

УДК 621.311.243

## МЕТОДИКА РОЗРАХУНКУ ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНИХ ПОКАЗНИКІВ РОБОТИ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ З ФОТОЕЛЕКТРИЧНИМИ ЕЛЕМЕНТАМИ

ХАЦКЕВИЧ Ю. В.<sup>1\*</sup>, к.т.н., доц.,  
ЛУЦЕНКО І. М.<sup>2</sup>, к.т.н., доц.,  
АЛЕКСАНДРОВ М. В.<sup>3</sup>, студ.

<sup>1\*</sup> Кафедра систем електропостачання, Державний вищий навчальний заклад «Національний гірничий університет», пр. Дмитра Яворницького, 19, м. Дніпро, Україна, тел. +380952251010, e-mail: yuliakhatskevych@gmail.com, ORCID ID: 0000-0003-0593-2184

<sup>2</sup> Кафедра систем електропостачання, Державний вищий навчальний заклад «Національний гірничий університет», пр. Дмитра Яворницького, 19, м. Дніпро, Україна, тел. +380950089392 lutsenkoin@gmail.com, ORCID ID: 0000-0001-6406-2364

<sup>3</sup> Кафедра систем електропостачання, Державний вищий навчальний заклад «Національний гірничий університет», пр. Дмитра Яворницького, 19, м. Дніпро, Україна, тел. +380957817404 mrmykola95@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-5026-3496

**Анотація. Мета.** У роботі виконано дослідження техніко-економічних характеристик структур реалізації гібридної системи електропостачання побутового споживача з використанням відновлюваних джерел енергії – фотоелектричних елементів. Метою даної роботи є розробка рекомендацій щодо створення такої методики з обґрунтуванням та комплексним урахуванням наведених вище факторів. Її застосування дозволить визначати оптимальну структуру системи електропостачання з ВДЕ. **Методика.** Розроблено та запропоновано методику розрахунку та вибору комбінованої системи електропостачання, що враховує існуючу систему оплати за електроенергію в комунально-побутовому секторі, режими електроспоживання від декількох джерел енергії, вартість спорудження та строки окупності проектних рішень. Застосування цієї методики дозволить визначити та рекомендувати оптимальну структуру системи електропостачання для конкретних умов окремого споживача. **Результати.** В результаті виконаних розрахунків за запропонованою методикою отримано техніко-економічні характеристики системи електропостачання з фотоелектричними елементами, що відрізняються від існуючих комплексним урахуванням наявних тарифів на електроенергію побутових споживачів, режими роботи елементів системи та дозволяють обрати оптимальну структуру системи за критерієм мінімального строку окупності. **Наукова новизна.** Встановлено залежності строків окупності різних структур систем електропостачання від обсягів електроспоживання споживача а також показано, що немає конкретної залежності між строком окупності та потужністю окремих елементів системи. Це спричиняє необхідність проведення аналізу показників для можливих типів структури та режимів роботи системи для умов кожного споживача індивідуально. **Практична значимість.** Існуюча система тарифікації оплати за ЕЕ електропостачання об'єкта робить недоцільним забезпечення повної енергонезалежності об'єкта від централізованої мережі за рахунок 100%-ого покриття споживання фотоелектричними елементами та є найменш вигідним варіантом, строки окупності якого у декілька разів перевищують строки окупності системи з комбінованим електропостачанням.

**Ключові слова:** фотоелектричні елементи, структура системи електропостачання, комунально-побутові споживачі електроенергії, тариф, режим генерації електроенергії

## МЕТОДИКА РАСЧЕТА ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ РАБОТЫ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ С ФОТОЭЛЕКТРИЧНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ

ХАЦКЕВИЧ Ю. В.<sup>1\*</sup>, к.т.н., доц.,  
ЛУЦЕНКО И. Н.<sup>2</sup>, к.т.н., доц.,  
АЛЕКСАНДРОВ Н. В.<sup>3</sup>, студ.

<sup>1\*</sup> Кафедра систем электроснабжения, Государственное высшее учебное заведение «Национальный горный университет», пр. Дмитрия Яворницкого, 19, г. Днепр, Украина, тел. +380952251010, e-mail: yuliakhatskevych@gmail.com, ORCID ID: 0000-0003-0593-2184

<sup>2</sup> Кафедра систем электроснабжения, Государственное высшее учебное заведение «Национальный горный университет», пр. Дмитрия Яворницкого, 19, г. Днепр, Украина, тел. +380950089392 lutsenkoin@gmail.com, ORCID ID: 0000-0001-6406-2364

<sup>3</sup> Кафедра систем электроснабжения, Государственное высшее учебное заведение «Национальный горный университет», пр. Дмитрия Яворницкого, 19, г. Днепр, Украина, тел. +380957817404 mrmynkola95@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-5026-3496

**Аннотация. Цель.** В работе выполнено исследование технико-экономических характеристик структур реализации гибридной системы электроснабжения бытового потребителя с использованием возобновляемых источников энергии - фотоэлектрических элементов. **Методика.** Разработана и предложена методика расчета и выбора комбинированной системы электроснабжения, учитывающая существующую систему оплаты за электроэнергию в коммунально-бытовом секторе, режимы электропотребления от нескольких источников энергии, стоимость строительства и сроки окупаемости проектных решений. Применение этой методики позволит определить и рекомендовать оптимальную структуру системы электроснабжения для конкретных условий отдельного потребителя. **Результаты.** В результате выполненных расчетов по предложенной методике получено технико-экономические характеристики системы электроснабжения с фотоэлектрическими элементами, отличающиеся от существующих комплексным учетом существующих тарифов на электроэнергию бытовых потребителей, режимы работы элементов системы и позволяют выбрать оптимальную структуру системы по критерию минимального срока окупаемости. **Научная новизна.** Установлены зависимости сроков окупаемости различных структур систем электроснабжения от объемов электропотребления потребителя а также показано, что нет конкретной зависимости между сроком окупаемости и мощностью отдельных элементов системы. Это вызывает необходимость проведения анализа показателей для возможных типов структуры и режимов работы системы для условий каждого потребителя индивидуально. **Практическая значимость.** Существующая система тарификации оплаты за электроснабжении объекта делает нецелесообразным обеспечения его полной энергонезависимости от централизованной сети за счет 100%-ного покрытия потребления фотоэлектрическими элементами и является наименее выгодным вариантом, сроки окупаемости которого в несколько раз превышают сроки окупаемости системы с комбинированным электроснабжением.

