

УМЕНЬШЕНИЕ ПОТЕРЬ ЭНЕРГИИ В КОММУНАЛЬНЫХ SMART GRID СЕТЯХ ЗА СЧЕТ ПЕРЕХОДА ОТ ОДНОФАЗНЫХ К ТРЕХФАЗНЫМ СИСТЕМАМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

Отримані аналітичні залежності показників ефективності переходу від однофазних до трифазних систем електропостачання – потужності втрат енергії та витрати міді.

Получены аналитические зависимости показателей эффективности перехода от однофазных к трехфазным системам электроснабжения – мощности потерь энергии и расхода меди.

ВВЕДЕНИЕ

Концепция построения систем электроснабжения коммунальных потребителей электроэнергии, зародившаяся в конце 19 века, практически не претерпела изменений до настоящего времени. Электроэнергия вырабатывается мощными генераторами трехфазного переменного напряжения с частотой 50 (60) Hz, установленными на электростанциях и объединенными в промышленную систему электроснабжения. Транспорт электроэнергии от электростанций до потребителей осуществляется по воздушно-кабельным линиям высокого напряжения. Вблизи потребителей электроэнергии устанавливаются трансформаторные подстанции, понижающие напряжение до среднего, $1\text{ kV} < U_S \leq 35\text{ kV}$, или низкого, $U_S \leq 1\text{ kV}$, уровня. В коммунальных сетях Украины понижающие трансформаторы имеют напряжения 10/0,38 kV или 6/0,38 kV. Особенностью коммунальных сетей электроснабжения является наличие нулевого вывода вторичной обмотки трансформатора и четырехпроводной линии, соединяющей обмотку трансформатора с нагрузкой. Нагрузки номинальной мощностью до 5-10 kW подключаются к одному из фазных выводов трансформатора и к нулевому проводу. Более мощные нагрузки подключаются к трем фазным проводникам [1, 2].

В последнее десятилетие интенсивно разрабатывается новая концепция построения системы электроснабжения (СЭ), получившая название "Smart Grid" [2-7]. Система электроснабжения будущего представляется как "Силовой Интернет" ("Power Internet"), в котором потребители энергии подключаются к сети по принципу "Plug and Play" и могут работать как в режиме потребления, так и в режиме генерации электроэнергии.

Успех практической реализации Smart Grid систем электроснабжения будет зависеть от степени уменьшения потерь электроэнергии при ее производстве, транспортировании и потреблении [5].

В настоящей статье рассматривается возможность уменьшения потерь электроэнергии в кабельных линиях, соединяющих трансформаторную подстанцию со зданиями, и в кабелях внутри зданий за счет перехода от однофазных систем питания к трехфазным.

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПЕРЕХОДА ОТ ОДНОФАЗНОЙ К ТРЕХФАЗНОЙ СЭ

Для оценки эффективности предложенного технического решения рассмотрим пример, приведенный в [8]. На рис. 1 представлены эквивалентные схемы из

[8] трехфазной симметричной (рис. 1,а) и однофазной (рис. 1,б) СЭ. В обеих схемах напряжения источников синусоидальные, нагрузки – активно-индуктивные и линейные.

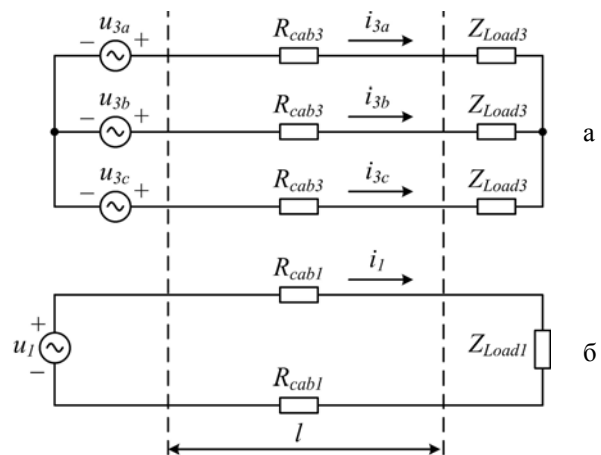


Рис. 1. Эквивалентная схема трехфазной (а) и однофазной (б) СЭ

Обозначения, принятые на рис. 1: l – длина кабеля между источником и нагрузкой; u_{3a}, u_{3b}, u_{3c} – фазные синусоидальные напряжения трехфазного источника; u_1 – синусоидальное напряжение однофазного источника; Z_{Load1}, Z_{Load3} – полное сопротивление нагрузки однофазной и трехфазной СЭ соответственно; R_{Cab1}, R_{Cab3} – сопротивление одной жилы кабеля однофазной и трехфазной СЭ соответственно.

