

П. Д. Лежнюк<sup>1</sup>  
В. М. Лисий<sup>2</sup>

## ОЦІНЮВАННЯ ВПЛИВУ ФАКТОРІВ, ЯКІ ВПЛИВАЮТЬ НА ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ ВДЕ ПІД ЧАС БАЛАНСУВАННЯ РЕЖИМІВ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМ

<sup>1</sup>Вінницький національний технічний університет;  
<sup>2</sup>Інститут відновлювальної енергетики НАН України

*В роботі оцінено фактори спричинені масовим будівництвом відновлювальних джерел енергії (ВДЕ), які в свою чергу знижують їх енергоефективність, а суттєва потужність генерації, що залежить від погодних умов зумовлює складність у балансуванні режимів електроенергетичних систем. Для передачі генерованої ними електроенергії використовують електричні мережі загального призначення. Вони впливають на техніко-економічні параметри електричних мереж. Зокрема, зі збільшенням кількості електроенергії в балансі електроенергетичних систем (ЕЕС).*

*Запропонований метод структуризації втрат електроенергії, що спричинені перетоками потужності в електричних мережах, які pojawiaються в них від зеленого генерування, дадуть змогу збільшити ефективність використання ВДЕ у балансуванні режимів шляхом закладання їх в графік генерації на наступну добу. Як наслідок, покращення точності прогнозування генерування, що збільшує енергоефективності таких джерел.*

*Метод ґрунтується на математичній моделі електричної мережі для визначення втрат, в якій застосовуються коефіцієнти розподілу струмів у вітках від вузлів з ВДЕ та вузлові напруги. В результаті формується матриця коефіцієнтів розподілу втрат потужності у вітках що залежить від перетоку потужності по вітці від кожного вузла схеми. Для формування масиву даних потрібного для визначення втрат розраховують усталений режим електричної мережі або використовують експериментальні дані вимірювання. Показано, що значення втрат електроенергії в електричних мережах, викликаних ВДЕ, можуть використовуватися під час оперативного планування балансу електроенергії в ЕЕС та, оскільки вони є адресними, то відповідно може компенсуватися їх вартість.*

**Ключові слова:** електроенергетична система, відновлювальні джерела енергії, вектор сумарних втрат, параметри електричної мережі.

### Вступ

Відновлювані джерела енергії становлять зростаючу частку виробництва енергії в світі. Очікується, що фотоелектричні (PV) і вітрові технології стануть найбільшим джерелом відновлювальної енергії до 2025 року, 60%. Тому, енергоефективність фотоелектричних станцій стає головною проблемою в сценарії де більшість власників джерел альтернативної енергії працюють по затвердженим графікам генерації на наступну добу, та піддаються обмеженням у випадку відхилення їх від встановлених меж.

Такі темпи росту відновлювальної енергії не минули Україну. Набула популярності тенденція впровадження відновлювальних джерел електроенергії (ВДЕ) в розподільчих електричних мережах (РЕМ), спричинила постановку нових завдань, спрямованих на оцінку факторів енергоефективності елементів даного ринку, а саме ВДЕ [1].

До елементів ринку електричної енергії, що варті уваги, крім атомних електричних станцій (АЕС) та теплових електростанцій (ТЕС), можна віднести відновлювальні джерела електричної енергії (ВДЕ), що в даний час мають значення генерації в пікові 16%, що еквівалентно ТЕС рис.1.

Нестабільність режимів роботи ФЕС негативно впливає на балансову надійність енергосистеми, а також на стійкість її роботи [2]. Тому актуальною постає задача оцінки фактору втрат потужності та електроенергії в електричних мережах, спричинених нестабільним генеруванням відновлювальних джерел, які впливають на енергоефективність ВДЕ, а також на баланс потужності та електроенергії в енергосистемі.

