

Г.Г. Жемеров, Д.В. Турай

ФИЗИЧЕСКИЙ СМЫСЛ ПОНЯТИЯ «РЕАКТИВНАЯ МОЩНОСТЬ» ПРИМЕНительно К ТРЕХФАЗНЫМ СИСТЕМАМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ С НЕЛИНЕЙНОЙ НАГРУЗКОЙ

Автори статті ставлять собі за мету дати відповіді на питання, здатні розкрити фізичний зміст терміну «реактивна потужність» з обґрунтуванням прийнятих припущень стосовно трифазних трипровідних і чотирипровідних систем електропостачання. Методика. Використовувалася еквівалентна графічна заміна складної розгалуженої схеми системи електропостачання спрощеною розрахунковою схемою, методи теорії електричних кіл, сучасні теорії миттєвої активної і реактивної потужностей, комп'ютерне моделювання в середовищі Matlab. Результати. Дано відповіді на шість основних питань, які розкривають фізичний зміст поняття «реактивна потужність». Сформульовано декілька визначень терміну «реактивна потужність». Обґрунтовані допущення, що дозволяють запропонувати універсальну розрахункову формулу для визначення відносної сумарної потужності втрат у трифазній системі електропостачання як суму чотирьох складових, обумовлених: мінімально можливими втратами, реактивною потужністю, пульсаціями миттєвої активної потужності і протіканням струму в нульовому проводі. Наукова новизна. Запропоновано визначення, що розкриває фізичний зміст терміну «реактивна потужність» для трифазних систем електропостачання, що відповідає положенням сучасних теорій миттєвої активної і реактивної потужностей. Практичне значення. Розвинені положення методу оцінки енергетичної ефективності систем електропостачання з нелінійним навантаженням, засновані на розрахунку додаткових складових потужності втрат. Подальший розвиток методу дозволить внести доповнення до практики розрахунку, вибору та експлуатації силових активних фільтрів. Бібл. 10, табл. 3, рис. 5.

Ключові слова: система електропостачання, реактивна потужність, потужність додаткових втрат, мінімально можливі втрати, Matlab-модель трифазної системи електропостачання.

Автори статті задаються целью дать ответы на вопросы, способные раскрыть физический смысл термина «реактивная мощность» с обоснованием принимаемых допущений применительно к трехфазным трехпроводным и четырехпроводным системам электроснабжения. Методика. Использовалась эквивалентная графическая замена сложной разветвленной схемы системы электроснабжения упрощенной расчетной схемой, методы теории электрических цепей, современные теории мгновенной активной и реактивной мощностей, компьютерное моделирование в среде Matlab. Результаты. Даны ответы на шесть основных вопросов, раскрывающих физический смысл понятия «реактивная мощность». Сформулированы несколько определений термина «реактивная мощность». Обоснованы допущения, позволяющие предложить универсальную расчетную формулу для определения относительной суммарной мощности потерь в трехфазной системе электроснабжения как суммы четырех составляющих, обусловленных: минимально возможными потерями, реактивной мощностью, пульсациями мгновенной активной мощности и протеканием тока в нулевом проводе. Научная новизна. Предложено определение, раскрывающее физический смысл термина «реактивная мощность» для трехфазных систем электроснабжения, отвечающее положениям современных теорий мгновенной активной и реактивной мощностей. Практическое значение. Развита положения метода оценки энергетической эффективности систем электроснабжения с нелинейной нагрузкой, основанные на расчете дополнительных составляющих мощности потерь. Дальнейшее развитие метода позволит внести дополнения в практику расчета, выбора и эксплуатации силовых активных фильтров. Библ. 10, табл. 3, рис. 5.

Ключевые слова: система электроснабжения, реактивная мощность, мощность дополнительных потерь, минимально возможные потери, Matlab-модель трехфазной системы электроснабжения.

Введение. Через пять лет можно будет отмечать 100-летний юбилей растянувшегося на длинный период рождения термина «реактивная мощность» («reactive power») [1-7].

Несмотря на солидный возраст термина, его внутренне содержание до настоящего времени остается нечетким и противоречивым. Это отчасти объясняется тем, что для ответа на вопрос в чем заключается физический смысл понятия реактивная мощность необходимо предварительно ответить на несколько других вопросов, а именно:

1) какова структура рассматриваемой системы электроснабжения (СЭ);

2) как определяется период повторяемости процессов в рассматриваемой СЭ;

3) в каких точках СЭ измеряются мгновенные значения токов и напряжений;

4) в какой системе координат определяется обобщенные векторы мгновенных напряжений, токов и реактивной мощности трехфазной СЭ;

5) как рассчитываются мгновенные значения активной мощности и модуля вектора мгновенной реактивной мощности;

6) какова единица измерения модуля вектора мгновенной реактивной мощности.