Соотношения для напряжений и токов в приведенных СЭ.

Напряжение и ток однофазного источника:

$$u_1 = U_{m1} \cdot \sin \vartheta, \quad (1)$$

$$i_1 = I_{m1} \cdot \sin(\vartheta - \varphi), \quad (2)$$

где U_{m1} – амплитуда синусоидального напряжения источника; I_{m1} – амплитуда тока однофазного источника; φ – угол сдвига между напряжением и током источника; ϑ – безразмерное время:

$$\vartheta = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot t. \quad (3)$$

Напряжения и токи трехфазного источника:

$$\left. \begin{aligned} u_{3a} &= U_{m3} \cdot \sin \vartheta, \\ u_{3b} &= U_{m3} \cdot \sin\left(\vartheta - \frac{2\pi}{3}\right), \\ u_{3c} &= U_{m3} \cdot \sin\left(\vartheta - \frac{4\pi}{3}\right) \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

$$\left. \begin{aligned} i_{3a} &= I_{m3} \cdot \sin(\vartheta - \varphi), \\ i_{3b} &= I_{m3} \cdot \sin\left(\vartheta - \varphi - \frac{2\pi}{3}\right), \\ i_{3c} &= I_{m3} \cdot \sin\left(\vartheta - \varphi - \frac{4\pi}{3}\right), \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

где U_{m3} – амплитуда фазного напряжения трехфазного источника; I_{m3} – амплитуда тока трехфазного источника.

Сделаем допущение, что однофазная и трехфазная СЭ работают в установившемся режиме с одинаковыми углами сдвига φ и с одной и той же средней за период повторяемости активной мощностью нагрузки.

$$P_{Load1} = P_{Load3} = P_{Load}, \quad (6)$$

$$P_{Load1} = \frac{1}{2} \cdot U_{m1} \cdot I_{m1} \cdot \cos\varphi - R_{cab1} \cdot I_{m1}^2, \quad (7)$$

$$P_{Load3} = \frac{3}{2} \cdot U_{m3} \cdot I_{m3} \cdot \cos\varphi - 3 \cdot R_{cab3} \cdot \frac{I_{m3}^2}{2}. \quad (8)$$

Введем коэффициент отношения амплитуд фазных напряжений:

$$k_U = \frac{U_{m1}}{U_{m3}}. \quad (9)$$

Возможный диапазон изменения коэффициента:

$$1 \leq k_U \leq \sqrt{3}. \quad (10)$$

Принимаем, что длины кабелей, l , и плотность тока в кабелях, γ , в однофазной и трехфазной СЭ одинаковы.

Сопоставим при принятых условиях потери энергии и расход меди в этих СЭ.

Поскольку величина мощности потерь для обеих СЭ является величиной изначально неизвестной, предположим, что она составляет от 0 до 10 % от соответствующей мощности сети:

$$\begin{aligned} \Delta P_{cab1} &= R_{cab1} \cdot I_{m1}^2 = p_{1*} \cdot P_{S1} = \\ &= p_{1*} \cdot \frac{1}{2} \cdot U_{m1} \cdot I_{m1} \cdot \cos\varphi, \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \Delta P_{cab3} &= 3 \cdot R_{cab3} \cdot \frac{I_{m3}^2}{2} = p_{3*} \cdot P_{S3} = \\ &= p_{3*} \cdot \frac{3}{2} \cdot U_{m3} \cdot I_{m3} \cdot \cos\varphi, \end{aligned} \quad (12)$$

где

$$p_{1*} = 0 \dots 0,1; \quad p_{3*} = 0 \dots 0,1. \quad (13)$$

Из (6) – (13) получим:

$$I_{m3} = \frac{k_U \cdot I_{m1}}{3} \cdot \frac{(1 - p_{1*})}{(1 - p_{3*})}. \quad (14)$$

Обозначим:

$$k_{\Delta P} = \frac{(1 - p_{1*})}{(1 - p_{3*})}. \quad (15)$$

В соответствии с (13) находим: $k_{\Delta P} = 0,9 \dots 1,111$.

