

## ЭНЕРГИЯ И МОЩНОСТЬ В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ С ПОЛУПРОВОДНИКОВЫМИ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯМИ И НАКОПИТЕЛЯМИ ЭНЕРГИИ

*Обґрунтовано використання термінів "енергія", "активна потужність", "реактивна потужність" щодо систем електропостачання з напівпровідниковими перетворювачами і накопичувачами енергії. Представлені способи розрахунку таких систем електропостачання.*

*Обосновано использование терминов "энергия", "активная мощность", "реактивная мощность" применительно к системам электроснабжения с полупроводниковыми преобразователями и накопителями энергии. Представлены способы расчета энергетической эффективности таких систем электроснабжения.*

### ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время силовая электроника, быстрому развитию которой положили начало в конце пятидесятих годов прошлого столетия разработка и промышленное производство силовых полупроводниковых приборов, близка к зениту своих возможностей. С применением современных полупроводниковых ключей могут быть разработаны и изготовлены преобразователи электрической энергии практически с любыми требуемыми характеристиками в диапазоне номинальных мощностей от нескольких ватт до сотен мегаватт [36-41].

Многочисленные научные публикации по силовой электронике и системам электроснабжения (СЭ) с полупроводниковыми преобразователями в изданиях Украины, России, США, Европейских стран, Японии, как правило, базируются на корректном использовании принятой международными стандартами терминологии и на адекватном представлении об электромагнитных процессах в рассматриваемых системах.

К сожалению, это не всегда можно отнести к авторефератам диссертаций и к статьям в трудах конференций, условия проведения которых не предусматривают издательское рецензирование публикаций. В этих работах можно встретить нечетко сформулированные определения, неясные термины и, что особенно печально, устаревшие или вовсе неверные представления об электромагнитных процессах в системах электроснабжения. Наиболее часто недоразумения возникают, когда речь идет о передаче и накоплении энергии или о скорости обмена энергией между отдельными элементами системы электроснабжения.

Одной из причин нечетких представлений об энергии и мощности, вероятно, является отсутствие прогресса в изложении разделов "Активная, реактивная и полная мощность" и "Мгновенная мощность и колебания энергии в цепи синусоидального тока" в учебниках по ТОЭ за период с 1952 г. по настоящее время [42-45]. Последние учебники [44, 45], по сути, повторяют посылки шестидесятилетней давности [42].

В настоящей статье, которую можно считать обобщением и уточнением материалов публикаций авторов [1-18], сделана попытка изложения некоторых положений теории передачи энергии и теории мощности в системах электроснабжения с полупроводниковыми преобразователями и накопителями энергии. В отличие от [44, 45] как основной вариант рассматриваются не однофазные, а трехфазные трехпроводные или четырехпроводные системы электро-

снабжения с симметричным трехфазным источником синусоидальных напряжений. Однофазные системы электроснабжения при таком подходе представляют собой частный случай асимметричной трехфазной системы с бесконечно большими сопротивлениями в двух из трех фаз нагрузки.

Положения настоящей статьи, как полагают авторы, находятся в согласии с положениями современных теорий мощности, изложенных в монографии [19] и в многочисленных журнальных публикациях, например, [20-35].

### ЭКВИВАЛЕНТНАЯ СХЕМА СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

Трехфазные СЭ с источниками синусоидальных симметричных напряжений включают семь основных элементов: генераторы электрической энергии, трансформаторы и реакторы, полупроводниковые преобразователи, фильтро-компенсирующие устройства, накопители энергии, пассивные и активные нагрузки, соединительные кабели.

Схемы соединения элементов СЭ могут быть многообразными и сложными. Тем не менее, при рассмотрении процессов обмена энергией они, как правило, могут быть приведены к простой эквивалентной трехпроводной схеме, представленной на рис. 1, или к четырехпроводной схеме, представленной на рис. 2.

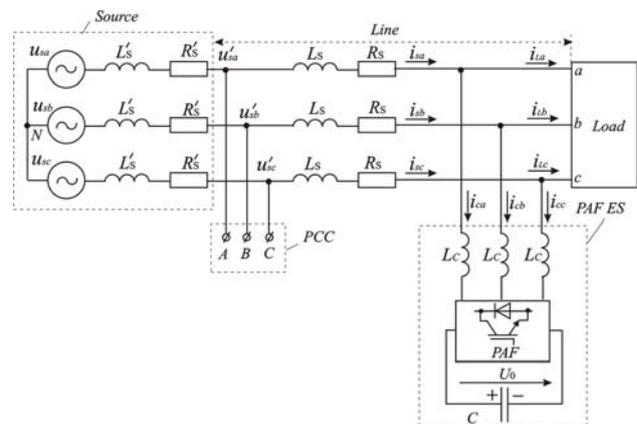


Рис. 1. Эквивалентная схема трехфазной трехпроводной СЭ: *Source* – источник трехфазного синусоидального симметричного напряжения; *Load* – нагрузка; *Line* – линия, соединяющая источник с нагрузкой; *PAF ES* – силовой активный фильтр, совмещенный с накопителем энергии; *PCC* – общие точки подключения нагрузок

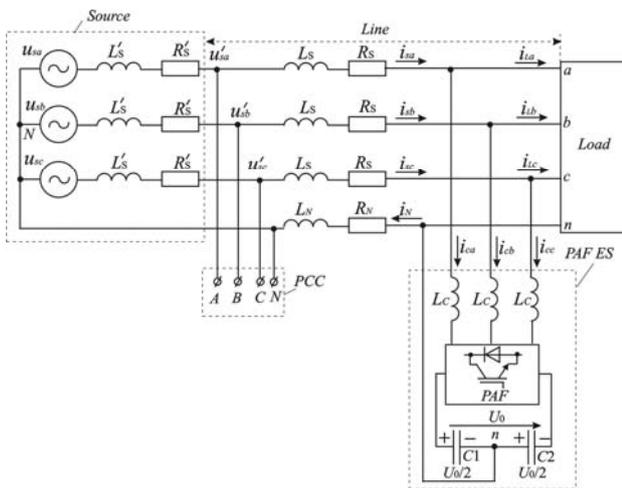


Рис. 2. Эквивалентная схема трехфазной четырехпроводной СЭ

## ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

Назначение схем СЭ заключается в передаче электрической энергии из источника в нагрузку или передаче энергии из нагрузки в источник. Внутри блока нагрузки может происходить как преобразование электрической энергии в тепловую, химическую, механическую, световую и другие виды энергии, так и обратное преобразование энергии.

Основными характеристиками СЭ являются:

- количество электрической энергии  $E$ , передаваемое за некоторый интервал времени, например, за период повторяемости, в джоулях (J);
- мгновенная и средняя за некоторый интервал времени скорости передачи энергии в ваттах (W), которые в настоящей статье будем называть соответственно мгновенной  $p$  или средней  $P$  активной мощностью;
- потери энергии в СЭ,  $\Delta E$ , за рассматриваемый интервал времени;
- коэффициент полезного действия при передаче энергии,  $\eta$ , за любой по длительности рассматриваемый интервал времени.

Указанные выше характеристики СЭ, которые можно назвать количественными, связаны между собой следующими соотношениями:

- передаваемая энергия

$$E = \int_t^{t+T} p dt = P \cdot T, \quad (1)$$

где  $T$  – период повторяемости,  $p$  – мгновенная активная мощность;

- средняя активная мощность

$$P = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} p dt; \quad (2)$$

- КПД

$$\eta = \frac{E}{E + \Delta E}, \quad (3)$$

или

$$\eta = \frac{P}{P + \Delta P}, \quad (4)$$

где  $\Delta E$  – потери энергии,  $\Delta P$  – средняя за рассматриваемый интервал времени мощность потерь энергии.

Отметим, что знак активной мощности, мгновенной или усредненной, определяет направление потока энергии: при положительной активной мощности энергия передается из источника в нагрузку, при отрицательной активной мощности направление потока энергии обратное.

При анализе энергетической эффективности СЭ, численной оценкой которой является КПД, необходимо определить условия, при выполнении которых достигается максимальный теоретически возможный КПД, а также реальный КПД, соответствующий конкретному режиму работы СЭ. Для определения этих условий достаточно оперировать понятиями, принятыми в соотношениях (1)-(4), а также параметрами схемы электроснабжения и графика мгновенной активной мощности.

Основным качественным показателем СЭ является коэффициент несинусоидальности напряжений (THD) на клеммах в точке общего соединения, PCC, (см. рис. 1, 2), величина которого определяется из соотношения

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^{\infty} U_k^2}}{U_1} = \frac{\sqrt{U_\delta^2 - U_1^2}}{U_1}, \quad (5)$$

где  $k = 1, 2, 3, \dots, \infty$  – порядок гармоники напряжения,  $U_k$  – действующее значение напряжения гармоники с номером  $k$ ,  $U_1$  – действующее значение основной гармоники напряжения,  $U_\delta$  – действующее значение напряжения с учетом всех гармоник, и регламентируется стандартами.

Другим качественным показателем может быть величина модуля вектора мгновенной реактивной мощности, равного в трехфазной системе электроснабжения векторному произведению пространственного вектора напряжения на пространственный вектор тока. Равенство модуля вектора мгновенной реактивной мощности нулю является одним из двух условий достижения максимального КПД в СЭ.

Отметим несколько особенностей эквивалентных схем.

На характер нагрузки не накладываются какие-либо ограничения: внутри трехполосника (см. рис. 1) или четырехполосника (см. рис. 2) могут содержаться резисторы, конденсаторы, реакторы, нелинейные элементы, источники напряжения и источники тока. Период повторяемости графика мгновенной активной мощности трехфазной нагрузки в общем случае не совпадает с периодом повторяемости напряжения источника. Как правило, период повторяемости графика мгновенной активной мощности значительно, на несколько порядков, больше периода повторяемости напряжения источника

$$T \gg T_S, \quad (6)$$

где  $T_S$  – период повторяемости синусоидальных напряжений источника.

На рис. 1, 2 индуктивность  $L'_s$  и сопротивление  $R'_s$  определяются эквивалентными параметрами генератора и трансформатора источника. Индуктивность  $L_s$  и сопротивление  $R_s$  определяются параметрами кабелей, реакторов и трансформаторов, через которые передается электрическая энергия. Обычно выдерживаются неравенства

$$L_S \gg L'_S, \quad (7)$$

$$R_S \gg R'_S. \quad (8)$$

На входе блока *PAF ES*, выполняющего роль силового активного фильтра и управляемого накопителя энергии, включаются три реактора с индуктивностью  $L_C$ , величина которой обычно значительно больше индуктивности  $L_S$ :

$$L_C \gg L_S. \quad (9)$$

### МОЩНОСТЬ РЕЗИСТИВНОГО К.З.

При анализе потерь энергии и КПД СЭ целесообразно ввести величину расчетной мощности резистивного короткого замыкания  $P_{SC}$ . Мощность резистивного к.з. при направлении потока энергии от источника в нагрузку,  $P_{SC+}$ , определяется в соответствии с рис. 3, а при обратном направлении потока энергии,  $P_{SC-}$ , – в соответствии с рис. 4.

Как было отмечено выше падения напряжений на омических сопротивлениях и индуктивностях линии значительно меньше напряжений источника и нагрузки. Поэтому в большинстве случаев можно принять, что

$$P_{SC+} = P_{SC-} = P_{SC}. \quad (10)$$

Величина мощности резистивного к.з.,  $P_{SC}$ , определяется из соотношения [16]:

$$P_{SC} = \frac{3 \cdot U_{sm}^2}{2 \cdot (R_S + R'_S)}, \quad (11)$$

где  $U_{sm}$  – амплитуда фазного синусоидального напряжения,  $R_S$  – омическое сопротивление линии,  $R'_S$  – внутреннее омическое сопротивление источника или нагрузки.

