

ГУНЬКО ІРИНА

Інститут відновлюваної енергетики

<https://orcid.org/0000-0001-5470-7413>e-mail: [iryna\\_hunko@ukr.net](mailto:iryna_hunko@ukr.net)

ЛИСИЙ ВЛАДИСЛАВ

Інститут відновлюваної енергетики

<https://orcid.org/0009-0007-0211-9100>e-mail: [2e.14b.vlad.lysyi@gmail.com](mailto:2e.14b.vlad.lysyi@gmail.com)

## ВИЗНАЧЕННЯ ДЛЯ СПОЖИВАЧІВ ПОХОДЖЕННЯ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ ВІД НИЗЬКОВУГЛЕЦЕВИХ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ

У роботі представлено метод оцінювання частки електроспоживання конкретного споживача, яка забезпечується відновлювальними джерелами енергії (ВДЕ). Зокрема, йдеться про оцінювання частки електроенергії певного споживача, яку він отримує з низьковуглецевих джерел енергії (НВДЕ). Підтвердження походження спожитої електроенергії дозволяє виробникам випускати продукцію з зеленим маркуванням та/або покращити імідж компанії перед клієнтами, інвесторами та партнерами. Метод ґрунтується на методах та алгоритмах розрахунку ustalених режимів електричних мереж. Метод базується на алгоритмах розрахунку ustalених режимів електричних мереж. В методі використовується математичну модель для визначення складових перетікань електроенергії у вітках мережі, застосовуючи коефіцієнти розподілу струмів від вузлів з джерелами генерації та вузлові напруги. Оскільки НВДЕ, серед яких станції, що працюють на відновлюваних джерелах енергії (ВДЕ) та атомні електростанції в електроенергетичних системах (ЕЕС) для передачі генерованої ними електроенергії використовують електричні мережі загального призначення, то визначення їх частки потужності в перетоках дозволяє враховувати вплив різних джерел генерування на параметри режиму ЕЕС. В роботі виконано розрахунок ustalеного режиму 14 вузлової схеми з різними класами напруги (110 кВ та 220 кВ), різними джерелами енергії, серед яких НВДЕ. Зокрема, шляхом розрахунків з використанням методу гарантованого походження електроенергії, визначено перетоки потужності у вітках електричної схеми та втрати потужності в них. Результати комп'ютерно моделювання в програмному комплексі Power Factory співрозмірні з результатами розрахунків, що підтверджує адекватність методу.

Ключові слова: походження електроенергії, математична модель, комп'ютерне моделювання, низьковуглецеві джерела енергії, відновлювані джерела енергії, матриця коефіцієнтів розподілу потужності НВДЕ

HUNKO IRYNA, LYSYI VLADYSLAV

Institute of Renewable Energy

## A MATHEMATICAL MODEL FOR THE DETERMINATION OF THE ORIGIN OF CONSUMER ELECTRICITY FROM RENEWABLE ENERGY SOURCES IN THE ENERGY SUPPLY SYSTEM

This article presents a method for assessing the share of electricity consumption of a particular consumer that is provided by renewable sources of energy (RES). In particular, we are talking about estimating the share of electricity of a particular consumer that it receives from low-carbon energy sources (LCES). Confirmation of the origin of the consumed electricity allows manufacturers to produce products with green labeling and/or improve the company's image among customers, investors, and partners. The method is based on methods and algorithms for calculating the steady-state modes of power grids. The method is based on a mathematical model for determining the components of electricity flows in the branches of the power grid circuit, which uses the coefficients of current distribution in the branches of the circuit from nodes with generation sources and nodal voltages. As a result, a matrix of power distribution coefficients in the branches of the power grid is formed. Since renewable energy sources, including renewable sources of energy (RSE) and nuclear power plants in electric power systems (EPS), use general-purpose power grids to transmit the electricity they generate, determining their share of power in the flows allows us to take into account the influence of different generation sources on the parameters of the EPS mode. In this paper, we calculated the steady-state mode of a 14-node circuit with different voltage classes (110 kV and 220 kV) and different energy sources, including renewable energy sources. In particular, by calculations using the method of guaranteed power origin, power flows in the branches of the electrical circuit and power losses in them were determined. The results of computer modeling in the Power Factory software package are commensurate with the results of calculations, which confirms the adequacy of the method.