Окончательно получим:

$$I_{m3} = \frac{k_U \cdot k_{\Delta P} \cdot I_{m1}}{3}. \quad (16)$$

Площадь поперечного сечения кабелей:

$$S_1 = \frac{I_{m1}}{\sqrt{2} \cdot \gamma}, \quad (17)$$

$$S_3 = \frac{I_{m3}}{\sqrt{2} \cdot \gamma}. \quad (18)$$

Из (16) – (18):

$$\frac{S_1}{S_3} = \frac{3}{k_U \cdot k_{\Delta P}}. \quad (19)$$

С учетом количества жил определим расход меди:

$$\Delta M_1 = 2 \cdot S_1 \cdot l; \quad (20)$$

- в трехфазной СЭ:

$$\Delta M_3 = 3 \cdot S_3 \cdot l. \quad (21)$$

Из (19) – (21) получим:

$$\frac{\Delta M_3}{\Delta M_1} = \frac{k_U \cdot k_{\Delta P}}{2}. \quad (22)$$

Омические сопротивления одной жилы кабеля:

$$R_{cab1} = \rho \cdot \frac{l}{S_1}, \quad (23)$$

$$R_{cab3} = \rho \cdot \frac{l}{S_3}, \quad (24)$$

где ρ – удельное электрическое сопротивление проводникового материала.

Из (23), (24), (17), (18) получим:

$$R_{cab1} = \frac{\rho \cdot l \cdot \sqrt{2} \cdot \gamma}{I_{m1}}; \quad (25)$$

$$R_{cab3} = \frac{\rho \cdot l \cdot 3 \cdot \sqrt{2} \cdot \gamma}{k_U \cdot k_{\Delta P} \cdot I_{m1}}. \quad (26)$$

Мощность потерь энергии в кабелях определим с учетом количества жил из (7), (8), (25), (26):

$$\Delta P_{cab1} = \sqrt{2} \cdot \rho \cdot l \cdot \gamma \cdot I_{m1}; \quad (27)$$

$$\Delta P_{cab3} = \frac{\sqrt{2} \cdot \rho \cdot l \cdot \gamma \cdot I_{m1} \cdot k_U \cdot k_{\Delta P}}{2}. \quad (28)$$

Из (27) и (28):

$$\frac{\Delta P_{cab3}}{\Delta P_{cab1}} = \frac{k_U \cdot k_{\Delta P}}{2}. \quad (29)$$

На рис. 2 приведены зависимости, иллюстрирующие эффективность перехода от однофазной к трехфазной СЭ при различных значениях коэффициента $k_{\Delta P}$. Из полученных аналитических выражений видно, что при $k_{\Delta P} = k_U = 1$ потери энергии и расход меди уменьшаются в два раза.

Для определения порядка относительных потерь энергии в рассматриваемых СЭ выразим мощности потерь энергии в кабелях (11) и (12) с учетом (17), (18), (23) и (24). Запишем:

$$\Delta P_{cab1} = \sqrt{2} \cdot \rho \cdot l \cdot \gamma \cdot I_{m1}; \quad (30)$$

$$\Delta P_{cab3} = \frac{3}{\sqrt{2}} \cdot \rho \cdot l \cdot \gamma \cdot I_{m3}. \quad (31)$$

Разделим обе части (30) и (31) на P_{Load} , пренебрегая потерями в кабелях. В результате получим:

$$\frac{\Delta P_{cab1}}{P_{Load}} = \Delta P_{cab1*} = 2\sqrt{2} \cdot \frac{\rho \cdot l \cdot \gamma}{U_{m1}}; \quad (32)$$

$$\frac{\Delta P_{cab3}}{P_{Load}} = \Delta P_{cab3*} = \sqrt{2} \cdot \frac{\rho \cdot l \cdot \gamma}{U_{m3}}. \quad (33)$$

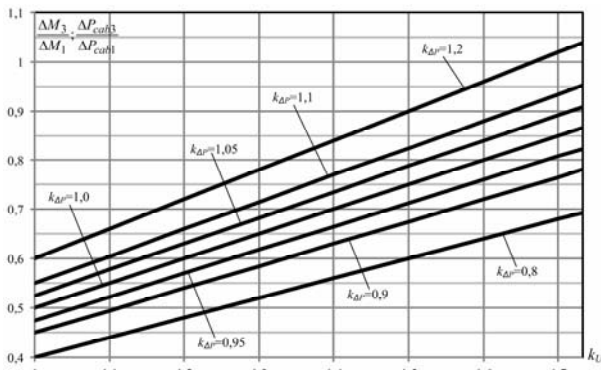


Рис. 2. Кривые эффективности перехода от однофазной к трехфазной СЭ

Зададимся начальными данными для определения порядка относительных потерь энергии в рассматриваемых СЭ и анализа возможного увеличения коэффициента полезного действия (КПД) коммунальных SMART GRID сетей:

