

О. Б. БУРИКІН

АТ «Вінницяобленерго»

ORCID: 0000-0002-0067-3630

Ю. В. МАЛОГУЛКО

Вінницький національний технічний університет

ORCID: 0000-0002-6637-7391

А. Л. ПОЛІЩУК

АТ «Вінницяобленерго»

ORCID: 0000-0003-4652-9113

## МЕТОД ОЦІНЮВАННЯ ЧАСТКИ ЕЛЕКТРОСПОЖИВАННЯ ЗАДАНОГО СПОЖИВАЧА, ЯКА ЗАБЕЗПЕЧУЄТЬСЯ З ВІДНОВЛЮВАЛЬНИХ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ

Одним із інструментів підтвердження походження електроенергії, що продається на роздрібному ринку є, так звані, Гарантії походження. Вони є основою для розрахунків викидів парникових газів та звітування щодо викидів вуглецю і є найбільш затребуваним європейськими підприємствами. Застосування Гарантій походження передбачає використання спеціалізованих систем та програмного забезпечення, яке дозволяє вести їх облік, випуск та скасування.

В усіх Європейських країнах застосовується відокремлення фізичних процесів від комерційних, тому врахування топології мережі та втрат електроенергії на її передачу є безумовною перевагою наведеного дослідження.

Об'єктом дослідження є механізм підтвердження гарантій походження, що спирається на обґрунтоване визначення обсягів покриття навантаження споживача енергією з відновлювальних джерел.

Наявні рішення для маркування електроенергії на основі сертифікатів Гарантій походження мають низку проблем. Вони часто не точно відображають викиди вуглецю, не забезпечують прозорості та можливості перевірки для кінцевих споживачів оскільки не враховують фізичні процеси передавання електроенергії у системі маркування. Зважаючи на важливість експорту електроенергії, наявність функціонуючого механізму Гарантій Походження набуде особливого значення після прийняття закону Європейського Союзу про «Зелений курс» та впровадження Механізму прикордонного вуглецевого регулювання.

Для вирішення цієї проблеми розроблено метод визначення частки навантаження кожного вузла електричної мережі, що забезпечується певним джерелом електроенергії. Для врахування нелінійності співвідношення між напругами у вузлах електричних мереж та потужностями їх генерування чи навантаження використовуються результати розрахунку ustalених режимів. Метод може бути інструментом підтвердження обсягів електроенергії у гарантіях її походження з урахуванням фізичних процесів електричних мереж.

**Ключові слова:** гарантії походження, відновлювальні джерела енергії, «зелений тариф», блокчейн.

O. B. BURYKIN

JSC «Vinnytsiaoblenergo»

ORCID: 0000-0002-0067-3630

Yu. V. MALOGULKO

Vinnytsia National Technical University

ORCID: 0000-0002-6637-7391

A. L. POLISHCHUK

JSC «Vinnytsiaoblenergo»

ORCID: 0000-0003-4652-9113

## METHOD FOR ESTIMATING THE SHARE OF ELECTRICITY CONSUMPTION BY A GIVEN CONSUMER, WHICH IS PROVIDED FROM RENEWABLE ENERGY SOURCES

One of the tools for confirming the origin of electricity sold on the retail market is the so-called Guarantee of Origin. They are the basis for calculating greenhouse gas emissions and reporting on carbon emissions and are the most requested by European enterprises.

The use of guarantees of origin involves the use of specialized systems and software that allows for their registration, issuance and cancellation. Separation of physical processes from commercial processes is used in all European countries, therefore taking into account the topology of the network and losses of electricity for its transmission is an absolute advantage of the above study.

The object of the research is the mechanism of confirmation of guarantees of origin, which is based on a reasonable determination of the volume of coverage of the consumer's load with energy from renewable sources.