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

### Вступ

Політика декарбонізації є важливою частиною глобальних зусиль по боротьбі зі зміною клімату та скороченням викидів парникових газів [1-3]. Декарбонізація передбачає зниження залежності від вуглецевих джерел енергії (вугілля, нафта, газ) і перехід на поновлювані джерела енергії (вітрова, сонячна, гідроенергетика та ін.) у всіх галузях виробництва [4-6]. Як зазначено у звіті IEA Net Zero by 2050 [7] гідроенергетика та атомна енергетика, два найбільші джерела низьковуглецевої електроенергії, які сьогодні забезпечують важливу основу для енергетичного переходу. Також варто звернути увагу на Європейський зелений курс (European Green Deal) [8], стратегічний план Європейського Союзу (ЄС), спрямований на досягнення кліматичної нейтральності до 2050 року. Серед основних цілей та заходів Зеленого курсу передбачено кліматичну нейтральність, а саме зниження викидів парникових газів до нульового рівня до 2050 року. Зокрема мова йде про скорочення викидів в усіх секторах економіки, включаючи енергетику, транспорт, промисловість та сільське господарство. Також, особлива увага приділена енергетичному переходу, за мету якого поставлено збільшення частки відновлюваних джерел енергії та підвищення енергоефективності. Це включає розвиток сонячної, вітрової та інших видів зеленої енергетики. Україна підписала та ратифікувала Паризьку угоду, але

досягнення цілей щодо декарбонізації електроенергетики вимагає значних фінансових вкладень. Без суттєвих інвестицій у модернізацію енергосектору, зокрема розвиток відновлюваних джерел енергії та зниження залежності від викопних палив, виконання зобов'язань є вкрай складним. Для стабільного функціонування безвуглецевої енергосистеми України, як зазначено у [9], необхідно створити потужні системи сезонного накопичення енергії з сумарною енергоємністю, що складає від 6 до 15% річного обсягу відпущеної електроенергії. Для стимулювання вкладень у розвиток відновлюваної енергетики у світі використовують різні інструменти. Так, зокрема, задля відповідності цілям сталого розвитку компанії купують гарантії походження (Guarantees of Origin, GO [10-15]) або укладають PPA контракти (Power Purchase Agreements [16, 17]). Таким чином виробники прагнуть зменшити свій вуглецевий слід та довести, що енергія, яку вони споживають, походить із ВДЕ. Це в свою чергу дозволяє виробникам випускати продукцію з зеленим маркуванням та/або покращити імідж компанії перед клієнтами, інвесторами та партнерами. Варто відзначити також те, що PPA контракти часто дають змогу компаніям зафіксувати ціни на енергію на тривалий термін, що може захистити їх від коливань на ринку енергії та забезпечити довгострокові фінансові переваги. Задача визначення походження електроенергії, особливо коли джерело знаходиться на відстані від виробника та генерує в загальну електричну мережу, а не безпосередньо споживачу (physical PPA), є складною, оскільки необхідно знати витрати на передачу електроенергії від НВДЕ операторам систем розподілу, та визначити яку частку в енергоміксі що отримує споживач, вироблено НВДЕ. Метою статті є визначення обсягу електроенергії отриманої споживачем від низьковуглецевих джерел енергії для підтвердження її походження, що дозволить виробникам випускати продукцію з зеленим маркуванням.