- амплитуда фазного напряжения источников $U_{m1}=U_{m3}=311\text{ V}$;
- удельное электрическое сопротивление меди $\rho=0,018\text{ (}\Omega\cdot\text{mm}^2/\text{m}\text{)}$.

Рассчитаем удельные мощности потерь в проводниках различной длины для однофазной и трехфазной СЭ при двух значениях удельной плотности тока γ согласно (32) и (33), сводим полученные результаты в табл. 1.

Таблица 1

Удельные мощности потерь в проводниках

$l, \text{ m}$	$\gamma=5\text{ A/mm}^2$		$\gamma=10\text{ A/mm}^2$	
	ΔP_{cab1}^*	ΔP_{cab3}^*	ΔP_{cab1}^*	ΔP_{cab3}^*
10	0,00818	0,00409	0,01636	0,00818
20	0,01636	0,00818	0,03273	0,01636
30	0,02455	0,01227	0,04909	0,02455
40	0,03273	0,01636	0,06545	0,03273
50	0,04091	0,02045	0,08182	0,04091
60	0,04909	0,02455	0,09818	0,04909
70	0,05727	0,02864	0,11455	0,05727
80	0,06545	0,03273	0,13091	0,06545
90	0,07364	0,03682	0,14727	0,07364
100	0,08182	0,04091	0,16364	0,08182

Данные из табл. 1 демонстрируют, что в зависимости от разводки проводки и электрической нагрузки проводников (кабелей) переход от однофазной к трехфазной СЭ в коммунальных Smart Grid сетях позволят сэкономить не менее 1 % от потребляемой энергии.

При этом снижение потерь энергии и расхода меди при переходе от однофазной к трехфазной СЭ сопряжено с необходимостью разработки новых конструкций вилок и розеток, позволяющих подключаться как к трехфазному напряжению, так и к однофазному; переходом к трехфазным источникам питания и трехфазным двигателям в электронных и бытовых электроприборах; заменой однофазных осветительных приборов трехфазными.

МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

С целью подтверждения вышеизложенного материала выполнено моделирование однофазной и

трехфазной СЭ в пакете MATLAB/Simulink. Модели выполнены согласно эквивалентным схемам, представленным на рис. 1.

В качестве исходных данных для расчетов и моделирования были приняты:

- мощность нагрузки $P_{Load} = 5\text{ kW}$;
- амплитуда фазного напряжения источника $U_{m1}=311\text{ V}$;
- частота сети переменного тока $f_s=50\text{ Hz}$;
- удельная плотность тока γ не превышает 5 A/mm^2 .

Схема эксперимента для однофазной СЭ представлена на рис. 3.

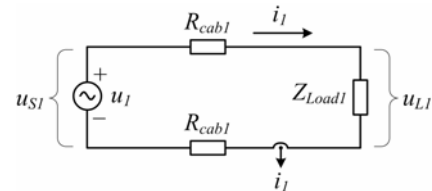


Рис. 3. Схема эксперимента для однофазной СЭ

Виртуальный эксперимент проводился для нескольких значений длины проводников l , однако независимо от их длины мощность нагрузки была постоянной и равнялась P_{Load} . В качестве проводников выбраны медные провода с удельным электрическим сопротивлением $\rho=0,018\text{ (}\Omega\cdot\text{mm}^2/\text{m}\text{)}$. Сопротивление проводящей линии рассчитываем согласно (23), а площадь поперечного сечения определяем из (17). Также выполняем расчет расхода меди согласно (20).

На рис. 4 приведена MATLAB-модель экспериментальной схемы по рис. 3, а в табл. 2 – результаты эксперимента.