К перечисленным шести вопросам необходимо добавить обоснования нескольких допущений:

- мощность потерь энергии в линии, обусловленная протеканием активной составляющей тока, и мощность потерь, обусловленная протеканием реактивных токов, взаимно независимы;

- влиянием индуктивностей кабелей на величину потерь энергии можно пренебречь в виду его малости. В других случаях индуктивность кабелей можно перенести в нагрузку;

- в симметричной трехфазной СЭ с резистивной нагрузкой минимальные потери энергии, т.е. максимально возможный КПД, η_{\max} , однозначно определяются

отношением мощности к.з. на зажимах нагрузки к полезной мощности, равной среднему значению мощности нагрузки, вычисленному в периоде повторяемости;

- мощность потерь в СЭ, обусловленных потоком энергии от источника в нагрузку, пропорциональна квадрату средней полезной мощности нагрузки;

- мощность дополнительных потерь, обусловленных реактивной мощностью, равна произведению мощности минимальных потерь, соответствующих максимально возможному КПД, на отношение квадрата среднеквадратического значения реактивной мощности к квадрату средней полезной мощности;

- мощность дополнительных потерь, обусловленных пульсациями активной мощности равна произведению мощности минимально возможных потерь на отношение квадрата среднеквадратического значения переменной составляющей мгновенной активной мощности к квадрату средней активной мощности;

- в режимах работы четырехпроводной СЭ, в которых отличен от нуля ток нулевого провода, возникает четвертая составляющая суммарных потерь, пропорциональная произведению сопротивления нулевого провода на квадрат среднеквадратического значения нулевого тока.

В настоящей работе приведены ответы авторов статьи на перечисленные вопросы и обоснования принятых допущений, что позволило предложить универсальную расчетную формулу для определения суммарной мощности потерь как суммы четырех составляющих.

Ответы на предварительные вопросы.

1. Эквивалентная схема рассматриваемой СЭ представлена на рис. 1.

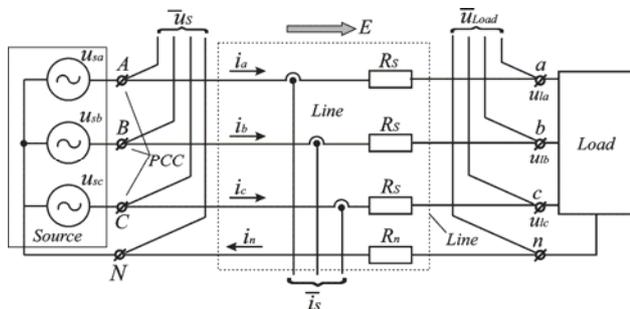


Рис. 1. Эквивалентная схема трехфазной СЭ

Поток энергии в системе направлен из источника (Source) в нагрузку (Load) посредством четырехпроводной линии (Line). Сопротивление фазного кабеля линии равно R_s , а нулевого R_n . При анализе целесообразно рассматривать три значения сопротивления нулевого провода: $R_n = 0, R_s, \infty$. Источник представляет собой трехфазную систему почти синусоидальных напряжений симметричную или несимметричную. В кривой напряжений могут содержаться высшие гармоники. Нагрузка (Load) в общем случае содержит линейные и нелинейные элементы, источники тока и напряжения. Как правило, каждую фазу нагрузки можно представить источником тока. При больших длинах кабелей к нагрузке можно отнести индуктивность кабелей.

2. Период повторяемости кривых токов, напряжений, активной и реактивной мощности СЭ – это наи-

меньший отрезок времени, в котором укладывается целое число периодов повторяемости указанных величин. В зависимости от целей расчетов или экспериментов может быть выбран любой произвольный период повторяемости в интервале времени от нуля до бесконечности. Наиболее популярный вариант – выбор периода повторяемости, равного периоду или части периода напряжения питающей сети. Однако такой подход может быть связан со значительными погрешностями из-за неучета низкочастотных пульсаций мгновенной активной мощности.

3. Как следует из эквивалентной схемы СЭ, представленной на рис. 1, напряжения источника u_{sa}, u_{sb}, u_{sc} измеряются в точке общего присоединения (PCC), а напряжения нагрузки u_{La}, u_{Lb}, u_{Lc} измеряются на клеммах нагрузки.

4. Обобщенные векторы напряжений \vec{u}_S, \vec{u}_L , тока \vec{i} и реактивной мощности \vec{q}_S определяются в одной из пространственных декартовых систем координат [8], например, abc :

$$\vec{u}_S = \vec{i} \cdot u_{sa} + \vec{j} \cdot u_{sb} + \vec{k} \cdot u_{sc}, \quad (1)$$

$$\vec{u}_L = \vec{i} \cdot u_{La} + \vec{j} \cdot u_{Lb} + \vec{k} \cdot u_{Lc}, \quad (2)$$

$$\vec{i}_S = \vec{i} \cdot i_{sa} + \vec{j} \cdot i_{sb} + \vec{k} \cdot i_{sc}, \quad (3)$$

$$\vec{q}_S = \vec{u}_S \times \vec{i}_S = \begin{bmatrix} q_{sa} \\ q_{sb} \\ q_{sc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_{sb} & u_{sc} \\ i_b & i_c \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_{sc} & u_{sa} \\ i_c & i_a \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_{sa} & u_{sb} \\ i_a & i_b \end{bmatrix}^t, \quad (4)$$

где $\vec{i}, \vec{j}, \vec{k}$ – орты направления по осям a, b, c системы координат.

