

DOI <https://doi.org/10.32782/2220-8674-2025-15-1-20>

УДК 621.311:621.311.25

С. В. Галько¹, канд. техн. наук

ORCID: 0000-0001-7991-0311

О. В. Сотнік², канд. техн. наук

ORCID: 0000-0002-2518-3726

О. О. Мірошник², д-р техн. наук

ORCID: 0000-0002-6144-7573

О. В. Сотнік², аспірант

ORCID: 0009-0000-4575-5114

Д. М. Зеленков¹, аспірант

ORCID: 0009-0002-9685-9196

¹Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного²Державний біотехнологічний університет, м. Харків

e-mail: galkosv@gmail.com

ЗБАЛАНСУВАННЯ ГРАФІКА НАВАНТАЖЕННЯ СІЛЬСЬКИХ КОМУНАЛЬНИХ СПОЖИВАЧІВ З ВИКОРИСТАННЯМ СОНЯЧНИХ ПАНЕЛЕЙ ТА НАКОПИЧУВАЧІВ ЕНЕРГІЇ

Анотація. У роботі проведено аналіз змін у добовому графіку електричних навантажень лінії трансформаторної підстанції 10/0,4 кВ потужністю 100 кВА в Харківській області, яка живить сільські житлові будинки взимку та влітку. Для згладжування піків навантаження й оптимізації енергоспоживання проведено розрахункової ефективності використання пристроїв накопичення енергії для визначення можливостей їх використання. Виконано аналіз добового споживання енергії по двадцяти приватних будинках, включно з розрахунком і оцінкою енергії, необхідної для забезпечення роботи побутових електроприладів протягом 24 годин. На основі отриманих даних побудовані графіки добового навантаження, що відображають зміни в споживанні енергії протягом доби. Запропоновано метод збалансування графіків навантажень за допомогою сонячної панелі та накопичувача енергії. Цей метод дає змогу підвищити ефективність таких електричних мереж.

Ключові слова: низьковольтні сільські електричні мережі, сільські житлові будинки, графік електричного навантаження, зелена енергетика, сонячна панель, накопичувач електричної енергії.

Постановка проблеми. Зміна електричного навантаження в побутовому секторі є випадковим процесом і потребує ретельного вивчення та побудови графіків зміни споживання за добу для різних сезонів року. Для покращення якості електроенергії у споживачів, згладжування піків навантаження та оптимізації енергоспоживання побутовими споживачами відомі різні способи й технічні рішення. Один із таких способів – це використання відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) разом із накопичувальними пристроями. Ключовою проблемою ВДЕ є їх залежність від погодних умов, що призводить до нестабільного виробництва енергії. Дослідження показують, що найефективнішим універсальним підходом для збалансування цієї мінливості є використання їх з буферними акумуляторними батареями.

Аналіз останніх досліджень. ВДЕ перебувають на шляху стрімкого розвитку. Великий відсоток ВДЕ надходить від сонячних електростанцій (СЕС). У 2022 році кількість СЕС у всьому світі зросла на 239 ГВт нових сонячних панелей. Це на 45 % більше, ніж роком раніше. Експерти прогнозують глобальний прогноз розвитку сонячної енергетики на рівні близько 800 ГВт енергії від сонячних панелей у 2027 році [1].

Також в Україні діє Закон «Про відновлювальні джерела енергії», який встановлює правові відносини між постачальниками та споживачами електричної енергії. Незважаючи на всі свої недоліки, він стимулює виробництво електричної енергії із сонячної енергії в Україні [2].

Україна також має значний потенціал сонячної енергетики, близько $1235 \text{ кВт} \cdot \text{год}/\text{м}^2$, що сприяло стрімкому розвитку сонячної енергетики [3, 4]. Проте відбулося зниження інвестиційної привабливості України в розвитку ВДЕ. Уперше з 2015 року спостерігався відтік інвестицій, який у 2020 році становив \$868,2 млн [5]. Підвищення тарифів на електричну енергію та нестабільність у роботі традиційних електричних мереж є основними факторами, які роблять попит на СЕС в Україні значним [6, 7].