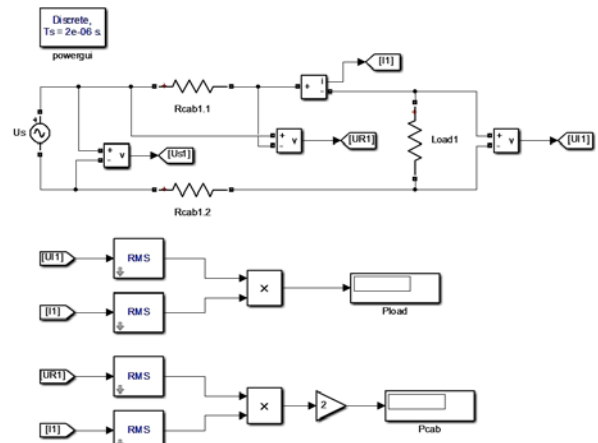


Рис. 4. MATLAB-модель экспериментальной схемы для однофазной СЭ

Аналогично проведем моделирование трехфазной СЭ. Схема эксперимента представлена на рис. 5.

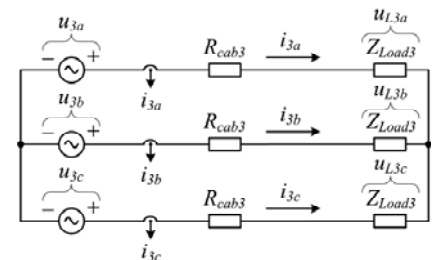


Рис. 5. Схема эксперимента для трехфазной СЭ

Таблица 2

Результаты эксперимента для однофазной СЭ

Длина проводников l, m	Суммарное сопротивление проводников $\Sigma R_{cab}, \Omega$	Суммарная мощность потерь в проводниках $\Sigma P_{cab}, W$	Расход меди $\Delta M_1 \cdot 10^3, m^3$
10	0,0792	40,9	0,091
20	0,1584	81,8	0,182
30	0,2376	122,7	0,273
40	0,3168	163,6	0,364
50	0,3960	204,5	0,455
60	0,4752	245,4	0,545
70	0,5544	286,4	0,636
80	0,6336	327,3	0,727
90	0,7128	368,2	0,818
100	0,7920	409,1	0,909

MATLAB-модель экспериментальной схемы приведена на рис. 6, а результаты эксперимента – в табл. 3.

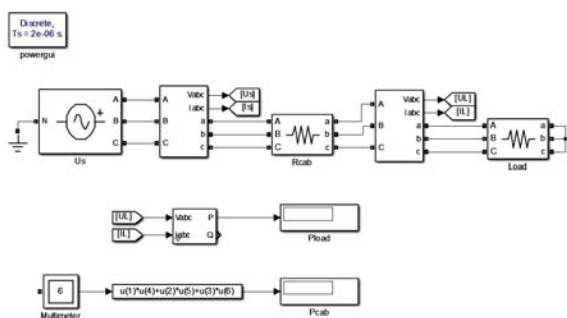


Рис. 6. MATLAB-модель экспериментальной схемы для трехфазной СЭ

Таблица 3

Результаты эксперимента для трехфазной СЭ

Длина проводников l, m	Суммарное сопротивление проводников $\Sigma R_{cab}, \Omega$	Суммарная мощность потерь в проводниках $\Sigma P_{cab}, W$	Расход меди $\Delta M_1 \cdot 10^3, m^3$
10	0,3564	20,5	0,045
20	0,7128	40,9	0,091
30	1,0692	61,4	0,136
40	1,4256	81,8	0,182
50	1,7820	102,3	0,227
60	2,1384	122,7	0,273
70	2,4948	143,2	0,318
80	2,8512	163,6	0,364
90	3,2076	184,1	0,409
100	3,5640	204,5	0,455

На рис. 7 и 8 приведены диаграммы сравнения мощности потерь энергии в проводниках и расхода меди в однофазной и трехфазной СЭ.

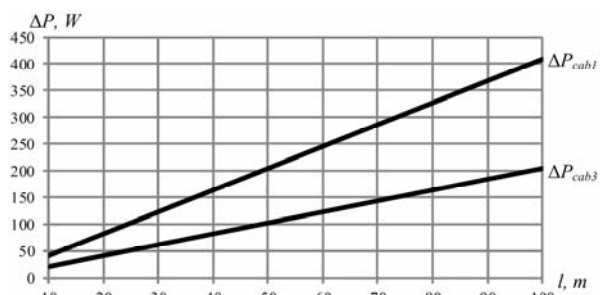


Рис. 7. Мощность потерь энергии в однофазной и трехфазной СЭ при различной длине фазных проводников

