Вип. 1. – С. 192-197. **14.** Жемеров Г.Г. Зависимость дополнительных потерь в трехфазных системах электроснабжения от реактивной мощности и пульсаций мгновенной активной мощности / Г.Г. Жемеров, Д.В. Тугай // Технічна електродинаміка. – 2015. – №4. – С. 66-70. **15.** Жемеров Г.Г. Развитие современных теорий мощности трехфазных четырехпроводных систем электроснабжения с нелинейной нагрузкой / Г.Г. Жемеров, Е.И. Сокол, Д.В. Тугай // Електротехніка і електромеханіка. Спеціальний випуск до XXII Міжнародної науково-технічної конференції «Силова електроніка та енергоефективність». – 2016. – Т. I. – № 4(1). – С. 11-19.

Bibliography (transliterated): **1.** Mayevskiy, O. A. *Energeticheskiye pokazateli ventil'nykh preobrazovateley*. Moscow: Energiya, 1978, 320. Print. **2.** Budeanu, C.I. "Puissances réactives et fictives" / *Ins. Bucharest. Romaine de Energie*, 1927. Print. **3.** Fryze, S. "Active and Apparent power in non-sinusoidal systems." *Przegląd Elektrot*. No. 7. 1931. 193-203. Print. **4.** Depenbrock, M. "The FBD-method, a generally applicable tool for analyzing power relations." *IEEE Transactions on Power Systems*. 8.2. 1993. 381-387. Print. **5.** Czarnecki, L. S. "Orthogonal decomposition of the currents in a 3-phase nonlinear asymmetrical circuit with a nonsinusoidal voltage source." *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. 37.1. 1988. 30-34. Print. **6.** Czarnecki, L. S. "Power theories of periodic non-sinusoidal systems." *Rozprawy Elektrotechniczne*. 31.3-4. 1985. 659-685. Print. **7.** Shepherd, W., Zakikhani, P. "Suggested definition of reactive power for nonsinusoidal systems." *Proceedings of the Institution of Electrical Engineers*. 119.9. 1972. 1361-1362. Print. **8.** Sharon, D. "Reactive-power definitions and power-factor improvement in nonlinear systems." *Proceedings of the Institution of electrical Engineers*. 120.6. 1973.704-706. Print. **9.** Kuster, N. L. "On the definition of reactive power under non-sinusoidal conditions." *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*. No. 5. 1980. 1845-1854. Print. **10.** Buchholz, F. "Die drehstrom-scheinleistung bei ungleichmassiger belastung der drei zweige." *Licht und Kraft*. 2. 1922. 9-11. Print. **11.** Akagi, H., Kanazava, Y., and Nubae A. "Generalized theory of the instantaneous power in three phase circuits." *Int. Power Electronics Conf. Tokio. Japan*. 1983. 1375-1386. Print. **12.** Akagi, H., Kanazava, Y., and Nubae A. "Instantaneous reactive power compensations comprising switching devices without energy storage components." *IEEE Trans. Ind. Applicat*. 20. 1984. 625-630. Print. **13.** Zhezhelenko, I. V., Sayenko YU. L. "Sovremennaya kontseptsiya reaktivnoy moshchnosti." *Visnyk Pryazov'skoho derzhavnogo tekhnichnogo universytetu : zb. naukovykh prats' / PDTU*. 1. 1995. 192-197. Print. **14.** Zhemerov, G.G., Tugay, D.V. "Zavysymost' dopolnytel'nykh poter' v trekhfaznykh systemakh élektrosnabzhenyya ot reaktivnoy moshchnosti y pul'satsyy mhnovennoy aktivnoy moshchnosti." *Tekhnichna elektrodynamika*. No. 4. 2015. 66-70. Print. **15.** Zhemerov, G.G., Sokol, E.Y., and Tugay, D.V. "Razvytye sovremennykh teory moshchnosti trekhfaznykh chetyrekhprovodnykh system élektrosnabzhenyya s nelyneynoy nahruzkoy." *Elektrotekhnika i elektromekhanika. Spetsial'nyy vypusk do KHKHII Mizhnarodnoyi nauково-tekhnichnoyi konferentsiyi «Sylova elektronika ta enerhoefektyvnist'»*. 1.4(1). (2016): 11-19. Print.

Поступила 30.05.2017

Таблица 3 – Результаты компьютерного моделирования

k_{sc}	η	Q_{rms^*}	ΔP_{min^*}	ΔP_Q^*	$\Delta P_{1\Sigma^*}$	$\Delta P_{2\Sigma^*}$
Симметричная R-L нагрузка						
20	0.943	0.2906	0.05574	0.004708	0.06046	0.06046
Асимметричная резистивная нагрузка						
20	0.943	0.2906	0.05574	0.004708	0.06046	0.06046
Асимметричная резистивная нагрузка (четырёхпроводная СЭ)						
20	0.943	0.2906	0.05574	0.004708	0.06046	0.06046
Нелинейная симметричная нагрузка						
20	0.943	0.2906	0.05574	0.004708	0.06046	0.06046
Нелинейная симметричная нагрузка (четырёхпроводная СЭ)						
20	0.943	0.2906	0.05574	0.004708	0.06046	0.06046
Асимметричная R-L нагрузка						
20	0.943	0.2906	0.05574	0.004708	0.06046	0.06046
Асимметричная R-L нагрузка (четырёхпроводная СЭ)						
20	0.943	0.2906	0.05574	0.004708	0.06046	0.06046
Смешанная R-L и нелинейная нагрузка						
20	0.943	0.2906	0.05574	0.004708	0.06046	0.06046
Смешанная R-L и нелинейная нагрузка (четырёхпроводная СЭ)						
20	0.943	0.2906	0.05574	0.004708	0.06046	0.06046