### Огляд літератури

Визначення походження електроенергії, а саме відстеження перетоків активної та реактивної потужності необхідні з точки зору виробника та споживача (в тому числі активного) для досягнення справедливого ринку електроенергії, оскільки витрати на експлуатацію, використання та обслуговування системи повинні бути розподілені належним чином. Так зокрема, трасування потоків було представлено Біалеком, як схема розподілу втрат, що базується на розв'язанні лінійних рівнянь [18], і паралельно Кіршеном як аналітичний інструмент, який використовує ітераційний підхід з урахуванням графів [19]. Наявність кільцевих схем, значно ускладнює алгоритми розрахунку перетоків потужності, особливо в мережах з високою щільністю приєднань різнотипних розосереджених джерел енергії, зокрема вітрових та сонячних станцій, режим роботи яких залежить від погодних умов. Це зумовлює необхідність удосконалення існуючих методів, особливо з огляду на те, що відповідальні виробники хочуть знати, яку частку електроенергії вони отримують від НВДЕ. Так, в статті [20] описано метод відстеження потоку потужності в електричній мережі та розподілу використання пропускної спроможності лінії між відповідними джерелами або споживачами за допомогою процесу, схожого на дифузію, беручи до уваги структуру мережі та місця приєднань джерел генерування. Описані вище методики, були використанні для створення Electricity Map [21]. Перевагою Electricity Map є розширена аналітична інформація, зокрема можна отримати доступ до ряду даних про електроенергію, інтенсивності викидів вуглецю кожного виду електростанцій, дані про споживання електроенергії та частки електроенергії, виробленої з НВДЕ по кожній країні. Проте, отримати інформацію можна про транскордонні (cross boarder) перетоки між країнами. Актуальною є задача визначення походження електроенергії в системах менших масштабів, наприклад, в межах однієї територіальної громади, або, наприклад, енергетичного кооперативу чи спільноти. Так, для енергетичних кооперативів або спільнот, визначення походження електроенергії дозволяє підтвердити, що інвестиції учасників сприяють сталому розвитку. Однак, існує кілька проблем, пов'язаних з використанням такого інструменту, як сертифікатів гарантій походження. Так зокрема впровадження гарантій походження вимагає адаптації законодавства до європейських стандартів. Це включає створення відповідної інфраструктури та регуляторних механізмів. З іншого боку вартість сертифікатів гарантій походження може варіюватися залежно від ринку. Наприклад, в країнах з високим попитом ціни можуть бути значно вищими. Також, серед задач, важливою є забезпечення прозорості та довіри до системи гарантій походження. Це включає надійний моніторинг та верифікацію джерел енергії. В роботі [22] описано метод визначення походження електроенергії, в основу якого покладено основу методу покладено математичну модель для визначення складових перетікань електроенергії у вітках схеми електричної мережі, в якій використовуються коефіцієнти розподілу струмів у вітках схеми від вузлів з джерелами генерування та вузлові напруги. Запропонований в статті методика лягла в основу досліджень описаних далі в статті.

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

Метод визначення частки перетікань потужності в електричних мережах від сукупності НВДЕ до певних вузлів навантаження, описаний у працях [22], полягає в наступному: спочатку обчислюють значення повної потужності на початку і в кінці кожної вітки схеми, використовуючи формулу:

$$\dot{S}_e = \sqrt{3} \dot{U}_o \mathbf{M}_z \hat{\mathbf{I}}_o, \quad (1)$$

де  $\dot{S}_e$  – матриця потужності, в якій в стовбцях знаходяться потужності початку і кінця у вітках електричної мережі;  $\dot{U}_o$  – діагональна матриця напруги у вузлах, включаючи і балансувальні;  $\mathbf{M}_z$  – матриця з'єднань віток у вузлах, включаючи і балансувальні;  $\hat{\mathbf{I}}_o$  – діагональна матриця струмів у вітках схеми.

Особливістю методу, є використання матриці коефіцієнтів розподілу потужності вузлів по вітках електричної мережі  $\mathbf{D}$ . Вектор-рядок  $\mathbf{d}_i$  визначається за формулою [23]:

$$\mathbf{D}_i = (\mathbf{U}_\delta \mathbf{M}_{\Sigma i}) \widehat{\mathbf{C}}_i \mathbf{U}_\delta^{-1}, \quad (3)$$

де вектор-рядок  $\mathbf{d}_i$  включає коефіцієнти, що вказують, яку частку загальної потужності кожної вітки спричиняє протікання потужності від кожного вузла,  $\widehat{\mathbf{C}}_i$  –  $i$ -й вектор-рядок матриці розподілу задаючих струмів у вузлах.