Виробництво електричної енергії СЕС багато в чому залежить від інтенсивності сонячної радіації, яка дуже нерівномірна як протягом доби, так і протягом усього року [8–10]. Для підвищення надійності та стабільності роботи СЕС доцільно вибирати відповідні технічні рішення для зберігання електричної енергії в системі електропостачання [11, 12]. Технічні рішення, що дають змогу резервувати енергію, можуть бути різноманітними, але повинні задовольняти можливості й потреби електрогенераторів і споживачів у кожному конкретному випадку [13–15].

Формулювання мети статті. Обґрунтувати метод збалансування добових графіків навантажень за допомогою сонячної генерації та накопичувачів енергії та розробити рекомендації щодо його використання.

Для досягнення поставленої мети потрібно вирішити такі *завдання досліджень*:

- провести аналіз добового споживання енергії приватними будинками, включно з розрахунком і оцінкою енергії, необхідної для забезпечення роботи побутових електроприладів протягом 24 годин;
- для згладжування піків навантаження й оптимізації енергоспоживання виконати розрахунок ефективності використання пристроїв накопичення енергії для визначення можливостей їх використання;
- обґрунтувати метод збалансування добових графіків навантажень із використанням сонячних панелей і акумуляторів енергії;
- розробити рекомендації щодо практичного застосування методу збалансування добових графіків навантажень із використанням сонячних панелей і акумуляторів енергії.

Основна частина. Пристрої накопичення енергії відіграють важливу роль у роботі СЕС [16, 17]. Вони допомагають зменшити залежність від традиційних джерел енергії, як-от газ, нафта та вугілля, та сприяють переходу на відновлювані джерела енергії, зокрема сонце та вітер. Це могло б зменшити навантаження на енергосистему та зробити її незалежною від традиційних джерел, що дуже важливо для України. Це також може скоротити викиди парникових газів, що особливо важливо для боротьби зі зміною клімату [18–20]. Вони дають можливість зберігати енергію, вироблену з відновлюваних джерел, у періоди, коли виробництво перевищує споживання, і використовувати в пікові періоди для зниження навантаження на електромережу й запобігання перевантажень [21, 22].

Пристрої накопичення енергії також можуть використовуватися для управління навантаженнями в системі Smart Grid [23, 24]. Вони можуть заряджатися в періоди низького попиту та використовуватися для згладжування пікових навантажень шляхом постачання додаткової енергії під час пікового попиту, що допомагає збалансувати навантаження на систему й підвищити енергоефективність [25, 26]. Накопичувач енергії є важливим елементом у розвитку Smart Grid, що дає змогу створити більш ефективну та стійку систему енергопостачання на основі відновлюваних джерел енергії з використанням сучасних технологій.

Для згладжування піків навантаження й оптимізації енергоспоживання було проведено розрахунок ефективності використання пристроїв накопичення енергії для визначення можливостей їх використання. Із цією метою був проведений аналіз добового споживання енергії по двадцяти приватних будинках, включно з розрахунком і оцінкою енергії, необхідної для забез-

печення роботи побутових електроприладів протягом 24 годин. На основі отриманих даних був побудований графік добового навантаження, що відображає зміни в споживанні енергії протягом доби. Ці 20 житлових будинків розташовані в сільській місцевості та мають живлення від трансформаторної підстанції 10/0,4 кВ потужністю 100 кВА в Харківській області.

На основі теорії імовірностей розроблено метод дослідження комунальних побутових електричних навантажень. В основі методу розрахунку електричних навантажень лежить принцип врахування ймовірності включеного стану приладів, дані про які беруться зі служб обслуговування електричних мереж.

Електричне навантаження на трансформатор визначається за рівнянням [27]:

$$S_{(y)} = \sum_{i=1}^r P_i m_i p_i + \bar{z}(y) \left[\sum_{i=1}^r P_i^2 m_i p_i q_i \right]^{0.5}, \quad (1)$$

де p – імовірність включення приладу;

q – імовірність знаходження пристрою у вимкненому стані;

m – кількість пристроїв, що живляться від цієї трансформаторної підстанції, од;

P – навантаження цього пристрою, кВт;

y – кількість добових максимумів, од.;

$\bar{z}(y)$ – поправочний коефіцієнт (міра відхилення від середнього значення найбільшого добового піку);

i – індекс, що відображає кількість одного типу пристрою, од.;

r – кількість різних типів пристроїв, од.