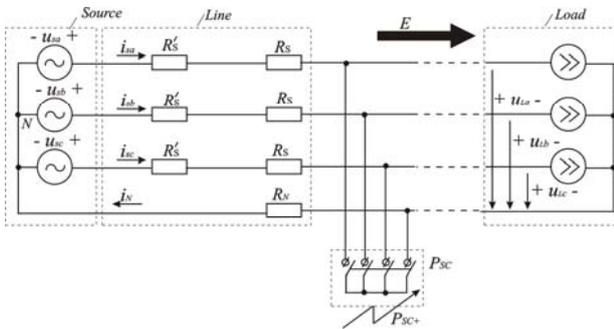


Рис. 3. Определение мощности резистивного к.з. при направлении потока энергии от источника в нагрузку

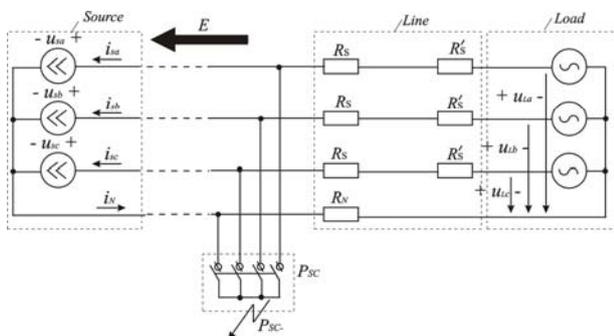


Рис. 4. Определение мощности резистивного к.з. при направлении потока энергии от нагрузки в источник

Моделирование нагрузки на рис. 3 и источника на рис. 4 источниками тока оправдано тем, что при

расчете КПД системы электроснабжения задаются временными графиками модуля пространственного вектора тока или мгновенной активной мощности и их периодом повторяемости [16]. Реализация этих графиков осуществляется с помощью замкнутой системы автоматического регулирования.

### РАСЧЕТ КПД СЭ

Возможны три режима работы СЭ:

- режим 1 с однонаправленным потоком энергии от источника к нагрузке во всем периоде повторяемости при  $p_s > 0, p_L > 0$ ;
- режим 2 с однонаправленным потоком энергии от нагрузки к источнику при  $p_s < 0, p_L < 0$ ;
- режим 3 с двунаправленным потоком энергии, когда в периоде повторяемости интервалы времени с положительными мгновенными активными мощностями,  $p_s > 0, p_L > 0$ , чередуются с интервалами времени с отрицательными мгновенными активными мощностями,  $p_s < 0, p_L < 0$ .

Будем считать, что во всех трех указанных режимах между мгновенной активной мощностью потерь и мгновенной активной мощностью передачи энергии соблюдаются соотношения:

$$\begin{aligned} \Delta p &\ll |p_S|, \\ \Delta p &\ll |p_L|. \end{aligned} \quad (12)$$

Мгновенные и средние за период повторяемости значения КПД определяются в зависимости от характера режима по следующим соотношениям.

В режиме 1

$$\eta_{1inst} = \frac{P_{L1}}{P_{S1}}, \quad (13)$$

$$P_{S1} = P_{L1} + \Delta p_1, \quad (14)$$

$$\eta_1 = \frac{\int_t^{t+T} p_{L1} dt}{\int_t^{t+T} p_{S1} dt} = \frac{T \cdot P_{L1}}{T \cdot P_{S1}} = \frac{E_{L1}}{E_{S1}} = \frac{P_{L1}}{P_{S1}}, \quad (15)$$

где  $T$  – период повторяемости графика мгновенной активной мощности,  $\eta_{1inst}$  и  $\eta_1$  – соответственно мгновенный и средний КПД в режиме 1,  $P_{L1}$  и  $P_{S1}$  – соответственно средние за период повторяемости мощность нагрузки и средняя мощность источника.

В режиме 2

$$\eta_{2inst} = \frac{P_{S2}}{P_{L2}}, \quad (16)$$

$$-p_{L2} = -p_{S2} + \Delta p_2, \quad (17)$$

$$\eta_2 = \frac{\int_t^{t+T} p_{S2} dt}{\int_t^{t+T} p_{L2} dt} = \frac{T \cdot P_{S2}}{T \cdot P_{L2}} = \frac{E_{S2}}{E_{L2}} = \frac{P_{S2}}{P_{L2}}. \quad (18)$$

В режиме 3 КПД определяется путем разбиения графика мгновенной активной мощности на участки, в которых  $p_s > 0, p_L > 0$ , и участки, в которых  $p_s < 0, p_L < 0$ , определения двух значений КПД по соотношениям (15) и (18) и определения суммарного КПД из соотношения

$$\eta_{\Sigma 3} = \frac{E_{L31} + E_{L32}}{E_{S31} + E_{S32}}, \quad (19)$$

где

$$E_{S31} > 0, \quad E_{L31} > 0, \quad E_{S32} < 0, \quad E_{L32} < 0. \quad (20)$$

Таким образом, работа СЭ в режиме 3 характеризуется тремя значениями КПД:

КПД передачи энергии из источника в нагрузку

$$\eta_{31} = \frac{E_{L31}}{E_{S31}}. \quad (21)$$

КПД передачи энергии из нагрузки в источник

$$\eta_{32} = \frac{E_{S32}}{E_{L32}}, \quad (22)$$

и суммарным КПД, вычисляемым по (19).

Для определения зависимости между тремя величинами КПД в режиме 3 введем коэффициент возврата энергии в источник:

$$0 \leq k_E = \frac{-E_{S32}}{E_{S31}} \leq 1, \quad (23)$$

где

$$E_{S32} < 0, \quad E_{S31} > 0. \quad (24)$$

Подставив в (19) соотношения (21), (22), (23), после преобразования получим

$$\eta_{\Sigma 3} = \frac{\eta_{31} - k_E}{1 - k_E}. \quad (25)$$

В табл. 1 приведены значения суммарного КПД в режиме 3, рассчитанные для заданных значений  $\eta_{31}$ ,  $\eta_{32}$ , в зависимости от коэффициента возврата энергии  $k_E$  при допущении, что

$$\eta_{31} = \eta_{32}. \quad (26)$$

По данным табл. 1 построены зависимости суммарного коэффициента полезного действия от коэффициента возврата энергии, представленные на рис. 5. Из рис. 5 видно, что даже при небольших потерях энергии в кабелях и источнике при увеличении коэффициента возврата энергии суммарный КПД резко уменьшается и при некоторых сочетаниях параметров обращается в нуль.

Таблица 1

Суммарный КПД СЭ в режиме 3

$k_E$	$\eta_{31} = \eta_{32}$								
	0.980	0.960	0.940	0.920	0.900	0.880	0.860	0.840	0.820
0	0.980	0.960	0.940	0.920	0.900	0.880	0.860	0.840	0.820
0.1	0.976	0.951	0.926	0.901	0.877	0.852	0.826	0.801	0.776
0.2	0.970	0.940	0.909	0.878	0.847	0.816	0.784	0.752	0.720
0.3	0.963	0.925	0.887	0.848	0.810	0.770	0.730	0.690	0.649
0.4	0.953	0.906	0.857	0.809	0.759	0.709	0.658	0.606	0.554
0.5	0.940	0.878	0.816	0.753	0.689	0.624	0.557	0.490	0.420
0.6	0.919	0.837	0.754	0.670	0.583	0.499	0.406	0.314	0.221
0.7	0.886	0.769	0.651	0.530	0.407	0.282	0.153	0.022	-
0.8	0.818	0.633	0.445	0.252	0.056	-	-	-	-
0.9	0.616	0.225	0.174	-	-	-	-	-	-

Положив в соотношении (25)  $\eta_{\Sigma 3} = 0$ , определим зависимость значений однонаправленных КПД, соответствующих нулевому суммарному КПД, от коэффициента возврата энергии:

$$\eta_{31} = \eta_{32} = \sqrt{k_E}. \quad (27)$$

По соотношению (27) построена зависимость, приведенная на рис. 6.

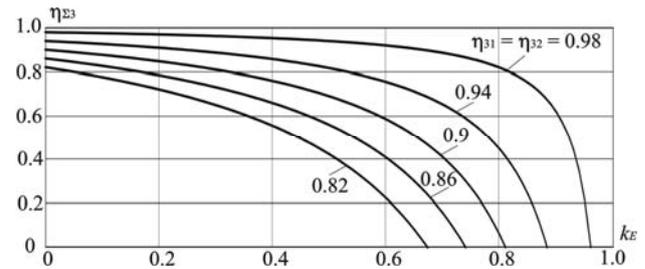


Рис. 5. Суммарный КПД СЭ в режиме 3

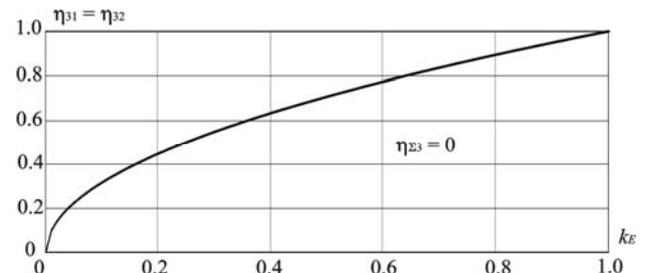


Рис. 6. Зависимость значений однонаправленных КПД СЭ, соответствующих  $\eta_{\Sigma 3} = 0$

Отметим, что направление потока энергии в СЭ может быть обусловлено двумя факторами: технологией работы нагрузки, например, необходимостью рекуперативного торможения в системе электропривода, и взаимным обменом энергией между реактивными элементами в разных фазах нагрузки без обмена с питающей сетью трехфазного синусоидального напряжения. В первом случае период повторяемости процесса обмена энергией, как правило, значительно больше периода напряжения источника, а во втором реактивные элементы обмениваются между собой энергией с частотой сети. Оба фактора приводят к снижению суммарного коэффициента полезного действия.

Зависимости, представленные на рис. 5, 6 проверены в виртуальном эксперименте с использованием Matlab-модели, приведенной на рис. 7.

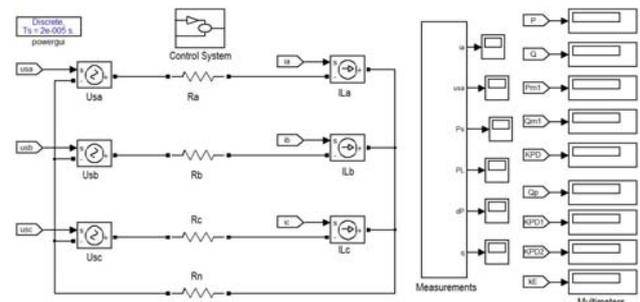


Рис. 7. Matlab-модель для проверки зависимостей на рис. 5

Matlab-модель представляет собой трехфазную четырехпроводную систему электроснабжения состоящую из трехфазного источника Usa, Usb, Usc, выполненной на регулируемых источниках тока ILa, ILb, ILc и соединительных проводов, потери в которых учитываются сопротивлениями резисторов Ra, Rb, Rc и Rn. Результаты моделирования обрабатываются в подсистеме Measurements и выводятся на цифровые осциллографы и мультиметры. Заданием графика мгновенной

активной мощности с помощью регулируемых источников тока в блоке Control System были получены данные аналогичные представленным в табл. 1, на рис. 5, 6.

