

ГУНЬКО ІРИНА

Інститут відновлюваної енергетики

<https://orcid.org/0000-0001-5470-7413>e-mail: iryna_hunko@ukr.net

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ВИЗНАЧЕННЯ ПОХОДЖЕННЯ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ СПОЖИВАЧА ВІД ВДЕ В ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНІЙ СИСТЕМІ

У роботі представлено метод оцінювання частки електроспоживання конкретного споживача, яка забезпечується відновлювальними джерелами енергії. Основою методу є математична модель, яка визначає складові перетікань електроенергії у вітках електричної мережі, використовуючи коефіцієнти розподілу струмів у вітках схеми від вузлів з ВДЕ та вузлові напруги. Визначення частки електроенергії, яку споживачі гарантовано отримують від ВДЕ, створює умови для стимулювання генеруючих компаній і споживачів до збільшення використання відновлювальної енергії та сприяння розвитку ринку зеленої енергетики.

В роботі представлені результати комп'ютерного та математичного моделювання фрагменту енергосистеми, в якій експлуатуються 2 фотовольтаїчні станції та локальна електроенергетична система. Запропонований метод також дозволяє оцінити втрати потужності в електромережі, спричинені потоками з відновлюваних джерел енергії.

Ключові слова: гарантії походження, відновлювані джерела енергії, математична модель, локальна електроенергетична система.

HUNKO IRYNA

Institute of Renewable Energy

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

The research paper describes a method for estimating the part of a particular consumer's electricity consumption that is generated by renewable sources of energy. The basis of the method is a mathematical model that determines the components of electricity flows in the branches of the electric grid using the coefficients of current distribution in the branches of the circuit from RES nodes and nodal voltages. Determining the part of electricity that consumers are guaranteed to receive from renewable sources of energy creates conditions to encourage generating companies and consumers to increase the use of renewable energy and promote the development of the green energy market. Also, confirmation of electricity from renewable sources allows businesses to produce products with green labeling, which makes them more competitive in European markets and eliminates additional taxation.

The research presents the results of computer and mathematical modeling of a fragment of the power system, which operates 2 photovoltaic stations and a local electric energy system. The power generation capacity of the photovoltaic stations is 15 MW each. The power consumption of the local electric power system is 25 MW. The results of the calculations show that the local electric energy system consumed 12.24 MW from renewable energy sources, while the rest was consumed by other consumers of the grid. The offered method also allows to estimate power losses in the power grid caused by flows from renewable sources of energy. In the considered grid, the total power losses amount to 1.828 MW, including 1.1 MW from the transmission of power from RSE, which coincided with the results of the computer simulation performed in the Power Factory software package.

Keywords: guarantees of origin, renewable sources of energy, mathematical model, local electric energy system.

Постановка проблеми

Електроенергетична система України в довоєнний час мала великий запас міцності завдяки тому, що проектувалася за умов централізованого електропостачання. На початку 1990-х років Україна мала значні генерувальні потужності. Важливу роль відігравала розвинена інфраструктура, включаючи мережі 750 кВ та централізоване диспетчерське управління. Завдяки цьому Україна стала найбільш електрифікованою країною з точки зору щільності розвитку розподільчої мережі, для забезпечення електроенергією споживачів. Проте внаслідок численних атак на об'єкти енергетичної інфраструктури, втрати генеруючих потужностей сягають 55 %, переважна більшість з яких припадає на теплові електростанції. За таких умов забезпечення стійкості енергосистеми являється ключовою задачею. В Україні обговорюють зміну підходів до управління енергетикою, зокрема, переорієнтацію на розподілену генерацію та впровадження розумних мереж (SMART Grid).

В Енергетичній стратегії України до 2050 року, затвердженій розпорядженням Кабміну від 21 квітня 2023 року, де до числа важливих чинників подолання наслідків війни віднесено децентралізацію генерації електроенергії по всій території країни для покращення стійкості та надійності енергозабезпечення [1]. Україна має значний потенціал для розвитку відновлюваної енергетики, зокрема сонячних та вітрових станцій, що можуть активно розбудовуватися та нарощують потужності [2]. Слід зазначити, що 8 травня 2024 року на своєму засіданні Регулятор прийняв рішення, яке спрощує процедуру приєднання генеруючих установок (газотурбінних, газопоршневих, когенераційних тощо) до електричних мереж. Як вже було зазначено, на конференції Конференція з питань відновлення України у Німеччині, планується розбудова до 1 ГВт газової генерації. Варто звернути увагу, ще й на те, що для компаній, які керуються стандартами ESG (Environmental, Social, Governance) та прагнуть вести свій бізнес екологічно відповідально необхідно мати підтвердження споживання «зеленої» енергії, в тому числі і для того щоб уникнути податків при експорті

продукції до ЄС, а також бути конкурентними на європейських ринках. А тому визначити джерело походження електроенергії в енергоміксі такого споживача є актуальною задачею.