*Ключевые слова:* фотоэлектрические элементы, структура системы электроснабжения, коммунально-бытовые потребители электроэнергии, тариф, режим генерации электроэнергии

## METHOD OF TECHNICAL AND ECONOMIC OPERATION PARAMETERS CALCULATION FOR POWER SUPPLY SYSTEM WITH PHOTOVOLTAIC CELLS

Khatskevych Yu. V.<sup>1\*</sup>, *Cand. Sc. (Tech.), Ass. Prof.*,  
Lutsenko I. M.<sup>2</sup>, *Cand. Sc. (Tech.), Ass. Prof.*,  
Aleksandrov M. V.<sup>3</sup>, *stud.*

<sup>1\*</sup> Department of power supply system, State Higher Educational Establishment "National Mining University", D. Yavornytskogo prospect, 19, Dnipro, Ukraine, phon. +380952251010, e-mail: yuliakhatskevych@gmail.com, ORCID ID: 0000-0003-0593-2184

<sup>2</sup> Department of power supply system, State Higher Educational Establishment "National Mining University", D. Yavornytskogo prospect, 19, Dnipro, Ukraine, phon. +380950089392 lutsenkoin@gmail.com, ORCID ID: 0000-0001-6406-2364

<sup>3</sup> Department of power supply system, State Higher Educational Establishment "National Mining University", D. Yavornytskogo prospect, 19, Dnipro, Ukraine, phon. +380957817404 mrmynkola95@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-5026-3496

**Abstract. Purpose.** This paper presents the technical and economic characteristics research of the hybrid power supply system structures implementation for domestic consumers using renewable energy - photovoltaic cells. **Methodology.** The proposed method for calculating and selecting of the hybrid power supply system takes into account payment for electricity in the domestic sector and modes of consumption from more than one source of energy, capital costs and payback periods of solutions by reducing fees for centralized power supply is developed and proposed. The use of this methodology will allow identifying and recommending the optimal structure of the power supply system for the specific conditions of the individual consumer. **Findings.** As a result of the calculations, obtained by the proposed method, technical and economic characteristics of the power system with photovoltaic cells are given. They differ from the existing by complex taking into account current tariffs on electricity for residential consumers, operation modes of the system elements and allow selection of the optimal structure of the system that provides minimum payback period criterion. **Originality.** The dependences of the payback period for the various power supply system structures on the amount of electricity consumption show that there is no specific relationship between the payback period and the power of system components. This fact cause the necessity of analyze of possible structures and modes of operation for conditions of each consumer individually. **Practical value.** The existing tariff system of electricity consumption payment makes the ensuring of its full energy independence from a centralized network due to the 100% consumption coverage by photovoltaic cells impractical and is the least favorable structure due to the payback period, which is several times higher than the payback period of the system with combined power supply.

*Keywords:* photovoltaic cells, power supply system structure, domestic electricity consumers, tariff, electricity generation mode

## Введення

Однією з головних задач електроенергетичної галузі нашої держави є підвищення ефективності використання енергоресурсів [4]. Застосування нетрадиційних та відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) останнім часом є одним із важливих критеріїв сталого розвитку світової електроенергетики, підвищення надійності функціонування систем електропостачання [13], зменшення негативного впливу на довкілля та ін. [9]. Здійснюється пошук нових і вдосконалення існуючих технологій енергозабезпечення з використанням ВДЕ, підвищення їх економічної ефективності та розширення сфер впровадження в системах електропостачання Smart Grid [10, 12]. Головними чинниками зростання попиту на ВДЕ є високі темпи вичерпання запасів органічних видів палива, постійне зростання їх вартості, недосконалість та низька ефективність технологій використання. В Україні існує потенціал щодо розширення напрямків використання ВДЕ. При цьому, проблема низької ефективності використання традиційних джерел енергії в Україні є більш гострою, ніж у світі чи країнах ЄС. Причинами цього є застарілі технології, вичерпання ресурсу використання основних фондів генерації електроенергії і тепла, що додатково призводить до значних обсягів шкідливих викидів у навколишнє середовище і погіршення екологічної ситуації в цілому. Значні втрати при транспортуванні, розподілі та використанні електроенергії і тепла, а також монопольна залежність від імпорту енергоносіїв ще більш ускладнюють ситуацію на енергетичних ринках країни.

Географічне розташування нашої держави сприяє застосуванню технологій сонячної енергетики. Середньорічний потенціал сонячної енергії в Україні 1235 кВт·год/м.кв., що є досить високим, і набагато вище, ніж, наприклад, у Німеччині – 1000 кВт·год/м.кв. або у Польщі – 1080 кВт·год/м.кв. Отже, ми маємо можливості ефективного використання фотоелектричного обладнання на території України [6-7].

Через значні капітальні вкладення та тривалі строки окупності розповсюдження сонячних технологій в Україні відбувається з низькими темпами як на глобальному рівні (будівництво сонячних електростанцій), так і на локальному (системи електропостачання комунально-побутових об'єктів від сонячних фотоелектричних модулів).

Дану проблему пропонується вирішувати шляхом оптимізації структури системи електропостачання з відновлюваними джерелами енергії. Під оптимізацією структури слід розуміти обґрунтований вибір технічних параметрів джерел, що входять до комбінованої системи електропостачання. В якості критеріїв оптимізації

пропонується використовувати строк окупності системи або економічний ефект при впровадженні децентралізованого джерела.