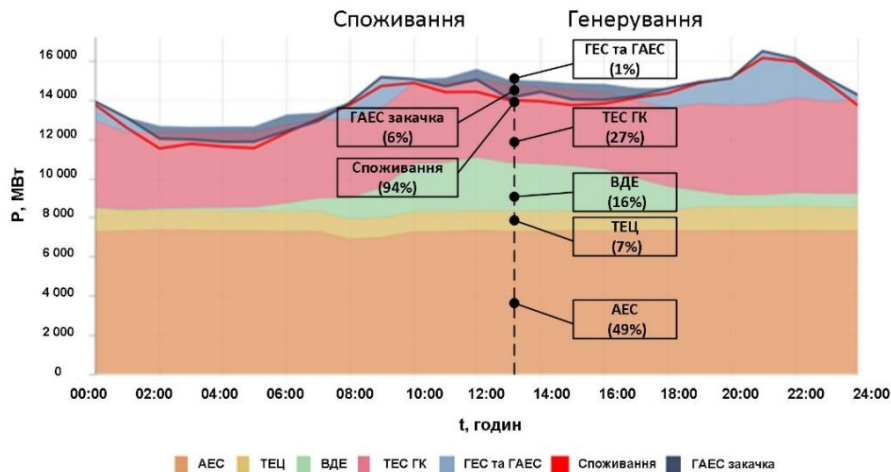


Рис. 1. Приклад добового графіка електроспоживання

Зазначена вище задача містить важливі фактори, що погіршують балансову надійність ЕЕС.  
А саме:

1. значний обсяг енергії яка генерується ВДЕ, що є важкопрогнозованою та залежить від погодних умов;
  2. зменшення попиту на електроенергію, яка генерується ТЕС, що являються гарячим резервом ЕМ та виконують ключову функцію у балансуванні.
- З цього випливають наступні наслідки:
- ускладнення керування режимами електричних мереж;
  - поява надлишкової потужності, що зумовлює труднощі з регулюванням частоти;
  - виникнення реверсивних перетікань потужності в розподільних мережах та в мережах високої напруги;
  - необхідність забезпечення стійкості роботи енергосистеми за відключення (або включення) великої кількості ВДЕ;
  - поява в структурі електричних мереж відновлюваних джерел енергії, що мають імовірнісний характер генерування потужності;
  - складність узгодження графіків генерування відновлюваних джерел енергії та електроспоживання.

### Результати дослідження

Для оцінки втрат, спричинених відновлювальними джерелами, доцільним є вирішення задачі визначення втрат потужності та електроенергії в електричних мережах та окремих її вітках, які викликані приєднанням окремих ВДЕ та їх груп, методом визначення коефіцієнтів розподілу втрат потужності генерування ВДЕ і використанням результатів розрахунку усталеного режиму мережі. В залежності від місця встановлення та способу приєднання нової станції до мережі залежатимуть втрати, які з'являться в ній (див. рис. 2).