Особливості фізичних процесів передавання електричної енергії унеможливають виокремлення окремого перетікання «зеленої» енергії від ВДЕ до споживача без певних припущень [3, 4]. Тому, для того щоб гарантувати, що конкретний споживач отримує «зелену» енергію у ряді Європейських країн застосовуються штучний підхід відокремлення фізичних процесів від комерційних який полягає у застосуванні «сертифікатів походження» для маркування кожної одиниці відновлюваної енергії. Зацікавлені сторони можуть торгувати цими сертифікатами окремо від фізичної енергії. Після споживання електроенергії сертифікати анулюються [5].

Як зазначено у [6] наразі в Україні механізм гарантій походження (ГП) на стадії активного впровадження. Задля повноцінного функціонування механізму гарантій походження електроенергії з ВДЕ в Україні мають бути виконані кроки, пов'язані з функціонуванням реєстрів генеруючих установок та гарантій походження. Зокрема, Україна має стати членом Асоціації емітуючих органів АІВ та розробити відповідний Domain protocol. Вже до кінця серпня 2024 р. очікується початок повноцінної роботи реєстру гарантій походження, після якого за певний проміжок часу розпочне роботу і платформа Оператора ринку для торгівлі ГП.

В статті запропоновано метод оцінювання частки електроспоживання заданого споживача, яка забезпечується з відновлювальних джерел енергії, дозволить підтвердити споживачу отримання «зеленої» енергії та дасть можливість випускати продукцію з зеленим маркуванням.

Визначення походження електроенергії у вітках електричної мережі

Суть методу визначення частки перетікань потужності в електричних мережах від сукупності ВДЕ до певних вузлів навантаження полягає в тому, що спочатку визначим значення повної потужності на початку і в кінці кожної вітки схеми визначається за формулою [7]:

$$\dot{\mathbf{S}}_b = \sqrt{3} \dot{\mathbf{U}}_d \mathbf{M}_\Sigma \hat{\mathbf{I}}_d, \quad (1)$$

де $\dot{\mathbf{S}}_b$ – матриця потужності, в якій в стовбцях знаходяться потужності початку і кінця у вітках електричної мережі; $\dot{\mathbf{U}}_d$ – діагональна матриця напруги у вузлах, включаючи і балансувальні; \mathbf{M}_Σ – матриця з'єднань віток у вузлах, включаючи і балансувальні; $\hat{\mathbf{I}}_d$ – діагональна матриця струмів у вітках схеми (тут і далі знак $\hat{}$ означає, що матриця або вектор є спряжений).

Для того, щоб отримати ту частку потужності, яка від ВДЕ передається до певного споживача, запишемо спочатку з (1) значення потужності початку і кінця в i -й вітці електричної мережі:

$$\dot{S}_{bi} = \sqrt{3} (\dot{\mathbf{U}}_d \mathbf{M}_{\Sigma i}) \hat{I}_i, \quad (2)$$

де $\mathbf{M}_{\Sigma i}$ – вектор-стовпець матриці з'єднань віток у вузлах \mathbf{M}_Σ ; \hat{I}_i – струм в i -й вітці.

Щоб перейти від значень струмів у вітках і вузлах до потужності, перепишемо відповідно (2). Для цього струм у вітках \hat{I}_i визначимо через струми у вузлах:

$$\hat{\mathbf{I}}_i = \mathbf{C}_i \hat{\mathbf{J}}, \quad (3)$$

де $\hat{\mathbf{C}}_i$ – i -й вектор-рядок матриці розподілу задаючих струмів у вузлах $\hat{\mathbf{J}}$ по вітках схеми.

