

І. О. Гунько<sup>1,2</sup>В. М. Лисий<sup>1</sup>А. В. Ситник<sup>2</sup>

# ВИЗНАЧЕННЯ ДЛЯ СПОЖИВАЧІВ ПОХОДЖЕННЯ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ ВІД НИЗЬКОВУГЛЕЦЕВИХ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ

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

У дослідженні основна увага приділяється визначенню частки електроенергії, яку споживач отримує з низьковуглецевих джерел (НВДЕ), таких як відновлювані джерела енергії та атомна енергія. Підтвердження походження спожитої електроенергії дозволяє покращити імідж компанії перед клієнтами, партнерами та інвесторами та маркувати відповідним чином продукцію. Також, в умовах введення механізму вуглецевого коригування імпорту ЄС (СВАМ), визначення походження електроенергії стає актуальним для підприємств таких галузей, як металургійна, будівельна, енергетична та агропромислова. СВАМ створить додаткові бар'єри для торгівлі, збільшуючи витрати через вуглецеві викиди, що ускладнить експорт українських товарів до ЄС. Використання «чистої» енергії може зменшити вартість вуглецевих сертифікатів у межах СВАМ. Компанії, що беруть енергію з низьковуглецевих джерел, матимуть менше викидів CO<sub>2</sub>, що зменшить їхні витрати на імпорт до ЄС. Для компаній та підприємств, що провадять зовнішню торгівлю, це може стати важливою стратегією адаптації до нових вимог і збереження конкурентоспроможності. З метою підтвердження походження електроенергії від НВДЕ досліджено можливості застосування методу розрахунку окремих складових перетікань електроенергії у вітках схеми електричної мережі, що зумовлені генеруванням та споживанням у вузлах. Метод ґрунтується на методах та алгоритмах розрахунку ustalених режимів електричних мереж. В результаті формується матриця коефіцієнтів розподілу потужності, що дозволяє визначити складову перетікань потужності у вітках схеми зумовлену генеруванням НВДЕ. Як приклад, виконано розрахунок для схеми IEEE з 14 вузлів, включаючи різні джерела енергії, з використанням програмного комплексу Power Factory. Аналіз отриманих результатів розрахунку підтверджується результатами комп'ютерного моделювання.

**Ключові слова:** походження електроенергії, математична модель, низьковуглецеві джерела енергії, відновлювані джерела енергії, матриця коефіцієнтів розподілу потужності НВДЕ

## Вступ

Політика декарбонізації є ключовим напрямком глобальних зусиль для боротьби зі зміною клімату та зниженням викидів парникових газів [1, 2]. Вона полягає у зменшенні залежності від вуглецевих джерел енергії (вугілля, нафта, газ) і переході на низьковуглецеві джерела енергії, зокрема, відновлювані джерела енергії (вітрова, сонячна, гідроенергія). У звіті IEA Net Zero by 2050 наголошується на важливості гідроенергетики та атомної енергетики як основних джерел низьковуглецевої електроенергії для енергетичного переходу [3]. Європейський зелений курс (European Green Deal) також ставить за мету досягнення кліматичної нейтральності до 2050 року, зокрема шляхом скорочення викидів у всіх секторах економіки та розвитку відновлюваних джерел енергії [4]. Для стимулювання інвестицій компанії використовують інструменти, зокрема, гарантії походження енергії (GO) або укладають контракти PPA [5, 6]. Визначення походження електроенергії стає складним завданням, коли джерело енергії знаходиться на відстані від виробника і генерує в електричну мережу загального призначення, а не напряму для споживача (як у випадку з physical PPA). Це вимагає врахування витрат на передачу енергії від НВДЕ операторам систем розподілу та визначення частки енергії з НВДЕ в загальному енергомиксі, яку отримує споживач. Метою дослідження є визначення обсягу електроенергії, яку споживач отримує від НВДЕ, для підтвердження її походження та можливості використання зеленого маркування продукції.

## Алгоритм оцінювання частки електроспоживання заданого споживача, яка забезпечується з відновлювальних джерел енергії

На рис. 1 наведено алгоритм визначення частки потужності, що генерується НВДЕ і передається до заданого споживача електроенергії. Підхід в алгоритмі закладений такий, що визначаються потоки потужності у вітках електричної мережі, які інцидентні з вузлами з заданими в них списком споживачами електроенергії від НВДЕ [7, 8]. Безпосередньо у вузлі з балансу потужності з групи різних споживачів розраховується потужність споживача, зорієнтованого на споживання електроенергії від конкретного НВДЕ з врахуванням фізичних процесів у електричній мережі. Таким чином стає можливим оцінювання обсягів покриття навантаження заданого споживача з НВДЕ, які віддають енергію до електроенергетичної системи в контрольований період часу  $T$ . Вхідними даними для розрахунку є параметри електричної мережі, навантаження вузлів, заданих потужністю або графіками, а також масиви вузлів генерування НВДЕ  $\theta_{\text{НВДЕ}}$  і централізованого  $\theta_{\text{ЦЖ}}$  та споживачів з контрольованим значенням гарантованого походження електроенергії від НВДЕ  $\dot{S}_{\text{НВДЕ}}$ .

