

## СИЛОВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА И КОНЦЕПЦИЯ РАЗВИТИЯ ЭНЕРГЕТИКИ «SMART GRID»

Е.И. Сокол<sup>1</sup>, член-кор. НАН Украины, Г.Г. Жемеров<sup>1</sup>, докт. техн. наук, Д.В. Тугай<sup>2</sup>, канд. техн. наук

<sup>1</sup> – Национальный технический университет «ХПИ»

ул. Фрунзе, 21, 61002, Харьков, Украина,

<sup>2</sup> – Харьковский национальный университет городского хозяйства им. А.Н. Бекетова

ул. Революции, 12, 61002, Харьков, Украина.

*Сформулированы общие требования к Smart Grid, учитывающие уменьшение потерь энергии в системе электроснабжения в результате применения новых полупроводниковых преобразователей и энергоемких накопителей энергии, а также перехода от однофазной сети потребителей к трехфазной. На примере различных систем электроснабжения оценен ориентировочный положительный эффект от внедрения указанных мероприятий. Библи. 25, рис. 6, табл. 2.*

**Ключевые слова:** Smart Grid, система электроснабжения, коэффициент полезного действия, накопитель энергии, силовой активный фильтр

**Введение.** Начало развития энергетики и электротехники как отрасли мирового народного хозяйства было положено в конце 19-го столетия изобретениями электрической лампы накаливания (Т. Edison), трансформатора (L. Gaulard, D. Gibbs), трехфазной машины переменного тока (N. Tesla, M. Dolivo-Dobrowolski), а также предпринимательским чутьем и инициативой G. Westinghouse. Более 125 лет назад были заложены основные принципы построения систем электроснабжения (СЭ), а именно: использование трехфазных сетей переменного тока для передачи электроэнергии; централизованное производство электроэнергии на мощных электростанциях; синхронная работа генераторов электростанций, объединенных в единую энергосистему; однонаправленный поток энергии в системе электроснабжения от электростанций к потребителям; централизованное управление потоками энергии в системе электроснабжения.

Эти принципы остаются в силе и в настоящее время. Стабильность перечисленных пяти принципов развития энергетики объясняется тем, что отказ от любого из них влечет за собой не только радикальную замену энергетического и электротехнического оборудования, но и глубокие изменения в рыночных отношениях производителей, поставщиков и потребителей электроэнергии.

В последнее десятилетие в значительной мере под влиянием принципов функционирования сети Internet родилась новая концепция развития сетей электроснабжения, получившая название «Smart Grid». [21-23]. Перспектива практической реализации концепции Smart Grid появилась вследствие достижений альтернативной энергетики и силовой электроники, прогресса в разработке энерго-

ёмких накопителей энергии; начала широкомасштабного промышленного производства электромобилей, развития теории и технологии управления сложными энергосистемами [1, 2, 4, 15, 17-19,24].

Разновидности Smart Grid – систем электроснабжения: Smart House, Smart Building, Smart Enterprise, Smart City, Smart Country и т.д. строятся на общих принципах, коренным образом отличающихся от пяти принципов построения существующих в настоящее время СЭ: распределенная асинхронная система электроснабжения с двунаправленными потоками электроэнергии и с возможностью подключения источников электроэнергии по принципу «plug and play» в любой момент времени; интеллектуальное управление СЭ с использованием специальных программ, измерительных приборов и коммуникационной инфраструктуры; возможность работы в автономном от основной промышленной сети режиме, в том числе, при 100% потреблении энергии от альтернативных источников; уменьшение потерь электроэнергии при ее генерации, транспортировании и потреблении; высокий уровень качества электроэнергии в СЭ, ее стабильность и надежность; соответствие СЭ экологическим требованиям.

О широком интересе к концепции Smart Grid электротехнических фирм, государственных организаций и университетов, проводящих исследования и разработки демонстрационных проектов разных масштабов, свидетельствуют проведенный 16–19 января 2012 года в Абу-Даби (ОАЭ) международный саммит энергии будущего, с участием генерального секретаря ООН Пан Ги Муна, и проведенный 6-7 декабря 2012 года Мировой форум Smart Grid в Женеве (Швейцария). Ряд стран ЕС, США, Китай, Южная Корея и другие страны финансируют разработки технологий Smart Grid на правительственном уровне с объемом финансирования в десятки миллиардов долларов в год [19].

В настоящей статье сделана попытка оценки теоретической и промышленной готовности адаптации силовой электроники к новым требованиям, возникающим при практической реализации концепции Smart Grid.

**Общие требования к Smart Grid силовой электронике (SGPE).** Кажется очевидным, что условием успеха практической реализации концепции Smart Grid является значительное общее уменьшение потерь электроэнергии при ее производстве, транспортировании и потреблении, получаемое в результате внедрения Smart Grid. Такое условие распространяется и на улучшение качества электроэнергии: изменение структуры СЭ, приводящее к улучшению качественных показателей электроэнергии, должно одновременно приводить к уменьшению потерь энергии.

Если реализация Smart Grid будет приводить к увеличению потерь энергии, то такой отрицательный эффект может оказаться весомей факторов в пользу новой концепции.

Преобразовательные системы силовой электроники такие как управляемые выпрямители (УВ), реакторные (ТРНР) и конденсаторные (ТРНК) тиристорные регуляторы соответственно индуктивности и емкости, статические компенсаторы реактивной мощности (СТАТКОМ), силовые активные фильтры (САФ), активные выпрямители (АВ), многоуровневые инверторы (МУИ), гибкие системы передачи энергии переменного тока (FACTS), частотно-регулируемые электроприводы (ASD) и

другие типы преобразовательных систем широко применяются в энергетической и других отраслях промышленности.

Современный уровень развития силовой электроники позволяет создавать новые типы преобразовательных устройств практически с любыми требуемыми характеристиками. К преобразовательным системам предъявляются два основных требования: высокий, близкий к единице, коэффициент полезного действия во всем диапазоне изменения параметров нагрузки и низкий, близкий к нулю, коэффициент несинусоидальности (THD) токов в точках подключения преобразователя к источнику электроэнергии и нагрузке.