Для формування сумарного електричного навантаження однієї лінії або трансформаторної підстанції (ТП) загалом може бути застосована схема незалежних випробувань і властивостей адитивності. При цьому число електричних споживачів (m), які одночасно беруть участь у максимальному електричному навантаженні, визначається з біноміального закону розподілу [28–30]. У фіксований момент часу групове електричне навантаження створюється сумою окремих навантажень, випадково включених m споживачами електроенергії [31]:

$$P_{(t)} = \sum_{i=1}^m P_i(t), \quad (2)$$

де P_i – активна потужність споживача електроенергії, кВт.

Тобто зміна електричного навантаження в побутовому секторі є випадковим процесом і потребує ретельного вивчення та побудови графіків зміни споживання за добу для різних сезонів року [32–34].

За середнє значення електричного навантаження шляхом погодинного запису показань лічильника прийняті дані для побудови добових змін електричного навантаження 20 будинків у сільській місцевості на зимовий та літній періоди. Це здійснювалося протягом 24 годин чотири рази на місяць (грудень, січень, лютий і червень, липень, серпень) на лінії, яка відходить від ТП, що забезпечує електроживлення.

У таблиці 1 представлені можливі споживачі електроенергії в приватних житлових будинках у сільській місцевості і їх робочий час за добу.

Результати вимірювань потужності ТП наведені в таблиці 2. За вимірними даними потужності побудований графік зміни потужності протягом доби для лінії, що відходить від ТП, яка забезпечує електроенергією 20 будинків.



Таблиця 1

Результати вимірювань електричних навантажень ТП 10/0,4 кВ

Найменування споживача електромережі	Активна потужність, кВт/год, на одиницю	Час роботи за добу, год
Лампа світлодіодна	0,02	5
Лампа розжарювання	0,6	3
Холодильник	0,3	24
Електричний насос	1,0	0,5
Електричний насос	1,2	0,2
Посудомийна машина	1,2	1,0
Чайник	2,0	0,2
Кавоварка	2,0	0,2
Пральна машина автомат	1,3	1,5
Телевізор	0,2	6
Кондиціонер	1,0	1,5
Комп'ютер	0,4	5
Електричний водонагрівач	2,0	4
Зарядний пристрій	0,02	1
Пилосос	1,3	0,5
Мікрохвильова піч	2,0	0,2
Обігрівач	1,0	5,0
Маслозбивальна машини	0,7	0,2
Дробарка	1,2	0,2
Кухонна техніка з електроприводом	0,35	0,3

Таблиця 2

Результати вимірювань зміни потужності літнього та зимового сезонів лінії, що відходить від ТП 10/0,4 кВ потужністю 100 кВА в Харківській області

Години доби	Потужність, кВт, літо	Потужність, кВт, зима
1	14,6	28,4
2	12,7	23,5
3	14,9	16,2
4	13	12,8
5	15,8	16,8
6	16,4	18,4
7	28,8	38,5
8	37,1	39,9
9	33,9	42,1
10	29,1	33,6
11	23	28,7
12	15,1	28
13	19,6	27,9
14	22,3	28,9
15	22,2	28,8
16	22,6	38,4
17	22,6	42,6
18	36,8	47,3
19	33	52,4
20	33,3	48,4
21	40,1	44,2
22	31	41,6
23	25,3	39,3
24	18,6	32,6

Максимальний час використання навантаження дорівнює [35]

$$T_{\max} = \frac{\Delta W}{P_{\max}}, \quad (3)$$

- для літа: $T_{\max} = \frac{581,8}{40,1} = 14,51$, год;

- для зими: $T_{\max} = \frac{799,3}{52,4} = 15,25$, год,

де ΔW – різниця показань лічильника на початку і наприкінці вимірювань;

$P_{\max}$ – максимальна середня потужність.

Визначимо середнє навантаження:

$$P_{\text{av}} = \frac{\Delta W}{24}, \quad (4)$$

- для літа: $P_{\text{av}} = \frac{581,8}{24} = 24,24$ кВт;

- для зими: $P_{\text{av}} = \frac{799,3}{24} = 33,3$ кВт.

У розрахунках також враховувалися показники й аналітичні вирази для розрахунків, які наведені нижче.