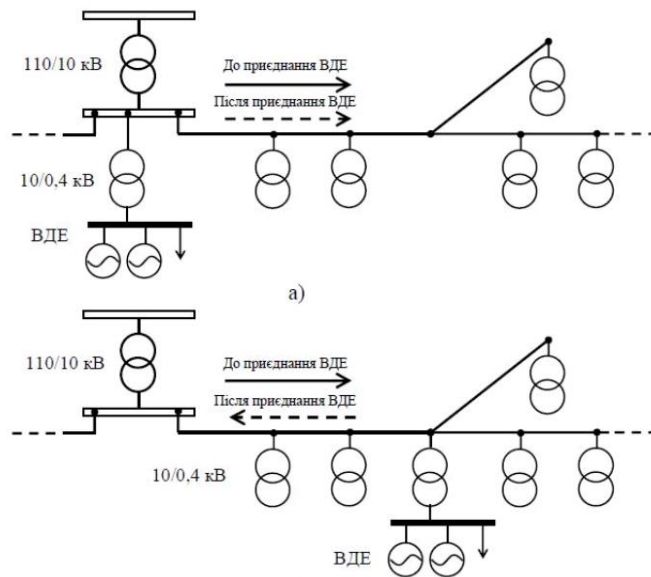


Рис. 2. Розподілення втрат в ЕМ в залежності від місця приднання ВДЕ

Якщо схема і параметри електричних мереж ЕЕС є незмінними, то доцільним є застосування методу визначення струмів у вітках за допомогою матриці струм розподілу. Матриця струморозподілу  $C$  розраховується методом одиничних струмів або за наступним виразом [3]:

$$C = z_b^{-1} M_{\Sigma t} (M_{\Sigma} z_b^{-1} M_{\Sigma t})^{-1}, \quad (1)$$

де  $z_b$  – діагональна матриця комплексних опорів віток схеми електричної мережі;  $M_{\Sigma}$  – матриця з'єднань віток у вузлах, включаючи і балансувальні (тут і далі індекс "t" означає, що матриця або вектор є транспонованими).;

З врахуванням виразу (1) отримаємо матрицю коефіцієнтів розподілу втрат потужності у вітках схеми (2):

$$\dot{V}_i = (\dot{U}_i M_{\Sigma t}) \hat{C}_i \dot{U}_d^{-1} \quad (2)$$

де  $\dot{U}_i$  – транспонований вектор напруг у вузлах, включаючи і балансувальні  $M_{\Sigma t}$  – вектор-стовпець матриці з'єднань віток у вузлах  $M_{\Sigma}$ ;  $\dot{U}_d$  – діагональна матриця напруг у вузлах без балансувальних вузлів.

З врахуванням виразів (1) і (2), отримаємо рівняння (3), яке описує залежність сумарних втрат у вітках:

$$\Delta \dot{S}_b = \dot{V} \cdot \dot{S}_{\Sigma} \quad (3)$$

де  $\dot{S}_{\Sigma}$  – вектор навантажень і генерувань ВДЕ у вузлах, включаючи і балансувальні.

Втрати потужності у заданій вітці (вітках) електричної мережі від протікання в ній електроенергії ВДЕ визначається за допомогою (3). Для цього розраховується вектор-рядок матриці розподілу втрат  $V$  з уточненням напруги у вузлах відповідно до значень потужності у цих же вузлах мережі і визначаються складові втрат потужності.

Втрати електроенергії є сумою втрат потужності у всіх режимах мережі за розрахунковий період  $T$ . В цьому випадку прогнозуються і є відомими графіки генерування ВДЕ, а також за даними автоматизованої системи комерційного обліку електроенергії (АСКОЕ) відомі фактичні значення виробленої ВДЕ електроенергії на інтервалах часу.

Значення визначаються за графіками прогнозу потужностей  $P(t)$  і  $Q(t)$  у вузлах з ВДЕ. Наприклад, для  $i$ -ої ФЕС фактичні значення втрат електроенергії для цієї ж ФЕС визначаються як:

$$\Delta W_{ВД_i}^{np} = \sum_{i=1}^n \Delta P_{ВД_i}^{np} \Delta t \quad (4)$$

де  $\Delta P_{ВД_i}^{np}$  – втрати потужності, які приймаються постійними на протязі часу  $\Delta t_i$ ;  $n$  – кількість інтервалів, на які розбито графік зміни втрат.

Якщо прогнозні і фактичні значення втрат електроенергії приведені до однакового періоду часу, то визначається похибка прогнозування втрат електроенергії  $\delta$  під час балансування режиму ЕЕС:

$$\delta = \frac{\Delta W_{ВД}^{np} - \Delta W_{ВД}^{\phi}}{\Delta W_{ВД}^{np}} 100\% \quad (5)$$

де  $\Delta W_{ВД}^{np}$  – прогнозовані значення втрат електроенергії для ФЕС;  $\Delta W_{ВД}^{\phi}$  – фактичні значення втрат електроенергії для ФЕС.