## Мета

Метою даної роботи є розробка рекомендацій щодо створення такої методики з обґрунтуванням та комплексним урахуванням наведених вище факторів. Її застосування дозволить визначати оптимальну структуру системи електропостачання з ВДЕ.

## Методика

На сьогоднішній день не існує методики, яка дозволяє розрахувати техніко-економічні показники роботи системи електропостачання з сонячними фотоелектричними елементами для комунально-побутових споживачів України та одночасно надає можливість аналізу різних режимів роботи системи, у тому числі при електропостачанні від декількох джерел енергії з урахуванням існуючих тарифів оплати за електроенергію, та дисконтування фінансових потоків при розрахунку строку окупності. Технічні аспекти застосування гібридних систем електропостачання для побутових споживачів розглянуто у [1]. Економічне прогнозування доцільності впровадження таких систем з орієнтовним урахуванням зміни тарифів на електричну енергію та вартості сонячних панелей виконано у роботі [2], проте доцільно більш широко пов'язати існуючі тарифи з режимами електроспоживання та рекомендованою структурою системи електропостачання з використанням ВДЕ. Важливим чинником, який необхідно враховувати, є державна політика у розвитку технологій із застосуванням відновлюваних джерел та стимулювання вкладення коштів у такі проекти з чистої енергетики [11].

Для зменшення вартості системи електропостачання (СЕР) та підвищення надійності її роботи пропонується розглянути можливість використання декількох джерел енергії, тобто комбіновану (гібридну) систему, представлену на рис. 1.

Система електропостачання включає наступні основні компоненти: централізовану мережу електропостачання, сонячні фотоелементи, акумуляторні батареї та гібридний інвертор.



Рис. 1. Принципова схема структури гібридної СЕР / Principal scheme of the hybrid power supply system structure

Електропостачання комунально-побутового об'єкта з використанням комбінованої СЕП (ВДЕ та централізована мережа) надає можливість суттєво зменшити капітальні вкладення на реалізацію її структури за рахунок зменшення встановленої потужності елементів системи з фотоелектричними модулями. Таке рішення щодо гібридного енергозабезпечення об'єкта, в свою чергу, дозволяє більш ефективно використовувати відновлювальні джерела та знизити споживання електроенергії від централізованої мережі, а в деяких випадках і зовсім відмовитися від неї [3, 5].

**Методика визначення техніко-економічних показників системи електропостачання з фотоелектричними елементами в комунально-побутовому господарстві з урахуванням діючих тарифів на електроенергію та графіків електричних навантажень (ГЕН).** Потужність системи електропостачання та її окремих елементів залежить, в першу чергу, від потреби споживача в певному обсязі електроенергії.

Згідно з [8] типовий добовий ГЕН комунально-побутового споживача за робочий день має вигляд, представлений на рис. 2.

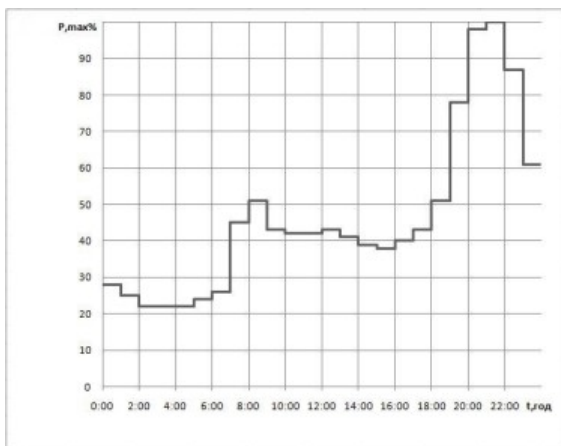


Рис. 2. Добовий ГЕН-прототип комунально-побутового споживача / Prototype graph of daily electric load for a domestic consumer

**Визначення потужності та кількості фотоелектричних елементів.**

Обсяг спожитої електроенергії в певну зону доби при нерівномірному ГЕН визначається як

$$W_j = P_{\max} \cdot \Delta t \cdot P_{\%, t, j} / 100, \text{ кВт}\cdot\text{год} \quad (1)$$

де  $j$  – зона доби (пік, напівпік, ніч);

$P_{\max}$  – максимальне значення електричного

навантаження споживача за добу, кВт;

$\Delta t$  – інтервал осереднення ГЕН, год;

$P_{\%, t, j}$  – потужність електроспоживання в  $j$ -й період часу у відсотковому вираженні відносно ГЕН-прототипу, %.

Визначаємо, який відсоток ЕЕ споживається у певну зону доби відповідно до графіка навантаження:

$$W_{j\%} = \frac{W_j}{W_{\Sigma\phi}} \cdot 100\% \quad (2)$$

$W_{\Sigma\phi}$  – фактичний обсяг споживання електричної енергії, разом по всім зонам доби, кВт·год.

Наприклад, для тризонного тарифу:

$$W_{\text{нік}\%} = \frac{W_{\text{нік}}}{W_{\Sigma\phi}} \cdot 100\% = 20,39 \quad \% \quad (3)$$

$$W_{\text{нп}\%} = \frac{W_{\text{нп}}}{W_{\Sigma\phi}} \cdot 100\% = 49,42 \quad \% \quad (4)$$

$$W_{\text{ніч}\%} = \frac{W_{\text{ніч}}}{W_{\Sigma\phi}} \cdot 100\% = 30,20 \quad \% \quad (5)$$

Згідно з режимом роботи системи визначаємо обсяг ЕЕ, споживаний об'єктом від централізованої мережі:

$$W_{\text{Мнік}} = \frac{W_{\text{нік}} - W_{\text{СБ,нік}} + W_{\text{АБснік}}^{\text{М}} - W_{\text{АБзнік}}}{E_{\Sigma\phi}} \quad (6)$$

$$W_{\text{Мнп}} = \frac{W_{\text{нп}} - W_{\text{СБ,нп}} + W_{\text{АБснп}}^{\text{М}} - W_{\text{АБзнп}}}{E_{\Sigma\phi}} \quad (7)$$

$$W_{\text{Мніч}} = \frac{W_{\text{ніч}} - W_{\text{СБ,ніч}} + W_{\text{АБсніч}}^{\text{М}} - W_{\text{АБзніч}}}{E_{\Sigma\phi}} \quad (8)$$