Параметры и характеристики силовых полупроводниковых приборов, трансформаторов, реакторов, конденсаторов и других элементов преобразовательных систем достигли в настоящее время уровня, при котором коэффициент полезного действия преобразователей средней и большой мощности, выполненных с использованием этих элементов, в номинальном режиме находится в пределах 0.95...0.98.

Возможности дальнейшего повышения КПД за счет совершенствования параметров элементов силовых схем ограничены. Наиболее ожидаемый прогресс в борьбе за энергоэффективность преобразователей связан с освоением производства силовых полупроводниковых приборов на основе карбида кремния (CSi) или другого полупроводника, однако это позволит уменьшить потери высоковольтных преобразователей не более чем на 1-1.5%. Примерно на такую же величину следует ожидать увеличение потерь в дополнительных фильтрокомпенсирующих устройствах, необходимых для удовлетворения повышенных требований к качественным показателям электроэнергии.

Существенное уменьшение потерь энергии в системах электроснабжения Smart Grid, по нашему мнению, может быть достигнуто тремя путями:

- широким применением сравнительно новых преобразователей силовой электроники, такие как активные выпрямители, силовые активные фильтры и на их основе компенсаторы мгновенной реактивной мощности и пульсаций мгновенной активной мощности;
- использованием энергоемких накопителей энергии, выполненных на основе суперконденсаторов и аккумуляторов;
- радикальным изменением системы электроснабжения коммунальных потребителей, заключающемся в переходе от однофазных сетей и потребителей к трехфазным.

Рассмотрим более подробно перечисленные возможности уменьшения потерь электроэнергии.

#### **Компенсация реактивной мощности и пульсаций мгновенной активной мощности.**

Оценка зависимости между расчетным модулем вектора реактивной мощности и мощностью потерь энергии в системе электроснабжения сделана в работе [6]. В работах [5, 10] приведены зависимости КПД системы электроснабжения от относительной амплитуды пульсаций мгновенной активной мощности нагрузки.

В [7] получены зависимости от параметров СЭ максимально возможных и реальных значений КПД трехфазной четырехпроводной системы электроснабжения с синусоидальными симметричными напряжениями источника и асимметричной нелинейной нагрузкой, эквивалентная схема которой представлена на рис. 1.

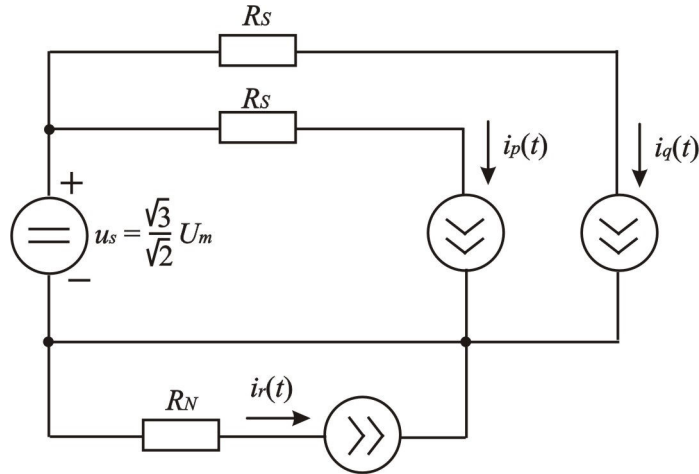


Рис. 1

На рис. 1 приняты следующие обозначения:  $U_s$  – модуль пространственного вектора напряжения;  $U_m$  – амплитуда фазного синусоидального напряжения;  $R_s$  – активное сопротивление линии, соединяющей источник и нагрузку;  $R_N$  – активное сопротивление нулевого провода СЭ;  $i_p(t)$ ,  $i_q(t)$ ,  $i_r(t)$  – соответственно, мгновенные значения проекций пространственного вектора тока на оси  $p$ ,  $q$ ,  $r$  системы координат  $pqr$ .

Проекция вектора тока на оси  $p$ ,  $q$ ,  $r$  определяются по известным мгновенным значениям трех фазных токов СЭ из следующих соотношений [12]:

$$\begin{bmatrix} i_p \\ i_q \\ i_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{\frac{2}{3}} \cos \theta_1 \cos \theta_2 + \frac{1}{\sqrt{3}} \sin \theta_2 & \sqrt{\frac{2}{3}} \cos \left( \theta_1 - \frac{2\pi}{3} \right) \cos \theta_2 + \frac{1}{\sqrt{3}} \sin \theta_2 & \sqrt{\frac{2}{3}} \cos \left( \theta_1 + \frac{2\pi}{3} \right) \cos \theta_2 + \frac{1}{\sqrt{3}} \sin \theta_2 \\ -\sqrt{\frac{2}{3}} \sin \theta_1 & -\sqrt{\frac{2}{3}} \sin \left( \theta_1 - \frac{2\pi}{3} \right) & -\sqrt{\frac{2}{3}} \sin \left( \theta_1 + \frac{2\pi}{3} \right) \\ -\sqrt{\frac{2}{3}} \cos \theta_1 \sin \theta_2 + \frac{1}{\sqrt{3}} \cos \theta_2 & -\sqrt{\frac{2}{3}} \cos \left( \theta_1 - \frac{2\pi}{3} \right) \sin \theta_2 + \frac{1}{\sqrt{3}} \cos \theta_2 & -\sqrt{\frac{2}{3}} \cos \left( \theta_1 + \frac{2\pi}{3} \right) \sin \theta_2 + \frac{1}{\sqrt{3}} \cos \theta_2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где

$$\theta_1 = \arctg \frac{i_b - i_c}{\sqrt{3} \cdot i_a}, \quad (2)$$

$$\theta_2 = \arctg \frac{i_0}{i_{\alpha\beta}}, \quad (3)$$

$$i_{\alpha\beta} = \sqrt{i_\alpha^2 + i_\beta^2}, \quad (4)$$

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \\ i_0 \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{La} \\ i_{Lb} \\ i_{Lc} \end{bmatrix}. \quad (5)$$

Полученные в [7] теоретические и экспериментальные зависимости иллюстрируются данными, приведенными в табл. 1.