5. Мгновенная активная мощность источника определяется двумя способами:

$$p_S = u_{sa} \cdot i_a + u_{sb} \cdot i_b + u_{sc} \cdot i_c, \quad (5)$$

$$p_S = |\vec{u}_S| \cdot |\vec{i}| \cdot \cos \varphi, \quad (6)$$

а мгновенная активная мощность нагрузки

$$p_L = u_{La} \cdot i_a + u_{Lb} \cdot i_b + u_{Lc} \cdot i_c, \quad (7)$$

$$p_L = |\vec{u}_L| \cdot |\vec{i}| \cdot \cos \varphi, \quad (8)$$

где

$$\cos \varphi = \frac{u_a}{|u|} \cdot \frac{i_a}{|i|} + \frac{u_b}{|u|} \cdot \frac{i_b}{|i|} + \frac{u_c}{|u|} \cdot \frac{i_c}{|i|}. \quad (9)$$

Модуль вектора мгновенной реактивной мощности источника

$$q_S = |\vec{q}_S| = |\vec{u}_S| \cdot |\vec{i}| \cdot |\sin \varphi|. \quad (10)$$

Как следует из (5)-(8) мгновенная активная мощность и, следовательно, средняя за период повторяемости активная мощность могут изменять знак, причем положительная активная мощность соответствует положительному направлению потока энергии, – из источника в нагрузку, – а отрицательная активная мощность соответствует противоположному направлению потока энергии.

Модуль вектора мгновенной реактивной мощности всегда положителен, это находится в согласии с допущением, что от реактивной мощности в трехфазной СЭ скорость передачи энергии и направление потока энергии не зависят.

Помимо модуля вектора мгновенной реактивной мощности для определения мощности потерь в СЭ требуется среднее и среднеквадратическое за период повторяемости значение реактивной мощности.

Отметим, что в настоящей статье рассматривается режим работы СЭ с однонаправленным потоком энергии, т.е., с постоянным знаком мгновенной активной мощности во всем периоде повторяемости. Режим работы, в котором знак мгновенной активной мощности в периоде повторяемости принимает как положительные, так и отрицательные значения, требует отдельного рассмотрения.

6. При анализе СЭ используются величины, представленные в табл.1. Размерность модуля реактивной мощности – ватт (W). Могут использоваться безразмерные величины в долях полезной средней за период повторяемости активной мощности нагрузки, P_{usf} , которая во всех расчетах и экспериментах поддерживается равной заданной величине.

Таким образом, сформулирован ответ на все шесть вопросов. Перейдем к допущениям.

Обоснования принятых допущений.

1. В пространственной декартовой системе координат вектор активного тока при неизменном векторе напряжений источника не изменяется. Векторы активных и реактивных токов взаимно перпендикулярны.

2. Потери в индуктивностях кабелей отсутствуют. Однако ввод индуктивностей приводит к увеличению реактивной мощности и потерь в омических сопротивлениях линии. Это увеличение, в ряде случаев, составляет доли процента, что подтверждают эксперименты. Индуктивность кабелей можно перенести в нагрузку без изменения точек подключения.

3. Это теорема о максимально возможном КПД СЭ (аналогична теореме Tevenin).

В [9] получено аналитическое выражение для максимально возможного КПД СЭ в виде

$$\eta_{\max} = \frac{1}{2} + \sqrt{\frac{1}{4} - \frac{1}{P_{sc}/P_{usf}}}, \quad (11)$$

где P_{sc} – мощность резистивного короткого замыкания на клеммах нагрузки (см. рис.1).

Относительные минимальные потери в СЭ, соответствующие максимально возможному КПД [6]

$$\Delta P_{\min}^* = \frac{\Delta P_{\min}}{P_{usf}} = \frac{1}{\eta_{\max}} - 1. \quad (12)$$

На рис. 2 приведены кривые, рассчитанные по (11), а в табл. 2 – значения КПД при заданных величинах P_{sc}/P_{usf} .

4. 5. Четвертое и пятое допущения можно объединить одним допущением о существовании пропорции

$$\frac{P_{usf}^2}{\Delta P_{\min}} = \frac{Q_{RMS}^2}{\Delta P_q}. \quad (13)$$

Откуда

$$\Delta P_q = \frac{Q_{RMS}^2 \cdot \Delta P_{\min}}{P_{usf}^2}. \quad (14)$$

Сопротивления, в которых выделяется тепловая энергия под действием активного и реактивного токов, одни и те же. Мощности в (13), (14) приняты в

квадратах потому, что потери пропорциональны квадратам токов, которые, в свою очередь, пропорциональны мощностям.

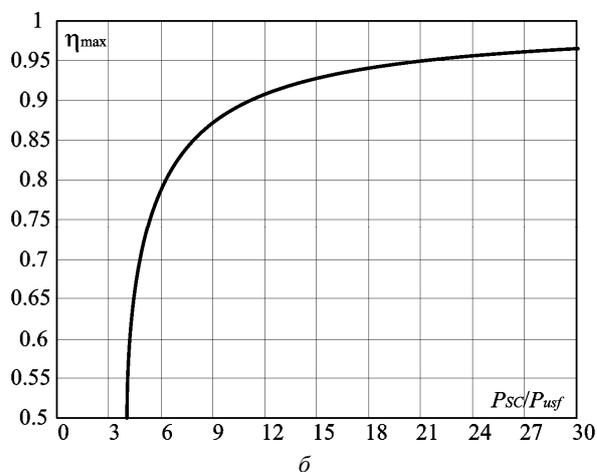
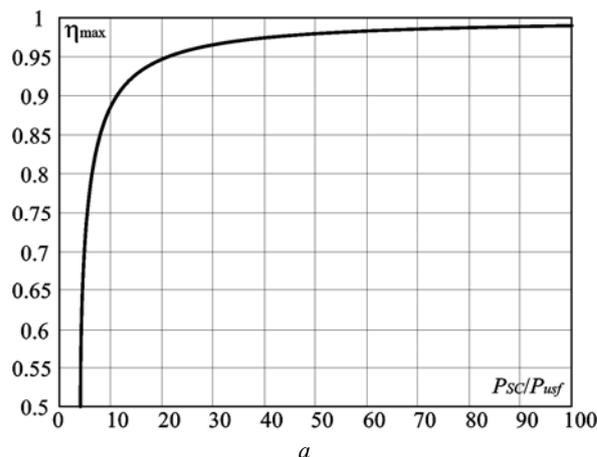


Рис. 2. Максимально возможный КПД

6. Зависимость мощности дополнительных потерь, обусловленных пульсациями мгновенной активной мощности, от среднеквадратического (действующего) значения, вычисленного в периоде повторяемости, переменной составляющей активной мощности, может быть получено аналитически.