### МАКСИМАЛЬНЫЙ И РЕАЛЬНЫЙ КПД

В [16-18] показано, что максимальный КПД СЭ достигается в трехфазной симметричной СЭ с резистивной симметричной нагрузкой при отсутствии пульсаций мгновенной активной мощности. Численное значение максимального КПД однозначно зависит от параметра отношения мощности резистивного короткого замыкания к полезной мощности,  $P_{SC}/P_{usf}$ . В табл. 2 приведена эта зависимость, полученная в [16].

Таблица 2

Максимально возможный КПД СЭ

$\frac{P_{SC}}{P_{usf}}$	4	6	8	10	12	14	16	18
$\eta_{max}$	0.5	0.789	0.854	0.887	0.909	0.923	0.933	0.941
$\frac{P_{SC}}{P_{usf}}$	20	25	30	40	50	60	75	100
$\eta_{max}$	0.947	0.958	0.965	0.974	0.98	0.983	0.986	0.99

Реальный средний КПД, вычисленный в периоде повторяемости, всегда меньше максимального КПД вследствие пульсаций мгновенной активной мощности трехфазной системы, а также вследствие влияния следующих факторов, обуславливающих фазовый сдвиг суммарного вектора тока относительно суммарного вектора напряжения питающей сети:

- реактивной или смешанного характера нагрузки;
- несимметрии резистивной или смешанной нагрузки;

- нелинейности нагрузки;
- несинусоидальности напряжения питающей сети;
- несимметрии напряжения питающей сети.

Перечисленные выше факторы могут проявляться одновременно в разных сочетаниях. Для трехфазной четырехпроводной СЭ возможны 32 сочетания факторов [11], приведенных в табл. 3, из которых только одно сочетание, – симметричное синусоидальное напряжение и линейная резистивная симметричная нагрузка (ячейка 1.1 в табл. 3) – обеспечивает максимально возможный КПД СЭ. Все остальные сочетания соответствуют более высокому уровню потерь энергии при той же средней активной мощности СЭ, то есть – реальному КПД.

Реальный КПД СЭ можно приблизить к максимально возможному КПД путем подключения параллельно нагрузке силового активного фильтра с накопителем энергии (PAF ES). Параметры схемы и алгоритм работы PAF ES при синусоидальности и симметрии напряжений сети должны обеспечивать синусоидальную форму токов сети  $i_{sa}, i_{sb}, i_{sc}$ , и их совпадение по фазе с соответствующими напряжениями. Очевидно, что потери энергии в самом PAF ES должны быть существенно меньшими величины, на которую уменьшаются потери в СЭ после подключения PAF ES.

Примеры расчета максимального и реального КПД трехфазной четырехпроводной СЭ при асимметрии и нелинейности нагрузки приведены в [17], где показано, что уменьшение реального КПД по сравнению с максимальным может превышать 10%.

Таблица 3

Сочетания параметров напряжения сети и нагрузки, от которых зависит КПД трехфазной четырехпроводной системы электроснабжения

Напряже- ние сети		Нагрузка							
		Симметричная				Несимметричная			
		Линейная			Нелинейная	Линейная			Нелинейная
		Резистивная	Реактивная	Смешанная		Резистивная	Реактивная	Смешанная	
Синусоидальное	Симметричное	$p = P = const$ $I_q = 0, I_r = 0$ $\eta = \eta_{max}$	$p = 0$ $I_q \neq 0, I_r = 0$ $\eta = 0$	$p = P = const$ $I_q \neq 0, I_r = 0$ $0 < \eta < 1$	$p = P + p_{\sim}$ $I_q \neq 0, I_r \neq 0$ $0 < \eta < 1$	$p = P + p_{\sim}$ $I_q = 0, I_r \neq 0$ $0 < \eta < 1$	$p = p_{\sim}$ $I_q \neq 0, I_r \neq 0$ $\eta = 0$	$p = P + p_{\sim}$ $I_q \neq 0, I_r \neq 0$ $0 < \eta < 1$	$p = P + p_{\sim}$ $I_q \neq 0, I_r \neq 0$ $0 < \eta < 1$
	Несимметричное	$p = P + p_{\sim}$ $I_q = 0, I_r \neq 0$ $0 < \eta < 1$	$p = p_{\sim}$ $I_q \neq 0, I_r \neq 0$ $\eta = 0$	$p = P + p_{\sim}$ $I_q \neq 0, I_r \neq 0$ $0 < \eta < 1$	$p = P + p_{\sim}$ $I_q \neq 0, I_r \neq 0$ $0 < \eta < 1$	$p = P + p_{\sim}$ $I_q = 0, I_r \neq 0$ $0 < \eta < 1$	$p = p_{\sim}$ $I_q \neq 0, I_r \neq 0$ $\eta = 0$	$p = P + p_{\sim}$ $I_q \neq 0, I_r \neq 0$ $0 < \eta < 1$	$p = P + p_{\sim}$ $I_q \neq 0, I_r \neq 0$ $0 < \eta < 1$
Несинусоидальное	Симметричное	$p = P + p_{\sim}$ $I_q = 0, I_r \neq 0$ $0 < \eta < 1$	$p = p_{\sim}$ $I_q \neq 0, I_r \neq 0$ $\eta = 0$	$p = P + p_{\sim}$ $I_q \neq 0, I_r \neq 0$ $0 < \eta < 1$	$p = P + p_{\sim}$ $I_q \neq 0, I_r \neq 0$ $0 < \eta < 1$	$p = P + p_{\sim}$ $I_q \neq 0, I_r \neq 0$ $0 < \eta < 1$	$p = p_{\sim}$ $I_q \neq 0, I_r \neq 0$ $\eta = 0$	$p = P + p_{\sim}$ $I_q \neq 0, I_r \neq 0$ $0 < \eta < 1$	$p = P + p_{\sim}$ $I_q \neq 0, I_r \neq 0$ $0 < \eta < 1$
	Несимметричное	$p = P + p_{\sim}$ $I_q \neq 0, I_r = 0$ $0 < \eta < 1$	$p = p_{\sim}$ $I_q \neq 0, I_r = 0$ $\eta = 0$	$p = P + p_{\sim}$ $I_q \neq 0, I_r \neq 0$ $0 < \eta < 1$	$p = P + p_{\sim}$ $I_q \neq 0, I_r \neq 0$ $0 < \eta < 1$	$p = P + p_{\sim}$ $I_q \neq 0, I_r \neq 0$ $0 < \eta < 1$	$p = p_{\sim}$ $I_q \neq 0, I_r \neq 0$ $\eta = 0$	$p = P + p_{\sim}$ $I_q \neq 0, I_r \neq 0$ $0 < \eta < 1$	$p = P + p_{\sim}$ $I_q \neq 0, I_r \neq 0$ $0 < \eta < 1$

$p$  – мгновенная активная мощность;  $P$  – средняя за период повторяемости активная мощность;  $p_{\sim}$  – переменная составляющая мгновенной активной мощности;  $I_q$  – модуль проекции пространственного вектора тока на ось  $q$ ;  $I_r$  – модуль проекции пространственного вектора тока на ось  $r$

### ОБМЕН ЭНЕРГИЕЙ, МГНОВЕННЫЕ АКТИВНАЯ И РЕАКТИВНАЯ МОЩНОСТИ

Как показано выше, двунаправленный обмен энергией между источником и нагрузкой приводит к значительному снижению КПД СЭ (см. рис. 5). К таким же последствиям приводит обмен энергией с участием других элементов СЭ, например, батарей конденсаторов или батарей реакторов.

Здесь важно отметить, что в трехфазной системе электроснабжения адекватную картину электромагнитных процессов можно получить, учитывая одновременно все три фазных тока и все три фазных напряжения.

В качестве примера рассмотрим трехфазные симметричные сети с линейной нагрузкой [3], представленные на рис. 8.

Трехфазную нагрузку и трехфазный источник рассматриваем как единое устройство.

В соответствии с [1, 3, 9] определяем пространственные векторы напряжения и тока в трехмерной декартовой системе координат как

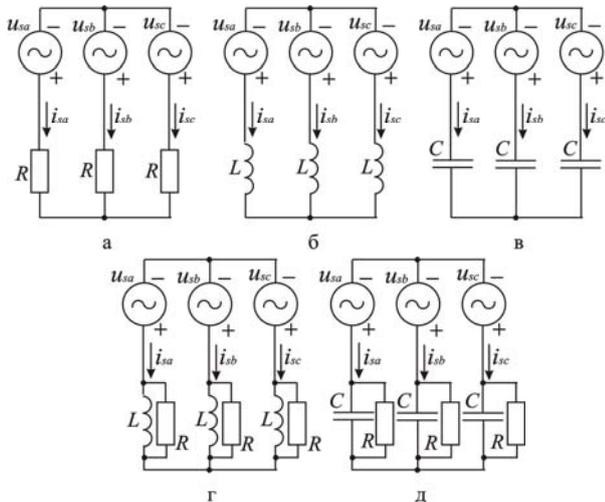


Рис. 8. Трехфазные симметричные сети с линейной нагрузкой

$$\vec{u}_S = [u_{sa} \quad u_{sb} \quad u_{sc}]^T, \quad (28)$$

$$\vec{i}_S = [i_{sa} \quad i_{sb} \quad i_{sc}]^T, \quad (29)$$

где  $u_{sa}, u_{sb}, u_{sc}$  – соответственно проекции обобщенного вектора напряжения  $\vec{u}_S$  на оси  $a, b, c$  неподвижной декартовой системы координат;

$$\begin{aligned} u_{sa} &= U_m \cdot \sin \vartheta, \\ u_{sb} &= U_m \cdot \sin \left( \vartheta - \frac{2 \cdot \pi}{3} \right), \\ u_{sc} &= U_m \cdot \sin \left( \vartheta - \frac{4 \cdot \pi}{3} \right); \end{aligned} \quad (30)$$

$i_{sa}, i_{sb}, i_{sc}$  – соответственно проекции пространственного вектора тока на оси  $a, b, c$ , численно равные мгновенным фазным токам

$$\begin{aligned} i_{sa} &= I_m \cdot \sin(\varphi - \vartheta), \\ i_{sb} &= I_m \cdot \sin \left( \vartheta - \frac{2 \cdot \pi}{3} - \varphi \right), \\ i_{sc} &= I_m \cdot \sin \left( \vartheta - \frac{4 \cdot \pi}{3} - \varphi \right), \end{aligned} \quad (31)$$

где  $U_m, I_m$  – соответственно амплитуды фазных напряжений и фазных токов;  $\varphi$  – угол сдвига между фазным напряжением и фазным током, численно равный углу между пространственными векторами  $\vec{u}_S$  и  $\vec{i}_S$ ;

$$\vartheta = 2 \cdot \pi \cdot f_S \cdot t, \quad (32)$$

где  $f$  – частота сети,  $t$  – время.