Для того, щоб перейти від потужності споживача до спожитої ним електроенергії, використовуються методи середніх або максимальних навантажень. В залежності від обраного методу задається середнє  $\dot{S}_{\text{cp}}$  або максимальне  $\dot{S}_{\text{max}}$  значення потужності споживача за період  $T$ . Більш точним методом є варіант, коли задається прогнозований погодинний графік споживання на добу наперед і фактичні дані споживання за даними автоматизованої системи комерційного обліку електроенергії (АСКОЕ). В першому випадку визначається прогнозована кількість електроенергії, яка запланована для споживання від НВДЕ. В іншому випадку визначається фактичне значення спожитої електроенергії від НВДЕ. Ці дані передаються у реєстр гарантій походження з урахуванням обсягу гарантованого покриття навантаження споживача енергією з відновлюваних джерел енергії. В залежності від необхідності і технічних можливостей системи обліку запуск програми ініціюється щогодинно або за графіком у відповідності до графіків генерування і споживання електроенергії в електричній мережі.

Масив напруги вузлів, необхідний для розрахунків, можливо отримати двома способами: як результат розрахунку усталеного режиму або за даними АСКОЕ. Якщо визначаються погодинні прогнозовані значення генерування НВДЕ і споживання, то напруга визначається за результатами розрахунків усталених режимів або, коли допустима точність, то за середньо статистичними даними. Якщо відповідно визначаються фактичні значення, то вихідними даними є результати вимірювання напруги в АСКОЕ.

Після формування масиву напруги вузлів формується матриця інциденцій  $M_{\Sigma}$  і матриця коефіцієнтів розподілу вузлових задаючих струмів у вітках електричної мережі  $\dot{C}$ . В подальшому розраховується матриця коефіцієнтів розподілу потужності вузлів по вітках електричної мережі  $\dot{D}$ , яка складається з рядків  $\dot{D}_i$ . Використовуючи матрицю  $\dot{D}$ , у вітках мережі визначаються ті частини сумарної потужності  $\dot{S}_{\text{НВДЕ}}$ , які перетікають від НВДЕ.

Підсумовуючи потужності  $\dot{S}_{\text{НВДЕ}}$  віток, що інцидентні до  $j$ -х вузлів з контрольованим споживанням від НВДЕ, визначається їх гарантоване значення електроенергії походженням від НВДЕ. Ці вузли можуть бути двох типів. Якщо вузол тупиковий, тобто до нього тільки підходить вітка з потужністю від НВДЕ  $\dot{S}_{\text{НВДЕ } j}$ , то ця потужність і є потужністю походженням від НВДЕ для даного споживача електроенергії. Якщо вузол проміжний, то потужність  $\dot{S}_{\text{НВДЕ } j}$  визначається з балансу потужності у  $j$ -му вузлі. У блоці «Виведення результатів» в залежності від форми завдання вихідних даних потужність  $\dot{S}_{\text{НВДЕ } j}$

перераховуються в електроенергію споживача походженням від НВДЕ і відповідним чином протоколюється.