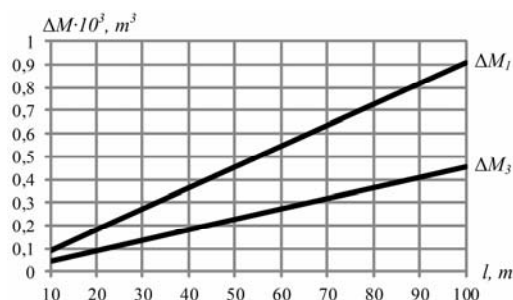


Рис. 8. Расход меди в однофазной и трехфазной СЭ при различной длине фазных проводников

Для уменьшения вероятности попадания под опасное для здоровья человека напряжение возможно уменьшение амплитуды фазного напряжения источников трехфазного напряжения относительно традиционного значения 311 В, т.е. коэффициента k_U .

Рассмотрим влияние изменения коэффициента k_U на мощность потерь энергии в проводниках и расход меди в трехфазной СЭ относительно однофазной (табл. 2).

Алгоритм эксперимента:

1. Задаемся девятью значениями коэффициента k_U и длиной проводников $l = 50 m$.
2. Рассчитываем согласно (23) и (24) значения R_{cab3} при всех значениях коэффициента k_U .
3. Для каждого значения коэффициента k_U запускаем схемы, представленные на рис. 4 и 6, и считываем значения мощности потерь энергии в проводниках.
4. Рассчитываем расход меди согласно (21).

Таблица 4

Влияние коэффициента k_U на мощность потерь энергии в проводниках и расход меди при длине проводников $l=50 m$

Коэффициент k_U	Суммарное сопротивление проводников $\Sigma R_{cab}, \Omega$	Суммарная мощность потерь в проводниках $\Sigma P_{cab}, W$	Расход меди $\Delta M_1 \cdot 10^3, m^3$
1	1,782	102,27	0,227
1,1	1,620	112,50	0,250
1,2	1,485	122,73	0,273
1,3	1,371	132,95	0,295
1,4	1,273	143,18	0,318
1,5	1,188	153,41	0,341
1,6	1,114	163,64	0,364
1,7	1,048	173,86	0,386
1,732 ($\sqrt{3}$)	1,029	177,18	0,394

Кривая на рис. 9 демонстрирует, что даже при уменьшении амплитуды фазного напряжения трех-

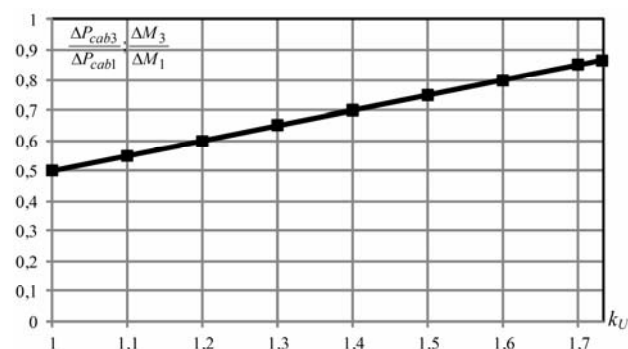


Рис. 9. Экспериментальные результаты перехода от однофазной к трехфазной СЭ

фазных источников напряжения до 180 В мощность потерь энергии в проводниках и расход меди более чем на 10 % меньше по сравнению с СЭ с однофазным источником напряжения с амплитудой 311 В.

ВЫВОДЫ

1. Переход в коммунальных сетях от однофазных к трехфазным СЭ позволяет уменьшить потери энергии и расход проводниковых материалов. Эффективность зависит от величины мощности потерь и отношения амплитуд фазных напряжений обеих СЭ. Так для равных значений этих параметров потери энергии и расход проводникового материала уменьшается в два раза.

2. Эффективность перехода от однофазных к трехфазным СЭ подтверждена экспериментальным путем с помощью виртуальных моделей, разработанных в пакете MATLAB/Simulink. Увеличение длины проводников приводит к пропорциональному увеличению потерь энергии и расхода меди.

3. Уменьшение амплитуды фазного напряжения трехфазной СЭ относительно традиционных 311 В приводит к увеличению потерь энергии и расхода меди. Даже при уменьшении напряжения в $\sqrt{3}$ раз переход к трехфазным СЭ позволит экономить более 10 % проводникового материала.