В загальному можна записати, що

$$\mathbf{S}_e = \mathbf{D} \mathbf{S}, \quad (4)$$

де  $\mathbf{D}$  – матриця коефіцієнтів розподілу потужності вузлів по вітках електричної мережі, яка сформована з  $n$  рядків  $\mathbf{d}_i$ ,  $n$  – кількість віток в електричній мережі.

За виразом (4) визначаються складові потужності у вітках електричної мережі від потужності вузлів. Для визначення перетікань від НВДЕ у вітках схеми у виразі (4) в  $\mathbf{S}$  мають бути тільки потужності НВДЕ:

$$\mathbf{S}_{e, \text{НВДЕ}} = \mathbf{D} \mathbf{S}_{\text{НВДЕ}}. \quad (5)$$

де  $\mathbf{S}_{e, \text{НВДЕ}}$  – вектор перетікань потужності у вітках схеми, викликаних потужністю вузлів з ВДЕ;  $\mathbf{S}_{\text{НВДЕ}}$  – вектор потужностей вузлів, що відповідають вузлам схеми з НВДЕ.

Відповідно до математичної моделі визначення походження електроенергії було розроблено алгоритм показаний на рис.1 та писаний в [22].



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

### Приклад

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 МВт, показаний на рис.2. 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.

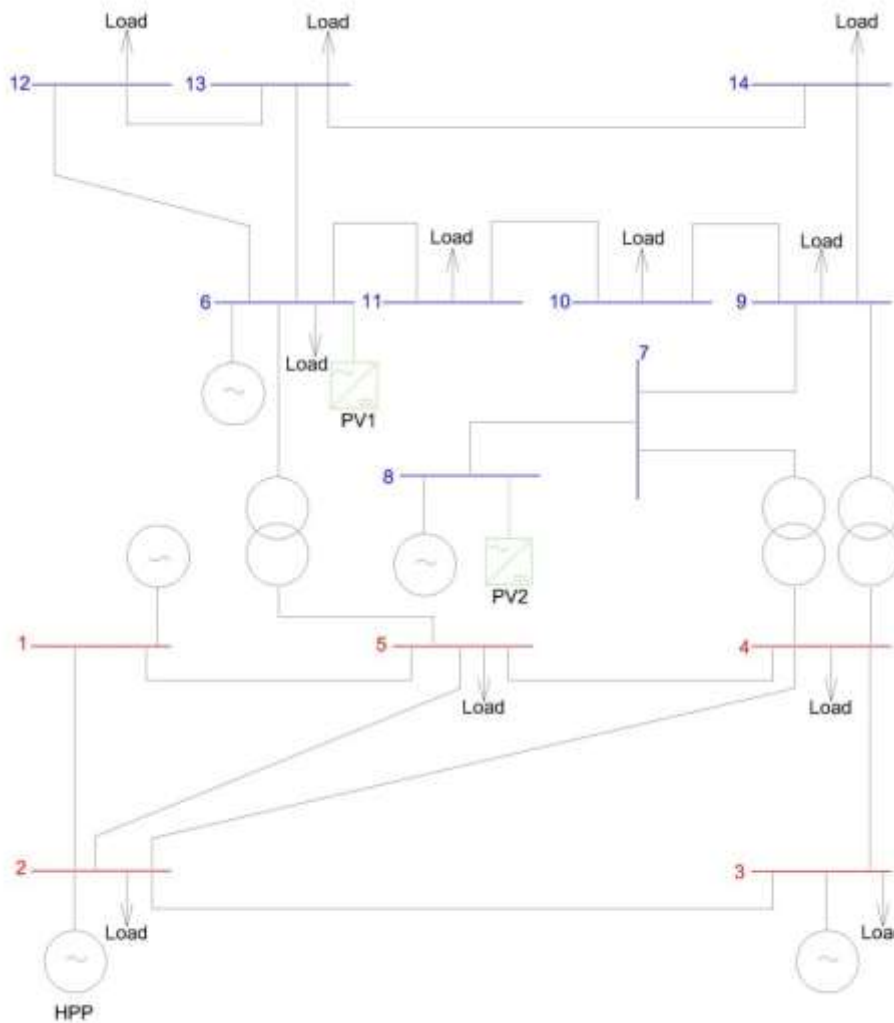


Рис. 2. Схема електричної мережі

З метою зменшення обсягу отриманих в результаті розрахунку матриць, наведемо лише активну складову шуканих потужностей. Використовуючи значення розрахованих напруг вузлів розраховуємо матрицю коефіцієнтів розподілу потужності (3):