де:  $W_{\text{нік}}$ ,  $W_{\text{нп}}$ ,  $W_{\text{ніч}}$  – обсяг ЕЕ, спожитий протягом відповідної зони доби, кВт·год;

$W_{\text{СБ,нік}}$ ,  $W_{\text{СБ,нп}}$ ,  $W_{\text{СБ,ніч}}$  – обсяг ЕЕ, який генерують фотоелементи протягом доби, кВт·год;

$W_{\text{АБснік}}^{\text{М}}$ ,  $W_{\text{АБснп}}^{\text{М}}$ ,  $W_{\text{АБсніч}}^{\text{М}}$  – обсяг ЕЕ, спожитий з мережі для накопичення в АБ, кВт·год;

$W_{\text{АБзнік}}$ ,  $W_{\text{АБзнп}}$ ,  $W_{\text{АБзніч}}$  – обсяг ЕЕ, який генерують АБ, кВт·год.

Протягом доби сонячні елементи генерують загальний обсяг ЕЕ

$$W_{\text{СБ}} = W_{\text{СБ,нік}} + W_{\text{АБснік}}^{\text{СБ}} + W_{\text{СБ,нп}} + W_{\text{АБснп}}^{\text{СБ}} + W_{\text{СБ,ніч}} + W_{\text{АБсніч}}^{\text{СБ}} \quad (9)$$

де  $W_{\text{АБснік}}^{\text{СБ}}$ ,  $W_{\text{АБснп}}^{\text{СБ}}$ ,  $W_{\text{АБсніч}}^{\text{СБ}}$  – обсяг ЕЕ, спожитої від СБ для накопичення в АБ, кВт·год;

Визначаємо обсяг електроенергії, що генерує один фотоелектричний елемент потужністю  $P_{\text{ном,сб1}}$  за добу з урахуванням інсоляції  $W_{\text{інс}}$  за формулою:

$$W_{сб1} = \frac{P_{норм,сб1} \cdot W_{инс}}{P_{инс}} \quad (10)$$

де:  $P_{инс}$  – максимальна потужність інсоляції квадратного метра земної поверхні (1000 Вт).  
Кількість СБ для покриття розрахункового навантаження дорівнює:

$$N_{сб} = \frac{W_{СБ}}{W_{сб1}} \quad (11)$$

Обсяг ЕЕ, що генерують всі СБ за місяць, визначається за формулою:

$$W_{сб,міс} = W_{сб1} \cdot N_{д} \cdot N_{сб} \cdot \eta_{инв} \quad (12)$$

де:  $N_{сб}$  – кількість СБ, шт.;

$N_{д}$  – кількість днів у розрахунковому місяці;

$\eta_{инв}$  – ККД інвертора.

Визначення необхідної кількості АБ, та їх загальної ємності.

Електрозабезпечення об'єкта протягом проміжків часу вечірнього піку та напівпіку навантажень енергосистеми виконується за рахунок обсягу електричної енергії, накопиченої АБ у денний час доби. Для визначення необхідної кількості АБ, визначаємо, який обсяг ЕЕ вони повинні накопичувати.

$$W_{АБ} = \sum W_{АБс, j}^{СБ} + W_{АБс, j}^M \quad (13)$$

Отриманий обсяг ЕЕ, який необхідно накопичувати, перераховуємо в ємність акумуляторів за формулою:

$$E_{АБ\Sigma} = \frac{W_{АБ} \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot U_{АБ} \cdot K_p} \quad (14)$$

де:  $K_p$  – коефіцієнт використання ємності, що враховує, яку частину енергії всіх використовуваних акумуляторів можна реально використовувати споживачам.

Визначення кількості акумуляторних батарей виконується за формулою:

$$N_{АБ} = \frac{E_{АБ\Sigma}}{E_{сб1}} \quad (15)$$

де:  $E_{АБ\Sigma}$  – сумарна електрична ємність акумуляторів, А·год;

$E_{сб1}$  – електричний заряд однієї сонячної батареї, А·год.

#### Визначення потужності інвертора.

Вибір гібридного інвертора виконують за умовами роботи в нормальному режимі. За номінальними параметрами гібридний інвертор

повинен відповідати умовам експлуатації: напруга низької та високої сторони мережі, та за розрахунковим навантаженням.

Потужність інвертора вибирається наступним чином:

$$P_{норм,гі} \cdot \eta_{инв} \geq P_n \quad (16)$$

де:  $P_n = P_{ср,добр}$  – активне навантаження, кВт;

$\eta_{инв}$  – ККД гібридного інвертора.

Розрахунок економічного ефекту.

Економічний ефект визначається, як різниця плати за спожиту ЕЕ від централізованої мережі та запропонованої системи електропостачання.

$$E_{e.e.} = C_1 - C_2 \quad (17)$$

де:  $C_1$  – плата за спожиту ЕЕ, при електропостачанні лише від централізованої мережі, грн;

$C_2$  – плата за спожиту ЕЕ при електропостачанні від запропонованої комплексної системи, грн;

Тариф на споживану електричну енергію для побутового споживача окрім диференціювання за зонами доби додатково диференціюється за обсягами електроспоживання, а його значення залежить від категорії споживачів (місто, село, категорія за пільгами, віддаленість від АЕС та ін.). Тоді плата за користування електричною енергією від централізованої енергосистеми буде розраховуватись наступним чином:

$$C_1 = \sum_{i=1}^m (W_{норм,i} / W_{\Sigma,\phi} \cdot T_i) \cdot \sum_{j=1}^n (W_j \cdot k_j) \quad (18)$$

де:  $W_{норм,i}$  – нормований обсяг електроспоживання за і-тим рівнем тарифу, кВт·год;

$T_i$  – тариф відповідної категорії побутових споживачів для відповідного нормованого обсягу електроспоживання, грн/кВт·год;