В табл. 1 приняты следующие обозначения:  $P_{SC}$  – мощность резистивного короткого замыкания (КЗ) СЭ;  $P_{usf}$  – полезная активная мощность, соответствующая энергии поступающей в нагрузку за интервал времени, равный периоду повторяемости;

**Таблица 1**

$P_{CS}/P_{usf} = 20, K_I = 0.053, K_R = 1, \eta_{max} = 0.947$							$P_{CS}/P_{usf} = 25, K_I = 0.042, K_R = 1, \eta_{max} = 0.958$					
$\varphi$	$\Delta_n$											
	0	0.1	0.25	0.5	0.75	1	0	0.1	0.25	0.5	0.75	1
0	0.947	0.947	0.944	0.935	0.921	0.902	0.958	0.958	0.956	0.948	0.937	0.921
$\pi/12$	0.934	0.934	0.931	0.923	0.909	0.890	0.947	0.947	0.945	0.938	0.926	0.911
$\pi/6$	0.919	0.919	0.916	0.908	0.894	0.876	0.935	0.935	0.933	0.926	0.915	0.900
$\pi/4$	0.899	0.899	0.896	0.888	0.876	0.858	0.919	0.919	0.917	0.910	0.899	0.885
$P_{CS}/P_{usf} = 30, K_I = 0.035, K_R = 1, \eta_{max} = 0.965$							$P_{CS}/P_{usf} = 50, K_I = 0.02, K_R = 1, \eta_{max} = 0.98$					
$\varphi$	$\Delta_n$											
	0	0.1	0.25	0.5	0.75	1	0	0.1	0.25	0.5	0.75	1
0	0.965	0.965	0.963	0.957	0.947	0.933	0.980	0.980	0.979	0.975	0.969	0.961
$\pi/12$	0.956	0.956	0.954	0.948	0.938	0.925	0.975	0.975	0.974	0.970	0.964	0.956
$\pi/6$	0.946	0.946	0.944	0.938	0.929	0.916	0.969	0.969	0.968	0.964	0.959	0.951
$\pi/4$	0.932	0.932	0.930	0.924	0.915	0.903	0.961	0.961	0.960	0.956	0.951	0.943

$$K_I \cong \frac{P_{usf}}{P_{SC}} - \quad (6)$$

– коэффициент;

$$K_R = \frac{R_N}{R_S} - \quad (7)$$

– отношение сопротивления нулевого провода к сопротивлению фазы;

$$\Delta_n = \frac{\sqrt{I_{N50}^2 + I_{N150}^2}}{I_{usf}}, \quad (8)$$

где  $I_{N50}$  – действующее значение 50-герцовой составляющей тока нулевого провода;  $I_{N150}$  – действующее значение 150-герцовой составляющей тока нулевого провода;  $I_{usf}$  – средний за период повторяемости активный (по оси  $p$ ) ток нагрузки;  $\varphi$  – угол сдвига между фазным напряжением источника и основной гармоникой тока нагрузки;  $\eta_{max}$  – максимально возможный КПД СЭ при  $\varphi = 0, \Delta_n = 0$ .

Анализ данных, приведенных в табл. 1 и в работах [5, 10] показывает, что за счет применения силовых активных фильтров, накопителей энергии, обеспечивающих компенсацию пульсаций мгновенной активной мощности, и активных выпрямителей можно ожидать повышение КПД СЭ в среднем на 5-7% при одновременном улучшении качества электроэнергии: уменьшение коэффициента несинусоидальности и величины отклонений напряжения в точках общего подсоединения нагрузки (РСС).

**Использование энергоёмких накопителей энергии.** Параметры аккумуляторов и суперконденсаторов, такие как удельная энергоемкость, допустимое количество циклов заряда-разряда быстро улучшаются [8, 20]. Уже в настоящее время возможно эффективное применение суперконденсаторов

в ряде систем электроснабжения. В качестве примера рассмотрим СЭ подвижного состава метрополитена.

Электроснабжение электропоездов украинских метрополитенов осуществляется от тяговой контактной сети постоянного тока напряжением 825 В. Контактная сеть питается от подземных или наземных подстанций, которые подключаются к сети 6(10) кВ через понижающий трансформатор и неуправляемый шестипульсный выпрямитель. Однонаправленный поток энергии от сети к нагрузке обуславливает значительные суммарные потери энергии в такой СЭ, которые складываются из потерь в устройствах тяговых подстанций  $\Delta E_S$ , контактной сети  $\Delta E_d$ , элементах электропривода  $\Delta E_{ASD}$  и тормозных резисторах  $\Delta E_{BR}$  [11, 13]

$$\Delta E_{\Sigma} = \Delta E_S + \Delta E_d + \Delta E_{ASD} + \Delta E_{BR}. \quad (9)$$

Альтернативной существующей СЭ подвижного состава метрополитена являются системы электроснабжения, использующие энергоемкие накопители энергии (НЭ). Причем возможны два варианта размещения накопителя – стационарное (на тяговой подстанции) и бортовое (на борту электропоезда), как показано на рис. 2.