Покажем это. Графики активной мощности без пульсаций и с пульсациями представлены на рис. 3,а и рис. 3,б соответственно.

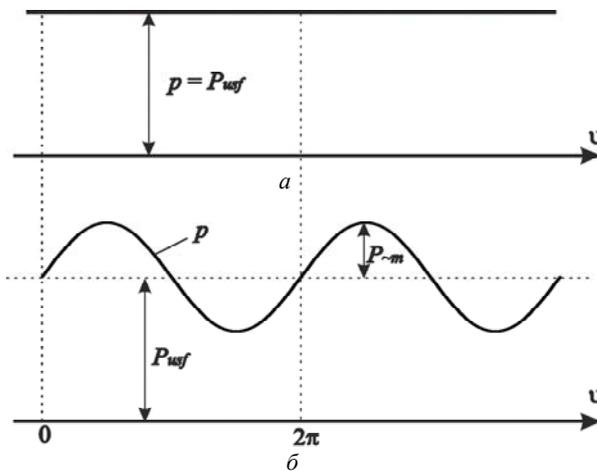


Рис. 3. Графики активной мощности без пульсаций (а) и с пульсациями (б)

Величины, используемые в статье

№	Наименование	Сокращенное наименование	Обозначение	Расчетная формула	Размерность	Примечания
1	Вектор мгновенной реактивной мощности	–	\vec{q}	(4, 9, 10)	–	–
2	Модуль вектора мгновенной реактивной мощности	Мгновенная реактивная мощность	$ \vec{q} $	(10)	W	–
3	Мгновенная реактивная мощность	–	q	(10)	W	$q = \vec{q} $
4	Относительная реактивная мощность	–	q^*	$q^* = \frac{q}{P_{usf}}$	безразмерная	–
5	Средняя за период повторяемости реактивная мощность	Средняя реактивная мощность	Q_{AV}	$Q_{AV} = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} q dt$	W	–
			Q_{AV^*}	$Q_{AV^*} = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} q^* dt$	безразмерная	–
6	Среднеквадратическая в периоде повторяемости реактивная мощность	Среднеквадратическая реактивная мощность	Q_{RMS}	$Q_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_t^{t+T} q^2 dt}$	W	–
			Q_{RMS^*}	$Q_{RMS^*} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_t^{t+T} q^{*2} dt}$	безразмерная	–

Таблица 2

Максимально возможный КПД

k_{sc}	4	6	8	10	12	14	16	18
η_{max}	0.5	0.789	0.854	0.887	0.909	0.923	0.933	0.941
ΔP_{min^*}	1	0.276	0.171	0.127	0.101	0.083	0.072	0.063
P_{sours^*}	2	1.276	1.171	1.127	1.101	1.083	1.072	1.063
k_{sc}	20	25	30	40	50	60	75	100
η_{max}	0.947	0.958	0.965	0.974	0.980	0.983	0.986	0.99
ΔP_{min^*}	0.056	0.043	0.036	0.026	0.021	0.017	0.014	0.01
P_{sours^*}	1.056	1.043	1.036	1.026	1.021	1.017	1.014	1.01

Мгновенная активная мощность нагрузки трехфазной СЭ при отсутствии пульсаций

$$p = P_{usf} = const, \tag{15}$$

при наличии пульсаций

$$p = P_{usf} + P_{\sim m} \cdot \sin \vartheta. \tag{16}$$

Полагаем, что активный ток кабеля пропорционален мгновенной активной мощности. Мощность потерь в кабеле от активной составляющей тока при отсутствии пульсаций

$$\Delta p_{\sim} = \Delta P_{\sim} = R_S \cdot k \cdot p^2 = R_S \cdot k \cdot P_{usf}^2, \tag{17}$$

где k – коэффициент пропорциональности.

При наличии пульсаций

$$\Delta p_{\sim} = R_S \cdot k \cdot (P_{usf} + P_{\sim m} \cdot \sin \vartheta)^2. \tag{18}$$

Период повторяемости графика активной мощности в соответствии с рис. 3 равен 2π . Из соотношения (18) в периоде повторяемости с учетом независимости мощности потерь от частоты пульсаций активной мощности

$$\Delta P_{\sim} = \frac{1}{2\pi} R_S \cdot k \cdot \left(\int_0^{2\pi} [P_{usf}^2 + 2 \cdot P_{usf} \cdot P_{\sim m} \cdot \sin \vartheta] d\vartheta + \int_0^{2\pi} P_{\sim m}^2 \cdot \sin^2 \vartheta d\vartheta \right). \tag{19}$$

С учетом равенства нулю второго интеграла в скобках определим разность в мощности потерь в рассматриваемых двух вариантах графика мгновенной активной мощности

$$\begin{aligned} \Delta P_{puls} &= \Delta P_{\sim} - \Delta P_{\sim} = \\ &= \frac{1}{2\pi} R_S \cdot k \cdot \int_0^{2\pi} 2 \cdot P_{\sim m} \cdot \frac{1}{2} \cdot (1 - \cos 2\vartheta) d\vartheta = \tag{20} \\ &= R_S \cdot k \cdot \frac{P_{\sim m}^2}{2} = R_S \cdot k \cdot P_{pulsRMS}^2. \end{aligned}$$

Из соотношения (20) следует, что дополнительная мощность потерь, обусловленная пульсациями мгновенной активной мощности, пропорциональна квадрату среднеквадратического (действующего) значения переменной составляющей активной мощности.