$k_j$  – тарифний коефіцієнт відповідно до зони доби;

$W_{\Sigma,\phi}$  – фактичний обсяг споживання електричної енергії по всіх зонах доби протягом розрахункового періоду, кВт·год;

$W_j$  – фактичний обсяг споживання електричної енергії у відповідній тарифній зоні доби кВт·год;

$n$  – кількість тарифних зон;

$m$  – кількість нормованих обсягів електроспоживання з відповідними тарифами;

$$C_2 = \sum_{i=1}^m (W_{норм,i} / W_{\Sigma,\phi} \cdot T_i) \cdot \sum_{j=1}^n (W_{СБj} \cdot k_j) \quad (19)$$

де:  $W_{CBj}$  – ЕЕ, спожита протягом певної зони доби при електропостачанні від запропонованої комплексної системи, кВт·год;

**Варіанти структур комбінованої системи електропостачання з сонячними фотоелектричними елементами.**

Було розглянуто 6 варіантів структури системи електропостачання, що відрізняються потужністю встановлених СБ, АБ, режимом їх роботи та обсягом електричної енергії, що споживається від централізованої системи.

**Варіант №1.** Забезпечення електроенергією споживача відбувається без використання централізованої мережі. В освітлений період доби СБ генерують електричну енергію для одночасного споживання, а також для акумуляції в АБ. Протягом ночі використовується ЕЕ, акумуляована в АБ.

**Варіант №2.** Забезпечення електроенергією споживача відбувається в денний час доби за рахунок генерації СБ, а вночі – за рахунок споживання електроенергії від централізованої мережі. АБ в цьому варіанті структури відсутні.

**Варіант №3.** Електроенергія, що генерується СБ, в денний час споживається відразу, і частина її акумуляується в АБ для покриття навантаження у вечірній час доби (до 23:00). Забезпечення

електроенергією у нічний період часу виконується за рахунок споживання електроенергії з централізованої мережі.

**Варіант №4.** Електроенергія, яка генерується СБ в денний час, споживається відразу. Покриття вечірнього навантаження (з 17:00 до 23:00) забезпечується за рахунок енергії від централізованої мережі, що акумуляується в АБ протягом ночі. Забезпечення електроенергією у нічний період часу виконується за рахунок її споживання з централізованої мережі.

**Варіант №5.** Електроенергія, яка генерується СБ в денний час, споживається відразу, і частина її акумуляується в АБ для покриття тільки вечірнього піку навантаження. Забезпечення електроенергією у нічний період часу здійснюється за рахунок споживання електроенергії від централізованої мережі.

**Варіант №6.** Електроенергія, яка генерується СБ в денний час, розрахована тільки на покриття ранкового та вечірнього піків. Оскільки в період вечірнього піку сонячне випромінювання відсутнє, то ЕЕ, яка потрібна для покриття вечірнього піку, акумуляується вдень від СБ. Забезпечення електроенергією в інший час доби здійснюється за рахунок споживання електроенергії від централізованої мережі.

Таблиця 1

**Енергетичні показники режиму роботи системи / Energy indicators of the system structure operation mode**

	Варіант структури системи					
	1	2	3	4	5	6
ЕЕ котру генерують всі СБ за добу, відносно загальноспожитої ЕЕ, $W_{\Sigma CB}$ , %	100	41,6	66,7	41,6	50	20,8
ЕЕ спожита від СБ в години наявності сонячного випромінювання, відносно загально спожитої ЕЕ, $W_{CB}$ , %	41,6	41,6	41,8	41,6	41,6	12,4
ЕЕ спожита від АБ, в години відсутності сонячного випромінювання, відносно загальноспожитої ЕЕ, $W_{AB}$ , %	аккумуляована ЕЕ від СБ	58,4	0	24,9	0	8,4
	аккумуляована ЕЕ від централізованої мережі	0	0	0	24,9	0
ЕЕ спожита від централізованої мережі, відносно загально спожитої ЕЕ, $W_{CM}$ , %	0	58,4	33,3	58,4	50	79,2

Розрахунок техніко-економічних показників гібридної системи електропостачання був проведений для рівномірного ГЕН з середньодобовим електроспоживанням на рівні 72 кВт·год та середньодобовою потужністю 3 кВт.

При електропостачанні об'єкта від сонячних та акумуляторних батарей, час електроспоживання від централізованої мережі зменшується.

Результати розрахунків техніко-економічних показників для систем залежно від структури представлені в вигляді залежностей на рис.3-8.

На рис. 3 представлені залежності строку окупності, що розраховані для однозонного (1), двозонного (2) та трizonного тарифу (3), від кількості спожитої ЕЕ за місяць при відсутності споживання енергії з мережі (структура №1). При електроспоживанні від 100 до 2000 кВт·год/міс строк окупності суттєво нелінійно зменшується із

зростанням електроспоживання. При електроспоживанні більше 2000 кВт·год/міс характер залежності змінюється плавно, і зниження строку окупності відбувається значно повільніше. З цього можна зробити висновок, що при оплаті за спожиту від централізованої мережі ЕЕ, має місце вплив кількості спожитої енергії та її вартості. При існуючих тарифах для населення вартість електроенергії нелінійно збільшується при зростанні кількості енергії, що було спожито. Строк окупності систем з фотоелектричними елементами зменшується при збільшенні плати за споживання енергії з мережі.

Дану структуру доцільно застосовувати при місячному електроспоживанні більше 2000 кВт·год/міс.