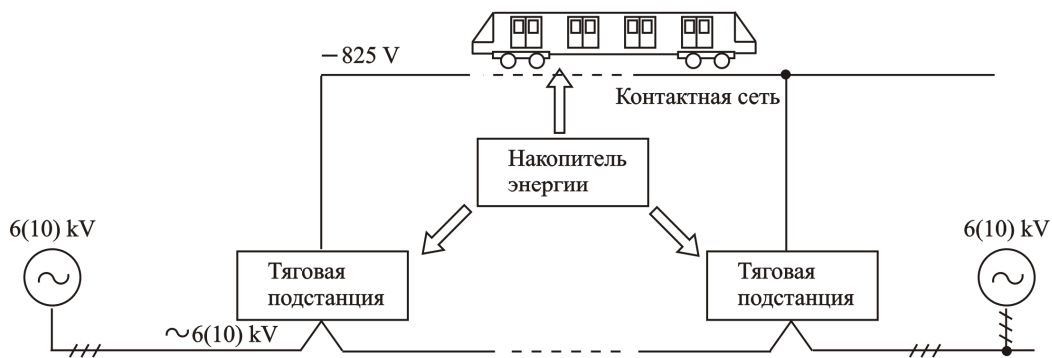


Рис. 2

Выбор того или иного варианта размещения НЭ зависит от сопоставления технико-экономических и эксплуатационных показателей в ходе принятия индивидуальных проектных решений. Оба варианта размещения позволяют сократить суммарную энергию, потребляемую подвижным составом из сети, и уменьшить уровень потерь энергии в элементах СЭ [11]. Уменьшение потребляемой из сети энергии достигается циркуляцией в СЭ двунаправленного энергетического потока, при котором максимальная кинетическая энергия, накапливаемая электропоездом в момент окончания разгона, не рассеивается в тормозных резисторах, а отправляется в накопитель энергии. Из сети потребляется энергия, необходимая для питания вспомогательного электротехнического оборудования (привод дверей, освещение, вентиляция, связь), энергия, расходуемая на преодоление сопротивления воздуха в туннеле и трения колесной базы, и энергия, эквивалентная потерям в элементах СЭ.

В случае размещения НЭ на тяговой подстанции суммарные потери энергии в СЭ

$$\Delta E_{\Sigma st} = \Delta E_S + \Delta E_d + \Delta E_{ASD} + \Delta E'_d + \Delta E'_{ASD} + \Delta E_{ES1}, \quad (10)$$

где  $\Delta E'_d$ ,  $E'_{ASD}$  – соответственно приведенные потери энергии в контактной сети и элементах электропривода при обратном потоке из нагрузки в НЭ;  $\Delta E_{ES1}$  – потери в накопителе энергии.

При бортовом размещении НЭ суммарные потери энергии уменьшатся на величину  $\Delta E'_d$

$$\Delta E_{\Sigma} = \Delta E_S + \Delta E_d + \Delta E_{ASD} + \Delta E'_{ASD} + \Delta E_{ES1}. \quad (11)$$

Возможен вариант использования бортового накопителя энергии в бесконтактной СЭ. Массогабаритные характеристики накопителя в такой системе электроснабжения увеличиваются, однако происходит значительное уменьшение потерь энергии за счет отсутствия контактной сети

$$\Delta E_{\Sigma} = \Delta E_S + \Delta E_{ASD} + \Delta E'_{ASD} + \Delta E_{ES2}, \quad (12)$$

где  $\Delta E_{ES1}$  – потери энергии в накопителе при бесконтактной СЭ.

В табл. 2 представлено сопоставление результатов расчета суммарной энергии, потребляемой из сети, и потерь энергии для четырех указанных систем электроснабжения подвижного состава метрополитена относительно традиционной СЭ без накопителя энергии. При расчете были приняты допущения, что энергия собственных нужд электропоезда составляет 10% от максимума кинетической энергии, а энергия, затрачиваемая на преодоление сопротивления воздуха в туннеле и трение, – 20%.

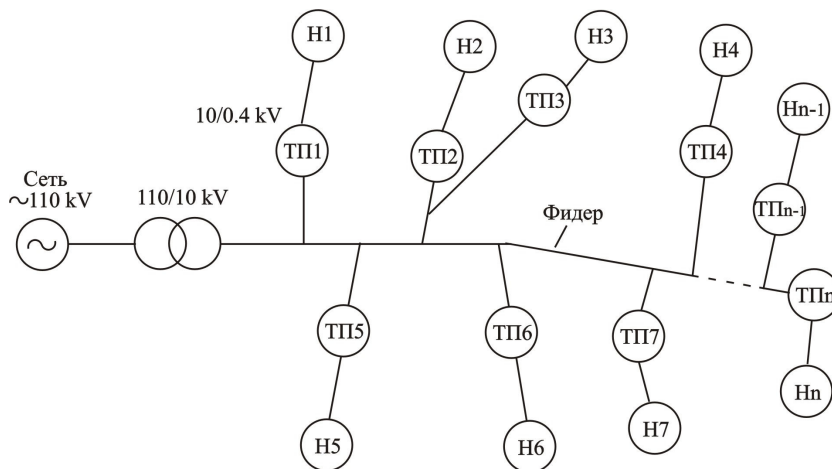
**Таблица 2**

Тип СЭ	Суммарная относительная энергия, потребляемая из сети, $E_{S*}$	Суммарные относительные потери энергии, $\Delta E_{\Sigma*}$
Традиционная	1	1
Со стационарным НЭ	0.435	0.301
С бортовым НЭ	0.317	0.155
Бесконтактная с бортовым НЭ	0.295	0.128

Анализ данных табл. 2 позволяет сделать вывод, что использование энергоемких накопителей в системах электроснабжения подвижного состава метрополитена позволит уменьшить потребление энергии из сети в 2.3 – 3.4 раза при одновременном снижении потерь энергии в 3.3 – 7.8 раза.

**Модернизация системы электроснабжения коммунальных потребителей энергии.** В развитых странах коммунальные объекты потребляют более 30% всей вырабатываемой электроэнергии [16]. Упрощенная схема СЭ коммунальных потребителей представлена на рис. 3.

От трансформатора 110/10 kV, установленного на высоковольтной подстанции, проложен фидер



**Рис. 3**

длинной в несколько километров. К фидеру в разных точках подключается несколько десятков трансформаторных подстанций 10/0.4 kV (ТП), первичные обмотки трансформаторов, установленных на ТП, соединены в звезду, а вторичные в звезду с нулевым проводом. От каждой из ТП запитывается несколько потребителей

по кабельным или воздушным линиям, длина которых может достигать 100 метров и более.