Середньоквадратичне значення потужності [36]:

$$P_{\text{RMS}} = \sqrt{\frac{\Delta t \sum_{i=1}^{23} P_i^2}{T}}. \quad (5)$$

Форм-фактор діаграми:

$$k_{\text{gsf}} = \frac{P_{\text{RMS}}}{P_{\text{av}}}. \quad (6)$$

Коефіцієнт заповнення графіка:

$$k_{\text{gff}} = \frac{P_{\text{av}}}{P_{\max}}. \quad (7)$$

Коефіцієнт нерівномірності заповнення:

$$k_{\text{fuc}} = \frac{P_{\min}}{P_{\max}}. \quad (8)$$

Для того щоб зменшити нерівномірність графіка електричного навантаження, можна використовувати акумуляторні батареї [37, 38], потужність яких розраховується за формулою:

$$P = UCn, \quad (9)$$

де U – напруга акумуляторної батареї, В;

C – ємність акумуляторної батареї, А·год.,

n – кількість акумуляторних батарей, шт.

Якщо взяти 20 акумуляторних батарей ємністю 200 А·год. з напругою 12 В, то їх потужність дорівнює:

$$P=12 \cdot 200 \cdot 20 = 48 \text{ кВт.}$$

Згідно з правилами експлуатації хімічних акумуляторів, їх рівень заряду не повинен знижуватися нижче за 25 %, тобто потужність становитиме 36 кВт.

Для підбору сонячної панелі з метою заряджання акумуляторних батарей її потужність можна визначити за формулою:

$$P_{\text{сон}} = SE\eta \frac{t}{1000}, \quad (10)$$

де S – площа однієї сонячної панелі, м²;

E – щільність освітленості поверхні, Вт/м²;

η – ККД панелі, в. о.;

t – кількість сонячних годин.

Сонячна панель генеруватиме електричну енергію нерівномірно, залежно від погодних умов, скажімо, приблизно одна сонячна панель виробляє в середньому 1,5 кВт на добу. 20 сонячних панелей забезпечать приблизно 30 кВт на добу в літній день (рис. 1). Взимку, припустимо, одна панель генерує 0,7 кВт·год на добу, тоді за добу 20 сонячних панелей генеруватимуть 14 кВт·год на добу (рис. 2).

Висновки. Використання пристроїв накопичення електричної енергії дає можливість знизити пікові електричні навантаження в низьковольтній мережі. Це дуже актуально в умовах, коли значна частина генерації електричної енергії знищується внаслідок російської військової агресії.

Добова зміна електричних навантажень лінії ТП 10/0,4 кВ для забезпечення електроенергією 20 будинків з використанням сонячної генерації та акумуляторних батарей для вирівнювання графіка навантаження в літній сезон показала ефективність використання пристроїв накопичення електричної енергії, а саме вранці та ввечері, під час пікових електричних навантажень вдалося знизити їх рівень майже на 40 %.