7. Допущение о мощности потерь в нулевом проводе четырехпроводной СЭ очевидно.

Таким образом, обоснованы все семь принимаемых в работе допущений. Корректность принятых допущений может быть проверена на соответствующей Matlab-модели. Поскольку существует, по крайней мере, 72 заслуживающих внимания варианта сочетаний наборов параметров моделей [7], разработка моделей, моделирование и сопоставительный анализ результатов требует длительного периода времени.

После моделирования и анализа пяти вариантов СЭ авторы сочли возможным предложить универсальную расчетную формулу для определения четырех составляющих суммарной мощности потерь [10]

$$\begin{aligned} \Delta P_{\Sigma^*} &= \Delta P_{min^*} \times \\ &\times \left(1 + Q_{RMS^*}^2 + P_{pulsRMS^*}^2 \right) + \Delta P_{n^*} \Big|_{P_{usf} = const} \tag{21} \end{aligned}$$

В соотношении (21) все величины взяты в долях заданного неизменного значения полезной мощности нагрузки, P_{usf} . По сравнению с соотношением (27) в [10] в (21) введены уточненные индексы, более соответствующие физическому смыслу величин. Соотношение (21) является основным расчетным соотношением. В нем:

$$\Delta P_{\Sigma^*} = \Delta P_{\Sigma} / P_{usf} - \quad (22)$$

относительная суммарная мощность потерь в рассматриваемой СЭ в долях полезной мощности нагрузки;

$$\Delta P_{\min^*} = \Delta P_{\min} / P_{usf} - \quad (23)$$

относительная минимально возможная мощность потерь в СЭ при отсутствии пульсаций активной мощности и при равенстве нулю мгновенной реактивной мощности во всем периоде повторяемости;

$$Q_{RMS^*} = Q_{RMS} / P_{usf} - \quad (24)$$

относительная среднеквадратическая в периоде повторяемости реактивная мощность;

$$P_{pulsRMS^*} = P_{pulsRMS} / P_{usf} - \quad (25)$$

относительное среднеквадратическое значение переменной составляющей мгновенной активной мощности;

$$\Delta P_{n^*} = \frac{R_n}{P_{usf} \cdot T} \int_t^{t+T} i_n^2 dt = \frac{\Delta P_n}{P_{usf}} - \quad (26)$$

среднее за период повторяемости относительное значение мощности потерь в нулевом проводе.

Проверка корректности универсальной формулы (21). Универсальная формула (21) получена при ряде допущений и поэтому является приближенной. Степень приближения расчета суммарной мощности потерь и ее составляющих определяется путем сравнения результатов полученных по (21) и результатов измерения токов, напряжений, активной, реактивной мощностей, мощности потерь и КПД СЭ в Matlab-модели.

В [10] была описана Matlab-модель трехфазной СЭ, позволяющая выполнять необходимые измерения и производить анализ электромагнитных процессов

в режиме реального времени. Графическая часть Matlab-модели представлена на рис. 4. Модель позволяет снимать данные для любого из 72 вариантов набора параметров. Остановимся на варианте СЭ с симметричным источником трехфазных синусоидальных напряжений, представленными на рис. 4 блоками 1-3, и симметричной нелинейной нагрузкой представленной в каждой фазе параллельным включением резисторов R_{la} , R_{lb} , R_{lc} (блоки 11-13) и регулируемых источников тока J_a , J_b , J_c (блоки 8-10).

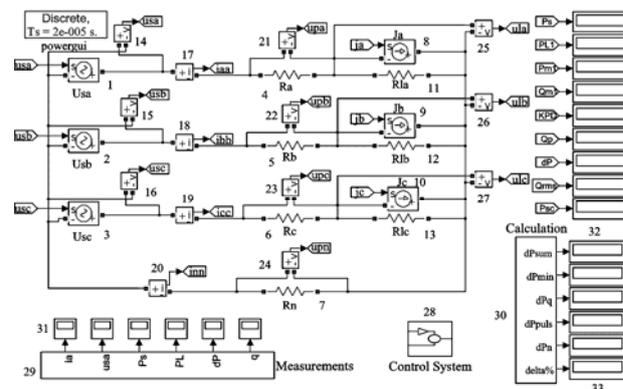


Рис. 4. Matlab-модель эквивалентной схемы трехфазной СЭ

Для моделирования был выбран вариант, когда в кривой тока содержатся нечетные гармоники включительно по 37. Параметры элементов модели: $k_{sc} = P_{sc} / P_{usf} = 5, 10, 15, 20, 25, 30$; $U_m = 311.13 \text{ V}$; $f_s = 50 \text{ Hz}$; $P_{usf} = \text{const} = 400.1 \text{ kW}$; $R_n = \infty, 0, R_s$. Постоянство средней полезной мощности $P_{usf} = \text{const}$ поддерживалось с помощью коэффициента k_l , на который умножались значения сопротивлений нагрузки.