*Existing solutions for electricity labeling based on Guarantees of Origin certificates have a number of problems. They often do not accurately reflect carbon emissions, do not provide transparency and verifiability for end consumers, as they do not take into account the physical processes of electricity transmission in the labeling system. Given the importance of electricity exports, the existence of a functioning mechanism of Guarantees of Origin will become especially important after the adoption of the European Union law on the "Green Deal" and the implementation of the Border Carbon Regulation Mechanism.*

*To solve this problem, a method of determining the share of the load of each node of the electrical network, which is provided by a certain source of electricity, has been developed. To take into account the non-linearity of the relationship between the voltages in the nodes of electric networks and their generation or load capacities, the results of the steady state calculation are used. The method can be a tool for confirming the amount of electricity in guarantees of its origin, taking into account the physical processes of electrical networks.*

**Key words:** *guarantees of origin, renewable energy, green tariff, blockchain.*

### Постановка проблеми

Зміна клімату є основною передумовою для впровадження сталих рішень з виробництва електроенергії на основі відновлювальних джерел енергії (ВДЕ). Швидкий прогрес технологій робить рішення для виробництва та зберігання енергії доступнішими для споживачів та дає їм змогу стати відповідальними учасниками енергетичного процесу. Реальний успіх рішень у сфері енергетики з використанням невичерпних джерел залежить не стільки від технологічної готовності, яка вже значною мірою існує, скільки від усвідомлення споживачами доцільності використання саме ВДЕ. У європейських країнах проводяться активні дослідження стосовно поведінки споживачів під час прийняття рішень щодо використання енергії з відновлюваних джерел шляхом порівняння економічних, екологічних та соціальних переваг. Тому у низці європейських країн впроваджуються нееконімічні стимули, що відіграють важливу роль [1]. Споживачі готові платити більше за позитивну соціальну норму з використання екологічних інновацій не зважаючи на меншу економічну ефективність рішень.

Одним із інструментів підтвердження походження енергії, що продається на роздрібному ринку є, так звані, Гарантії походження (ГП). ГП є дієвим інструментом декарбонізації економіки, основою для розрахунків викидів парникових газів у атмосферу для звітування про викиди вуглецю і є найбільш затребуваним європейськими підприємствами. ГП також є інструментом підтримки ВДЕ на європейських торгових майданчиках. ВДЕ продають ГП трейдерам, або роздрібним постачальникам. Ті своєю чергою пропонують їх далі зацікавленим комерційним споживачам. Основний економічний стимул полягає у зменшеному оподаткуванні, оскільки вся електроенергія у європейських країнах підлягає сплаті «вуглецевого» податку, за винятком електроенергії, виробленої з ВДЕ.

Однією з ключових стратегічних цілей та важливою складовою енергетичної безпеки України є інтеграція її об'єднаної енергосистеми до ENTSO-E. Тому, дослідження у цьому напрямку стають актуальними і для нашої держави. Зважаючи на важливість експорту електроенергії, наявність функціонуючого механізму Гарантій Походження набуде особливого значення після прийняття закону Європейського Союзу (ЄС) про «Зелений курс» та впровадження Механізму прикордонного вуглецевого регулювання у 2023 році [2].

Збільшення частки ВДЕ у енергобалансі країни в умовах ринку електроенергії з урахуванням соціальних норм, що спрямовані на впровадження екологічних інновацій, актуалізує проблему забезпечення споживача енергією з відновлювальних джерел. Фізично реалізувати процес адресного постачання електроенергії за умов паралельної роботи різномісних електростанцій в системі не можливо. Однак для кожного споживача можливо обгрунтовано оцінити частку електроспоживання, яка забезпечується з відновлювальних джерел. Така задача є динамічною. Постійні зміни навантаження споживачів та генерування ВДЕ, зокрема від метеорологічних умов, призводять до змін у структурі балансу електроенергії в енергосистемі. Зміни структури дохідної частини балансу електроенергії впливають на частку електроспоживання окремого споживача, яка покривається з ВДЕ. Крім того впливають місця їх приєднання до мереж, а також графіки генерування та споживання.