$$D = \begin{pmatrix} & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & 8 & 9 & 10 & 11 & 12 & 13 & 14 \\ 1 & 0.822 & 0.76 & 0.657 & 0.593 & 0.453 & 0.492 & 0.477 & 0.486 & 0.483 & 0.47 & 0.458 & 0.462 & 0.478 \\ 2 & -0.03 & 0.583 & 0.147 & 0.099 & 0.086 & 0.119 & 0.115 & 0.116 & 0.112 & 0.1 & 0.089 & 0.092 & 0.107 \\ 3 & -0.06 & 0.108 & 0.3 & 0.202 & 0.17 & 0.234 & 0.226 & 0.228 & 0.219 & 0.196 & 0.175 & 0.18 & 0.209 \\ 4 & -0.081 & 0.044 & 0.188 & 0.272 & 0.203 & 0.148 & 0.143 & 0.152 & 0.161 & 0.182 & 0.201 & 0.197 & 0.173 \\ 5 & 0.172 & 0.268 & 0.368 & 0.424 & 0.325 & 0.287 & 0.278 & 0.289 & 0.296 & 0.311 & 0.324 & 0.322 & 0.306 \\ 6 & 0.081 & 0.28 & 0.497 & -0.272 & -0.137 & 0.373 & 0.361 & 0.328 & 0.252 & 0.066 & -0.107 & -0.067 & 0.159 \\ 7 & 0.03 & 0.417 & -0.147 & -0.099 & -0.086 & -0.119 & -0.115 & -0.116 & -0.112 & -0.1 & -0.089 & -0.092 & -0.107 \\ 8 & -0.008 & -0.029 & -0.05 & 0.027 & -0.872 & -0.074 & -0.071 & -0.136 & -0.261 & -0.557 & -0.836 & -0.777 & -0.42 \\ 9 & 0.004 & 0.011 & 0.017 & -0.002 & -0.017 & -0.763 & -0.732 & -0.174 & -0.149 & -0.086 & -0.028 & -0.042 & -0.491 \\ 10 & 0.003 & 0.017 & 0.032 & 0.028 & -0.109 & -0.159 & -0.152 & -0.696 & -0.602 & -0.366 & -0.149 & -0.2 & 0.118 \\ 11 & -0.004 & -0.011 & -0.016 & -0.002 & 0.017 & -0.232 & -0.221 & 0.171 & 0.146 & 0.084 & 0.028 & 0.041 & 0 \\ 12 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -0.957 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -0.023 \\ 13 & 0.004 & -0.017 & -0.03 & 0.016 & 0.077 & -0.044 & -0.042 & -0.081 & 0.779 & 0.442 & 0.068 & 0.055 & -0.023 \\ 14 & -0.005 & -0.018 & -0.03 & 0.016 & 0.077 & -0.045 & -0.043 & -0.082 & -0.222 & 0.444 & 0.069 & 0.055 & 0.023 \\ 15 & 0.005 & 0.018 & 0.03 & -0.016 & -0.077 & 0.045 & 0.043 & 0.082 & 0.222 & 0.556 & -0.069 & -0.055 & 0.618 \\ 16 & -0.003 & -0.011 & -0.018 & 0.01 & 0.047 & -0.027 & -0.026 & -0.05 & -0.034 & 0.005 & 0.106 & 0.181 & 0.073 \\ 17 & 0 & 0.002 & 0.003 & -0.002 & -0.009 & 0.005 & 0.005 & 0.01 & 0.006 & -0.001 & 0.624 & 0.153 & -0.007 \\ 18 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.001 & 0 & 0 & -0.001 & 0 & 0 & -0.005 & -0.014 & -0.006 \\ 19 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.001 & 0 & 0 & -0.001 & 0 & 0 & 0.002 & 0.003 & 0 \\ 20 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.002 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