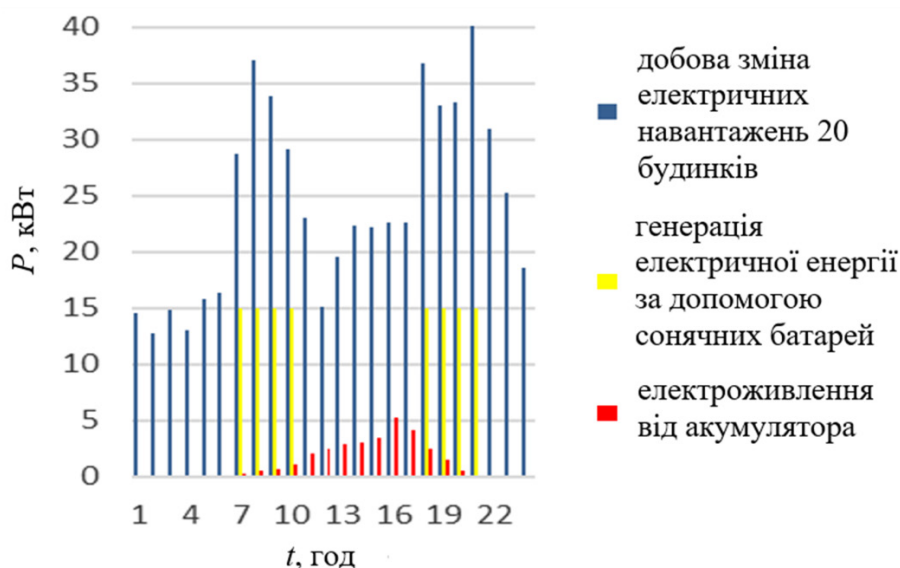


Рис. 1. Добова зміна електричних навантажень лінії ТП 10/0,4 кВ для забезпечення 20 будинків за допомогою сонячної генерації та акумуляторних батарей для вирівнювання графіка навантаження в літній сезон

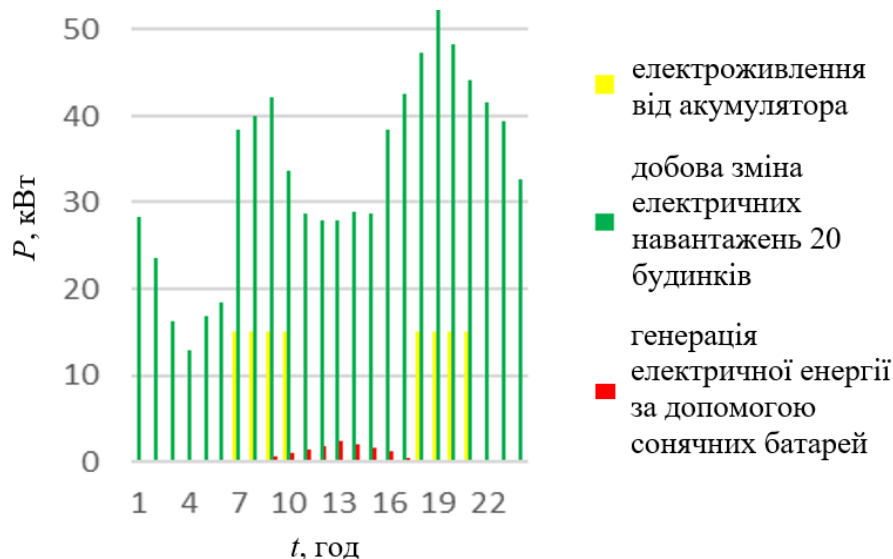


Рис. 2. Добова зміна електричних навантажень лінії ТП 10/0,4 кВ для забезпечення 20 будинків за допомогою сонячної генерації та акумуляторних батарей для вирівнювання графіка навантаження в зимовий сезон

Добові зміни в електричній лінії ТП 10/0,4 кВ для живлення 20 будинків, що використовують сонячну генерацію та акумуляторні батареї, взимку показали недостатнє виробництво електричної енергії сонячними батареями для зменшення нерівномірних графіків. Максимальне електричне навантаження в зимовий сезон під час досліджень становило 52,4 кВт, і середнє навантаження в зимовий сезон перевищило середнє навантаження в літній сезон на 26,2 %. У зимову пору року рекомендується заряджати акумулятори від електричної мережі під час низьких електричних навантажень, щоб зменшити нерівномірність графіка електричних навантажень.

Ці методи балансування можна використовувати в Smart Grid. Хоча сьогодні Smart Grid є дорогим заходом, але з урахуванням того, що тарифи в Україні на електроенергію вже значно зросли і для побутових споживачів вони становлять понад 1\$, це є доцільним. Також спостерігається дуже великий дефіцит виробництва електричної енергії, тому в майбутньому використання Smart Grid може бути економічно виправданим.