Мгновенная активная мощность источника трехфазной системы определяется как скалярное произведение пространственных векторов [1, 3, 9]

$$p = \vec{u}_S \cdot \vec{i}_S = |\vec{u}_S| \cdot |\vec{i}_S| \cdot \cos \varphi = u_{sa} \cdot i_{sa} + u_{sb} \cdot i_{sb} + u_{sc} \cdot i_{sc}. \quad (33)$$

Если трехфазная система электроснабжения симметрична, то мгновенная активная мощность в любой момент времени равна средней активной мощности:

$$p = P = \frac{3}{2} \cdot U_m \cdot I_m \cdot \cos \varphi = \text{const}. \quad (34)$$

Мгновенная реактивная мощность является расчетной векторной величиной и определяется как векторное произведение пространственных векторов напряжения и тока [1, 3, 9, 19, 20]:

$$\vec{q} = \vec{u}_S \times \vec{i}_S = \begin{bmatrix} q_a \\ q_b \\ q_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_{sb} & u_{sc} \\ i_{sb} & i_{sc} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_{sc} & u_{sa} \\ i_{sc} & i_{sa} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_{sa} & u_{sb} \\ i_{sa} & i_{sb} \end{bmatrix}^T. \quad (35)$$

Модуль вектора мгновенной реактивной мощности симметричной системы:

$$q = |\vec{q}| = \frac{3}{2} \cdot U_m \cdot I_m \cdot |\sin \varphi| = \sqrt{q_a^2 + q_b^2 + q_c^2} = \text{const}. \quad (36)$$

В трехфазной СЭ с резистивной нагрузкой (см. рис. 8,а) энергия передается из источника в нагрузку с постоянной скоростью, пульсации мгновенной активной мощности отсутствуют, модуль вектора мгновенной реактивной мощности равен нулю.

При чисто реактивной нагрузке (см. рис. 8,б-в) мгновенная активная мощность источника равна нулю, что следует из соотношений (33), (34). Косвенным подтверждением этого является неизменное во времени суммарное значение энергии, накопленной в трехфазном реакторе (рис. 8,б)

$$E_{L\Sigma} = \frac{L}{2} \cdot (i_{sa}^2 + i_{sb}^2 + i_{sc}^2) = \frac{3}{4} \cdot L \cdot I_m^2 = \text{const}, \quad (37)$$

и неизменность суммарной энергии, накопленной в трехфазной батарее конденсаторов (рис. 8,в)

$$E_{C\Sigma} = \frac{C}{2} \cdot (u_{sa}^2 + u_{sb}^2 + u_{sc}^2) = \frac{3}{4} \cdot C \cdot U_m^2 = \text{const}. \quad (38)$$

При смешанной нагрузке (см. рис. 8,г-д) схему СЭ можно разбить на две параллельно работающие СЭ, одна из которых имеет чисто активную нагрузку, а другая – чисто реактивную, т.е. случай активно-реактивной нагрузки сводится к ранее рассмотренным.

Отметим два принципиальных отличия между трехфазной и однофазной СЭ:

- при чисто активной симметричной нагрузке скорость передачи энергии, – мгновенная активная мощность, – трехфазной СЭ постоянна. В однофазной СЭ скорость передачи энергии пульсирует с двойной частотой сети, причем амплитуда переменной составляющей активной мощности равна удвоенному значению средней активной мощности;

- при чисто реактивной нагрузке в трехфазной симметричной СЭ отсутствует обмен энергией между источником и нагрузкой, поскольку в любой момент времени мгновенная активная мощность трехфазного источника тождественно равна нулю. Три фазных реактора или три конденсатора обмениваются энергией между собой таким образом, что суммарная энергия, запасенная в трех фазах реактивной нагрузки, остается постоянной во времени. В однофазной СЭ при чисто реактивной нагрузке происходит обмен энергией между источником и нагрузкой, мгновенная активная мощность изменяется по закону  $\sin^2 \vartheta$ , средняя активная мощность за период напряжения сети равна нулю.

Отмеченные особенности трехфазных и однофазных СЭ свидетельствуют об энергетической неконку-

рентоспособности однофазной системы, которая, по сути, представляет собой трехфазную систему с двумя оборванными фазами. Понятно, что при рассмотрении процессов обмена энергией в трехфазной СЭ не могут служить эталоном процессы в однофазной СЭ, наоборот – недостатки однофазной системы проявляются при ее сравнении с трехфазной системой как эталоном.

### ПУЛЬСАЦИИ МГНОВЕННОЙ АКТИВНОЙ МОЩНОСТИ

Симметричная трехфазная СЭ с синусоидальными напряжениями источника при полной компенсации реактивных токов представляется эквивалентной схемой, приведенной на рис. 9 [6, 7].

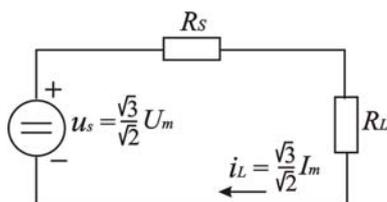


Рис. 9. Эквивалентная схема СЭ при полной компенсации реактивной мощности:  $U_m$  – амплитуда фазного синусоидального напряжения источника;  $I_m$  – амплитуда фазного синусоидального тока источника;  $u_s$  – модуль пространственного вектора напряжения;  $i_L$  – модуль пространственного вектора тока

Полная компенсация реактивных токов и, следовательно, реактивной мощности является необходимым, но недостаточным условием минимизации мощности потерь энергии в СЭ. Причиной увеличения потерь могут быть пульсации мгновенной активной мощности нагрузки. Частота таких пульсаций зависит от характера нагрузки. Например, в коммунальных системах электроснабжения мгновенная активная мощность имеет переменную составляющую с суточной частотой, на которую накладываются пульсации с частотой подключения и отключения нагрузок. График мгновенной активной мощности промышленных предприятий имеет составляющие с частотой в несколько герц, а график СЭ метрополитена – составляющие с частотой в несколько минут.

В [6-8] показано, что степень уменьшения КПД вследствие пульсаций мгновенной активной мощности зависит от параметра отношения мощности резистивного к.з. к полезной мощности, и от формы графика активной мощности и не зависит от частоты пульсаций.

В [7] получена зависимость КПД ( $\eta$ ) от отношения  $P_{K3}/P_{usf}$  и относительной амплитуды синусоидальной переменной составляющей активной мощности  $\Delta_1 = P_{Lmax}/P_{usf}$ , приведенная на рис. 10.

Как видно из рис. 10 переменная синусоидальная составляющая мгновенной активной мощности с амплитудой, равной средней за период повторяемости графика мощности, приводит к снижению КПД на 4.5 % при  $P_{K3}/P_{usf} = 15$ , на 3% при  $P_{K3}/P_{usf} = 20$  и на 1 % при  $P_{K3}/P_{usf} = 50$ . При наложении двух или трех пульсаций мгновенной активной мощности КПД может снизиться еще примерно на 1 % [7].

На Matlab-модели по рис. 7 были рассчитаны: относительная средняя реактивная мощность  $Q^*$ , относительное действующее значение реактивной мощ-

ности  $Q_{\delta^*}$ , а также относительные амплитуды основных гармоник мгновенных активной  $P_{1m^*}$  и реактивной мощностей  $Q_{1m^*}$ . В качестве базисной величины была выбрана средняя активная мощность, вычисляемая в периоде повторяемости, значение которой подерживалось неизменным

$$P_{base} = P = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T p dt = \text{const} . \quad (39)$$

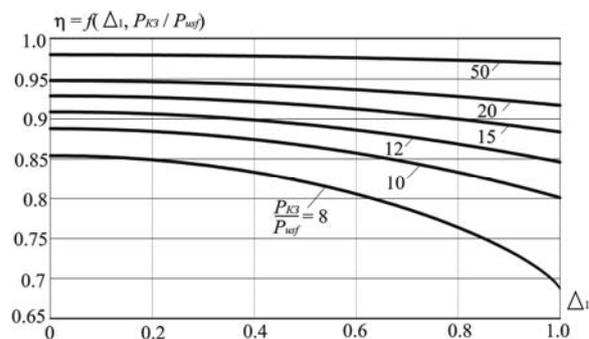


Рис. 10. Снижение КПД при наличии пульсаций мгновенной активной мощности

Расчет проводился для трех факторов возникновения мгновенной реактивной мощности: наличие угла сдвига между фазными напряжениями и токами, асимметрии резистивной нагрузки и наличия гармоник в кривых токов. Учет указанных факторов возможен при использовании соотношений (30), а также

$$\begin{aligned} i_a &= I_{ma} \cdot \sin(\vartheta + \varphi_a) + \\ &+ \sum_{n_1} \left( \frac{k_1 \cdot I_{ma}}{n_1} \cdot \sin(n_1 \cdot (\vartheta + \varphi_a)) \right) + \\ &+ \sum_{n_2} \left( \frac{k_2 \cdot I_{ma}}{n_2} \cdot \sin(n_2 \cdot (\vartheta + \varphi_a)) \right), \\ i_b &= I_{mb} \cdot \sin\left(\vartheta - \frac{2 \cdot \pi}{3} + \varphi_b\right) + \\ &+ \sum_{n_1} \left( \frac{k_1 \cdot I_{mb}}{n_1} \cdot \sin\left(n_1 \cdot \left(\vartheta - \frac{2 \cdot \pi}{3} + \varphi_b\right)\right) \right) + \\ &+ \sum_{n_2} \left( \frac{k_2 \cdot I_{mb}}{n_2} \cdot \sin\left(n_2 \cdot \left(\vartheta - \frac{2 \cdot \pi}{3} + \varphi_b\right)\right) \right), \\ i_c &= I_{mc} \cdot \sin\left(\vartheta - \frac{4 \cdot \pi}{3} + \varphi_c\right) + \\ &+ \sum_{n_1} \left( \frac{k_1 \cdot I_{mc}}{n_1} \cdot \sin\left(n_1 \cdot \left(\vartheta - \frac{4 \cdot \pi}{3} + \varphi_c\right)\right) \right) + \\ &+ \sum_{n_2} \left( \frac{k_2 \cdot I_{mc}}{n_2} \cdot \sin\left(n_2 \cdot \left(\vartheta - \frac{4 \cdot \pi}{3} + \varphi_c\right)\right) \right); \end{aligned} \quad (40)$$

где  $k_1, k_2$  – амплитудные коэффициенты;  $n_1 = 2, 4, 6, \dots, n_{1n}$ .

В табл. 4 представлен расчет указанных выше величин при уменьшении КПД системы электроснабжения на 1 % от максимального  $\eta_{max} = 0.947$ , соответствующего  $P_{K3}/P_{usf} = 20$ .

На рис. 11 представлены зависимости действующего значения реактивной мощности  $Q_{\delta^*}$  от величины уменьшения КПД  $-\Delta\eta$  (при  $\eta_{max} = 0.947$ ) для трех фак-

торов возникновения мгновенной реактивной мощности: одинакового для трех фаз фазового сдвига между напряжениями и токами (кривая 1), асимметрии резистивной нагрузки (кривая 2) и наличия нечетных гармоник в кривых токов (кривая 3). Несовпадение трех кривых указы-

вает на разную величину реактивной мощности при введении одного из трех факторов, и тем самым подтверждает тезис о том, что модуль вектора реактивной мощности является расчетной величиной и не определяет количественные характеристики энергообмена в СЭ.