Сопоставление результатов расчета по (21) и эксперимента на Matlab-модели представлено в табл. 3. Жирным шрифтом в табл. 3 выделены результаты расчета по формуле (21), а в последней колонке приведена относительная погрешность использования расчетной формулы.

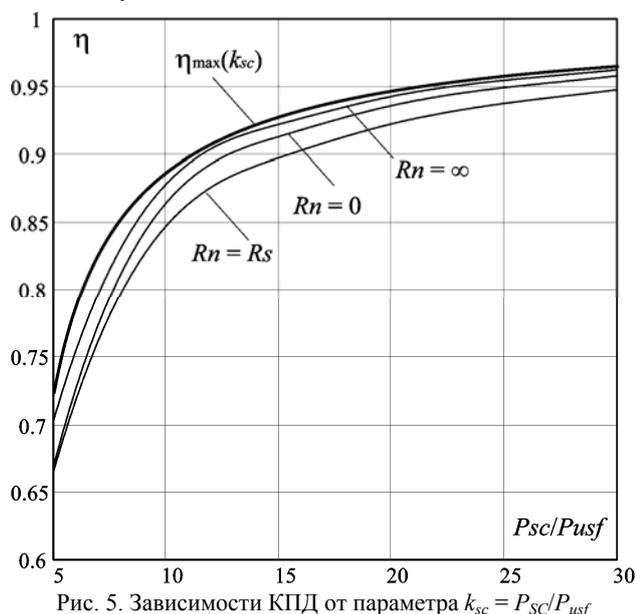
Таблица 3

Сопоставление результатов расчета и экспериментов

R_n	k_{sc}	k_l	η	Q_{rms^*}	$P_{pulsRMS^*}$	$\Delta P_{1\Sigma^*}$	$\Delta P_{2\Sigma^*}$	ΔP_{\min^*}	ΔP_{q^*}	ΔP_{puls^*}	ΔP_{n^*}	$\delta_{\Delta P_{\Sigma^*}}, \%$
∞	5	0.9595	0.7024	0.2992	0.04268	0.4236	0.4169	0.382	0.0342	0.00071	0	1.59
	10	0.9887	0.8783	0.2964	0.04258	0.13858	0.13841	0.127	0.01116	0.00023	0	0.126
	15	0.993	0.9222	0.2958	0.04245	0.08434	0.08429	0.07738	0.00677	0.00014	0	0.054
	20	0.995	0.9428	0.2951	0.04243	0.06072	0.0607	0.05574	0.004854	0.0001	0	0.03
	25	0.9963	0.9547	0.2949	0.04235	0.04744	0.04743	0.04356	0.00379	0.000078	0	0.027
	30	0.9969	0.9625	0.2947	0.04233	0.03894	0.03893	0.03576	0.00311	0.000064	0	0.026
0	5	0.8945	0.6684	0.4904	0.04425	0.49617	0.4746	0.382	0.09186	0.00078	0	4.34
	10	0.9711	0.8644	0.4785	0.04318	0.1569	0.15634	0.127	0.02908	0.00024	0	0.36
	15	0.9824	0.9132	0.4748	0.04284	0.0951	0.09497	0.07738	0.01744	0.00014	0	0.136
	20	0.9876	0.936	0.473	0.04268	0.06836	0.06832	0.05574	0.01247	0.0001	0	0.061
	25	0.9903	0.9493	0.4719	0.04258	0.05337	0.05334	0.04356	0.0097	0.000079	0	0.056
	30	0.992	0.958	0.4712	0.04252	0.04379	0.04376	0.03576	0.00794	0.000065	0	0.055
R_s	5	0.8875	0.6646	0.3688	0.04439	0.50455	0.45896	0.382	0.05195	0.00075	0.02429	9.03
	10	0.9495	0.8474	0.4145	0.04393	0.18008	0.17256	0.127	0.02182	0.00025	0.02348	4.17
	15	0.9644	0.8976	0.4313	0.04353	0.1141	0.1108	0.07738	0.01439	0.00015	0.01885	2.91
	20	0.9725	0.9225	0.4402	0.04327	0.084	0.0821	0.05574	0.0108	0.000104	0.01545	2.28
	25	0.9775	0.9376	0.4456	0.04309	0.06655	0.06532	0.04356	0.00865	0.000081	0.01303	1.84
	30	0.981	0.9477	0.4492	0.04296	0.05514	0.05427	0.03576	0.00722	0.000066	0.01123	1.57

Анализ данных табл. 3 подтверждает высокую точность расчета по (21) для трехфазных трехпроводных, а также четырехпроводных СЭ при допущении $R_n = 0$. В случае использования формулы (21) для трехфазной четырехпроводной СЭ при учете сопротивления нулевого провода, она дает достаточно точный для инженерных расчетов результат, однако требует уточнения при исследованиях, в связи с тем, что не учитывает взаимное влияние электромагнитных процессов в линейных проводах и нулевом проводе.

На рис. 5 представлены зависимости КПД от параметра $k_{sc} = P_{SC}/P_{usf}$ для трех значений сопротивления нулевого провода, а также зависимость максимально возможного КПД от указанного параметра, построенная по (11). Анализ кривых показывают, что компенсация дополнительных составляющих мощности потерь для рассматриваемой СЭ с малыми значениями отношения мощности резистивного короткого замыкания к полезной мощности нагрузки ($5 < k_{sc} < 10$), позволит увеличить КПД более чем на 5 %.