Отже, розроблення методу розрахунку складових перетікань електроенергії до певного споживача, що зумовлені генеруванням та споживанням у вузлах електричної мережі (ЕМ) є актуальною задачею.

### Аналіз останніх досліджень і публікацій

У Європейських країнах використання ГП «зеленої» електроенергії спрямоване на досягнення цілей Паризької хартії щодо регулювання заходів зі зменшення викидів діоксиду вуглецю з 2020 р. укладену на заміну Кіотському протоколу.

За оцінками експертів для досягнення цілей Паризької хартії необхідними умовами є повна електрифікація сектора опалення та транспорту [3], а також перехід до використання «зеленого» водню для промислового виробництва технологічного тепла [4]. Тобто, загальне споживання електроенергії зростатиме, що у майбутньому призведе до 100 % виробництва електроенергії з ВДЕ [5].

Оскільки покриття 100 % майбутнього використання електроенергії за допомогою відновлюваної енергії є недосяжним принаймні протягом десяти років [6], актуальним є питання визначення частки «зеленої» енергії енергопостачанні. Це необхідно як для виробників відновлюваної енергії, так і для промислових споживачів, які прагнуть скорочення викидів CO<sub>2</sub> [7]. Крім екологічного аспекту, це пов'язано переважно з необхідністю звітності, що підлягає перевірці. Адже акціонери вимагають розкриття об'ємів CO<sub>2</sub>, що викидається в результаті діяльності підприємств.

Застосування ГП передбачає використання спеціалізованих систем та програмного забезпечення, яке дозволяє вести їх облік, випуск та скасування. Для побудови таких систем дослідники пропонують різні моделі обміну інформацією, як мають свої переваги та недоліки.

В роботі [8] наведено результати досліджень спеціалізованих систем які дозволяють проводити облік ГП. Показано, що такі системи розроблені як національні електронні реєстри, в яких ГП торгуються за кожну вироблену МВт-годину незалежно від місця та часу їх генерування. Тобто, не вирішеним є питання врахування місця та часу виробництва електричної енергії. Причиною цього є відокремлення фізичних процесів від комерційних. Внаслідок такого підходу комунальні підприємства можуть купувати ГП, щоб маркувати невідновлювану електроенергію та продавати її як екологічну для своїх споживачів. Цю практику часто критикують як «зелене відмивання».

У [9] проведено аналіз функціонування Європейських реєстрів гарантій походження. Європейський досвід застосування ГП показує, що вони можуть походити з довільного місця та бути «спожитими» протягом одного року. Реєстри побудовані на припущенні, що неможливо відстежити перетікання енергії. Таке роз'єднання ГП з фізичною реальністю може знизити довіру споживачів [9], що призведе до байдужості та зниження готовності платити за тарифи на «зелену» енергію.

У [6] наведено результати досліджень можливості застосування ГП для визначення викидів вуглецю відповідно до цілей Паризької угоди 2022 р. Показано, що низька дискретність розрахунків перешкоджає ідентифікації споживання за певний проміжок часу. Це є причиною спотворення картини поточного постачання «зеленої» енергії та зменшення точності визначення викидів вуглецю. Отже, не досягається мета стимулювати необхідні інвестиції. Варіантом подолання відповідних труднощів може бути підвищення дискретності розрахунків та врахування втрат електроенергії на її передавання.

Одним з підходів подолання відповідних труднощів обліку ГП розглядається технологія блокчейн у різних модифікаціях [10]. Основними поняттями якими оперує блокчейн є хеш-дерево (дерево Меркла) та хеш-корінь. Валідність та термін придатності кожного сертифіката ГП легко перевірити знаючи хеш-корінь дерева Меркла без розголошення інших властивостей сертифіката ГП. Таким чином, автори запропонували сумісну, масштабовану систему, яка запобігає шахрайству або неправильному обліку, зберігаючи необхідну конфіденційність інформації для всіх учасників. Така структура створює інструмент для перевірки походження, дозволяє уникнути дублювання сертифікатів.