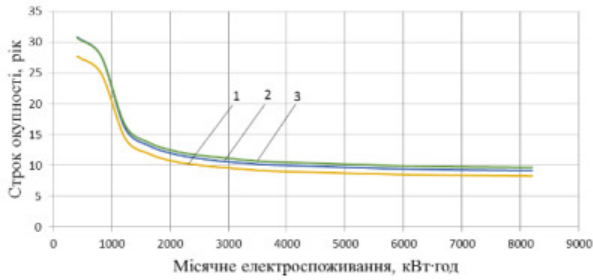


Рис. 3 - Залежність строку окупності СЕП зі структурою №1 від місячного електроспоживання: /

*Payback period of the first power grid structure in dependence on monthly electricity consumption:*

- 1 - однозонний тариф; 2 - двозонний тариф, диференційований за періодами часу;  
3 - тризонний тариф, диференційований за періодами часу / 1 – single-zone tariff; 2 – dual-zone tariff, differentiated by time periods; 3 – three-zone tariff, differentiated by time periods.

З графіків залежностей на рис. 3-8. можемо зробити висновок, що при електроспоживанні комунально-побутовим об'єктом до 1000 кВт-год/міс встановлення системи електропостачання від фотоелектричних елементів є недоцільним, тому що строк окупності системи більший за строк служби обладнання.

Для варіантів структури системи електропостачання з фотоелектричними елементами при наявності споживання з централізованої мережі найбільш вигідно розраховуватися за спожиту ЕЕ від мережі за тризонним тарифом. У цьому випадку строк окупності є найменшим для більшості величин місячного електроспоживання. З рисунків 3-8 бачимо, що при електроспоживанні від 1400-1800 кВт-год строк окупності буде змінюватися не суттєво.

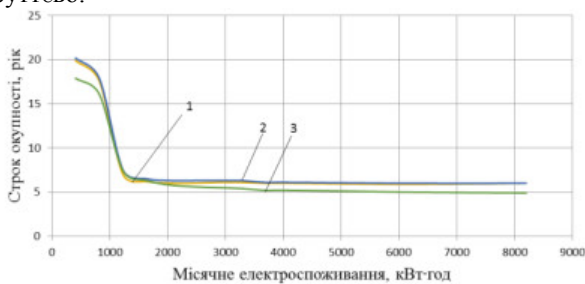


Рис. 4 - Залежність строку окупності структури №2 від місячного електроспоживання: /

*Payback period of the second power grid structure in dependence on monthly electricity consumption:*

- 1 - однозонний тариф; 2 - двозонний тариф, диференційований за періодами часу;  
3 - тризонний тариф, диференційований за періодами часу / 1 – single-zone tariff; 2 – dual-zone tariff, differentiated by time periods; 3 – three-zone tariff, differentiated by time periods.

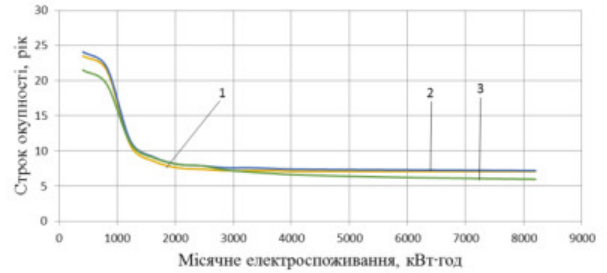


Рис. 5 - Залежність строку окупності структури №3 від місячного електроспоживання: /

*Payback period of the third power grid structure in dependence on monthly electricity consumption:*  
1 - однозонний тариф; 2 - двозонний тариф, диференційований за періодами часу;  
3 - тризонний тариф, диференційований за періодами часу / 1 – single-zone tariff; 2 – dual-zone tariff, differentiated by time periods; 3 – three-zone tariff, differentiated by time periods.

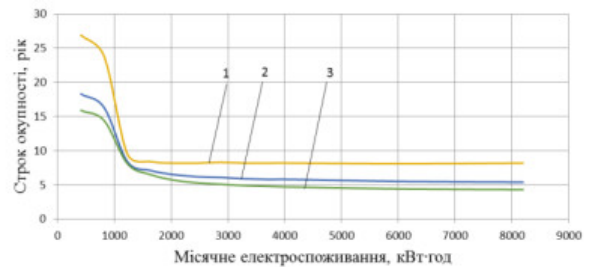


Рис. 6 - Залежність строку окупності структури №4 від місячного електроспоживання: /

*Payback period of the fourth power grid structure in dependence on monthly electricity consumption:*  
1 - однозонний тариф; 2 - двозонний тариф, диференційований за періодами часу; 3 - тризонний тариф, диференційований за періодами часу / 1 – single-zone tariff; 2 – dual-zone tariff, differentiated by time periods; 3 – three-zone tariff, differentiated by time periods.

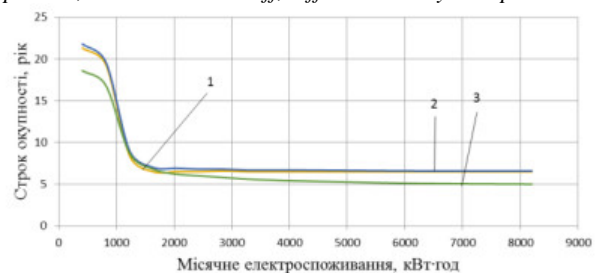


Рис. 7 - Залежність строку окупності структури №5 від місячного електроспоживання: /

*Payback period of the fifth power grid structure in dependence on monthly electricity consumption:*

- 1 - однозонний тариф; 2 - двозонний тариф, диференційований за періодами часу;  
3 - тризонний тариф, диференційований за періодами часу / 1 – single-zone tariff; 2 – dual-zone tariff, differentiated by time periods; 3 – three-zone tariff, differentiated by time periods.

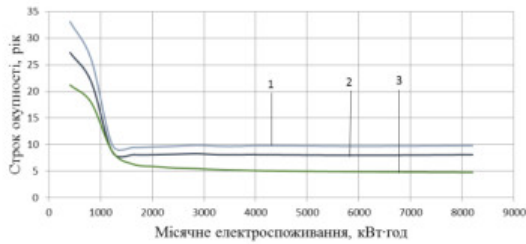


Рис. 8 - Залежність строку окупності структури №6 від місячного електроспоживання: / Payback period of the sixth power grid structure in dependence on monthly electricity consumption: 1 - однозонний тариф; 2 - двозонний тариф, диференційований за періодами часу; 3 - тризонний тариф, диференційований за періодами часу / 1 - single-zone tariff; 2 - dual-zone tariff, differentiated by time periods; 3 - three-zone tariff, differentiated by time period.