Выполненный анализ зависимости вычисленных в периоде повторяемости значений среднеквадратической реактивной мощности и средней, за тот же период времени, мощности потерь в СЭ, позволяет сформулировать несколько определений реактивной мощности, зависящих от ответов на шесть вопросов, сформулированных в начале статьи, и от принятых допущений.

Приведем несколько возможных определений.

1) В трехмерной системе координат вектор мгновенной реактивной мощности равен векторному произведению пространственного вектора напряжения на пространственный вектор тока СЭ.

2) Мгновенная реактивная мощность равна модулю вектора мгновенной реактивной мощности. Среднее и среднеквадратическое значения реактивной мощности вычисляются путем интегрирования в периоде повторяемости кривой мгновенной реактивной мощности.

3) В трехфазной СЭ одновременно протекают два практически независимых процесса обмена энергией. Первый процесс – это обмен энергией между источником и нагрузкой. Скорость первого обмена численно

равна мгновенной или средней за период повторяемости активной мощности. Знаком активной мощности определяется направление потока энергии. Второй процесс – это обмен энергией между фазами нагрузки, скорость которого равна мгновенной реактивной мощности. Второй обмен фактически не влияет на обмен энергией между источником и нагрузкой, однако порождает дополнительные потери энергии в линии, пропорциональные, как следует из (21), квадрату среднеквадратического значения реактивной мощности.

4) Реактивная мощность – это расчетная величина, определяющая скорость обмена энергией между фазами нагрузки трехфазной СЭ, отношение квадрата среднеквадратического значения которой к квадрату полезной мощности, умноженное на величину минимально возможной мощности потерь, равно одной из составляющих мощности дополнительных потерь в СЭ.

5) Возможны, по крайней мере, 72 варианта сочетаний параметров и режимов работы СЭ, приводящих к появлению реактивной мощности. Можно сделать предположение, что формула (21) с допустимой погрешностью справедлива для всех 72 вариантов. Путем сопоставления результатов моделирования и расчетов подтверждается справедливость формулы (21) для пяти вариантов.

6) В случае доказательства справедливости формулы (21) для остальных вариантов можно сформулировать теорему минимума потерь в СЭ: «Минимальная мощность потерь в СЭ достигается, если мгновенная реактивная мощность равна нулю во всем периоде повторяемости, а в графике мгновенной активной мощности отсутствуют пульсации». Численная величина этой минимально возможной мощности потерь в СЭ однозначно зависит от отношения мощности резистивного короткого замыкания на клеммах нагрузки к средней за период повторяемости мощности нагрузки и определяется по табл.2 и через максимально возможный КПД по соотношению (11).

Отметим, что возможность обмена энергией между фазами трехфазной СЭ при отсутствии потока энергии из источника в нагрузку или в обратном направлении показана в [9] для случая подключения к источнику трехфазной батареи конденсаторов или блока трехфазных реакторов.

Выводы. Сформулированы допущения, позволяющие предложить универсальную расчетную формулу (21) для определения суммарной мощности потерь в трехфазной СЭ как суммы четырех составляющих: минимально возможной мощности потерь в СЭ; мощности потерь, пропорциональной квадрату среднеквадратического значения реактивной мощности; мощности потерь, пропорциональной квадрату среднеквадратического значения переменной составляющей активной мощности; мощности потерь в нулевом проводе четырехпроводной СЭ.

Проверка корректности расчетной формулы (21) проверена путем моделирования на Matlab-модели трехфазной СЭ для пяти вариантов сочетания параметров СЭ. Результаты расчета и измерения на модели для выбранных вариантов практически совпадают. Требуется проверка формулы при других сочетаниях параметров СЭ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Lyon W.V. Reactive power and unbalanced circuits // *Electrical world*. – June, 1920. – vol.75. – no.25. – pp. 1417-1420.
2. Budeanu C.I. Puissances réactives et fictives // *Ins. Romaine de l'Energie*. – 1927. – no.2.
3. Fryze S. Active and Apparent power in non-sinusoidal systems // *Przeglad Elektrot.* – 1931. – no.7. – pp. 193-203.
4. Fryze S. Wirk-, Blind- und Scheinleistung in Elektrischen Stromkreisen mit Nichtsinusoidalem Verlauf von Strom und Spannung // *Elect. Zeitschrift.* – 1932. – vol.53. – no.25. – pp. 596-599.
5. Маевский О.А. Энергетические показатели вентиляльных преобразователей. – М.: Энергия, 1978. – 320 с.
6. Akagi H., Kanazawa Y., Nabae A. Generalized theory of the instantaneous power in three phase circuits // *Int. Power Electronics Conf.*, Tokyo, Japan. – 1983. – pp. 1375-1386.
7. Домнин И.Ф., Жемеров Г.Г., Ильина О.В., Тугай Д.В. Компенсация пульсаций мгновенной активной мощности в цепях с резистивной нагрузкой // *Технічна електродинаміка*. Тем. випуск «Проблеми сучасної електротехніки». – 2006. – Ч. 6. – С. 36-41.
8. Жемеров Г.Г., Колесник В.Ю., Ильина О.В. Соотношения для преобразования координат обобщенных векторов напряжений и токов трехфазной системы электроснабжения. Справочное пособие. – Х.: НТУ «ХПИ», 2009. – 40 с.
9. Жемеров Г.Г., Ильина Н.А., Ильина О.В., Ковальчук О.И., Сокол Е.И. КПД трехфазной четырехпроводной системы электроснабжения с асимметричной нагрузкой // *Технічна електродинаміка*. Тем. випуск «Силова електроніка та енергоефективність». – 2010. – №1. – С. 22-31.
10. Жемеров Г.Г., Тугай Д.В. Мощность потерь и реактивная мощность в трехфазных системах электроснабжения при симметричных синусоидальных напряжениях источника // *Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит.* – 2014. – №9(127). – С. 12-23.