Три фактора определяют необоснованно большие потери в существующих коммунальных СЭ [14], нагрузка которых обладает значительной пофазной асимметрией и нелинейностью: соединение первичных обмоток трансформаторов, устанавливаемых на ТП, в звезду при асимметрии токов во вторичных обмотках, вызывающая дополнительные потери вследствие насыщения магнитной системы; фазовый сдвиг основной гармоники тока нагрузки относительно напряжения, пульсации мгновенной активной мощности и неравенство нулю реактивной мощности; однофазная система разводки напряжений к потребителям энергии внутри коммунального объекта.

Устранение этих факторов в СЭ Smart Grid позволит значительно уменьшить потери энергии и, следовательно, повысить КПД.

Рассмотрим возможности устранения перечисленных факторов.

Первый фактор, обуславливающий дополнительные потери энергии, исчезает, если ликвидировать два других. Для ликвидации второго фактора достаточно установить на входе в Smart Building силовой активный фильтр с накопителем энергии, обеспечивающий синусоидальность фазных токов и их совпадение по фазе с фазными напряжениями.

На рис. 4 представлена схема СЭ с силовым активным фильтром (PAF), накопителем энергии (ES), солнечной батареей (SB) и преобразователем постоянного напряжения в постоянное (DC/DC).

Токи  $i_a, i_b, i_c$  на входе СЭ синусоидальны и совпадают или противоположны по фазе с напряжениями

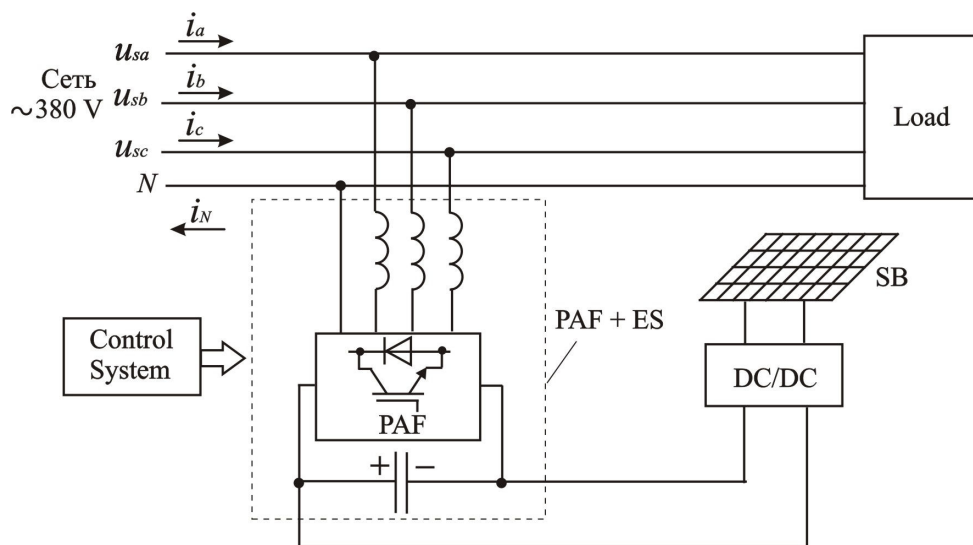


Рис. 4

$u_{sa}, u_{sb}, u_{sc}$ .  
Для полной компенсации вектора реактивной мощности теоретически не требуется накопитель энергии [5]. Накопитель энергии необходим для компенсации пульсаций мгновенной активной мощности. Требуемая энергоем-

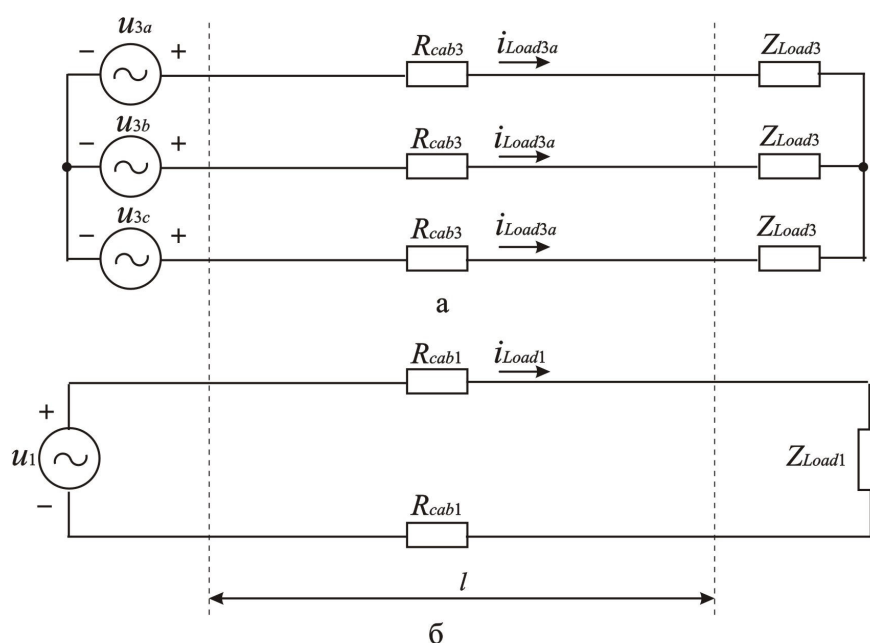
кость накопителя тем больше, чем больше период повторяемости графика мгновенной активной мощности. Современные накопители энергии, – аккумуляторы, суперконденсаторы и другие, – позволяют компенсировать пульсации с периодом повторяемости в несколько десятков секунд. Однако темпы совершенствования накопителей позволяют надеяться на значительное увеличение их энергоемкости в недалеком будущем и соответствующее увеличение длительности интервала повторяемости, при котором возможна компенсация, до десятков минут и нескольких часов.

Концепция Smart Grid предполагает радикальное изменение топологии СЭ. В частности, в ряде публикаций обсуждается возможность перехода от СЭ с однофазным источником синусоидально-



го напряжения к СЭ с источником постоянного напряжения. По нашему мнению более перспективным является переход в коммунальных СЭ к трехфазным симметричным системам синусоидальных напряжений, что позволит сохранить трансформаторы ТП и кабели, соединяющие ТП с коммунальными потребителями – жилыми и общественно-административными зданиями, осветительными установками, – значительно уменьшить потери энергии и расход проводникового материала в кабелях для подключения бытовых приборов к сети.