Таким чином, при споживанні електричної енергії з мережі (варіанти структури №2-6) найбільш вигідно використовувати тризонний тариф оплати. Це обумовлено тим, що час генерації енергії сонячними батареями співпадає з піковою та напівпіковою зонами доби, протягом яких електроенергія є найдорожчою.

З вище представлених графіків також видно, що строк окупності системи електропостачання з сонячними батареями суттєво залежить від обсягу електроспоживання, зі зростанням якого строк окупності зменшується.

Строк окупності стає співставним за величиною зі строком експлуатації системи лише в тому випадку коли сумарне електроспоживання буде вище 1400-1800 кВт·год/міс. Це пов'язано з нелінійністю зростання капітальних вкладень на обладнання із зростанням потужності системи.

#### Вибір оптимальної структури.

На рис. 9 показано залежність строку окупності систем електропостачання з фотоелектричними елементами залежно від структури та місячного електроспоживання при тризонному тарифі оплати за спожиту енергію.

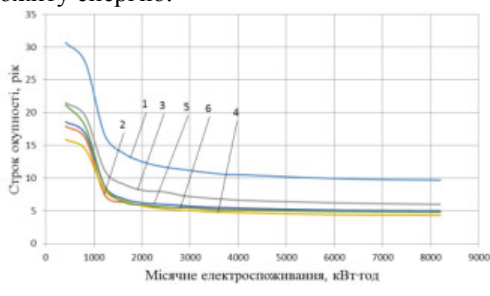


Рис. 9 - Залежність строку окупності системи електропостачання від структури та місячного електроспоживання: / Payback period of power supply system in dependence on its structure and monthly electricity consumption:

1 - структура №1; 2 - структура №2; 3 - структура №3;  
4 - структура №4; 5 - структура №5; 6 - структура №6 /  
1 - structure №1; 2 - structure №2; 3 - structure №3;  
4 - structure №4; 5 - structure №5; 6 - structure №6.

З кривих на рис. 9 видно, що структура №4 є найбільш оптимальною за критерієм мінімального строку окупності з використанням запропонованої методики.

Найменший строк окупності відповідає такому варіанту структури системи, тому що споживання електроенергії максимально оптимізовано з економічної і технічної точки зору. З технічної точки зору: мінімальна кількість СБ та АБ розрахована тільки на покриття піка та напівпіка, в періоди коли ЕЕ найдорожча; з економічної точки: крім мінімуму кількості СБ і АБ, акумуляторні батареї заряджаються не від СБ, що призводить до збільшення їх кількості, а від мережі в нічний період часу коли електроенергія є найдешевшою.

#### Результати

Розроблена методика оптимізації структури системи електропостачання з відновлюваними джерелами енергії.

#### Наукова новизна і практична значимість

Розроблена методика дає можливість визначити оптимальну структуру електропостачання в котрій строк окупності буде найменшим. Рекомендується, знаючи розрахункову величину місячного електроспоживання об'єкту, розраховувати техніко-економічні показники роботи системи електропостачання при різних можливих структурах системи і режимів роботи елементів, та обирати варіант з оптимальними параметрами.

#### Висновки

За розробленою методикою було проведено ряд розрахунків та отримано теоретичні результати в вигляді залежностей. Проаналізувавши отримані результати можна сказати, що:

- при електропостачанні комунально-побутового від комплексної системи найбільш вигідно розраховуватися за спожиту ЕЕ від централізованої мережі по тризонному тарифі, тому що строк окупності системи електропостачання в цьому випадку є найменшим;

- криві залежностей строку окупності системи електропостачання комунально-побутового об'єкта з використанням фотоелектричних модулів від місячного електроспоживання мають нелінійну форму;

- строк окупності системи суттєво залежить від рівня електроспоживання. Він стає співставним за значенням із строком експлуатації системи при сумарному електроспоживанні вище 1400-1800 кВт·год/міс;

- на сьогоднішній день при електроспоживанні комунально-побутовим об'єктом до 1000 кВт·год/міс встановлення системи електропостачання від фотоелектричних елементів



є недоцільним, тому що строк окупності системи більший за строк служби обладнання;

- потужність елементів системи та режим їх роботи суттєво впливають на техніко-економічні показники, у тому числі на строк окупності. Чим менше величина електроспоживання об'єкту, тим більше цей вплив. При різних значеннях електроспоживання мінімальний строк окупності відповідає різним структурам системи;

- немає однозначної залежності між строком окупності та потужністю окремих елементів системи. Це спричиняє необхідність проведення

аналізу показників для можливих типів структури та режимів роботи системи кожного споживача індивідуально;