REFERENCES

1. Lyon W.V. Reactive power and unbalanced circuits. *Electrical world*, June 1920, vol.75, no.25, pp. 1417-1420.
2. Budeanu C.I. Puissances réactives et fictives. *Ins. Romaine de l'Energie*, Bucharest, 1927, no.2.
3. Fryze S. Active and Apparent power in non-sinusoidal systems. *Przeglad Elektrot.*, 1931, no.7, pp. 193-203.
4. Fryze S. Wirk-, Blind- und Scheinleistung in Elektrischen Stromkreisen mit Nichtsinusoidalem Verlauf von Strom und Spannung. *Elect. Zeitschrift.*, 1932, vol.53, no.25, pp. 596-599.
5. Maevskiy O.A. *Energeticheskie pokazateli ventilnykh preobrazovateley* [Energy indicators of semiconductor converters]. Moscow, Energiya Publ., 1978. 320 p. (Rus).
6. Akagi H., Kanazawa Y., Nabae A. Generalized theory of the instantaneous power in three phase circuits. *Int. Power Electronics Conf.*, Tokyo, Japan, 1983, pp.1375-1386.
7. Domnin I.F., Zhemerov G.G., Il'ina O.V., Tugay D.V. Compensation of instantaneous power pulsations in electric circuits with a resistive load. *Tekhnichna elektrodynamika. Tem. vypusk «Problemy suchasnoyi elektrotekhniki» – Technical electro-dynamics. Thematic issue «Problems of modern electrical engineering»*. 2006, chapter 6, pp. 36-41. (Rus).
8. Zhemerov G.G., Kolesnik V.Yu., Il'ina O.V. *Sootnosheniya dlya preobrazovaniya koordinat obobshchennykh vektorov napryazheniy i tokov trehfaznoy sistemy elektrosnabzheniya. Spravochnoe posobie* [Relations for the generalized voltages and currents vectors coordinate transformation of three-phase energy supply system. Reference manual]. Kharkiv, NTU «KhPI» Publ., 2009. 40 p. (Rus).

9. Zhemerov G.G., Il'ina N.A., Il'ina O.V., Koval'chuk O.I., Sokol E.I. Efficiency three-phase four-wire power supply system with an asymmetric load. *Tekhnichna elektrodynamika. Tem. vypusk «Silova elektronika i energoefektivnist» – Technical electro-dynamics. Thematic issue «Power electronics & energy efficiency»*, 2010, vol.1, pp. 22-31. (Rus).
10. Zhemerov G.G., Tugay D.V. Power losses and reactive power in three-phase power supply systems with symmetrical sinusoidal voltage source. *Energosberezhenie. Energetika. Energoaudit – Energy saving. Power engineering. Energy audit*, 2014, no.9(127), pp. 12-23. (Rus).

Поступила (received) 01.09.2015

Жемеров Георгий Георгиевич¹, д.т.н., проф.,
Тугай Дмитрий Васильевич², к.т.н., доц.,

¹Национальный технический университет
«Харьковский политехнический институт»,
61002, Харьков, ул. Фрунзе, 21,
тел/phone +38 057 7076312, e-mail: zhemerov@gmail.com
²Харьковский национальный университет
городского хозяйства им. А.Н. Бекетова,
61002, Харьков, ул. Революции, 12,
тел/phone +38 057 7073111, e-mail: tugaydv@yandex.ru

G.G. Zhemerov¹, D.V. Tugay²

¹National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»,
21, Frunze Str., Kharkiv, 61002, Ukraine.

²O.M. Beketov National University of Urban Economy
in Kharkiv,
12, Revolution Str., Kharkiv, 61002, Ukraine.

Physical meaning of the «reactive power» concept applied to three-phase energy supply systems with non-linear load.

Purpose. The contradictions in the use of the term «reactive power» require justification by clarifying its physical meaning. The aim of the paper is to reveal the physical meaning of the term «reactive power» applied to three-phase three-wire and four-wire energy supply systems. **Methodology.** We have applied the modern theory of instantaneous active and reactive power, the graphical filling complex branched energy supply system of simplified design scheme, the theory of electrical circuits, computer Matlab-simulation. **Results.** We have provided answers to six basic questions that reveal the physical meaning and definition of the concept of «reactive power». We have justified the assumptions suggesting a universal calculation formula to determine the relative total power loss in the three-phase energy supply system as the sum of four components caused by: a minimal losses, reactive power, active power pulsations and instantaneous current flow in the neutral wire. **Originality.** We have developed the definition that reveals the physical meaning of the term «reactive power» for three-phase energy supply systems corresponding to modern theories of instantaneous active and reactive power. **Practical value.** We have proposed energy efficiency method ideas of energy supply systems with non-linear load based on the additional components of the power losses calculation. The further development of the method will allow to amend the design, selection and operation of the power active filters practices. References 10, tables 3, figures 5. **Key words:** energy supply system, reactive power, power of additional losses, the minimum possible losses, Matlab-model of three-phase energy supply system.