Список використаних джерел

1. Renewable Energy Statistics 2022. IRENA. 2022. URL: <http://surl.li/pfuxg> (дата звернення 23.02.2025).
2. Kabir E., Kumar P., Kumar S., Adelodun A., Kim Ki-Hyun. Solar energy: Potential and future prospect. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2018. Vol. 82 (1). P. 894–900. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.09.094>.
3. Галько С. В., Жарков В. Я., Жарков А. В. Технології та засоби перетворення відновлюваних джерел енергії для приватних домогосподарств : монографія. Мелітополь : Люкс. 2019. 215 с.
4. Halko S., Halko K. Research of electrical and physical characteristics of the solar panel on the basis of cogeneration photoelectric modules. *Integración de las ciencias fundamentales y aplicadas en el paradigma de la sociedad post-industrial: Colección de documentos científicos “ΛΟΓΟΣ” con actas de la Conferencia Internacional Científica y Práctica*, 24 de abril de 2020. Barcelona, España: Plataforma Europea de la Ciencia. 2020. Vol. 2. P. 39–44.
5. Оцінка збитків енергетичного сектору України – VI (станом на січня 2025 року). URL: <https://cutt.us/clzZG> (дата звернення 28.01.2025).
6. Про затвердження нормативно-правових актів, що регулюють діяльність гарантованого покупця та придбання електричної енергії за «зеленим» тарифом та за аукціонною ціною. Документ v0641874-19, чин-

ний, чинна редакція – редакція від 28.04.2023, підстава – v0758874-23. URL: <https://cutt.us/Hh6XX> (дата звернення 28.01.2025).

7. Komada P., Trunova I., Miroshnyk O., Savchenko O., Shchur T. The incentive scheme for maintaining or improving power supply quality. *Przegląd Elektrotechniczny*. 2019. Vol. 95 (5). P. 79–82. <https://doi.org/10.15199/48.2019.05.20>.

8. Chub A., Vinnikov D., Stepenko S., Liivik E., Blaabjerg F. Photovoltaic Energy Yield Improvement in Two-Stage Solar Microinverters. *Energies*. 2019. Vol. 12. P. 3774. <https://doi.org/10.3390/en12193774>.

9. Lezhniuk P., Komar V., Belik M., Rubanenko O., Smaglo I. Analysis of technical conditions influencing the operation of PV power stations cooperating with controlled power grids. *2022 IEEE 4th International Conference on Modern Electrical and Energy System (MEES)*, Kremenchuk, Ukraine. 2022. 1–6, <https://doi.org/10.1109/MEES58014.2022.10005686>.

10. Галько С.В. Експериментальне дослідження і визначення параметрів когенераційного фотоелектричного модуля для гібридних сонячних електростанцій. *Традиційні та інноваційні підходи до наукових досліджень: матеріали Міжнар. наук. конф.*, 10 квіт. 2020 р. Луцьк: МЦНД. 2020. Т. 1. С. 83–90. <https://doi.org/10.36074/10.04.2020.v1.10>.

11. Ciriminna R., Meneguzzo F., Pecoraino M., Pagliaro M. Rethinking solar energy education on the dawn of the solar economy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2016. Vol. 63. P. 13–18. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.05.008>.

12. Миколук О., Желавська І., Ляховець В. Формування ключових векторів забезпечення енергетичної безпеки крізь призму інноваційного розвитку альтернативних джерел енергії. *Вісник Хмельницького національного університету. Економічні науки*. 2018. Вип. 3 (1). С. 199–204. <http://elar.khnu.km.ua/jspui/handle/123456789/6698>.

13. Barath J.N., Soundarrajan A., Stepenko S., Husev O., Vinnikov D., Nguyen M.-K. Topological Review of Quasi-Switched Boost Inverters. *Electronics*. 2021. Vol. 10. P. 1485. <https://doi.org/10.3390/electronics10121485>.

14. Shevchenko S. Finding Software Ways to Reduce the Error for the Solar Power Plant Simulation Model. *Proceedings – 16th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering, TCSET*. 2022. P. 277–280. <https://doi.org/10.1109/TCSET55632.2022.9766844>.

15. Галько С. В. Використання когенераційних фотоелектричних модулів для зарядки акумуляторів електромобілів. *Праці ТДАТУ. Технічні науки*. Мелітополь : ТДАТУ. 2019. Вип. 19. Т. 3. С. 130–141. <https://doi.org/10.31388/2078-0877-19-3-130-141>.

16. Miroshnyk O., Moroz O., Shchur T., Chepizhnyi A., Qawaqzeh M., Kocira S. Investigation of Smart Grid Operation Modes with Electrical Energy Storage System. *Energies*. 2023. Vol. 16 (6). P. 2638. <https://doi.org/10.3390/en16062638>.

17. Mahto T., Mukherjee V., Energy storage systems for mitigating the variability of isolated hybrid power system. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2015. Vol. 51. P. 1564–1577. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.07.012>.