Матриця струморозподілу розраховується методом одиничних струмів або за відомою формулою [1]:

$$\mathbf{C} = \mathbf{z}_b^{-1} \mathbf{M}_{\Sigma i} (\mathbf{M}_\Sigma \mathbf{z}_b^{-1} \mathbf{M}_{\Sigma i})^{-1}, \quad (4)$$

де \mathbf{z}_b – діагональна матриця комплексних опорів віток схеми електричної мережі.

Якщо схема і параметри електричних мереж ЕЕС є відносно незмінними, то застосування методу визначення струмів у вітках за допомогою матриці струморозподілу \mathbf{C} є доцільнішим.

З врахуванням (3) і (4) вираз (2) перепишеться:

$$\dot{S}_{bi} = \sqrt{3} (\dot{\mathbf{U}}_d \mathbf{M}_{\Sigma i}) \hat{\mathbf{C}}_i \hat{\mathbf{J}}, \quad (5)$$

З врахуванням того, що

$$\hat{\mathbf{J}} = \frac{1}{\sqrt{3}} \dot{\mathbf{U}}_d^{-1} \dot{\mathbf{S}},$$

(5) прийме вигляд:

$$\dot{S}_{bi} = (\dot{\mathbf{U}}_d \mathbf{M}_{\Sigma i}) \hat{\mathbf{C}}_i \dot{\mathbf{U}}_d^{-1} \dot{\mathbf{S}}, \quad (6)$$

де $\dot{\mathbf{S}}$ – вектор навантажень споживачів і генерування, в тому числі і ВДЕ, у вузлах, включаючи і балансувальні.

Позначимо в (6)

$$\hat{\mathbf{D}}_i = (\dot{\mathbf{U}}_d \mathbf{M}_{\Sigma i}) \hat{\mathbf{C}}_i \dot{\mathbf{U}}_d^{-1}, \quad (7)$$

де вектор-рядок $\hat{\mathbf{D}}_i$ складається з коефіцієнтів, які показують, яку частку в сумарній потужності i -ї вітки визиває протікання по ній потужності від кожного вузла.

З врахуванням (7) вираз (6) потужності в i -й вітці переписеться:

$$\dot{S}_{ei} = \dot{D}_i \dot{S}. \tag{8}$$

В загальному можна записати, що

$$\dot{S}_e = \dot{D} \dot{S}, \tag{9}$$

де \dot{D} – матриця коефіцієнтів розподілу потужності вузлів по вітках електричної мережі, яка сформована з n рядків \dot{D}_i , n – кількість віток в електричній мережі. За виразом (9) визначаються складові потужності у вітках електричної мережі від потужності вузлів. Для визначення перетікань від ВДЕ у вітках схеми у виразі (9) в \dot{S} мають бути тільки потужності ВДЕ:

$$\dot{S}_{e \text{ ВДЕ}} = \dot{D} \dot{S}_{\text{ВДЕ}}. \tag{10}$$

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

Для визначення потужності $\dot{S}_{\text{ВДЕ } j}$, яку споживач отримує в j -му вузлі від ВДЕ, складається відповідний баланс потужності:

$$\dot{S}_{\text{ВДЕ } j} = \dot{S}_{\text{ВДЕ } j}^+ - \dot{S}_{\text{ВДЕ } j}^-, \tag{11}$$

де $\dot{S}_{\text{ВДЕ } j}^+$, $\dot{S}_{\text{ВДЕ } j}^-$ – потужності, які генеруються ВДЕ, відповідно приходять і відходять від j -го вузла.

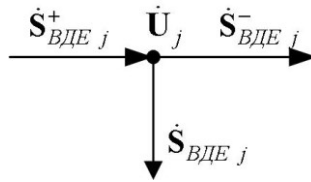


Рис. 1. Потужність споживача в j -му вузлі від ВДЕ

Потужності $\dot{S}_{\text{ВДЕ } j}^+$ і $\dot{S}_{\text{ВДЕ } j}^-$ визначаються за формулою (9), в якій перша матриця з'єднань M_Σ , складена для всіх вузлів схеми, подається у вигляді суми двох матриць:

$$M_\Sigma = M_\Sigma^+ + M_\Sigma^-, \tag{12}$$

де M_Σ^+ – матриця, що містить фрагмент матриці з'єднань, елементами якої є нулі та одиниці зі знаком “+”;

M_Σ^- – та ж матриця, але її елементами є нулі та одиниці зі знаком “-”.