Однак не вирішеним залишилось питання врахування місця та часу виробництва електричної енергії, тобто використовується відокремлення фізичних процесів від комерційних.

Слід зазначити, що нормативними документами регламентуючими підходи до випуску ГП Європейського союзу врахування фізичних процесів у електричних мережах є не обов'язковим. Тому, більшість проаналізованих підходів використовують спрощення, яке передбачає використання процесу видачі ГП саме як комерційного процесу, не пов'язаного з перетіканнями потужності та втратами електроенергії [9].

Все це дозволяє стверджувати, що доцільним є проведення дослідження, присвяченого врахуванню топології мережі та місця виробництва електроенергії у системі маркування ГП. Для цього пропонується вдосконалити пропонувану у [10] модель врахування фізичних процесів шляхом застосування методу розрахунку окремих складових перетікань електроенергії ВДЕ до окремого абонента системи розподілу.

#### **Формулювання мети дослідження**

Метою дослідження є виявлення нових та вдосконалення відомих раніше механізмів оцінювання обсягів енергії з відновлювальних джерел у споживанні окремого споживача. Їх застосування на етапі ідентифікації походження електроенергії, забезпечить врахування фізичних процесів у електричній мережі та сприятиме підвищенню довіри споживачів до сертифікатів ГП.

Для досягнення мети були поставлені такі задачі, як аналіз засобів та способів організації роботи національних електронних реєстрів ГП та розробка методу оцінювання частки електроспоживання заданого споживача, яка забезпечується з відновлювальних джерел енергії.

#### **Викладення основного матеріалу дослідження**

Об'єктом дослідження є механізм підтвердження гарантій походження електроенергії, що спирається на обґрунтоване визначення обсягів покриття навантаження споживача енергією з відновлювальних джерел. Задача ідентифікації потоків електроенергії належить до задач нелінійного програмування. Потoki електроенергії у окремих лініях електропередачі від генерування ВДЕ є нелінійними. Це ускладнює задачу виокремлення окремих складових із сукупного потоку. Тут необхідно враховувати спади напруги у мережі та втрати електроенергії, що викликані її транспортуванням. Розв'язання таких задач пов'язане з низькою алгоритмічності та інформаційних проблем. Для їх усунення, під час формалізації постановки задачі, було використано низку припущень. Зокрема, прийнято, що обладнання електричної мережі можна еквівалентувати елементами з зосередженими параметрами. Спади напруги в елементах ЕМ визначається сукупним потоком електроенергії в заданий момент часу, а не його складовими. Втрати електроенергії в елементах ЕМ від окремих транзакцій приймаються пропорційними спадам напруги та струмам, що зумовлені цими транзакціями. Для розв'язання поставлених задач використані узагальнювальні методи моделювання, методи лінійного та нелінійного програмування. Усталені режими моделюються на базі методу вузлових напруг.

Результати досліджень з визначення обсягу гарантованого покриття навантаження споживача енергією з відновлювальних джерел живлення

#### **Засоби та способи організації роботи національних електронних реєстрів гарантій походження**

ГП є гетерогенними продуктами, що відрізняються за вказаними характеристиками станцій. Це призводить до утворення кількох субринків з різними рівнями цін і ринковою ліквідністю. Скасування Гарантій походження в обсязі споживання електроенергії фізичною особою чи підприємством, дає змогу підтверджувати факт спожив-

вання ними енергії з ВДЕ. Як товарний сертифікат він також може надавати виробникам додаткову винагороду. Приклад організації даних у національному реєстрі ГП показано на рис. 1. Ця технологія забезпечує високий ступінь прозорості за своєю конструкцією та має можливість об'єднати всі сторони на єдиній нейтральній платформі.