18. Gundebommu S.L., Rubanenko O., Cosovic M. Determination of Normative Value Power Losses in Distribution power grids with Renewable Energy Sources using Criterion Method. *2020 19th International Symposium INFOTEH-JAHORINA (INFOTEH)*. East Sarajevo, Bosnia and Herzegovina. 2020. P. 1–6. <https://doi.org/10.1109/10.1109/INFOTEH48170.2020.9066302>.

19. Savchenko O., Miroshnyk O., Moroz O., Trunova I., Sereda A., Dudnikov S., Kozlovskiy O., Buinyi R., Halko S. Improving the Efficiency of Solar Power Plants Based on Forecasting the Intensity of Solar Radiation Using Artificial Neural Networks. *2021 IEEE 2nd KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)*, Kharkiv, Ukraine. 2021. P. 137–140, <https://doi.org/10.1109/KhPIWeek53812.2021.9570009>.

20. Halko S., Halko K., Suprun O., Qawaqzeh M., Miroshnyk O. Mathematical modelling of cogeneration photoelectric module parameters for hybrid solar charging power stations of electric vehicles. *2022 IEEE 3rd KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)*. Kharkiv, Ukraine. 2022. P. 1–6. <https://doi.org/10.1109/KhPIWeek57572.2022.9916397>.

21. Belik M., Rubanenko O. PV system for emergency power supply of cattle-farm in war conditions. *2023 IEEE 64th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON)*, Riga, Latvia. 2023. P. 1–7. <https://doi.org/10.1109/10.1109/RTUCON60080.2023.10412928>.

22. Belik M., Rubanenko O., Rubanenko O. Optimization of PV-system design for household. *2023 IEEE 4th KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)*, Kharkiv, Ukraine. 2023. P. 1–6 <https://doi.org/10.1109/KhPIWeek61412.2023.10312893>.
23. Molderink A., Bakker V., Bosman M.G.C., Hurink J.L., Smit G.J.M. Management and Control of Domestic Smart Grid Technology. *In IEEE Transactions on Smart Grid*, Sept. 2010. Vol. 1 (2). P. 109–119. <https://doi.org/10.1109/TSG.2010.2055904>.
24. Alrefo I.F., Matsulevych O., Vershkov O., Halko S., Suprun O., Miroshnyk O. Designing the working surfaces of rotary planetary mechanisms. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2023. Vol. 4. P. 82–88. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2023-4/082>.
25. Sansaniwal S., Sharma V., Mathur J. Energy analyses of various typical solar energy applications: A comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2018. Vol. 82 (1). P. 1576–1600. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.07.003>.
26. Viacheslav B., Roman B., Andrij S., Volodymyr T. Integration of New Single-Phase-to-Ground Faults Detection Devices into Existing SmartGrid Systems. *2019 IEEE 6th International Conference on Energy Smart Systems (ESS)*, Kyiv, Ukraine. 2019. P. 84–87. <https://doi.org/10.1109/ESS.2019.8764237>.
27. Al Issa H.A., Khasawneh A., Sotnik O., Miroshnyk O., Sotnik O., Tymchuk S. Influence of the Value of the Power Factor of Electricity Consumers in the Residential Sector of the Village on the Technical and Economic Indicators of Low-Voltage Electrical Networks. *2021 IEEE International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES)*. 2021. P. 1–4. <https://doi.org/10.1109/MEES52427.2021.9598687>.
28. Dwornicka R., Pietraszek J. The outline of the expert system for the design of experiment. *Production Engineering*. 2018. Vol. 20. P. 43–48. <https://doi.org/10.30657/pea.2018.20.09>.
29. Перевірочний розрахунок силового трансформатора : метод. вказівки до виконання розрахункових робіт з дисц. «Основи технічної експлуатації енергетичного обладнання систем електропостачання» для студентів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти денної та заочн. форм навч., спец.: 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка / Державн. біотехнолог. ун.-т; упоряд.: В. Г. Пазій, І. М. Трунова. Харків : ДБТУ. 2022. 35 с.
30. Zamulko A., Chernetska Y. Benchmarking method for analyzing the efficiency of the electricity distribution system operators. *Power engineering: economics, technique, ecology*. 2018. Vol. 3. P. 35–44. <https://doi.org/10.20535/1813-5420.3.2018.164264>.
31. Al-Issa H.A., Qawaqzeh M., Kurashkin S., Halko S., Kvitka S., Vovk O., Miroshnyk O. Monitoring of power transformers using thermal model and permission time of overload. *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)*. 2022. Vol. 12 (3). P. 2323–2334. <https://doi.org/10.11591/ijece.v12i3.pp2323-2334>.
32. Dwarakesh K., Jeyasekar C. Design and Implementation of Low-cost Remote Monitoring of Distribution Transformer with Consumer wise Energy recording, *Load control & Power theft detection using Internet of Things. IJAREE*, July 2018. Vol. 1 (1). P. 71–79.
33. Krasnozhon A.V., Buinyi R.O., Pentegov I.V. Calculation of active power losses in the grounding wire of overhead power lines. *Technical Electrodynamics*. 2016. Vol. 4. P. 23–25. <https://doi.org/10.15407/techned2016.04.023>.
34. Kennedy O., Elizabeth A., Robert O., John S. Monitoring and Fault Detection System for Power Transmission Using GSM Technology. *World Congress in Computer Science Computer Engineering & Applied Computing*, July 2017. P. 93–97.
35. Matukhno V., Baidak Yu., Tomlein P. Thermal subsystem of voltage distribution transformer. *Refrigeration Engineering and Technology*. 2016. Vol. 52 (6). P. 58–64.
36. Методичні вказівки з обліку та аналізу в енергосистемах технічного стану розподільних мереж напругою 0,38–20 кВ з повітряними лініями електропередачі: СОУ-Н МПЕ 40.1.20.576:2005. Київ : ГРІФРЕ, 2005. 67 с.
37. Krynke M., Klimecka-Tatar D. The use of Computer Simulation Techniques in Production Management. *Materials Research Proceedings*. 2022. Vol. 24. P. 126–133. <https://doi.org/10.21741/9781644902059-19>.
38. Dali M., Belhadj J., Roboam X. Hybrid solar–wind system with battery storage operating in grid-connected and standalone mode: control and energy management – experimental investigation. *Energy*. 2010. Vol. 35. P. 2587–2595. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2010.03.005>.