З (7) і (8) видно, що коефіцієнти розподілу вузлових потужностей \dot{S} на потужності у вітках \dot{D}_i залежать, окрім як від параметрів електричної мережі, також від напруги вузлів. Тому, для забезпечення адекватності математичної моделі необхідно, щоб значення напруги вузлів \dot{U} відповідали значенням потужності вузлів \dot{S} . У цьому випадку режим ЕЕС буде збалансованим і збережеться нелінійна залежність втрат електроенергії в електричних мережах від потужності вузлів \dot{S} , в тому числі і від $\dot{S}_{\text{ВДЕ}}$ [4].

Застосування методу визначення гарантійного походження електроенергії

Щоб продемонструвати ефективність методу визначення походження електроенергії споживача від відновлюваних джерел енергії, розглянемо фрагмент мережі 110 кВ показаний на рис. 2. Опори віток, навантаження і генерування показано в табл. 1. До 5 вузла приєднано локальну електроенергетичну систему (ЛЕС), яка споживає від мережі 25 МВт. Балансуючим вузлом є вузол №1, ВДЕ знаходяться у 5 та 6 вузлах. Контрольний розрахунок усталеного режиму для максимуму генерування ФЕС (о 13.00 годині) виконано програмою PowerFactory 15.1. За результатами розрахунку усталеного режиму визначені напруги вузлів (табл. 1).

Таблиця 1

Інформація про вузли						
№ вітки	Опір, Ом	№ вузла	P, МВт	Q, Мвар	U, кВ	Фаза, град
1	9+8,1i	1	-51,8	-44,7	114,95	0
2	4,5+4,05i	2	35	19	112,89	-0,03
3	4,5+4,05i	3	20	12	111,85	-0,01
4	11,25+10,125i	4	-15	0	112,81	0,24
5	18+16,32i	5	25	15	109,1	0,07
6	13,5+12,15i	6	-15	0	111,79	0,6
7	15,75+14,2i	-	-	-	-	-

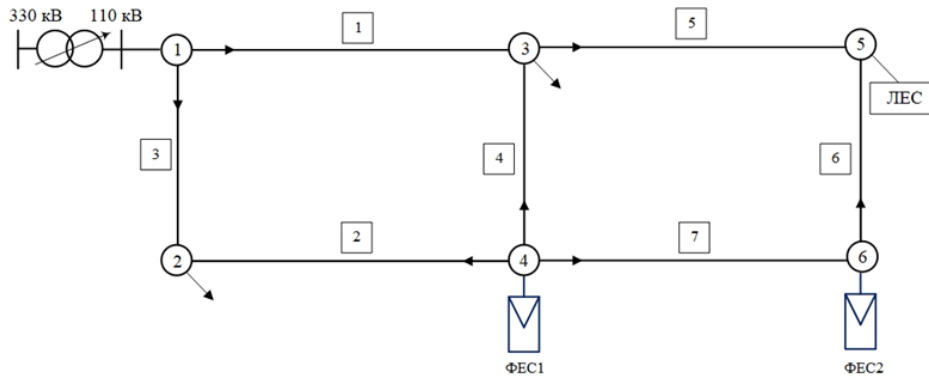


Рис. 2. Схема електричної мережі

Використовуючи значення розрахованих напруг вузлів, у відповідності до (9), розраховуємо матрицю коефіцієнтів розподілу потужності (13):

$$\mathbf{D} = \begin{array}{c|ccccc|c} & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & \\ \hline 1 & 0,165 + 7,6i \cdot 10^{-5} & 0,668 - 3,6i \cdot 10^{-5} & 0,329 - 0,001i & 0,553 - 0,001i & 0,444 - 0,005i & 1 \\ 2 & 0,166 + 1,8i \cdot 10^{-5} & -0,335 + 8,1i \cdot 10^{-5} & -0,668 + 0,003i & -0,476 + 0,001i & -0,561 + 0,006i & 2 \\ 3 & 0,834 - 1,8i \cdot 10^{-5} & 0,335 - 8,1i \cdot 10^{-5} & 0,668 - 0,003i & 0,476 - 0,001i & 0,561 - 0,006i & 3 \\ 4 & -0,133 - 1,8i \cdot 10^{-5} & 0,268 - 5,8i \cdot 10^{-5} & -0,266 + 0,001i & 0,065 + 3,1i \cdot 10^{-4} & -0,09 + 0,001i & 4 \\ 5 & 0,031 + 9,8i \cdot 10^{-5} & -0,062 - 1,7i \cdot 10^{-4} & 0,062 - 9,2i \cdot 10^{-5} & 0,603 + 0,001i & 0,346 - 0,003i & 5 \\ 6 & -0,031 - 9,8i \cdot 10^{-4} & 0,062 + 1,7i \cdot 10^{-4} & -0,062 + 9,2i \cdot 10^{-5} & 0,397 - 0,001i & -0,346 + 0,003i & 6 \\ 7 & -0,032 - 3,9i \cdot 10^{-5} & 0,0647 + 7,7i \cdot 10^{-4} & -0,063 - 4,9i \cdot 10^{-4} & 0,406 + 0,003i & 0,646 - 2,6i \cdot 10^{-4} & 7 \end{array} \quad (13)$$