Таблица 4

Расчет средней и действующей реактивной мощности при снижении КПД на 1% от  $\eta_{max} = 0.947$

Ф-р	$I_{ma}$	$I_{mb}$	$I_{mc}$	$\Phi_a$	$\Phi_b$	$\Phi_c$	$k_1$	$k_2$	$n_{1n}$	$n_{2n}$	$P_{1m*}$	$Q_{1m*}$	$Q^*$	$Q_a^*$
1	1.0108	1.0108	1.0108	0.518	0	0	0	0	-	-	0.178	0.198	0.24	0.278
	1.0162	1.0162	1.0162	0.54	$\pi/36$	0	0	0	-	-	0.18	0.204	0.261	0.298
	1.0131	1.0131	1.0131	0.523	0	$\pi/36$	0	0	-	-	0.162	0.175	0.264	0.292
	1.0202	1.0202	1.0202	0.545	$\pi/20$	0	0	0	-	-	0.179	0.194	0.281	0.313
	1.0154	1.0154	1.0154	0.519	0	$\pi/20$	0	0	-	-	0.15	0.149	0.284	0.303
	1.0192	1.0192	1.0192	0.549	$\pi/36$	$\pi/36$	0	0	-	-	0.161	0.184	0.286	0.314
	1.0211	1.0211	1.0211	0.545	$\pi/18$	0	0	0	-	-	0.179	0.19	0.286	0.316
	1.016	1.016	1.016	0.517	0	$\pi/18$	0	0	-	-	0.148	0.143	0.289	0.306
	1.0228	1.0228	1.0228	0.541	$\pi/15$	0	0	0	-	-	0.177	0.181	0.296	0.322
	1.0173	1.0173	1.0173	0.51	0	$\pi/15$	0	0	-	-	0.143	0.128	0.298	0.312
	1.0249	1.0249	1.0249	0.528	$\pi/12$	0	0	0	-	-	0.172	0.163	0.31	0.331
	1.0194	1.0194	1.0194	0.497	0	$\pi/12$	0	0	-	-	0.139	0.109	0.31	0.32
	1.0273	1.0273	1.0273	0.559	$\pi/20$	$\pi/20$	0	0	-	-	0.141	0.16	0.326	0.345
	1.0294	1.0294	1.0294	0.559	$\pi/18$	$\pi/18$	0	0	-	-	0.136	0.152	0.336	0.353
	1.0338	1.0338	1.0338	0.557	$\pi/15$	$\pi/15$	0	0	-	-	0.123	0.137	0.356	0.369
1.0405	1.0405	1.0405	0.545	$\pi/12$	$\pi/12$	0	0	-	-	0.101	0.111	0.384	0.392	
1.054	1.054	1.054	0.41	0.41	0.41	0	0	-	-	0	0	0.435	0.435	
2	1.274	1	0.6255	0	0	0	0	0	-	-	0.195	0.078	0.23	0.239
	1.321	0.9	0.679	0	0	0	0	0	-	-	0.195	0.082	0.23	0.238
	1.342	0.8	0.758	0	0	0	0	0	-	-	0.195	0.099	0.223	0.238
	1.33	0.7	0.87	0	0	0	0	0	-	-	0.195	0.087	0.228	0.238
	1.224	0.6	1.076	0	0	0	0	0	-	-	0.195	0.089	0.227	0.239
3	0.967	0.967	0.967	0	0	0	0.615	0	20	-	0.148	0.037	0.356	0.366
	0.967	0.967	0.967	0	0	0	0	0.561	-	21	0.032	0.025	0.247	0.257

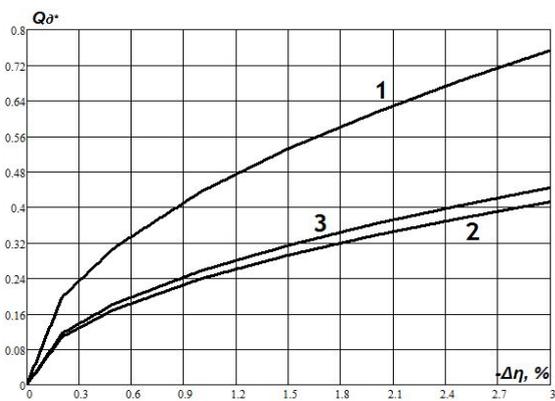


Рис. 11. Зависимости  $Q_{d*} = f(-\Delta\eta)$  при  $\eta_{max} = 0.947$

### ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СИСТЕМЫ КООРДИНАТ pqr ДЛЯ ОТОБРАЖЕНИЯ ВЕКТОРОВ НАПРЯЖЕНИЙ И ТОКОВ

Пространственные векторы напряжений, токов и реактивных мощностей элементов СЭ могут быть представлены в одной из пяти пространственных систем координат [15]. Наиболее удобным и отвечающим характеру электромагнитных процессов в системе электроснабжения является представление указанных векторов во вращающейся системе координат pqr. В системе pqr в любой момент времени ось r направлена по пространственному вектору напряжения. Поэтому проекция пространственного вектора тока на ось r соответствует активной составляющей тока, пропорциональной скорости передачи энергии

$$p = \vec{u} \cdot \vec{i} = |\vec{u}| \cdot |\vec{i}| \cdot \cos \varphi = |\vec{u}| \cdot |\vec{i}_p|, \quad (41)$$

где

$$|\vec{i}_p| = |\vec{i}| \cdot \cos \varphi, \quad (42)$$

Проекция пространственного вектора тока на оси q и r, определяющие величины двух реактивных токов,  $i_q, i_r$ , позволяют произвести декомпозицию реактивного тока на два ортогональных тока.

Преобразование координат пространственного вектора напряжения из abc в pqr имеет вид [15]:

$$\begin{bmatrix} u_p \\ u_q \\ u_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix}, \quad (43)$$

где

$$a_{11} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cos \theta_1 \cos \theta_2 + \frac{1}{\sqrt{3}} \sin \theta_2, \quad (44)$$

$$a_{12} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cos \left( \theta_1 - \frac{2\pi}{3} \right) \cos \theta_2 + \frac{1}{\sqrt{3}} \sin \theta_2, \quad (45)$$

$$a_{13} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cos \left( \theta_1 + \frac{2\pi}{3} \right) \cos \theta_2 + \frac{1}{\sqrt{3}} \sin \theta_2, \quad (46)$$

$$a_{21} = -\sqrt{\frac{2}{3}} \sin \theta_1, \quad (47)$$

$$a_{22} = -\sqrt{\frac{2}{3}} \sin \left( \theta_1 - \frac{2\pi}{3} \right), \quad (48)$$

$$a_{23} = -\sqrt{\frac{2}{3}} \sin\left(\theta_1 + \frac{2\pi}{3}\right), \quad (49)$$

$$a_{31} = -\sqrt{\frac{2}{3}} \cos \theta_1 \sin \theta_2 + \frac{1}{\sqrt{3}} \cos \theta_2, \quad (50)$$

$$a_{32} = -\sqrt{\frac{2}{3}} \cos\left(\theta_1 - \frac{2\pi}{3}\right) \sin \theta_2 + \frac{1}{\sqrt{3}} \cos \theta_2, \quad (51)$$

$$a_{33} = -\sqrt{\frac{2}{3}} \cos\left(\theta_1 + \frac{2\pi}{3}\right) \sin \theta_2 + \frac{1}{\sqrt{3}} \cos \theta_2, \quad (52)$$

$$\theta_1 = \arctg \frac{u_b - u_c}{\sqrt{3} \cdot u_a}, \quad (53)$$

$$\theta_2 = \arctg \frac{u_0}{u_{\alpha\beta}}, \quad (54)$$

$$u_0 = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot (u_a + u_b + u_c), \quad (55)$$

$$u_{\alpha\beta} = \sqrt{u_\alpha^2 + u_\beta^2}, \quad (56)$$

$$u_\alpha = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot u_a - \frac{1}{\sqrt{6}} \cdot u_b - \frac{1}{\sqrt{6}} \cdot u_c, \quad (57)$$

$$u_\beta = \sqrt{\frac{1}{2}} \cdot u_b - \sqrt{\frac{1}{2}} \cdot u_c. \quad (58)$$

В системе координат  $pqr$  мгновенная активная мощность

$$p = \vec{u}_{pqr} \cdot \vec{i}_{pqr} = u_p \cdot i_p, \quad (59)$$

где  $u_p$  – модуль пространственного вектора напряжения;  $i_p$  – проекция пространственного вектора тока на ось  $p$ .

### ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИЕ НАКОПИТЕЛИ ЭНЕРГИИ

Для работы силовых активных фильтров и активных выпрямителей, силовые схемы которых совпадают, принципиально не нужен накопитель энергии. Емкость конденсатора на выходе САФ (см. рис. 1, 2) выбирается из условия допустимого уровня пульсаций напряжения, обычно это несколько процентов от номинального значения. Энергия, запасенная в конденсаторе при работе схемы, практически остается постоянной.

Тем не менее в СЭ, работающих в режиме 3 с интервалами времени, в которых изменяется направление потока энергии, конденсатор силового активного фильтра увеличенной емкости может быть использован как накопитель рекуперированной энергии. Для этого САФ необходимо подключить непосредственно на зажимы переменного тока нагрузки, исключив потери в линии, соединяющей источник и нагрузку. Эффект подключения накопителя энергии обусловлен уменьшением потерь в эквивалентных резисторах  $R_S$  и  $R'_S$ . Очевидно, что такое уменьшение потерь должно превосходить по величине дополнительные потери энергии в самом САФ.

В качестве примера оценки эффективности использования энергоемкого накопителя можно рассмотреть систему электроснабжения метрополитена [46]. Традиционно СЭ украинских метрополитенов обеспечивает тягу электропоездов на постоянном токе

напряжением 825 V. Контактная сеть постоянного тока, получает питание от тяговых подстанций, где установлены неуправляемые выпрямители. При традиционной СЭ при передаче энергии в нагрузку происходят ее потери в устройствах тяговой подстанции, контактной сети, элементах электропривода. Кинетическая энергия, запасенная подвижным составом при разгоне, отправляется в тормозные резисторы при торможении электропоезда. Односторонний поток энергии традиционной СЭ метрополитена представлен на рис. 12 под цифрой (1). Принципиально, энергетическая эффективность описанной системы электроснабжения будет невелика. Возможность осуществить рекуперацию запасенной кинетической энергии в сеть, позволит повысить энергетическую эффективность СЭ, но может сказаться на надежности ее работы. Схема потоков энергии СЭ с рекуперацией представлена на рис. 12 под цифрой (2).

Использование энергоемких накопителей энергии позволяет увеличить энергоэффективность СЭ подвижного состава метрополитена при высоком уровне надежности электроснабжения. При этом возможны два варианта установки накопителя энергии – на тяговой подстанции и на борту электропоезда. Энергетические потоки, описывающие указанные системы электроснабжения, представлены на рис. 12 под цифрами (3) и (4) соответственно. Отдельно можно выделить бесконтактную СЭ с бортовым накопителем энергии, подзарядка которого осуществляется во время стоянки электропоезда на станции. Схема потоков энергии бесконтактной СЭ представлена на рис. 12 под цифрой (5).

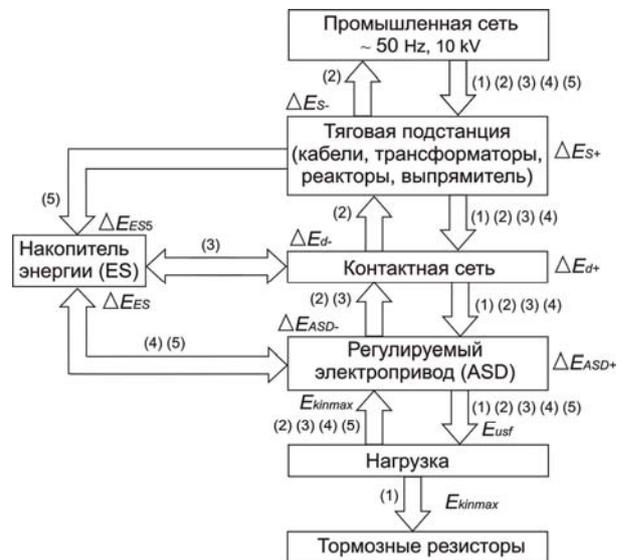


Рис. 12. Схема распределения потоков энергии пяти СЭ подвижного состава метрополитена

Примем, что полезная энергия нагрузки складывается из максимума кинетической энергии, а также энергии, затрачиваемой на работу электротехнического оборудования подвижного состава, преодоления сопротивления воздуха в туннеле и трения колес

$$E_{usf} = E_{kinmax} + E_{move}. \quad (60)$$

Если известны потери энергии в прямом потоке на всех элементах традиционной СЭ:

$$\Delta E_1 = \Delta E_{S+} + \Delta E_{d+} + \Delta E_{ASD+} = \Delta E_{1+}, \quad (61)$$

где  $\Delta E_{S+}$ ,  $\Delta E_{d+}$ ,  $\Delta E_{ASD+}$  – соответственно потери энергии в тяговой подстанции (трансформаторах, ректорах, выпрямителе и соединительных кабелях), контактной сети и элементах электропривода при потоке энергии из сети в нагрузку, то можно рассчитать коэффициенты полезного действия для пяти представленных СЭ воспользовавшись соотношениями (19), (22), (23).