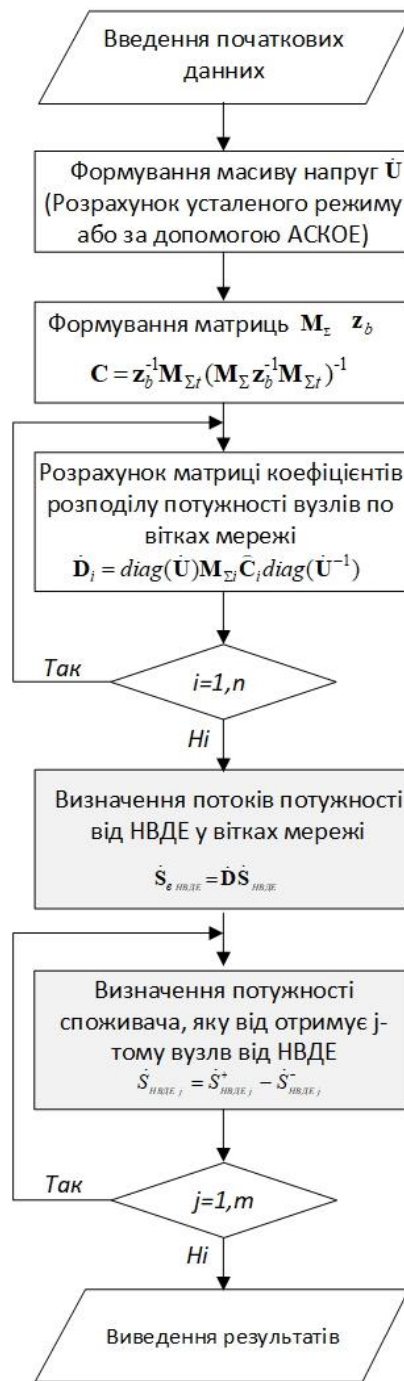


Рис. 1. Алгоритм визначення електроенергії споживача походженням від низьковуглецевих джерел енергії

### Результати дослідження

З метою дослідження можливості застосування методу визначення походження електроенергії споживача від відновлюваних джерел енергії та демонстрації його ефективності для кільцевих мереж різних напруг, розглянемо 14 вузлову мережу IEEE, в 6 та 8 вузлах якої встановлено фотоелектричні станції по 15, 20 МВт. відповідно. Вузол №1 є балансуєчим вузлом. Контрольний розрахунок усталеного режиму для максимального

генерування ФЕС був виконаний за допомогою програми PowerFactory 15.1. За результатами розрахунку визначені напруги у вузлах. Вважаємо, що перший вузол отримує живлення від НВДЕ, в нашому випадку від АЕС, а 2 вузол отримує живлення від джерела з високим вуглецевим слідом. Виконаємо розрахунки перетоків потужності по вітках схеми з урахуванням їх походження, для розглянутої схеми мережі за методикою описаною у [7]. З метою зменшення обсягів розрахунків приведемо матрицю розподілу потужностей по вітках електричної мережі в тому числі і від НВДЕ:

$$S = \begin{pmatrix} & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & 8 & 9 & 10 & 11 & 12 & 13 & 14 \\ 1 & -15.05 & 72.35 & 31.55 & 4.51 & -2.08 & -11.21 & 0 & 17.54 & 5.32 & 2.0 & 3.4 & 7.62 & 8.85 \\ 2 & 0.54 & 54.95 & 7.07 & 0.76 & -0.37 & -2.49 & 0 & 3.84 & 1.13 & 0.39 & 0.61 & 1.39 & 1.8 \\ 3 & 1.11 & 10.23 & 14.33 & 1.53 & -0.75 & -5.05 & 0 & 7.78 & 2.29 & 0.79 & 1.23 & 2.81 & 3.65 \\ 4 & 1.49 & 4.12 & 8.97 & 2.06 & -0.89 & -3.25 & 0 & 5.27 & 1.71 & 0.75 & 1.45 & 3.15 & 3.07 \\ 5 & -3.15 & 25.38 & 17.58 & 3.22 & -1.43 & -6.31 & 0 & 10.03 & 3.14 & 1.28 & 2.33 & 5.13 & 5.43 \\ 6 & -1.48 & 26.5 & 23.83 & -2.06 & 0.51 & -8.02 & 0 & 11.25 & 2.63 & 0.27 & -0.8 & -1.1 & 2.8 \\ 7 & -0.54 & 39.25 & -7.07 & -0.76 & 0.37 & 2.49 & 0 & -3.84 & -1.13 & -0.39 & -0.61 & -1.39 & -1.8 \\ 8 & 0.2 & -3.1 & -2.8 & 0.27 & 3.12 & 1.63 & 0 & -4.37 & -2.42 & -1.93 & -5.05 & -10.32 & -6.25 \\ 9 & -0.02 & 0.31 & 0.33 & -0.09 & 0.18 & 14.09 & 0 & -6.24 & -1.68 & -0.39 & -0.27 & -0.83 & -2.14 \\ 10 & -0.17 & 2.76 & 2.44 & -0.18 & 0.49 & 3.37 & 0 & -19.04 & -5.01 & -1.21 & -0.88 & -2.61 & -6.98 \\ 11 & 0.02 & -0.3 & -0.32 & 0.08 & -0.18 & 4.98 & 0 & 6.14 & 1.65 & 0.39 & 0.26 & 0.81 & 2.11 \\ 12 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 19.15 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 13 & 0.12 & -1.87 & -1.69 & 0.16 & -0.41 & 0.98 & 0 & -2.64 & 6.96 & 1.59 & 0.45 & 0.85 & -0.34 \\ 14 & 0.12 & -1.88 & -1.7 & 0.16 & -0.41 & 0.99 & 0 & -2.65 & -2.05 & 1.57 & 0.45 & 0.85 & -0.34 \\ 15 & -0.12 & 1.88 & 1.7 & -0.16 & 0.41 & -0.99 & 0 & 2.65 & 2.05 & 1.93 & -0.45 & -0.85 & 0.34 \\ 16 & 0.07 & -1.15 & -1.04 & 0.1 & -0.25 & 0.61 & 0 & -1.62 & -0.34 & 0.03 & 0.67 & 2.51 & 9.21 \\ 17 & -0.01 & 0.22 & 0.2 & -0.02 & 0.05 & -0.12 & 0 & 0.31 & 0.06 & -0.01 & 3.8 & 2.05 & 1.08 \\ 18 & -0.06 & 0.95 & 0.86 & -0.08 & 0.21 & -0.5 & 0 & 1.34 & 0.28 & -0.02 & 1.61 & 8.91 & 4.7 \\ 19 & -0.07 & 1.15 & 1.04 & -0.1 & 0.25 & -0.61 & 0 & 1.62 & 0.34 & -0.03 & -0.67 & -2.51 & 5.69 \\ 20 & -0.01 & 0.22 & 0.2 & -0.02 & 0.05 & -0.11 & 0 & 0.31 & 0.06 & -0.01 & -2.29 & 2.04 & 1.08 \end{pmatrix}$$