Рассмотрим пример, приведенный в [9]. На рис. 5 представлены эквивалентные схемы из [9] трехфазной симметричной (рис. 5,а) и однофазной (рис. 5,б) СЭ. В обеих схемах напряжения источников синусоидальны, нагрузки – активно-индуктивные и линейные.



Обозначения, принятые на рис. 5:  $l$  – длина кабеля между источником и нагрузкой;  $u_{3a}$ ,  $u_{3b}$ ,  $u_{3c}$  – фазные синусоидальные напряжения трехфазного источника;  $u_1$  – фазное синусоидальное напряжение однофазного источника;  $Z_{Load1}$ ,  $Z_{Load3}$  – соответственно модуль сопротивления нагрузки однофазной и трехфазной СЭ;  $R_{cab1}$ ,  $R_{cab3}$  – соответственно сопротивление одной жилы кабеля однофазной и трехфазной СЭ;  $i_{Load1}$ ,  $i_{Load3}$  – соответственно мгновенные значения тока нагрузки однофазной и трехфазной СЭ.

**Рис. 5**

ной жилы кабеля однофазной и трехфазной СЭ;  $i_{Load1}$ ,  $i_{Load3}$  – соответственно мгновенные значения тока нагрузки однофазной и трехфазной СЭ.

Будем считать, что однофазная и трехфазная СЭ работают в установившемся режиме с одинаковыми углами сдвига  $\varphi$  и с одной и той же средней за период повторяемости активной мощностью нагрузки

$$P_{Load1} = P_{Load3} = P_{Load} \cdot \quad (13)$$

Величины амплитуд фазных напряжений свяжем коэффициентом

$$k_U = \frac{U_{m1}}{U_{m3}} \quad (14)$$

Возможный диапазон изменения коэффициента

$$1 \leq k_U \leq \sqrt{3} \quad (15)$$

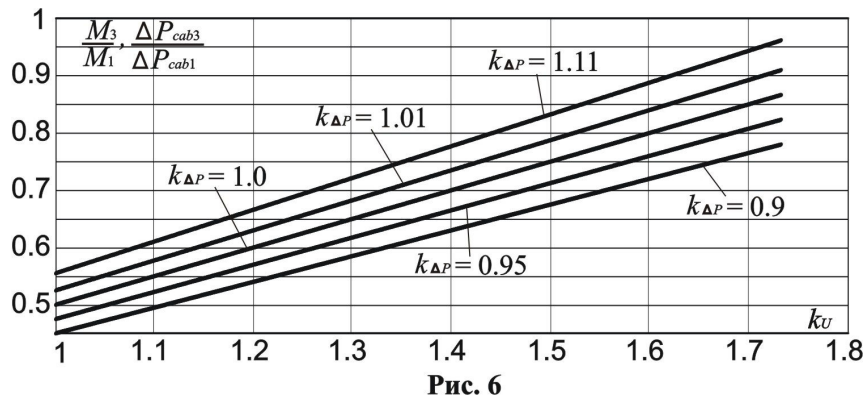
Принимаем, что длины кабелей и плотность тока в кабелях,  $\gamma$ , в однофазной и трехфазной СЭ одинаковы. При принятых условиях потери энергии и расход меди в этих СЭ будут из соотношения

$$\frac{\Delta P_{cab3}}{\Delta P_{cab1}} = \frac{\Delta M_3}{\Delta M_1} = \frac{k_U \cdot k_{\Delta P}}{2}, \quad (16)$$

где  $k_{\Delta P}$  – коэффициент, учитывающий величину мощности потерь в СЭ. При величине мощности потерь в 10% от мощности сети  $k_{\Delta P} = 0.9...1.111$ .

На рис. 6 приведены зависимости, иллюстрирующие эффективность перехода от однофазной к трехфазной СЭ, при разных значениях коэффициента  $k_{\Delta P}$ . При  $k_U = k_{\Delta P} = 1$  потери энергии и расход меди уменьшаются в два раза.

Зависимости (16) – приближенные. Точная оценка перехода от однофазной коммунальной СЭ



к трехфазной требует учета ряда дополнительных факторов, таких как, уровень допустимого номинального линейного напряжения в трехфазной СЭ, переход к розеткам и вилкам новой конструкции, делающей невозможным подключение по-

требителей на линейное напряжение, переход к трехфазным источникам питания и трехфазным двигателям в электронных и бытовых электроприборах и других нагрузках.

**Выводы.** Успех практической реализации концепции развития энергетики Smart Grid прежде всего будет зависеть от возможностей значительного уменьшения потерь энергии при ее производстве, передаче и потреблении.

Современный уровень развития силовой электроники позволяет обеспечить повышение КПД Smart Grid систем электроснабжения, используя следующие возможности: применение силовых активных фильтров и активных выпрямителей и, на их основе, компенсаторов реактивной и мгновенной активной мощности; широкое использование энергоёмких накопителей энергии для компенсации пульсаций мгновенной активной мощности в преобразовательных системах электроснабжения с динамичными нагрузками; переход в коммунальных сетях электроснабжения от однофазных систем к трехфазным, позволяющий уменьшить потери энергии и расход проводниковых материалов в соединительных кабелях.

Для ликвидации в отставания в разработке демонстрационных проектов Smart Grid от стран ЕС, США, Южной Кореи, Китая и других стран, затраты которых на эти цели превышают десятки миллиардов долларов в год, необходимо государственное финансирование, на конкурентной основе, разработок, с привлечением к созданию работающих демонстрационных СЭ промышленных предприятий, выпускающих устройства силовой электроники.