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 ВДЕ (14):

$$\dot{S}_e = \begin{array}{c|ccccc|c} & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & \\ \hline 1 & 5,76 + 3,13i & 13,36 + 8,01i & -4,94 + 0,02i & 13,84 + 6,63i & -6,66 + 0,07i & 1 \\ 2 & 5,81 + 3,16i & -6,71 - 4,02i & 10,02 - 0,05i & -11,92 - 5,69i & 8,42 - 0,09i & 2 \\ 3 & 29,19 + 15,84i & 6,71 + 4,02i & -10,02 + 0,05i & 11,92 + 5,69i & -8,42 + 0,09i & 3 \\ 4 & -4,65 - 2,53i & 5,37 + 3,22i & 3,99 - 0,02i & 1,62 + 0,79i & 1,34 - 0,02i & 4 \\ 5 & 1,08 + 0,59i & -1,24 - 0,75i & -0,93 + 1,39 \cdot 10^{-3}i & 15,07 + 7,26i & -5,19 + 0,04i & 5 \\ 6 & -1,08 - 0,59i & 1,24 + 0,75i & 0,93 - 1,39 \cdot 10^{-3}i & 9,93 + 4,74i & 5,19 - 0,04i & 6 \\ 7 & -1,1 + 0,61i & 1,27 + 0,78i & 0,95 + 7,38 \cdot 10^{-3}i & 10,12 + 4,96i & -9,68 + 4,03i \cdot 10^{-3} & 7 \end{array} \quad (14)$$

Значення елементів у стовпцях матриці показують розподіл потужності по вітках схеми від ВДЕ, що дає можливість розрахунковим шляхом, визначити, яка частка «зеленої» електроенергії була спожита конкретним споживачем. Так, на прикладі споживання ЛЕС, можна визначити, що від ВДЕ було отримано 12,24 МВт, решту - від ЕЕС.

Далі, маючи матрицю розподілу потужностей по вітках електричної мережі, можна також визначити матрицю втрат потужності, викликаних, в тому числі, і перетіканням від ВДЕ (15):

$$\Delta \dot{S}_e = \begin{array}{c|ccccc|c} & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & \\ \hline 1 & -0,16 - 0,09i & -0,37 - 0,22i & 0,14 & 0,38 - 0,19i & 0,18 & 1 \\ 2 & 0,02 - 0,03i & -0,02 + 0,03i & 0,01 - 0,05i & -0,04 + 0,05i & 0,01 - 0,04i & 2 \\ 3 & -0,52 - 0,3i & -0,12 - 0,08i & 0,18 & -0,21 - 0,11i & 0,15 & 3 \\ 4 & 0,03 + 0,04i & -0,03 - 0,05i & -0,03 - 0,02i & -0,01 - 0,01i & -0,01 - 0,01i & 4 \\ 5 & -0,03 - 0,01i & 0,03 + 0,02i & 0,02 & -0,39 - 0,16i & 0,13 - 0,01i & 5 \\ 6 & 0,02 + 0,02i & -0,02 - 0,03i & -0,02 - 0,01i & -0,2 - 0,21i & -0,13 - 0,05i & 6 \\ 7 & 0,01 & -0,02i & -0,01 + 0,01i & -0,12 + 0,02i & 0,09 - 0,06i & 7 \end{array} \quad (15)$$

Загальні втрати активної потужності розраховані матричним методом становлять 1,828 МВт (з них втрати від ВДЕ – 1,1 МВт), за результатами розрахунку усталеного режиму з використанням комплексу Power Factory – 1,83 МВт, що підтверджує адекватність запропонованого методу.