Помноживши матрицю коефіцієнтів розподілу потужності вузлів на вектор-стовпець навантаження та генерування у вузлах, отримаємо матрицю розподілу потужностей по вітках електричної мережі в тому числі і від НВДЕ:

	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

Значення елементів у стовпцях матриці показують розподіл потужності по вітках схеми від НВДЕ, що дає можливість розрахунковим шляхом, визначити, яка частка «чистої» електроенергії була спожита конкретним споживачем. Так, 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 PowerFactory, ці втрати становлять 12,37 МВт, що підтверджує точність запропонованого методу.

### Висновки

Визначення обсягу електроенергії отриманої споживачем від НВДЕ необхідно для підтвердження її походження, що дозволить виробникам випускати продукцію з зеленим маркуванням. В статті представлено метод розрахунку окремих складових перетікань електроенергії у вітках схеми електричної мережі, викликаних генеруванням та споживанням у вузлах. Згідно з методом визначається частка електроспоживання конкретного споживача електроенергії, що забезпечується з джерел енергії з низьким карбоновим слідом, підключених до електричної мережі. В основі методу лежить математична модель визначення коефіцієнтів розподілу потужності відновлюваних джерел енергії у вітках електричної мережі.

Описаний метод може слугувати інструментом підтвердження гарантій походження споживаної енергії. Оскільки НВДЕ використовують електричні мережі загального призначення для передачі виробленої електроенергії, визначення їх частки потужності в перетоках потужності до споживачів дозволяє враховувати вплив НВДЕ на параметри режиму електроенергетичної системи та може використовуватися при оперативному плануванні балансу електроенергії.

Результати розрахунків 14-вузлової схеми IEEE матричним методом підтвердились результатами комп'ютерного моделювання в програмному комплексі Power Factory.

### Література

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.org/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. Brecha, R.J., Ganti, G., Lamboll, R.D. et al. (2022). Institutional decarbonization scenarios evaluated against the Paris Agreement 1.5 °C goal. *Nat Commun* 13, 4304. [doi.org/10.1038/s41467-022-31734-1/](https://doi.org/10.1038/s41467-022-31734-1/)
4. Stanbery B. J., Van de Lagemaat J. (2023). Disruptive Photovoltaic Technologies Can Accelerate Global