Соответственно принятым на рис. 12 обозначениям

$$E_{L31} = E_{usf}, \quad (62)$$

$$E_{L32} = E_{kin\max}, \quad (63)$$

$$E_{S31} = E_{usf} + \Delta E_{n+}, \quad (64)$$

$$E_{S32} = E_{kin\max} - \Delta E_{n-}, \quad (65)$$

где  $\Delta E_{n+}$ ,  $\Delta E_{n-}$  – соответственно потери энергии в прямом и обратном потоке;  $n$  – номер системы электроснабжения.

Подставляя (60), (62-65) в (19) получим соотношение для расчета суммарного КПД систем электроснабжения подвижного состава метрополитена

$$\eta_{\Sigma 3n} = \frac{E_{move}}{E_{move} + \Delta E_{n+} + \Delta E_{n-}}. \quad (66)$$

Если принять, что величина энергии  $E_{move}$  неизменна во времени, то КПД системы электроснабжения будет зависеть от потерь энергии в двунаправленном потоке.

Для традиционной СЭ потери энергии в обратном потоке численно равны максимуму кинетической энергии

$$\Delta E_{1-} = E_{kin\max}. \quad (67)$$

Для СЭ с рекуперацией энергии в сеть потери энергии в прямом потоке равны потерям энергии традиционной СЭ. Потери энергии в обратном потоке:

$$\Delta E_{2-} = \Delta E_{ASD-} + \Delta E_{d-} + \Delta E_{S-}. \quad (68)$$

Входящие в соотношение (59) составляющие могут быть найдены из рис. 12

$$\Delta E_{ASD-} = \Delta E_{ASD+} \cdot \frac{E_{kin\max}}{E_{usf}}, \quad (69)$$

$$\Delta E_{d-} = \Delta E_{d+} \cdot \frac{E_{kin\max} - \Delta E_{ASD-}}{E_{usf} + \Delta E_{ASD+}}, \quad (70)$$

$$\Delta E_{S-} = \Delta E_{S+} \cdot \frac{E_{kin\max} - \Delta E_{ASD-} - \Delta E_{d-}}{E_{usf} + \Delta E_{ASD+} + \Delta E_{d+}}. \quad (71)$$

В соответствии с рис. 12 потери энергии в СЭ со стационарным накопителем в прямом и обратном потоке:

$$\Delta E_{3+} = \Delta E_{S3+} + \Delta E_{d+} + \Delta E_{ASD+}, \quad (72)$$

$$\Delta E_{3-} = \Delta E_{ASD-} + \Delta E_{d-}, \quad (73)$$

где

$$\Delta E_{S3+} = \Delta E_{S+} \cdot \frac{E_{move} + \Delta E_{ASD+} + \Delta E_{d+}}{E_{usf} + \Delta E_{ASD+} + \Delta E_{d+}} + \frac{\Delta E_{3-} - \Delta E_{ES}}{E_{usf} + \Delta E_{ASD+} + \Delta E_{d+}}, \quad (74)$$

$\Delta E_{ES}$  – потери энергии в накопителе.

Потери энергии в СЭ с бортовым размещением накопителя:

$$\Delta E_{4+} = \Delta E_{S4+} + \Delta E_{d4+} + \Delta E_{ASD+}, \quad (75)$$

$$\Delta E_{4-} = \Delta E_{ASD-}, \quad (76)$$

где

$$\Delta E_{d4+} = \Delta E_{d+} \cdot \frac{E_{move} + \Delta E_{ASD+}}{E_{usf} + \Delta E_{ASD+}} + \frac{\Delta E_{ASD-} - \Delta E_{ES}}{E_{usf} + \Delta E_{ASD+}}, \quad (77)$$

$$\Delta E_{S4+} = \Delta E_{S+} \cdot \frac{E_{move} + \Delta E_{ASD+} + \Delta E_{d4+}}{E_{usf} + \Delta E_{ASD+} + \Delta E_{d+}} + \frac{\Delta E_{ASD-} - \Delta E_{ES}}{E_{usf} + \Delta E_{ASD+} + \Delta E_{d+}}. \quad (78)$$

Потери энергии в бесконтактной СЭ:

$$\Delta E_{5+} = \Delta E_{S5+} + \Delta E_{ES5+} + \Delta E_{ASD+}, \quad (79)$$

$$\Delta E_{5-} = \Delta E_{ASD-}, \quad (80)$$

где

$$\Delta E_{S5+} = \Delta E_{S+} \cdot \frac{E_{move} + \Delta E_{ASD+}}{E_{usf} + \Delta E_{1+}} + \frac{\Delta E_{ASD-} - \Delta E_{ES5}}{E_{usf} + \Delta E_{1+}}, \quad (81)$$

$\Delta E_{ES5}$  – потери энергии в накопителе бесконтактной СЭ.

С использованием соотношений (21)-(23), (66)-(81) были рассчитаны КПД и коэффициент возврата энергии для пяти систем электроснабжения подвижного состава метрополитена. В качестве базисной величины был выбран максимум кинетической энергии  $E_{base} = E_{kin\max} = 1$ . Остальные исходные данные:  $E_{move} = 0.3$ ,  $\Delta E_{S+*} = 0.065$ ,  $\Delta E_{d+*} = 0.13$ ,  $\Delta E_{ASD+*} = 0.07$ ,  $\Delta E_{ES*} = 0.01$ ,  $\Delta E_{ES5*} = 0.02$ . Результаты расчетов представлены в табл. 5.

При сопоставлении данных табл. 5 видно, что при использовании стационарного накопителя энергии, размещенного на территории тяговой подстанции, суммарная энергия, потребляемая из сети, сокращается в 2.3 раза при уменьшении суммарных потерь в 3.3 раза. При переходе на СЭ с бортовым накопителем поток энергии, потребляемой из сети, сокращается более чем в три раза при снижении потерь энергии в 4.6-7.8 раза.

Отметим, что энергетические характеристики систем электроснабжения метрополитена получены с учетом потоков энергии и потерь энергии в интервалах повторяемости с использованием понятия только активной мощности.

Таблица 5

Показатели энергетической эффективности пяти систем электроснабжения подвижного состава метрополитена

Номер схемы СЭ	СЭ 1	СЭ 2	СЭ 3	СЭ 4	СЭ 5
Суммарная энергия, потребляемая из сети, $E_{S*}$	1.565	0.744	0.681	0.496	0.462
Положительный поток энергии, $E_{+*}$	1.565	1.565	1.527	1.432	1.408
Отрицательный поток энергии, $E_{-*}$	0	-0.821	-0.846	-0.936	-0.946
Потери энергии в положительном потоке, $\Delta E_{+*}$	0.265	0.265	0.227	0.132	0.108
Потери энергии в отрицательном потоке, $\Delta E_{-*}$	1	0.179	0.154	0.064	0.054
Суммарные потери энергии, $\Delta E_{\Sigma*}$	1.265	0.444	0.381	0.196	0.162
КПД при закачке энергии в нагрузку, $\eta_{31}$	0.831	0.831	0.851	0.908	0.923
КПД при отборе энергии нагрузки, $\eta_{32}$	0	0.821	0.846	0.936	0.946
Суммарный КПД, $\eta_{\Sigma 3}$	0.192	0.403	0.441	0.605	0.649
Коэффициент возврата энергии, $k_E$	0	0.524	0.554	0.654	0.672

## ВЫВОДЫ

1. Электромагнитные процессы в трехфазных СЭ с синусоидальными симметричными напряжениями источника адекватно описываются пространственными векторами напряжений и токов в неподвижной системе координат  $abc$  или в одной из вращающейся пространственной систем координат, например,  $pqr$ . Переход из одной системы координат в другую осуществляется с помощью матрицы прямых и обратных преобразований координат. Однофазную СЭ следует рассматривать как частный случай трехфазной при бесконечно больших сопротивлениях в двух фазах нагрузки.

2. Мгновенная скорость передачи энергии элементами СЭ, равна мгновенной активной мощности, определяемой как скалярное произведение пространственных векторов напряжения и тока.

3. Средняя скорость передачи энергии за некоторый промежуток времени, например за период повторяемости процессов, определяется как интеграл от мгновенной активной мощности в заданном интервале времени.

4. Вектор мгновенной реактивной мощности определяется как векторное произведение пространственного вектора напряжения и пространственного вектора тока. Вектор мгновенной реактивной мощности является расчетной величиной, он не определяет величину или скорость обмена энергией элементов схемы СЭ.

5. Количественной оценкой энергетической эффективности СЭ является ее КПД, который может рассчитываться в периоде повторяемости или в любом другом интервале времени, в том числе, в стремящемся к нулю.

6. В СЭ, которые могут быть приведены к эквивалентной схеме, состоящей из источника, нагрузки и резистивной линии их соединяющей, теоретический максимальный КПД однозначно определяется отношением мощности резистивного к.з. источника и линии к полезной мощности, равной средней активной мощности нагрузки за период повторяемости. Условиями достижения максимального КПД являются: равенство нулю мгновенной реактивной мощности в любой точке оси времени и отсутствие пульсаций мгновенной активной мощности в любом интервале времени.

7. В системе координат  $pqr$  пространственный вектор напряжения направлен по оси  $p$ . В этом случае условие максимума КПД выполняется, если проекция вектора тока на ось  $p$  не изменяется во времени, а проекции вектора тока на оси  $q$  и  $r$  тождественно равны нулю.

8. Вследствие нарушения условий максимального КПД, указанных в п. 7 выводов, реальный КПД может быть значительно меньше максимально возможного.

9. Повышение КПД, т.е. приближение его к максимально возможному значению, может быть достигнуто путем подключения параллельно нагрузке силового активного фильтра с накопителем энергии, который обеспечивает симметрию и синусоидальность токов трехфазного источника, и, одновременно, отсутствие пульсаций мгновенной активной мощности источника. Эффект повышения КПД достигается, если потери энергии в силовом активном фильтре и накопителе энергии существенно меньше величины разности потерь энергии в источнике и линии после подключения и до подключения силового активного фильтра.

10. Трехфазные симметричные линейные реактивные нагрузки, такие как трехфазные блоки реакторов или трехфазные блоки конденсаторов, будучи

подключенными к трехфазному источнику симметричных синусоидальных напряжений, не обмениваются с этим источником энергией, так как суммарная энергия трех реакторов или трех конденсаторов остается неизменной во времени, а мгновенная активная мощность источника равна нулю во всем интервале повторяемости. Обмен энергией между реактивной нагрузкой и сетью возможен при асимметричной реактивной нагрузке.