4. При переходе от однофазных к трехфазным коммунальным Smart Grid сетям можно ожидать экономии более 1 % от потребляемой энергии, в зависимости от длины проводников (кабелей) и их электрической нагрузки.

5. Полученные результаты могут быть использованы при проектировании и модернизации коммунальных Smart Grid сетей для малых промышленных предприятий, жилых и коммерческих зданий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Short T.A. Electric power distribution equipment and system. – Boca Raton, Florida, USA: CRC Press, 2006. – 318 p.
2. Smart Grids. Opportunities, Developments and Trends [Edited by A. Shawkat Ali]. – London: Springer-Verlag, 2013. – 230 p.
3. Алексеев Б.А. Планы повышения эффективного использования электроэнергии в Европе: роль силовой электроники // Энергоэксперт. – 2009. – №6. – С. 82-84.
4. Стогний 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.
5. Сокол Е.И., Жемеров Г.Г., Тугай Д.В. Силовая электроника и концепция развития энергетики "Smart Grid" // Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит. – 2013. – Спецвыпуск. т.1, №8 (114). – С. 7-16.

6. Boyd J. An internet-inspired electricity Grid // IEEE Spectrum. – 2013. – №1. – pp. 12-13.
7. Huang A., Heydt G., Dall S., Zheng J., Crow M. Energy internet – future renewable electric energy delivery and management (FREEDM) systems // IEEE Power Society News letter. – 2008. – 4th Quarter. – pp. 8-9.
8. Жемеров Г.Г., Ильина О.В., Ковальчук О.И. КПД систем электроснабжения однофазного переменного напряжения прямоугольной и синусоидальной формы // Технічна електродинаміка. Темат. вип. "Силова електроніка та енергоефективність". – 2010. – Ч.2. – С. 7-15.

REFERENCES: 1. Short T.A. *Electric power distribution equipment and system*. Boca Raton, Florida, USA, CRC Press Publ., 2006. 318 p. 2. *Smart Grids. Opportunities, Developments and Trends* [Edited by A. Shawkat Ali]. London, Springer-Verlag Publ., 2013. 230 p. 3. Alekseev B.A. Plans to increase the efficient use of electricity in Europe: the role of power electronics. *Energoexpert – Energoexpert*, 2009, no.6, pp. 82-84. 4. Stogniy B.S., Kirilenko O.V., Prakhovnik A.V., Denysiuk S.P. The evolution of smart grids and their prospects in Ukraine. *Tekhnichna elektrodynamika – Technical electrodyamics*, 2012, no.5, pp. 52-65. 5. Sokol E.I., Zhemerov G.G., Tugay D.V. Power electronics and energy development concept "Smart Grid". *Energosberezhenie. Energetika. Energoaudit – Energy saving. Power engineering. Energy audit*, Special Issue, 2013, vol.1, no.8(114), pp. 7-16. 6. Boyd J. An internet-inspired electricity Grid. *IEEE Spectrum*, 2013, no.1, pp. 12-13. 7. Huang A., Heydt G., Dall S., Zheng J., Crow M. Energy internet – future renewable electric energy delivery and management (FREEDM) systems. *IEEE Power Society News letter*, 2008, 4th Quarter, pp. 8-9. 8. Zhemerov G.G., Il'ina O.V., Kovalchuk O.I. Efficiency of the power supply system single-phase AC-voltage rectangular and sinusoidal. *Tekhnichna elektrodynamika. Tem. vypusk "Silova elektronika i energoefektivnist" – Technical electrodyamics. Special Issue "Power electronics & energy efficiency"*, 2010, Part 2, pp. 7-15.

Поступила (received) 14.07.2014

Жемеров Георгий Георгиевич¹, д.т.н., проф.,
Лобач Игорь Олегович¹,

¹Национальный технический университет
"Харьковский политехнический институт",
61002, Харьков, ул. Фрунзе 21,
тел/phone +38 057 7076312,
e-mail: zhemerov@gmail.com, i.o.lobach@yandex.ua

G.G. Zhemerov¹, I.O. Lobach¹
¹National Technical University "Kharkov Polytechnic Institute"
21, Frunze Str., Kharkiv, 61002, Ukraine

Energy loss reduction in Smart Grid utilities for account of transition from single-phase to three-phase power distribution systems.

Analytical dependences of such efficiency indices as energy loss power and copper consumption under transition from single-phase power distribution systems to three-phase ones are obtained.

Key words – energy loss, copper consumption, power distribution system, Smart Grid.