Відповідно до значення похибки розраховується додаткова потужність до потужності заміщення втрат від ВДЕ маневреними потужностями ЕЕС або накопичувачами електроенергії [4]

Оцінивши втрати спричинені ВДЕ, спостерігається позитивний ефект від встановлення ФЕС в електричній мережі. Завдяки роботі ФЕС втрати електроенергії в мережі зменшилися на 6,08 МВт-год порівняно з тим, коли за того ж навантаження споживачів ФЕС не працювала б рис 3. На графіках втрат потужності в мережі: червона крива – втрати потужності в мережі, коли ФЕС відключена; синя крива – втрати потужності в мережі, коли ФЕС генерує електроенергію у відповідності до графіка генерування; зелена крива – втрати електроенергії в мережі, які викликані в ній генеруванням ФЕС.

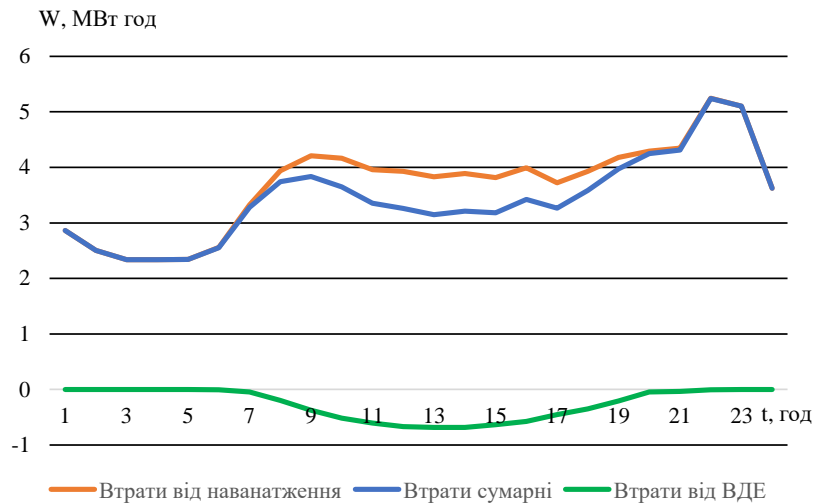


Рис. 3. Залежності втрат електроенергії в електричній мережі

Ефект впливу ФЕС на втрати електроенергії в мережі залежить не тільки від її генерування, але також від навантаження споживачів. Наприклад, якщо о 13.00 генерування ФЕС залишиться, а навантаження зменшиться в два рази, то сумарні втрати потужності в мережі складатимуть 0,71 МВт. Тобто, завдяки ФЕС втрати в мережі, обчислені за (3), збільшаться з  $-0,682$  МВт до  $-0,203$  МВт.

### Висновки

Використання методу визначення втрат потужності та електроенергії в електричних мережах та окремих її вітках, які викликані окремими ВДЕ, дає можливість в реальному часі оцінювати фактор впливу втрат на енергоефективність ВДЕ. Значення втрат електроенергії в електричних мережах, викликаних ВДЕ, можуть використовуватися під час планування графіків генерування, оскільки вони є адресними, то відповідно може компенсуватися їх вартість.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Кудря С. О. Нетрадиційні та відновлювані джерела енергії / С. О. Кудря – Підручник. – Київ: Національний технічний університет України («КПІ»), 2012.–495с.
- [2] Лежнюк П. Д., Комар В. О., Добровольська Л. Н., Повстянко К. О. Відносне оцінювання засобів балансування режимів електроенергетичних систем з відновлюваними джерелами енергії // Вісник ВПІ. – № 3. – 2022. – С. 24–30.
- [3] О. Б. Бурикін, В. А. Видмиш, П. П. Медяний. Визначення втрат потужності від транзитного перетікання в електричних мережах. // Наукові праці ВНТУ. – 2010. – № 1. Режим доступу до журналу: <http://praci.vntu.edu.ua/article/view/1024/40>.
- [4] Лежнюк П.Д., Комар В.О., Кравчук С.В., Лесько В.О., Нетребський В.В. Балансова надійність електричної мережі з фотоелектричними станціями: // Монографія – Вінниця: ВНТУ, 2018. – 136 с.