11. КПД системы электроснабжения, в которой интервалы времени с передачей энергии из источника в нагрузку чередуются с интервалами времени с обратным потоком энергии, резко снижается при увеличении коэффициента возврата энергии. Эффект снижения КПД существенно ослабляется путем подключения параллельно нагрузке накопителя энергии.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Домнин И.Ф., Жемеров Г.Г., Крылов Д.С., Сокол Е.И. Современные теории мощности и их использование в преобразовательных системах силовой электроники // *Технічна електродинаміка*. Тем. випуск "Проблеми сучасної електротехніки". – 2004. – Ч.1. – С. 80-91.
2. Жемеров Г.Г., Крылов Д.С., Тугай Д.В. Система составляющих полной мощности и энергетических коэффициентов на основе  $p$ - $q$ - $r$  теории мощности. // *Технічна електродинаміка*. Тем. випуск "Проблеми сучасної електротехніки". – 2004. – Ч.6. – С. 69-74.
3. Жемеров Г.Г., Тугай Д.В. Мгновенные и средние активные и реактивные мощности в линейных цепях с синусоидальными напряжениями // *Вісник НТУ "ХПИ"*. – 2004. – № 43. – С. 135-141.
4. Домнин И.Ф., Жемеров Г.Г. Определение мгновенных активных и реактивных мощностей в трехфазных электрических сетях с вентильными преобразователями // *Вісник приазовського державного технічного університету*. – 2005. – №15. – С. 70-74.
5. Жемеров Г.Г., Ильина О.В., Тугай Д.В. Преобразование координат в электроприводе и силовой электронике // *Технічна електродинаміка*. Тем. випуск "Проблеми сучасної електротехніки". – 2006. – Ч.1. – С. 81-88.
6. 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.
7. Жемеров Г.Г., Ильина О.В., Тугай Д.В. Энергосберегающий эффект компенсации пульсаций мгновенной активной мощности // *Технічна електродинаміка*. Тем. випуск "Силовая електроніка та енергоефективність". – 2006. – Ч.4. – С. 22-27.
8. Жемеров Г.Г., Домнин И.Ф., Ильина О.В., Тугай Д.В. Энергоэффективность коррекции фазы тока и компенсации пульсаций активной и реактивной мощностей в трехфазной системе электроснабжения // *Технічна електродинаміка*. – 2007. – № 1. – С. 52-57.
9. Жемеров Г.Г., Сокол Е.И., Ильина Н.А., Ильина О.В. О понятиях "мгновенная активная мощность" и "мгновенная реактивная мощность" // *Технічна електродинаміка*. Тем. випуск "Силовая електроніка та енергоефективність". – 2007. – Ч.1. – С. 33-44.
10. Жемеров Г.Г., Ильина О.В. Накопители энергии компенсаторов пульсаций мгновенной активной мощности // *Технічна електродинаміка*. Тем. випуск "Силовая електроніка та енергоефективність". – 2007. – Ч.3. – С. 23-28.
11. Жемеров Г.Г., Ильина О.В. Теория мощности Фризе и современные теории мощности // *Електротехніка і електромеханіка*. – 2007. – №6. – С. 63-65.
12. Жемеров Г.Г., Ильина О.В. Расчет параметров емкостного накопителя энергии компенсатора пульсаций мгновенной активной мощности // *Електричество*. – 2008. – №1. – С. 54-59.

13. Жемеров Г.Г., Ильина Н.А., Ильина О.В. Взаимосвязь между модулем мгновенной реактивной мощности и КПД системы электроснабжения // *Технічна електродинаміка*. Тем. випуск "Проблеми сучасної електротехніки". – 2008. – Ч.4. – С. 31-36.
14. Жемеров Г.Г., Ильина Н.А., Ильина О.В., Тугай Д.В. Уменьшение потерь и улучшение качества электроэнергии в системах коммунального электроснабжения // *Технічна електродинаміка*. Тем. випуск "Силовая электроника та энергоэффективность". – 2008. – Ч.2. – С. 80-87.
15. Жемеров Г.Г., Колесник В.Ю., Ильина О.В. Соотношения для преобразований координат обобщенных векторов напряжений и токов трехфазной системы электроснабжения. Справочное пособие. – НТУ "ХПИ", Харьков, 2009. – 40 с.
16. Жемеров Г.Г., Ильина Н.А., Ильина О.В., Ковальчук О.И., Сокол Е.И. КПД систем электроснабжения постоянно напряжения и трехфазной симметричной системы синусоидальных напряжений // *Технічна електродинаміка*. Тем. випуск "Проблеми сучасної електротехніки". – 2010. – Ч.2. – С. 107-118.
17. 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 "Силовая электроника та энергоэффективность". – 2010. – Ч.1. – С. 22-31.
18. Жемеров Г.Г., Ильина О.В., Ковальчук О.И. КПД системы электроснабжения однофазного переменного напряжения прямоугольной и синусоидальной формы // *Технічна електродинаміка*. Тем. випуск "Силовая электроника та энергоэффективность". – 2010. – Ч.2. – С. 7-15.
19. H. Akagi, E.H. Vatanabe, M. Aredes "Instantaneous power theory and applications to power conditioning" IEEE Press / Wiley-Interscience, 2007, 379 p.
20. H. Akagi, Y. Kanazava, A. Nubae "Generalized theory of the instantaneous power in three phase circuits." – Int. Power Electronics Conf., Tokio, Japan, 1983, p.p. 1375-1386.
21. H. Akagi, Y. Kanazava, A. Nubae. "Instantaneous reactive power compensators comprising switching devices without energy storage components" IEEE Trans. Ind.Applicat., vol. 20, p.p. 625-630, May/June, 1984.
22. H. Akagi, Y. Tsukamoto, A. Nubae "Analysis and design of an active power filter using quad-series voltage source PWM converters" IEEE Trans. Ind.Applicat., vol. 26, p.p. 93-98, Feb., 1990.
23. A. Nubae, T. Tanake "A new definition of instantaneous active-reactive current and power based on instantaneous space vectors on polar coordinates in three-phase circuits" IEEE/PES Winder Meeting, Paper 96, WM227-9PWRD, 1996.
24. F.Z. Peng, J.S. Lai "Generalized instantaneous reactive power theory for three-phase power systems" IEEE Trans. Instrum.Meas., vol. 45, no 1, p.p. 293-297, 1996.
25. H.S.Kim, H.Akagi "The instantaneous power theory based on mapping matrices in three-phase four-wire systems" In Proc. PCC'97 Conf.vol1, Nagaoka, Japan, Aug. 1997, pp.361-366.
26. F.Z. Peng, G.W. Ott, D.J. Adams "Harmonic and reactive power compensation based on mapping matrices in three-phase four-wire systems" IEEE Trans. Power Electronics, vol. 13, no 1, p.p. 305-312, 1998.
27. H.S. Kim, S. Ogasawara, H. Akagi "The theory of instantaneous power in three-phase four-wire systems: a comprehensive approach" In. Proc. IEEE/IAS'99 Aunu.Meeting.Oct. 1999 p.p. 431-439.
28. H.S. Kim, H. Akagi "The instantaneous power theory on the rotating p-q-r reference frames" In. Proc. IEEE/PEDS'99 Conf., Hong Kong, July, 1999, p.p. 422-427.
29. V. Soares, P. Verdelho, G.D. Marques "An instantaneous active and reactive current component method for active filters" IEEE Trans. Power Electr., vol. 15, p.p. 660-669, July, 2000.
30. H. Kim, F. Blaabjerg, B. Bak-Jensen, I. Choi "Instantaneous power compensation in three-phase systems using p-q-r theory" IEEE Trans. Power Electronics, vol. 17, no. 5, p.p. 701-710, 2002.
31. H. Kim, S. Lee, and S. Sul "Reference wave generation in dynamic voltage restorers by use of the pqr power theory" In Proc. IEEE Appl. Power Electron. Conf. Exp. (APEC 2004), vol. 3, p.p. 1452-1457.
32. F. Ng, M. Vong, and Y. Han "Analysis and control of UPQS and its DC-link power by use of p-q-r instantaneous power theory" In Proc. 1st Int. Conf. Power Electron. Syst. Appl., 2004, p.p. 43-53.
33. S. Lee, H. Kim, S. Sul, and F. Blaabjerg "A novel control algorithm for static series compensators by use of PQR instantaneous power theory" IEEE Trans. Power Electron., vol. 19, no. 3, p.p. 814-827, May 2004.
34. M. Depenbrock, V. Staudt, and H. Wrede "Concerning instantaneous power compensation in three-phase systems by using p-q-r theory" IEEE Trans. Power Electron., vol. 19, no. 4, p.p. 1151-1152, Jul. 1004.
35. M. Aredes, H. Akagi, E.H. Watanabe, E.V. Salgado, L.F. Encarnacao "Comparisons between the p-q and p-q-r theories in three-phase four-wire systems" IEEE Trans. on PE, vol. 24, no. 4, 2009, p.p. 924-933.
36. Ion Baldea "Control systems in adjustable-speed drivers" IEEE, Industrial Electronics magazine, September, 2008, p.p. 32-50.
37. Zhe Chen, Josep M. Guerrero, Frede Blaabjerg "A review of the state of the art of power electronics for wind turbines" IEEE Trans. on PE, vol. 24, no. 8, 2009, p.p. 1859-1875.
38. Jose R. Rodriguez, Juan W. Dixon, Jose R. Espinoza, Jorge Pontt, Pablo Lezana "PWM regenerative rectifiers: State of the art" IEEE Trans. on Industrial Electronics, vol. 52, no. 1, 2005, p.p. 5-22.
39. Ajit Kumar Chattopadhyay "Alternating current drives in the steel industry. Advancements in the last 30 years" IEEE, Industrial Electronics magazine, December, 2010, p.p. 30-42.
40. Jose Rodrigues, Jih-Shen Lai, Fang Zheng Peng "Multilevel inverters: A survey of topologies, control and application" IEEE Trans. on Industrial Electronics, vol. 49, no. 4, 2002, p.p. 725-738.
41. Samir Kouro, Wariusz Malinowski, K. Gopakumar, Jose Rodrigues, Marcelo A. Perer, Jose I. Leon "Recent advances an industrial applications of multilevel converters" IEEE Trans. on Industrial Electronics, vol. 17, no. 8, 2010, p.p. 2553-2580.
42. Основы электроники. Под ред. Круга К.А., Госэнергоиздат, 1952. – 432 с.
43. Нейман Л.Р., Калантаров П.А. Теоретические основы электротехники. Ч. II. – М.-Л. : Госэнергоиздат 1959. – 444 с.
44. Нейман Л.Р., Демирчан П.О. Теоретические основы электротехники. Т.1. – М.-Л. : Энергия, 1966. – 522 с.
45. Демирчан К.С., Нейман Л.Р., Коровкин Н.В. Теоретические основы электротехники. Т.1. – СПб. : Питер, 2009. – 512 с.
46. Жемеров Г.Г., Ильина Н.А., Тугай Д.В., Холод О.И. Системы электроснабжения метрополитена с современными полупроводниковыми преобразователями и накопителями энергии // *Електротехніка і електромеханіка*. – 2013. – № 1. – С. 41-49.