Стаття надійшла до редакції 25.02.2025 р.



S. Halko¹, O. Sotnik², O. Miroshnik², Ol. Sotnik², D. Zelenkov¹

¹Dmytro Motornyi Tavria State Agrotechnological University

²State Biotechnological University

BALANCING THE LOAD SCHEDULE OF RURAL COMMUNAL CONSUMERS WITH THE USE OF SOLAR PANELS AND ENERGY STORAGE

Summary

The paper analyzes changes in the daily schedule of electrical loads of the 10/0.4 kVA transformer substation line with a capacity of 100 kVA in the Kharkiv region, which supplies rural residential buildings in winter and summer. To smooth out load peaks and optimize energy consumption, the efficiency of energy storage devices was calculated to determine the possibilities of their use. An analysis of daily energy consumption in twenty private houses was carried out, including the calculation and assessment of the energy required to ensure the operation of household electrical appliances for 24 hours. Based on the data obtained, daily load graphs were built, reflecting changes in energy consumption during the day. A method for balancing load schedules using a solar panel and energy storage is proposed. This method allows you to increase the efficiency of such electrical networks.

The daily change in electrical loads of the 10/0.4 kV transformer substation line to provide electricity to 20 houses using solar generation and batteries to equalize the load schedule in the summer season showed the efficiency of using electrical energy storage devices, namely in the morning and in the evening, during peak electrical loads, it was possible to reduce their level by almost 40%.

Daily shifts in the electrical line of the 10/0.4 kV transformer substation to power 20 houses using solar generation and batteries in winter showed insufficient electricity production by solar panels to reduce uneven schedules. The maximum electrical load in the winter season during the studies was 52.4 kW, and the average load in the winter season exceeded the average load in the summer season by 26.2%. In the winter season, it is recommended to charge batteries from the mains during low electrical loads to reduce the unevenness of the electrical load schedule.

Keywords: low-voltage rural power grids, rural residential buildings, electric load schedule, green energy, solar panel, electric energy storage.