Так, проаналізуємо результати розрахунків на прикладі споживання навантаженням у вузлі 9. Можна визначити, що від ФЕС було отримано 5,64 МВт (з них від ФЕС 1-0,66 МВт, ФЕС 2 - 4,98 МВт), від другого вузла з ТЕС перетік до 9 вузла становить 0,19 МВт, решту отримує від АЕС. Для порівняння розглянемо покриття навантаження у 5 вузлі. Відповідно до розрахунків у 5 вузол перетік від ТЕС становить 2,97 МВт, решту покривається з балансуєчого вузла. Виходячи з того, що у 9 вузлі споживається 29,5 МВт, а у 5 – 7,6 МВт, то у відсотковому співвідношенні потужності отриманої від НДЕ до загальної потужності навантаження отримаємо наступні результати: для 5 вузла – 40%, для 9 – 99%, 20% з яких від ФЕС. Знаючи матрицю розподілу потужностей по вітках електричної мережі, можна також визначити матрицю втрат потужності, включаючи втрати від перетікання НВДЕ. Загальні втрати активної потужності, розраховані матричним методом, становлять 12,3 МВт. За результатами розрахунку усталеного режиму з використанням комплексу Power Factory, ці втрати становлять 12,37 МВт, що підтверджує точність запропонованого методу.

### Висновки

Визначення обсягу електроенергії, отриманої споживачем від низьковуглецевих джерел енергії (НВДЕ), необхідне для підтвердження її походження, що дозволить виробникам маркувати відповідним чином свою продукцію. Описаний метод може слугувати інструментом для підтвердження гарантій походження споживаної енергії. Оскільки НВДЕ використовують загальні електричні мережі для передачі виробленої електроенергії, визначення їх частки у перетіканні потужності до споживачів дозволяє враховувати вплив НВДЕ на параметри режиму електроенергетичної системи та може використовуватися при