### REFERENCES

- [1] Kudrya S. O. Non-traditional and renewable energy sources / S. O. Kudrya - Textbook. - Kyiv: National Technical University of Ukraine ("KPI"), 2012.-495p.

[2] Lezhniuk P. D., Komar V. O., Dobrovolska L. N., Povstyanko K. O. Relative evaluation of means of balancing modes of electric power systems with renewable energy sources // *Visnyk VPI*. – No. 3. – 2022. – P. 24–30.

[3] O. B. Burykin, V. A. Vydmysh, P. P. Mediany Determination of power losses due to transit flow in electric networks. // *Scientific works of VNTU*. – 2010. – No. 1. Mode of access to the journal: <http://praci.vntu.edu.ua/article/view/1024/40>.

[4] Lezhniuk P.D., Komar V.O., Kravchuk S.V., Lesko V.O., Netrebskyi V.V. Balanced reliability of the electric network with photovoltaic stations: // *Monograph – Vinnytsia: VNTU*, 2018. – 136 p.

**Лежнюк Петро Дем'янович** — д-р техн. наук, професор, професор кафедри електричних станцій та систем, e-mail: lezhpd@gmail.com ; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0338-2131>

Вінницький національний технічний університет;

**Лусий Владислав Михайлович** — аспірант, e-mail: 2e.14b.vlad.lysyi@gmail.com

Інститут відновлювальної енергетики НАН України

**P. D. Lezhniuk<sup>1</sup>**

**V. M. Lysyi<sup>2</sup>**

## **ASSESSMENT OF THE IMPACT OF FACTORS WHICH INFLUENCE THE ENERGY EFFICIENCY OF RES DURING THE BALANCING OF ELECTRICAL ENERGY SYSTEM MODES**

<sup>1</sup>Vinnytsia National Technical University;

<sup>2</sup>Institute of Renewable Energy of the National Academy of Sciences of Ukraine

*The paper evaluates the factors caused by the massive construction of renewable energy sources (RES), which in turn reduce their energy efficiency, and the significant generation capacity, which depends on weather conditions, causes difficulty in balancing the modes of electric power systems. General-purpose electrical networks are used to transmit the electricity generated by them. They affect the technical and economic parameters of electrical networks. In particular, with an increase in the amount of electricity in the balance of electric power systems (EPS).*

*A method of structuring electricity losses caused by power flows in electrical networks, which appear in them from green generation, is proposed, which will make it possible to increase the efficiency of RES use in mode balancing by including them in the generation schedule for the next day. As a consequence of improving the accuracy of generation forecasting, which increases the energy efficiency of such sources.*

*The method is based on a mathematical model of the electrical network for determining losses, in which current distribution coefficients in circuits from RES nodes and node voltages are used. As a result, a matrix of power loss distribution coefficients in lines is formed, which depends on the flow of power along the line from each circuit node. To form the array of data needed to determine losses, the steady-state mode of the electrical network is calculated or experimental measurement data is used. It is shown that the values of electricity losses in electrical networks caused by RES can be used during the operational planning of the electricity balance in the UES and, since they are addressable, their cost can be compensated accordingly.*

**Keywords:** electric power system, renewable energy sources, total loss vector, electric network parameters.

**Lezhniuk Petro D.** — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Professor of the Chair of Power Plants and Systems, e-mail: lezhpd@gmail.com ; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0338-2131>

**Lysyi Vladyslav M.** — graduate student, e-mail: 2e.14b.vlad.lysyi@gmail.com