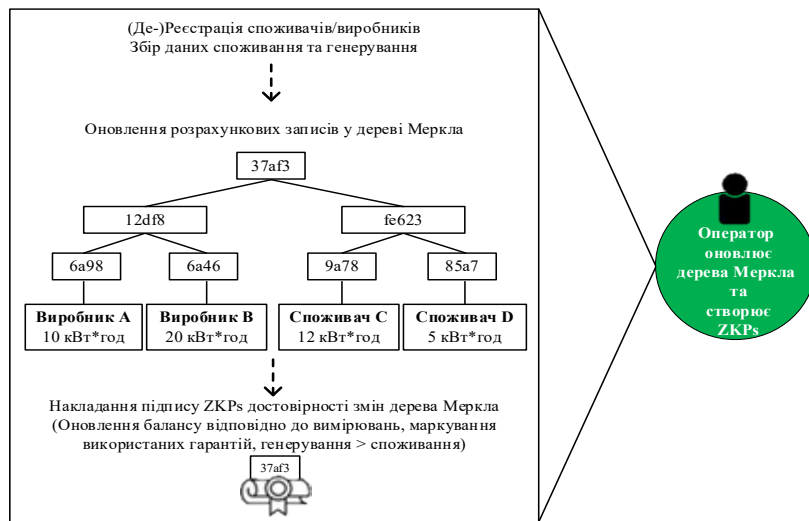


Рис. 1. Організація даних у реєстрі Гарантії походження

Наведене на рис. 1 дерево Меркла – це особлива структура даних, яка містить підсумкову інформацію про деякий більший обсяг даних та використовується для перевірки їх цілісності. Перевірка цілісності даних виконується оператором ГП відповідно до структурної схеми, що показано на рис. 2. Така структура дозволяє маркувати кожну одиницю електроенергії з ВДЕ за технологією блокчейн та торгувати цими сертифікатами окремо від фізичної енергії. Також у якості модифікації системи запропоновано застосування перевірки достовірності хеш-дерева за допомогою методу доведення з нульовим розголошенням ZKP підпис (zero-knowledge proof).

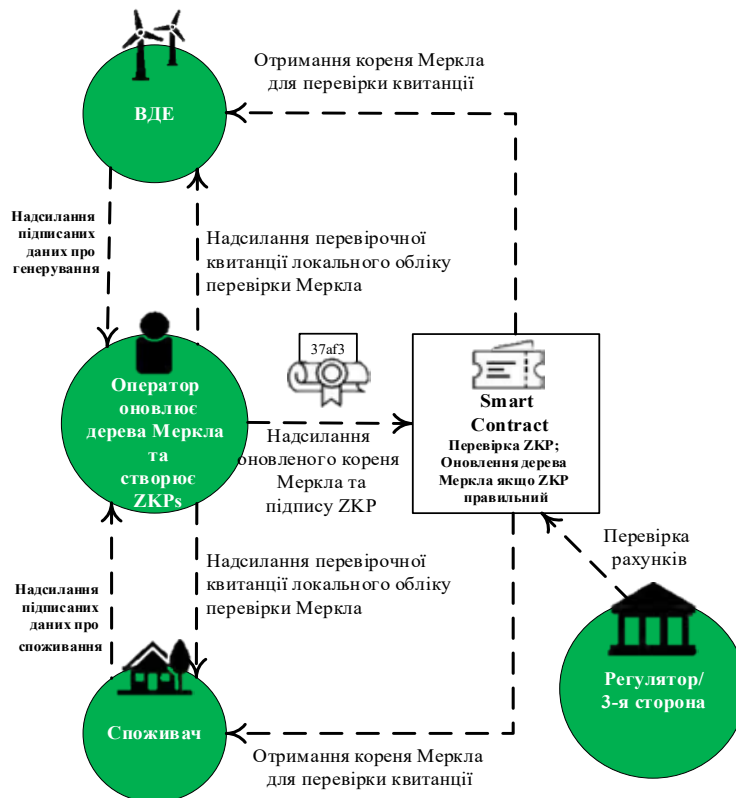


Рис. 2. Узагальнена структура системи маркування Гарантії походження

У пропонованій структурі організації даних у системи маркування Гарантії походження [10] не передбачено врахування топології мережі та місця виробництва електроенергії. Тому, актуальним є вдосконалення вказаної структури доповненням відповідним математичним апаратом оцінювання частки електроспоживання заданого споживача, яка забезпечується з відновлювальних джерел енергії.