оперативному плануванні балансу електроенергії. Результати розрахунків для 14-вузлової схеми ІЕЕЕ, виконані матричним методом, підтвердилися результатами комп'ютерного моделювання у програмному комплексі Power Factory.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Vormedal I., Bjander J., Lie Larsen M., Byskov Lindberg M. (2023). Technological Change and the Politics of Decarbonization. *A Re-making of Vested Interests, Environmental Innovation and Societal Transitions*, Volume 47, 100725, ISSN 2210-4224. [doi.10.1016/j.eist.2023.100725](https://doi.org/10.1016/j.eist.2023.100725).
- [2] Moreno, J., Campagnolo, L., Boitier, B. *et al.* (2024). The impacts of decarbonization pathways on Sustainable Development Goals in the European Union. *Commun Earth Environ* 5, 136. [doi.org/10.1038/s43247-024-01309-7](https://doi.org/10.1038/s43247-024-01309-7).
- [3] Net zero by 2050. Roadmap for the global energy sector. Access mode: <https://www.iea.org/reports/net-zero-by-2050>
- [4] European Green Deal. Access mode: [https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal\\_en](https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal_en)
- [5] The European Market for Guarantees of Origin for Green Electricity: A Scenario-Based Evaluation of Trading under Uncertainty. Available from: [https://www.researchgate.net/publication/376802131\\_The\\_European\\_Market\\_for\\_Guarantees\\_of\\_Origin\\_for\\_Green\\_Electricity\\_A\\_Scenario-Based\\_Evaluation\\_of\\_Trading\\_under\\_Uncertainty](https://www.researchgate.net/publication/376802131_The_European_Market_for_Guarantees_of_Origin_for_Green_Electricity_A_Scenario-Based_Evaluation_of_Trading_under_Uncertainty) [accessed Aug 05 2024].
- [6] Mendicino, L., Menniti D., Pinnarelli A., Sorrentino N., (2019). Corporate power purchase agreement: Formulation of the related leveled cost of energy and its application to a real life case study. *Applied Energy*. Volume 253253. [doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.113577](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.113577).
- [7] Lezhniuk, P., Burykin, O., Kulyk, V., Malogulko, J., Polishchuk, A., Sytnyk, A. (2022). Devising a method for estimating the share of electricity consumption by a given consumer, which is provided from renewable energy sources. *Eastern European Journal of Enterprise Technologies*, 5 (8 (119)), 21–30. [doi: https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.265749](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.265749)
- [8] Гунько І.О. Математична модель та алгоритм визначення походження електроенергії споживача від відновлюваних джерел енергії в електроенергетичній системі / І. О. Гунько, С. О. Кудря, В. О. Комар, П. Д. Лежнюк // Відновлювана енергетика. – 2024. – Вип. 2(77). – С. 6–12.

**Гунько Ірина Олександрівна** — кандидат техн. наук, доцент, докторант, e-mail: [irynd\\_hunko@ukr.net](mailto:irynd_hunko@ukr.net);

Інститут відновлюваної енергетики НАН України, Київ;

**Лисий Владислав Михайлович** — аспірант.

Інститут відновлюваної енергетики НАН України, Київ;

**Ситник Артур Валерійович** — асистент кафедри електричних станцій та систем.

Вінницький національний технічний університет, Вінниця.

**I. O. Hunko**<sup>1,2</sup>

**V. M. Lysyi**<sup>1</sup>

**A. V. Sytnyk**<sup>2</sup>

## Determining for consumers the origin of electricity from low-carbon energy sources

<sup>1</sup>Institute of Renewable Energy of the National Academy of Sciences of Ukraine

<sup>2</sup>Vinnitsia National Technical University

*The research focuses on determining the share of electricity that a consumer receives from low-carbon sources, such as renewable energy sources and nuclear power. Confirmation of the origin of the consumed electricity helps to improve the company's image in the eyes of customers, partners and investors and to label products accordingly. Also, in the context of the introduction of the EU's carbon adjustment mechanism for imports (CBAM), determining the origin of electricity is becoming relevant for companies in such industries as metallurgy, construction, energy and agriculture. CBAM will create additional barriers to trade by increasing costs due to carbon emissions, making it more difficult for Ukrainian goods to export to the EU. The use of clean energy can reduce the cost of carbon certificates under the CBAM. Companies sourcing energy from low-carbon sources will have fewer CO<sub>2</sub> emissions, which will reduce their import costs to the EU. For companies and entrepreneurs engaged in foreign trade, this can be an important strategy for adapting to new requirements and remaining competitive. In order to confirm the origin of electricity from LCES, the article investigates the possibility of applying a method for calculating individual components of electricity flows in the branches of the power grid circuit caused by generation and consumption in the nodes. The method is based on the methods and algorithms for calculating steady-state modes of power grids. As a result, a matrix of power distribution coefficients is formed, which allows determining the component of power flows in the branches of the circuit caused by the generation of LCES. As an example, a calculation was performed for an IEEE circuit of 14 nodes, including various energy sources, using the Power Factory software package. The analysis of the calculation results is confirmed by the results of computer modelling.*

**Keywords:** origin of electricity, mathematical model, low-carbon energy sources, renewable sources of energy, matrix of LCES power distribution coefficients

**Hunko Iryna Oleksandryvna** — PhD in Engineering, Associate Professor, Doctoral Student;

*Lysyi Vladyslav Myhaylovych* — Post-Graduate Student;

*Sytnyk Artur Valeriyovych* — Assistant of the Department of Power Plants and Systems.