- Decarbonization. *IEEE Green Technologies Conference (GreenTech)*, Denver, CO, USA, pp. 31-34. doi:10.1109/GreenTech56823.2023.10173795.
5. Balcu I. *et al.* (2019). Decarbonization of Low Power Applications through Methanation Facilities Integration. *IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe (ISGT-Europe)*, Bucharest, Romania, pp. 1-5. doi:10.1109/ISGTEurope.2019.8905506.
  6. Smith B. L., Woodhouse M., Feldman D., Margolis R. (2021). Towards Decarbonization: Establishing a Sustainable, Equitable, Diverse Workforce in the U.S. Photovoltaic Industry. *IEEE 48th Photovoltaic Specialists Conference (PVSC)*, Fort Lauderdale, FL, USA, pp. 2632-2636. doi:10.1109/PVSC43889.2021.9518581.
  7. Net zero by 2050. Roadmap for the global energy sector. Access mode: <https://www.iea.org/reports/net-zero-by-2050>
  8. 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)
  9. Басок Б. І., Буткевич О. Ф., Дубовський С. В. Техніко-економічні аспекти оцінювання перспектив декарбонізації об'єднаної енергосистеми України. *Технічна електродинаміка*. 2021. № 5. С. 55-62. URL: [https://doi.org/10.3390/en17010104](http://jnas.nbu.gov.ua/article/UJRN-0001265929Wimmers, A., Reinhard M., (2023). The European Market for Guarantees of Origin for Green Electricity: A Scenario-Based Evaluation of Trading under Uncertainty. <i>Energies</i>, 17, 104. 10.3390/en17010104. <a href=).
  10. Wimmers, A., Reinhard M., (2023). The European Market for Guarantees of Origin for Green Electricity: A Scenario-Based Evaluation of Trading under Uncertainty. *Energies*, 17, 104. 10.3390/en17010104. <https://doi.org/10.3390/en17010104>.
  11. Gkarakis, K.; Dagoumas, A. (2016). Assessment of the implementation of Guarantees of Origin (GOs) in Europe. *Engineering and Industry Series, Volume Power Systems, Energy Markets and Renewable Energy Sources in South-Eastern Europe*. [doi.org/10.22618/TP.El.20163.389011](https://doi.org/10.22618/TP.El.20163.389011).
  12. Alexander Wimmers, Reinhard Madlener (2023). The European Market for Guarantees of Origin for Green Electricity: A Scenario-Based Evaluation of Trading under Uncertainty. *Energies* 17(1):104, Based\_Evaluation\_of\_Trading\_under\_Uncertainty, accessed Aug 05 2024, doi.org/[10.3390/en17010104](https://doi.org/10.3390/en17010104).
  13. PEX SPOT. (2022). Successful start of Pan-European Spot Market for Guarantees of Origin: First Auction Completed by EPEX SPOT with Clearing and Delivery through ECC and EEX.. Available online: <https://www.epexspot.com/en/news/successful-start-pan-european-spot-market-guarantees-origin> [accessed Aug 05 2024].
  14. 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].
  15. Robert, L. (2022). [Guarantees of Origin Market Developments](#). *GO Market Review*.
  16. Mendicino, L., Menniti D., Pinnarelli A., Sorrentino N., (2019). Corporate power purchase agreement: Formulation of the related levelized 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).
  17. Baringa Partners LLP (2020). [A Market Study including an assessment of potential financial instruments to support renewable energy Commercial Power Purchase Agreements](#).
  18. Bialek J. Tracing the Flow of Electricity. *IEE Proc.-Gener. Transm. Distrib*, Vol. 143, No 4, July pp. 313-320.
  19. Kirschen D., Allan R., Strbac G. Contributions of individual generators to loads and flows. *IEEE Transactions on Power Systems*, Volume. 12, pp. 52-60, Feb. 1997. doi:10.1109/59.574923.
  20. Tranberg, Bo., Thomsen B A., Rodriguez A R., Gorm B. A. (2015). Power flow tracing in a simplified highly renewable European electricity network. *New Journal of Physics*. № 17. DOI:[10.1088/1367-2630/17/10/105002](https://doi.org/10.1088/1367-2630/17/10/105002)
  21. Electricity Maps <https://app.electricitymaps.com/map/>
  22. 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.
  23. Лежнюк П. Д. Математична модель визначення походження електроенергії споживача від ВДЕ в електроенергетичній системі/ П. Д. Лежнюк, І. О. Гунько // Відновлювана енергетика та енергоефективність у XXI столітті: матеріали XXIV міжнародної науково-практичної конференції, [Київ], 22–24 травня 2024 р. / К.: Інституту відновлюваної енергетики НАН України – Київ, 2024. – С. 97 – 99.

## References

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.
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.