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

Для структурування втрат потужності в ЕМ за окремими транзакціями електроенергії з врахуванням нелінійності, у [11] запропоновано використовувати матрицю коефіцієнтів розподілу втрат потужності у вигляді (1):

$$\hat{T}_i = (\hat{U}_i M_{\Sigma i}) \hat{C}_i \hat{U}_d^{-1}, \quad (1)$$

де  $\hat{U}_i$  – транспонований вектор напруг у вузлах включаючи і базисний;  $M_{\Sigma i}$  –  $i$ -ий вектор-стовпець матриці інцидентів;  $\hat{C}_i$  –  $i$ -й вектор-рядок матриці розподілу струмів у вузлах  $\hat{J}$  по вітках схеми електричної мережі з ВДЕ;  $\hat{U}_d^{-1}$  – діагональна обернена матриця напруг у всіх вузлах включаючи і базисний;

Вектор-рядок  $\hat{T}_i$  складається з коефіцієнтів, які показують, яку частку сумарних втрат потужності  $i$ -ої вітки зумовлює протікання по ній потужності навантаження (генерування) кожного вузла.

У виразі (1) перша матриця з'єднань  $M_{\Sigma}$ , складена для всіх вузлів схеми, враховуючи базисний, може бути подана у вигляді суми двох матриць:

$$M_{\Sigma} = M_{\Sigma}^{+} + M_{\Sigma}^{-}, \quad (2)$$

де  $M_{\Sigma}^{+}$  – матриця, що містить фрагмент матриці з'єднань, елементами якої є нулі та одиниці з знаком “+”;  $M_{\Sigma}^{-}$  – та ж матриця, але її елементами є нулі та одиниці з знаком “-”.

Для визначення складових переткань потужності в  $i$ -ій лінії за параметрами її кінця вираз (2) можна подати у вигляді:

$$M_{\Sigma}^k = 0 - M_{\Sigma}^{-}. \quad (3)$$

Вираз (3) містить фрагмент матриці з'єднань, елементами якої є нулі та одиниці з додатнім знаком, яка для кожної лінії ідентифікує вузол її кінця. Для кожного вузла матриця дає змогу визначити лінії, що закінчуються цим вузлом.

Втрати потужності згідно (1) визначаються як різниця між потоком потужності на початку та в кінці кожної вітки. Таким чином, після підстановки у (1)  $M_{\Sigma}^k$  замість  $M_{\Sigma}$  отримано вираз для визначення коефіцієнтів розподілу перетікань потужності у вітках схеми ЕМ, які зумовлені генеруванням у вузлах приєднання ВДЕ:

$$\hat{A}_i = (\hat{U}_i M_{\Sigma i}^k) \hat{C}_{\text{вде}i} \hat{U}_{\text{вде}}^{-1}, \quad (4)$$

де  $\hat{U}_{\text{вде}}^{-1}$  – обернена діагональна матриця напруг у вузлах приєднання ВДЕ;  $\hat{C}_{\text{вде}i}$  –  $i$ -й вектор-рядок фрагменту матриці коефіцієнтів розподілу струмів по вітках схеми ЕМ, який відповідає  $i$ -му вузлу приєднання ВДЕ:

$$\hat{C}_{\text{вде}} = \hat{z}_b^{-1} M_{\text{вде}t} (\hat{Y}_{\text{вде}})^{-1}, \quad (5)$$

$M_{\text{вде}t}$ ,  $\hat{Y}_{\text{вде}}$  – фрагменти транспонованої матриці з'єднань та матриці вузлових провідностей схеми ЕМ, які відповідають вузлам приєднання ВДЕ;  $\hat{z}_b$  – діагональна матриця комплексних опорів віток схеми електричної мережі.