2. Вариводов В.Н., Коваленко Ю.А. Интеллектуальные электрические системы // Электричество. – 2011. – №9. – С. 4-9.
3. Домнин И.Ф., Жемеров Г.Г., Ильина О.В., Тугай Д.В. Компенсация пульсаций мгновенной активной мощности в цепях с резистивной нагрузкой // Технічна електродинаміка. Темат. вип. «Проблеми сучасної електротехніки». – 2006. – Ч. 6. – С. 36-41.
4. Дуглас Дж. Демонстрационные проекты по интеллектуальным сктям: фокус на интеграции распределенных источников энергии // Энергоэксперт. – 2011. – № 2. – С. 92-95.
5. Жемеров Г.Г., Домнин И.Ф., Ильина О.В., Тугай Д.В. Энергоэффективность компенсации фазы тока и компенсации пульсаций активной и реактивной мощностей в трехфазной системе электроснабжения // Технічна електродинаміка. – 2007. – №. 1. – С. 52-57.
6. Жемеров Г.Г., Ильина Н.А., Ильина О.В. Взаимосвязь между модулем мгновенной реактивной мощности и КПД системы электроснабжения // Технічна електродинаміка. Темат. вип. «Проблеми сучасної електротехніки». – 2008. – Ч. 4. – С. 31-46.
7. Жемеров Г.Г., Ильина Н.А., Ковальчук О.И., Сокол Е.И. КПД трехфазной четырехпроводной системы электроснабжения с асимметричной нагрузкой // Технічна електродинаміка. Темат. вип. «Силовая електроніка та енергоефективність». – 2010. – Ч. 1. – С. 22-31.
8. Жемеров Г.Г., Ильина О.В. Накопители энергии компенсаторов пульсаций мгновенной активной мощности // Технічна електродинаміка. Темат. вип. «Силовая електроніка та енергоефективність». – 2007. – Ч. 3. – С. 23-28.
9. Жемеров Г.Г., Ильина О.В., Ковальчук О.И. КПД системы электроснабжения однофазного переменного напряжения прямоугольной и синусоидальной формы // Технічна електродинаміка. Темат. вип. «Силовая електроніка та енергоефективність». – 2010. – Ч. 2. – С. 7-15.
10. Жемеров Г.Г., Ильина О.В., Тугай Д.В. Энергосберегающий эффект компенсации пульсаций мгновенной активной мощности // Технічна електродинаміка. Темат. вип. «Силовая електроніка та енергоефективність». – 2006. – Ч. 4. – С. 22-27.
11. 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.
12. 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.
13. Жемеров Г.Г., Холод О.И. Пути модернизации систем электроснабжения метрополитена // Технічна електродинаміка. Темат. вип. «Силовая електроніка та енергоефективність». – 2012. – Ч. 1. – С. 27-35.
14. Ильина О.В. Энергосберегающие полупроводниковые преобразователи для коммунальных сетей электроснабжения // Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Харьков, НТУ «ХПИ». 2008. – 199 С.
15. Кобец Б.Б., Волкова И.О. Инновационное развитие электроэнергетики на базе концепции Smart Grid. – М.: ИАЦ Энергия, 2010. – 208 С.
16. Рейтинг стран мира по уровню потребления электроэнергии — информация об исследовании. [Электронный ресурс] // Центр гуманитарных технологий. URL: <http://gtmarket.ru/ratings/electric-power-consumption/info>.

17. Роменко К.А. Объединения информационных и операционных технологий для создания эффективной интеллектуальной сети // Энергоэксперт. – 2011. – № 3. – С. 72-75.
18. Стогній Б.С., Кириленко О.В., Денисюк С.П. Интеллектуальні електричні мережі електроенергетичних систем та їхнє технологічне забезпечення // Технічна електродинаміка. – 2010. – № 6. – С. 44-50.
19. Стогній Б.С., Кириленко О.В., Праховник А.В., Денисюк С.П. Еволюція інтелектуальних електричних мереж та їхні перспективи в Україні // Технічна електродинаміка. – 2012. – №5. – С. 52-65.
20. Шакарян Ю.Г. и др. Перспективы применения накопителей энергии в ЕНЭС и ЕЭС России // Вести в электроэнергетике. – 2010. – №4. С. – 16-22.
21. Boyd J. An internet –inspired electricity Grid // IEEE Spectrum, January. – 2013. – №1. – P. 12-13.
22. Huang A., Heydt G., Dale S., Zheng J., Crow M. Energy internet – future renewable electric energy delivery and management (FREEDM) systems // IEEE Power Electronics Society News letter. – 2008. – Fourth Quarter. – P. 8-9.
23. Kovalenco K. The Smart Grid // IEEE The Institute, Desember, – 2010. – P. 5.
24. Smart Grid – European Technology Platform for Electricity Networks of the Future. – European Commission, 2005. [Electronic resource] – Mode of access: <http://www.smartGrid.eu/>.
25. 2012 IEF Smart Grid World Forum. 6-7 Dec., 2012, Geneva, Switzerland.

УДК 621.314

### **Силовая электроника і концепція розвитку енергетики «Smart Grid»**

**Є.І. Сокол<sup>1</sup>**, член-кор. НАН України, **Г.Г. Жемеров<sup>1</sup>**, докт. техн. наук, **Д.В. Тугай<sup>2</sup>**, канд. техн. наук

<sup>1</sup> – **Національний технічний університет «ХПІ»**

**вул. Фрунзе, 21, 61002, Харків, Україна,**

<sup>2</sup> – **Харківський національний університет міського господарства ім. О.М. Бекетова**

**вул. Революції, 12, 61002, Харків, Україна.**

*Сформульовано загальні вимоги до Smart Grid, що враховують зменшення втрат енергії в системі електропостачання в результаті використання нових напівпровідникових перетворювачів та енергоємких накопичувачів енергії, а також переходу від однофазної мережі споживачів до трифазної. На прикладі різних систем електропостачання оцінений орієнтовний корисний ефект від впровадження вказаних заходів. Бібл. 25, рис. 6, табл. 2.*

**Ключові слова:** *Smart Grid, система електропостачання, коефіцієнт корисної дії, накопичувач енергії, силовий активний фільтр*

### **Power electronics and energy development concept «Smart Grid»**

**E.I.Sokol<sup>1</sup>, G.G.Zhemerov<sup>1</sup>, D.V.Tugay<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> – **National Technical University “Kharkov Polytechnic Institute”**