Висновки

Розроблено метод та алгоритм розрахунку окремих складових перетікань електроенергії у вітках схеми електричної мережі, що зумовлені генеруванням та споживанням у вузлах. Згідно методу визначається частка електроспоживання певного споживача електроенергії, що забезпечується з відновлювальних джерел енергії, приєднаних до електричної мережі. В основу методу покладено математичну модель визначення коефіцієнтів розподілу потужності ВДЕ у вітках електричної мережі.

Описаний метод може бути інструментом підтвердження гарантій походження енергії, що споживається реалізується на роздрібному ринку. Оскільки ВДЕ для передавання генерованої ними електроенергії використовують електричні мережі загального призначення, то визначення їх частки потужності в перетоках до споживачів дозволяє враховувати вплив ВДЕ на параметри режиму електроенергетичної системи і може використовуватися під час оперативного планування балансу електроенергії.

Література

1. Розпорядження Кабінету Міністрів України від 21 квітня 2021 р. № 373-р "Про схвалення Енергетичної стратегії України на період до 2050 року".
2. Атлас енергетичного потенціалу відновлюваних джерел енергії України / за заг. ред. С.О. Кудрі. – Київ : Інститут відновлюваної енергетики НАН України, 2020. – 82 с.
3. Ahmed K. S., Karthikeyan S. P. and Rao M. V. Proportional generation and proportional load based transmission loss allocation considering reactive power demand in restructured environment. TENCON 2017 - 2017 IEEE Region 10 Conference, 2017, pp. 992-997, doi: 10.1109/TENCON.2017.8228002.
4. Гунько І. О., Кудря С. О., Комар В. О., Лежнюк П. Д. Математична модель та алгоритм визначення походження електроенергії споживача від відновлюваних джерел енергії в електроенергетичній системі. VE, вип. 2(77), с. 6-12, 2024.
5. Розпорядження Кабінету Міністрів України від 27 лютого 2024 р. N 227-р "Про запровадження гарантій походження електричної енергії, виробленої з відновлюваних джерел енергії".
6. White paper «Гарантії походження як інструмент фінансування зеленого переходу. Поточний стан впровадження системи ГП в Україні», 2024, 9 с.
7. Lezhniuk P., Burykin O., Malogulko Y. Distributed energy sources in the local electrical systems. LAP LAMBERT Academic Publishing. 2018. 140 p.

References

1. Rozporiadzhennia Kabinetu Ministriv Ukrainy vid 21 kvitnia 2021 r. № 373-r "Pro skhvalennia Enerhetychnoi stratehii Ukrainy na period do 2050 roku".
2. Atlas enerhetychnoho potentsialu vidnovliuvanykh dzherel enerhii Ukrainy / za zah. red. S.O. Kudri. – Kyiv : Instytut vidnovliuvanoi enerhetyky NAN Ukrainy, 2020. – 82 s.
3. Ahmed K. S., Karthikeyan S. P. and Rao M. V. Proportional generation and proportional load based transmission loss allocation considering reactive power demand in restructured environment. TENCON 2017 - 2017 IEEE Region 10 Conference, 2017, pp. 992-997, doi: 10.1109/TENCON.2017.8228002.
4. Hunko I. O., Kudria S. O., Komar V. O., Lezhniuk P. D. Matematychna model ta alhorytm vyznachennia pokhodzhennia elektroenerhii spozhyvacha vid vidnovliuvanykh dzherel enerhii v elektroenerhetychnii systemi. VE, vyp. 2(77), s. 6-12, 2024.
5. Rozporiadzhennia Kabinetu Ministriv Ukrainy vid 27 liutoho 2024 r. N 227-r "Pro zaprovadzhennia harantii pokhodzhennia elektrychnoi enerhii, vyroblenoi z vidnovliuvanykh dzherel enerhii".
6. White paper «Harantii pokhodzhennia yak instrument finansuvannia zelenoho perekhodu. Potochnyi stan vprovadzhennia systemy HP v Ukraini», 2024, 9 s.
7. Lezhniuk P., Burykin O., Malogulko Y. Distributed energy sources in the local electrical systems. LAP LAMBERT Academic Publishing. 2018. 140 p.