**Bibliography (transliterated):** J. Domnin I.F., Zhemerov G.G., Krylov D.S., Sokol E.I. Modern theories of power and their use in power electronics converter systems. *Technical electro-dynamics. Special Issue "Problems of modern electrical engineering"*, 2004, Part 1, pp. 80-91. 2. Zhemerov G.G., Krylov D.S., Tugaj D.V. The system components of the full power and energy coefficients based on pqr theory of power. *Technical electro-dynamics. Special Issue "Problems of modern electrical engineering"*, 2004, Part 6, pp. 69-74. 3. Zhemerov G.G., Tugaj D.V. Instantaneous and average active and reactive power in linear circuits with sinusoidal voltages. *Bulletin of NTU "KhPI"*, 2004, no.43, pp. 135-141. 4. Domnin I.F., Zhemerov G.G. Instant definition of active and reactive power in three-phase networks with the converter. *Visnik priazov'skogo derzhavnogo tehnichnogo universitetu*, Mariupol, 2005, no.15, pp. 70-74. 5. Zhemerov G.G., Il'ina O.V., Tugaj D.V. Coordinate transformation in the electric drive and power electronics. *Technical electro-dynamics. Special Issue "Problems of modern electrical engineering"*, 2006, Part 1, pp. 81-88. 6. Domnin I.F., Zhemerov G.G., Il'ina O.V., Tugaj D.V. Compensation ripple instantaneous real power in circuits with resistive load. *Technical electro-dynamics. Special Issue "Problems of modern electrical engineering"*, 2006, Part 6, pp. 36-41. 7. Zhemerov G.G., Il'ina O.V., Tugaj D.V. Energy-saving effect of compensation ripple instantaneous real power. *Technical electro-dynamics. Special Issue "Power electronics & energy efficiency"*, 2006, Part 4, pp. 22-27. 8. Zhemerov G.G., Domnin I.F., Il'ina O.V., Tugaj D.V. Energy efficiency correction phase current ripple compensation and active and reactive power in a three phase power supply system. *Technical electro-*

dynamics, 2007, no.1, pp. 52-57. **9.** Zhemerov G.G., Sokol E.I., Il'ina N.A., Il'ina O.V. The concepts of "instantaneous active power" and "instantaneous reactive power. *Technical electro-dynamics. Special Issue "Power electronics & energy efficiency"*, 2007, Part 1, pp. 33-44. **10.** Zhemerov G.G., Il'ina O.V. Energy storage expansion joints pulsations instantaneous real power. *Technical electro-dynamics. Special Issue "Power electronics & energy efficiency"*, 2007, Part 3, pp. 23-28. **11.** Zhemerov G.G., Il'ina O.V. The theory of power Friese and modern theories of power. *Electrical engineering & electromechanics*, 2007, no.6, pp. 63-65. **12.** Zhemerov G.G., Il'ina O.V. Calculation of parameters of capacitive energy storage pulsation instantaneous real power. *Electrical engineering*, 2008, no.1, pp. 54-59. **13.** Zhemerov G.G., Il'ina N.A., Il'ina O.V. The relationship between the modulus of the instantaneous reactive power and efficiency of the electricity system. *Technical electro-dynamics. Special Issue "Problems of modern electrical engineering"*, 2008, Part 4, pp. 31-36. **14.** Zhemerov G.G., Il'ina N.A., Il'ina O.V., Tugaj D.V. Reducing waste and improving the quality of electric energy in your Utility power systems. *Technical electro-dynamics. Special Issue "Power electronics & energy efficiency"*, 2008, Part 2, pp. 80-87. **15.** Zhemerov G.G., Kolesnik V.Ju., Il'ina O.V. Relations for the coordinate transformations of generalized vectors of voltages and currents of three-phase power supply system. *Reference manual*. Kharkov, NTU "HPI" Publ., 2009. 40 p. **16.** Zhemerov G.G., Il'ina N.A., Il'ina O.V., Koval'chuk O.I., Sokol E.I. Efficiency of DC power supply systems and symmetrical three-phase system of sinusoidal voltages. *Technical electro-dynamics. Special Issue "Problems of modern electrical engineering"*, 2010, Part 2, pp. 107-118. **17.** 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. *Technical electro-dynamics. Special Issue "Power electronics & energy efficiency"*, 2010, Part 1, pp. 22-31. **18.** Zhemerov G.G., Il'ina O.V., Koval'chuk O.I. Efficiency of single-phase AC power system voltage rectangular and sinusoidal. *Technical electro-dynamics. Special Issue "Power electronics & energy efficiency"*, 2010, Part 2, pp. 7-15. **19.** Akagi H., Vatanabe E.H., Aredes M. *Instantaneous power theory and applications to power conditioning*. IEEE Press, Wiley-Interscience, 2007. 379 p. **20.** Akagi H., Kanazava Y., Nubae A. Generalized theory of the instantaneous power in three phase circuits. *Int. Power Electronics Conf.*, Tokyo, 1983, pp. 1375-1386. **21.** Akagi H., Kanazava Y., Nubae A. Instantaneous reactive power compensators comprising switching devices without energy storage components. *IEEE Trans. Ind.Applicat.*, 1984, vol.20, pp. 625-630. **22.** Akagi H., Tsukamoto Y., Nubae A. Analysis and design of an active power filter using quad-series voltage source PWM converters. *IEEE Trans. Ind.Applicat.*, 1990, vol.26, pp. 93-98. **23.** Nubae A., Tanake T. A new definition of instantaneous active-reactive current and power based on instantaneous space vectors on polar coordinates in three-phase circuits. *IEEE/PES Winter Meeting*, Paper 96, WM227-9PWRD, 1996. **24.** Peng F.Z., Lai J.S. Generalized instantaneous reactive power theory for three-phase power systems. *IEEE Trans. Instrum.Meas.*, 1996, vol.45, no.1, pp. 293-297. **25.** Kim H.S., Akagi H. The instantaneous power theory based on mapping matrices in three-phase four-wire systems. *In Proc. PCC'97 Conf.*, Nagaoka, 1997, vol.1, pp. 361-366. **26.** Peng F.Z., Ott G.W., Adams D.J. Harmonic and reactive power compensation based on mapping matrices in three-phase four-wire systems. *IEEE Trans. Power Electronics*, 1998, vol.13, no.1, pp. 305-312. **27.** Kim H.S., Ogasawara S., Akagi H. The theory of instantaneous power in three-phase four-wire systems: a comprehensive approach. *In Proc. IEEE/IAS'99 Annu. Meeting*, 1999, pp. 431-439. **28.** Kim H.S., Akagi H. The instantaneous power theory on the rotating p-q-r reference frames. *In Proc. IEEE/PEDS'99 Conf.*, Hong Kong, 1999, pp. 422-427. **29.** Soares V., Verdelho P., Marques G.D. An instantaneous active and reactive current component method for active filters. *IEEE Trans. Power Electr.*, 2000, vol.15, pp. 660-669. **30.** Kim H., Blaabjerg F., Bak-Jensen B., Choi I. Instantaneous power compensation in three-phase systems using p-q-r theory. *IEEE Trans. Power Electronics*, 2002, vol.17, no.5, pp. 701-710. **31.** Kim H., Lee S., Sul S. Reference wave generation in dynamic voltage restorers by use of the p-q-r power theory. *In Proc. IEEE Appl. Power Electron. Conf. Exp. (APEC 2004)*, vol.3, pp. 1452-1457. **32.** Ng F., Vong M., Han Y. Analysis and control of UPQS and its DC-link power by use of p-q-r instantaneous power theory. *In Proc. 1<sup>st</sup> Int. Conf. Power Electron. Syst. Appl.*, 2004, pp. 43-53. **33.** Lee S., Kim H., Sul S., Blaabjerg F. A novel control algorithm for static series compensators by use of P-Q-R instantaneous power theory. *IEEE Trans. Power Electron.*, 2004, vol.19, no.3, pp. 814-827. **34.** Depenbrock M., Staudt V., Wrede H. Concerning instantaneous power compensation in three-phase systems by using p-q-r theory. *IEEE Trans. Power Electron.*, 2004, vol.19, no.4, pp. 1151-1152. **35.** Aredes M., Akagi H., Watanabe E.H., Salgado E.V., Encarnacao L.F. Comparisons between the p-q and

p-q-r theories in three-phase four-wire systems. *IEEE Trans. on PE*, 2009, vol.24, no.4, pp. 924-933. **36.** Baldea I. Control systems in adjustable-speed drivers. *IEEE, Industrial Electronics magazine*, September, 2008, pp. 32-50. **37.** Chen Z., Guerro J.M., Blaabjerg F. A review of the state of the art of power electronics for wind turbines. *IEEE Trans. on PE*, 2009, vol.24, no.8, pp. 1859-1875. **38.** Rodriguer J.R., Dixon J.W., Espinoza J.R., Pontt J., Lezana P. PWM regenerative rectifiers: *State of the art*. *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, 2005, vol.52, no.1, pp. 5-22. **39.** Chattopadhyay A.K. Alternating current drives in the steel industry. *Advancements in the last 30 years*. *IEEE, Industrial Electronics magazine*, December, 2010, pp. 30-42. **40.** Rodrigues J., Jih-Shen Lai, Fang Zheng Peng. Multilevel inverters: A survey of topologies, control and application. *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, 2002, vol.49, no.4, pp. 725-738. **41.** Kouro S., Malinowski W., Gopakumar K., Rodrigues J., Perer M.A., Leon J.I. Resent advances an industrial applications of multilevel converters. *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, 2010, vol.17, no.8, pp. 2553-2580. **42.** *Osnovy jelektroniki*. Pod red. Kruga K.A., Moscow, Gosjenergoizdat Publ., 1952. 432 p. **43.** Nejman L.R., Kalantarov P.A. *Teoreticheskie osnovy jelektrrotehniki*. Part II. Moscow-Leningrad, Gosjenergoizdat Publ., 1959. 444 p. **44.** Nejman L.R., Demirchan P.O. *Teoreticheskie osnovy jelektrrotehniki*. Vol.1. Moscow-Leningrad, Jenergija Publ., 1966. 522 p. **45.** Demirchan K.S., Nejman L.R., Korovkin N.V. *Teoreticheskie osnovy jelektrrotehniki*. Vol.1. St.Petersburg, Piter Publ., 2009. 512 p. **46.** Zhemerov G.G., Ilyina N.A., Tugay D.V., Kholod O.I. Subway power systems with modern semiconductor converters and energy storage devices. *Electrical engineering & electromechanics*, 2013, no.1, pp. 41-49.

Поступила (received) 09.09.2013

Жемеров Георгий Георгиевич<sup>1</sup>, д.т.н., проф.,  
Тугай Дмитрий Васильевич<sup>2</sup>, к.т.н., доц.,  
<sup>1</sup>Национальный технический университет  
"Харьковский политехнический институт",  
кафедра "Промышленная и биомедицинская электроника",  
61002, Харьков, ул. Фрунзе, 21,  
тел/phone +38 057 7076312, e-mail: zhemerov@gmail.com  
<sup>2</sup>Харьковский национальный университет  
городского хозяйства им. А.Н. Бекетова,  
кафедра "Теоретическая и общая электротехника",  
61002, г. Харьков, ул. Революции, 12,  
тел./phone: +38 057 7073111, e-mail: tugaydv@yandex.ru

G.G. Zhemerov<sup>1</sup>, D.V. Tugay<sup>2</sup>

<sup>1</sup>National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"  
21, Frunze Str., Kharkiv, 61002, Ukraine

<sup>2</sup>O.M. Beketov Kharkiv National University of Municipal Economy  
12, Revolution Str., Kharkiv, 61002, Ukraine

### Energy and power in power supply systems with semiconductor converters and energy storage.

Use of the terms "energy", "active power", "reactive power" for power supply systems with semiconductor converters and energy storage is substantiated. Techniques for calculating energy efficiency of these systems are presented.

**Key words** – energy, active power, reactive power, efficiency, energy storage.