Аналогічно до [2] для визначення перетікань від ВДЕ у вітках схеми можна записати:

$$\hat{S}_{\text{вде}}^b = \hat{A}_i \text{diag}(\hat{S}_{\text{вде}}^i), \quad (6)$$

де  $\hat{S}_{\text{вде}}^b$  – вектор перетікань потужності у вітках схеми викликаних генеруванням у вузлах приєднання ВДЕ;  $\hat{S}_{\text{вде}}^i$  – фрагмент вектору потужностей вузлів ЕМ, що відповідає вузлам приєднання ВДЕ.

Отриманий за виразом (6) вектор  $\hat{S}_{\text{вде}}^b$  буде вміщувати лише перетікання у вітках, які зумовлені генеруванням ВДЕ. Для визначення перетікань від інших центрів живлення, зокрема електростанцій гарантованого генерування, у  $i$ -ій вітці схеми ЕМ, по аналогії з [3] запропоновано використовувати вираз:

$$\hat{S}_{\text{цж}i}^b = (\hat{U}_i M_{\Sigma i}^k) \hat{D}_{\text{цж}i} \hat{U}_{\text{цж}}^{-1}, \quad (7)$$

де  $\hat{D}_{\text{цж}i}$  –  $i$ -й вектор-рядок матриці провідностей, який відповідає  $i$ -ій вітці схеми ЕМ та визначається з матриці кумулятивних провідностей:

$$\hat{D}_{\text{цж}} = \hat{z}_b^{-1} (M_{\text{цж}t} - M_{\text{вде}t} (\hat{Y}_{\text{вде}})^{-1} \hat{Y}_{\text{цж}}), \quad (8)$$

$M_{\text{цкт}}, \dot{Y}_{\text{цк}}$  – фрагменти транспонованої матриці з'єднань та матриці вузлових провідностей схеми електричної мережі, які відповідають сукупності вузлів схеми ЕМ за виключенням вузлів приєднання ВДЕ. Матриця  $D_{\text{цк}}$  має фізичний зміст провідностей, що формують струми від центрів живлення (зокрема, базисного вузла) до вузлів споживання.

З врахуванням (6) і (7) можна записати вирази для визначення обсягів гарантованого покриття навантаження споживача енергією з відновлювальних джерел та від інших центрів живлення [12]:

$$\dot{S}_{\text{вде}}^{\text{част}} = M_{\Sigma} \dot{S}_{\text{вде}}^{\text{в}}; \quad \dot{S}_{\text{цк}}^{\text{част}} = M_{\Sigma} \dot{S}_{\text{цк}}^{\text{в}}. \quad (9)$$

Матриця  $\dot{S}_{\text{вде}}^{\text{част}}$  має розмірність за кількістю вузлів приєднання ВДЕ та загальною кількістю вузлів схеми. Вона вміщує обсяги гарантованого покриття навантаження окремих споживачів енергією з визначених ВДЕ. Враховуючи зв'язок між (6) та (9) матрична сума часткових обсягів  $\dot{S} = \dot{S}_{\text{вде}}^{\text{част}} + \dot{S}_{\text{цк}}^{\text{част}}$  завжди буде дорівнювати сумарним розрахунковим потужностям навантаження (генерування) у вузлах ЕМ  $\dot{S}$ .

Структура організації даних у реєстрі гарантій походження базується на блоках, які вже продуктивно використовуються в децентралізованих фінансах, наприклад, у формі ЗКР. Аналіз джерел для порівняння отриманих результатів з досягненнями інших науковців у вказаній проблематиці показав [12], що у всіх Європейських країнах застосовується відокремлення фізичних процесів від комерційних, тому врахування топології мережі та втрат електроенергії на її передачу є безумовною перевагою наведеного дослідження.