3. Brecha, R.J., Ganti, G., Lamboll, R.D. *et al.* (2022). Institutional decarbonization scenarios evaluated against the Paris Agreement 1.5 °C goal. *Nat Commun* **13**, 4304. doi.org/10.1038/s41467-022-31734-1/
4. Stanbery B. J., Van de Lagemaat J. (2023). Disruptive Photovoltaic Technologies Can Accelerate Global Decarbonization. *IEEE Green Technologies Conference (GreenTech)*, Denver, CO, USA, pp. 31-34. doi:10.1109/GreenTech56823.2023.10173795.
5. Balcu I. *et al.* (2019). Decarbonization of Low Power Applications through Methanation Facilities Integration. *IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe (ISGT-Europe)*, Bucharest, Romania, pp. 1-5. doi:10.1109/ISGTEurope.2019.8905506.
6. Smith B. L., Woodhouse M., Feldman D., Margolis R. (2021). Towards Decarbonization: Establishing a Sustainable, Equitable, Diverse Workforce in the U.S. Photovoltaic Industry. *IEEE 48th Photovoltaic Specialists Conference (PVSC)*, Fort Lauderdale, FL, USA, pp. 2632-2636. doi:10.1109/PVSC43889.2021.9518581.
7. Net Zero by 2050. A Roadmap for the Global Energy Sector.
8. The European Green Deal.
9. Basok B. I., Butkevych O. F., Dubovskyi S. V. (2021). Technical and economic aspects of decarbonisation prospects assessing of the interconnected power system of Ukraine. *Technical Electrodynamics*, 5, 55-62. <http://jnas.nbu.gov.ua/article/UJRN-0001265929>
10. Wimmers, A., Reinhard M., (2023). The European Market for Guarantees of Origin for Green Electricity: A Scenario-Based Evaluation of Trading under Uncertainty. *Energies*, 17, 104. 10.3390/en17010104. <https://doi.org/10.3390/en17010104>.
11. Gkarakis, K.; Dagoumas, A. (2016). Assessment of the implementation of Guarantees of Origin (GOs) in Europe. *Engineering and Industry Series, Volume Power Systems, Energy Markets and Renewable Energy Sources in South-Eastern Europe*. doi.org/10.22618/TP.EI.20163.389011.
12. Alexander Wimmers, Reinhard Madlener (2023). The European Market for Guarantees of Origin for Green Electricity: A Scenario-Based Evaluation of Trading under Uncertainty. *Energies* 17(1):104, Based\_Evaluation\_of\_Trading\_under\_Uncertainty, accessed Aug 05 2024, doi.org/10.3390/en17010104.
13. PEX SPOT. (2022). Successful start of Pan-European Spot Market for Guarantees of Origin: First Auction Completed by EPEX SPOT with Clearing and Delivery through ECC and EEX.. Available online: <https://www.epexspot.com/en/news/successful-start-pan-european-spot-market-guarantees-origin> [accessed Aug 05 2024].
14. 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].
15. Robert, L. (2022). Guarantees of Origin Market Developments. *GO Market Review*.
16. Mendicino, L., Menniti D., Pinnarelli A., Sorrentino N., (2019). Corporate power purchase agreement: Formulation of the related levelized cost of energy and its application to a real life case study. *Applied Energy*. Volume 253253. doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.113577.
17. Baringa Partners LLP (2020). A Market Study including an assessment of potential financial instruments to support renewable energy Commercial Power Purchase Agreements.
18. Bialek J. Tracing the Flow of Electricity. *IEE Proc.-Gener. Transm. Distrib*, Vol. 143, No 4, July pp. 313-320.
19. Kirschen D., Allan R., Strbac G. Contributions of individual generators to loads and flows. *IEEE Transactions on Power Systems*, Volume. 12, pp. 52-60, Feb. 1997. doi:10.1109/59.574923.
20. Tranberg, Bo., Thomsen B A., Rodriguez A R., Gorm B. A. (2015). Power flow tracing in a simplified highly renewable European electricity network. *New Journal of Physics*. № 17. DOI:10.1088/1367-2630/17/10/105002
21. Electricity Maps <https://app.electricitymaps.com/map/>
22. Hunko I.O., Kudrya S.O., Komar V.O., Lezhnyuk P.D., (2024). Mathematical model and algorithm for determining the origin of the consumer's electricity from renewable energy sources in the electric power system. *Renewable energy*. Volume 2(77). – P. 6–12.
23. Lezhniuk P.D. Hunko I.O. (2024). Mathematical model of determining the origin of the consumer's electricity from RSE to the electric power system *Renewable energy and energy efficiency in the XXI century: materials of the XXIV international scientific and practical conference. Institute of Renewable Energy of the National Academy of Sciences of Ukraine* – pp. 97 – 99. doi.org/10.36296/renewable.conf.22-24.05.2024