- при існуючих тарифах оплати за ЕЕ електропостачання об'єкта лише від фотоелектричних елементів без використання централізованої мережі (структура №1) є найменш вигідним варіантом, строки окупності якого у декілька разів перевищують строки окупності системи з комбінованим електропостачанням.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Бондарчук А. С. Внутрішньобудинкове електропостачання. Курсове проектування : навчальний посібник / А. С. Бондарчук. – Київ : Освіта України, 2015. – 480 с.
2. Бондарчук А. С. Прогнозна енергетична, економічна та екологічна ефективність запровадження мережових сонячних електростанцій в ринкових умовах / А. С. Бондарчук // Електротехнічні та комп'ютерні системи. – 2015. – № 20 (96). – С. 51–55.
3. Методы расчета ресурсов возобновляемых источников энергии: учебное пособие / под ред. В. И. Виссарионова. – 2-е изд. – Москва : Издательский дом МЭИ, 2009. – 144 с.
4. Разумний Ю. Т. Ефективне використання електроенергії та палива / Ю.Т. Разумний, А. В. Рухлов, В. М Прокуда, Н. Ю. Рухлова. — Дніпропетровськ : Національний гірничий університет, 2014.— 223 с.
5. Русан В. И., Короткевич М. А. Комплексное использование возобновляемых источников энергии : Монография / В. И. Русан, М. А. Короткевич. – Минск : Институт энергетики АПК НАН Беларуси, 2004. – 48 с.
6. Сибикин Ю. Д. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии : учебное пособие / Ю. Д. Сибикин. – 2-е изд. — Москва : КНОРУС, 2012. — 240 с.
7. Солнечная энергетика : Учебное пособие для вузов / Виссарионов В. И., Дерюгина Г. В., Кузнецова В. А., Малинин Н. К. ; под ред. В. И. Виссарионова. – Москва : Издательский дом МЭИ, 2008. – 276 с.
8. Тульчин И. К., Нудлер Г. И. Электрические сети жилых и общественных зданий. — Москва : Энергоатомиздат, 1983. — 304 с.
9. Benefits of Renewable Energy Use. Режим доступу: [http://www.ucsusa.org/clean\\_energy/our-energy-choices/renewable-energy/public-benefits-of-renewable.html#.V\\_JzO\\_mLTIU](http://www.ucsusa.org/clean_energy/our-energy-choices/renewable-energy/public-benefits-of-renewable.html#.V_JzO_mLTIU).
10. Challenges in Integrating Renewable Technologies into an Electric Power System. White Paper. – Режим доступу: [http://pserc.wisc.edu/research/white\\_papers.aspx](http://pserc.wisc.edu/research/white_papers.aspx).
11. Determination of tariff and other norms for Solar Rooftop and Small Photovoltaic Power Plants. – Режим доступу: <http://www.karnataka.gov.in>.
12. Smart Grids and Beyond: Achieving the Full Potential of Electricity Systems / M. Kezunovic, J. McCalley, and T. Overbye // Proceedings of the IEEE 100 (Centennial-Issue), 2012, – С. 1329-1341. Режим доступу: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=6174431>.
13. Vittal V. The Impact of Renewable Resources on the Performance and Reliability of the Electricity Grid. The Bridge. National Academies Press. April 2010. – Режим доступу: <https://www.nae.edu/Publications/Bridge/TheElectricityGrid/18587.aspx>.

### REFERENCES

1. Bondarchuk A. S. *Vnutrishn'obudynkove elektropostachannya. Kursove proektuvannya* [Inwardly household electric power supply]. Kyiv: Osvita Ukrayiny, 2015, 480 p. Available at: <http://library.nung.edu.ua/html> (in Ukrainian).
2. Bondarchuk A. S. *Prohnozna enerhetychna, ekonomichna ta ekolohichna efektyvnist' zaprovadzheniya merezhevykh sonyachnykh elektrostantsiy v rynkovykh umovakh* [The forecast power, economic and ecological efficiency of the usage of networked solar power-stations under market conditions] *Elektrotekhnichni ta kompyuterni systemy* [Electrotechnic and Computer Systems]. 2015, no. 20 (96), pp. 51-55. Available at: <http://www.etks.opu.ua/?fetch=articles&with=info&id=739> (in Ukrainian).
3. *Metodyi rascheta resursov vozobnovlyaemyih istochnikov energii* [Methods for calculating the renewable energy resources] Moscow: Izdatelskiy dom MEI, 2009, 144 p. (in Russian)
4. Razumnyy Y. T. Rukhlov A. V., Prokuda V. M. and Rukhlova N. Y. *Efektivne vycorystanna elektroenergii ta palyva* [Effective use of electric power and fuel]. Dnipropetrovsk, NGY Publ., 2014. 223 p. Available at: <http://ir.nmu.org.ua/bitstream/handle/123456789/1923/HTB451990.pdf>. (In Ukrainian).
5. Rusan V.I. and Korotkevich M.A. *Kompleksnoe ispolzovanie vozobnovlyaemyih istochnikov energii* [Integrated use of renewable energy sources]. Minsk, Institut energetiki APK NAN Belarusi Publ., 2004. 48 p. (in Russian).
6. Sibikin Yu.D. *Netraditsionnye i vozobnovlyaemye istochniki energii* [Alternative and renewable energy sources]. Moscow, Knorus Publ., 2012, 240 p. (in Russian).
7. Vissarionov V.I., Deryugina G.V., Kuznetsova V.A. and Malinin N.K. *Colnechnaya energetika* [Solar Energy]. Moscow, Izdatelskiy dom MEI Publ., 2008, 276 p. (in Russian).
8. Tulchin I. K. and Nudler G. I. *Elektricheskie seti zhilyih i obschestvennyih zdaniy* [Electrical network of residential and public buildings]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1983, 304 p. (in Russian).

9. Benefits of Renewable Energy Use. Available at: [http://www.ucsusa.org/clean\\_energy/our-energy-choices/renewable-energy/public-benefits-of-renewable.html#.V\\_JzO\\_mLTIU](http://www.ucsusa.org/clean_energy/our-energy-choices/renewable-energy/public-benefits-of-renewable.html#.V_JzO_mLTIU) (in English).
10. Challenges in Integrating Renewable Technologies into an Electric Power System. White Paper. Available at: [http://pserc.wisc.edu/research/white\\_papers.aspx](http://pserc.wisc.edu/research/white_papers.aspx) (in English).
11. Determination of tariff and other norms for Solar Rooftop and Small Photovoltaic Power Plants. Available at: <http://www.karnataka.gov.in> (in English).
12. Smart Grids and Beyond: Achieving the Full Potential of Electricity Systems / M. Kezunovic, J. McCalley, and T. Overbye // Proceedings of the IEEE 100 (Centennial-Issue): 2012, - P. 1329-1341. Available at: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=6174431> (in English).
13. Vittal V. The Impact of Renewable Resources on the Performance and Reliability of the Electricity Grid. The Bridge. National Academies Press. April 2010. – Available at: <https://www.nae.edu/Publications/Bridge/TheElectricityGrid/18587.aspx> (in English).

Стаття надійшла в редколегію 08.09.2016