**Frunze str., 21, 61002, Kharkov, Ukraine,**

<sup>2</sup> – **O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv**

**Revolution str., 12, 61002, Kharkov, Ukraine.**

*Formulate general requirements for Smart Grid, taking into account the reduction of energy losses in the energy supply system as a result of new semiconductor converters, energy storage and the transition from single-phase to three-phase consumers. On the example of the different power supply systems rated tentative positive effect of the introduction of these measures. References 25, figures 6, tables 2.*

**Key words:** *Smart Grid, power supply system, efficiency, energy storage, power active filter*

1. *Alekseev B.A.* Plans to increase the efficient use of electricity in Europe: the role of power electronics // *Energoexpert*. – 2009. – № 6. – P. 82-84.
2. *Varivodov V.N., Kovalenko U.A.* Intelligent Electric Systems // *Electrichestvo*. - 2011. - № 9. - P. 4-9.
3. *Domnin I.F., Zhemerov G.G., Ilyin O.V., Tugay D.V.* Compensation ripple instantaneous real power in circuits with resistive load // *Tehnichna elektrodynamika. Temat. VIP. " Problemi suchasmoi elektrotehnici"*. – 2006. – Part 6. - P. 36-41.
4. *Douglas J.* Demonstration projects on intellectual sktyam: Focus on the integration of distributed energy sources // *Energoexpert*. - 2011. - № 2. - S. 92-95.
5. *Zhemerov G.G., Domnin I.F., Ilina O.V., Tugay D.V.* Energy compensation phase of the current and compensate fluctuations of active and reactive power in a three phase power supply system // *Tehnichna elektrodynamika*. – 2007. – №. 1. – P. 52-57.
6. *Zhemerov G.G., Ilina N.A., Ilina O.V.* The relationship between the modulus of the instantaneous reactive power and efficiency of the electricity system // *Tehnichna elektrodynamika. "Problemi suchasmoi elektrotehnici"*. – 2008. – Part 4. – P. 31-46.
7. *Zhemerov G.G., Ilina N.A., Kovalchuk O.I., Sokol E.I.* Efficiency three-phase four-wire system to provide power supply with an asymmetric load // *Tehnichna elektrodynamika. "Silova elektronika i energoefektivnist"*. – 2010. – Part 1. – P. 22-31.
8. *Zhemerov G.G., Ilina O.V.* Energy Storage pulsation instantaneous active power // *Tehnichna elektrodynamika. "Silova elektronika i energoefektivnist"*. – 2007. – Part 3. - P. 23-28.
9. *Zhemerov G.G., Ilina O.V., Kovalchuk O.I.* Efficiency of the power supply system single-phase AC-voltage rectangular and sinusoidal // *Tehnichna elektrodynamika. "Silova elektronika i energoefektivnist"*. – 2010. – Part 2. – P. 7-15.
10. *Zhemerov G.G., Ilina O.V., Tugay D.V.* Energy-saving effect of active instantaneous power compensation // *Tehnichna elektrodynamika. "Silova elektronika i energoefektivnist"*. – 2006. – Part 4. – P. 22-27.
11. *Zhemerov G.G., Ilina N.A., Tugay D.V., Khold O.I.* Subway power supply systems by contemporary semiconductor converters and energy storage // *Elektrotehnika i elektromehanika*. - 2013. - № 1. - P. 41-49.
12. *Zhemerov G.G., Kolesnik V.U., Ilina O.V.* Relations for the transformation of generalized coordinates of the vectors of voltages and currents of three-phase power supply system. Reference manual, NTU "KhPI", Kharkov, 2009, – 40 P.
13. *Zhemerov G.G., Khold O.I.* Ways to modernize subway power supply systems // *Tehnichna elektrodynamika. "Silova elektronika i energoefektivnist"*. – 2012. – Part 1. – P. 27-35.
14. *Ilina O.V.* Energy-saving semiconductor converters for electric utilities supply // *Dissertation for the degree of PhD. Kharkiv, NTU "KPI". 2008. – 199 P.*

15. *Kobets B.B., Volkov I.O.* The innovative development of electric power based on the concept of Smart Grid. – M: IAC Energy, 2010. – 208 P.
16. Ranking countries in terms of energy consumption – information about the study. [Electronic resource] // Center for Humanitarian Technologies. URL: <http://gtmarket.ru/ratings/electric-power-consumption/info>.
17. *Romenko K.A.* Integration of information and operational technologies to create an efficient smart grid // *Energoexpert*. – 2011. – № 3. – P. 72-75.
18. *Stogniy B.S., Kirilenko O.V., Denysiuk S.P.* Intelligent electrical network power systems and their technological support // *Tekhnichna elektrodynamika*. – 2010. – № 6. – P. 44-50.
19. *Stogniy B.S., Kirilenko O.V., Prakhovnik A.V., Denysiuk S.P.* The evolution of smart grids and their prospects in Ukraine // *Tekhnichna elektrodynamika*. – 2012. – № 5. – P. 52-65.
20. *Shaqaryan J.G. et al.* Prospects of energy storage in the UNEG and UES of Russia // *Vesti v elektroenergetike*. – 2010. – № 4. – P. 16-22.
21. *Boyd J.* An internet –inspired electricity Grid // *IEEE Spectrum*, January. – 2013. – №1. – P. 12-13.
22. *Huang A., Heydt G., Dale S., Zheng J., Crow M.* Energy internet – future renewable electric energy delivery and management (FREEDM) systems // *IEEE Power Electronics Society News letter*. – 2008. – Fourth Quarter. – P. 8-9.
23. *Kovalenco K.* The Smart Grid // *IEEE The Institute*, Desember, – 2010. – P. 5.
24. Smart Grid – European Technology Platform for Electricity Networks of the Future. – European Commission, 2005. [Electronic resource] – Mode of access: <http://www.smartGrid.eu/>.
25. 2012 IEF Smart Grid World Forum. 6-7 Dec., 2012, Geneva, Switzerland.