Більшість Європейських експертів погоджується, що найкращим підходом до урахування втрат електроенергії є вимога до відповідального ОСП (та/або ОСР) компенсації втрат в мережі шляхом скасування належної кількості ГП, та видалення їх з ринку.

Доповнення запропованої у [10] структури організації даних реєстру гарантій походження обґрунтованим з точки зору електротехніки алгоритмом випуску ГП дозволить обмежити обсяги їх купівлі окремими споживачами. Споживач, що приєднаний до електромережі з надлишком ВДЕ не буде мати обмежень у придбанні ГП, якщо графік його електроспоживання частково або повністю відповідає графіку роботи електростанцій з ВДЕ. За інших умов на придбання ГП накладаються об'єктивні обмеження. Адже вироблена з ВДЕ електроенергія споживається в момент її вироблення визначеним колом споживачів з відповідним зниженням викидів вуглецю. Такий підхід є інструментом підтвердження гарантій походження енергії, що продається на роздрібному ринку. Це унеможлиблює подвійний облік зеленої енергії, створює прозорі умови для видачі сертифікатів та досить точно відображає викиди вуглецю.

Використання пропонованого методу потребує додаткових обчислень, що може дещо уповільнити процес видачі ГП. Для зменшення кількості розрахунків доцільно використовувати певні спрощення шляхом застосування типових режимів роботи електричної мережі та переходу від методу чисельного інтегрування до методу середніх навантажень.

На підставі досліджень було запропоновано метод та алгоритм визначення частки перетікань потужності до певного вузла навантаження від сукупності відновлюваних джерел енергії, що має певні переваги. Загальні обсяги ГП які може закупити споживач запропоновано визначати з урахуванням параметрів режиму та фізичних процесів у електричних мережах. Це дає можливість врахувати втрати електричної енергії на її передачу та більш точно враховувати викиди вуглецю.

Недоліками застосування пропонованого механізму є необхідність забезпечення високої пропускної здатності обліку електроенергії, наближену до реального часу. Кожному окремому споживачеві потрібна буде транзакція кожні 15 хвилин. Це також створює додаткові вимоги до обчислюваної техніки та організації даних у системі ГП Крім того, необхідно враховувати питання обробки помилок, наприклад, у разі затримки передачі показників лічильників.

Розвиток даного дослідження полягає у формуванні стійких залежностей між параметрами режиму та обсягами розподілу ГП для характерних режимів. Це дозволить зменшити обчислювальне навантаження та спростити процес визначення можливих обсягів ГП для кожного споживача.

### Висновки

Існуючі підходи до організації роботи національних електронних реєстрів ГП не передбачають врахування топології мережі та місця виробництва електроенергії. Реєстри організовані на принципах відокремлення фізичних процесів від комерційних. Тому, актуальним є доповнення існуючої структури організації ГП врахуванням фізичних процесів у системах передачі та розподілу електроенергії, що потребує розроблення відповідного математичного апарату.

Розроблено метод визначення частки перетікань потужності до певного вузла навантаження від сукупності відновлюваних джерел енергії, що приєднані до ЕМ. Для врахування нелінійності співвідношення між напругами у вузлах ЕМ та потужностями їх генерування чи навантаження використовуються результати розрахунку усталених режимів. Для оцінювання обсягів покриття навантаження заданого споживача з відновлюваних джерел енергії використовуються результати структурування перетікань потужності до вузла його приєднання за джерелами походження. Пропонований метод може бути інструментом підтвердження гарантій походження енергії, що продається на роздрібному ринку.

### Список використаної літератури

1. Kotilainen, K., Valta, J., Makinen, S. J., & Jarventausta, P. (2017). Understanding consumers' renewable energy behaviour beyond "homo economicus": An exploratory survey in four European countries. 2017 14th International Conference on the European Energy Market (EEM). <https://doi.org/10.1109/eem.2017.7981932>

2. E3G, LEHNE, J., & SARTOR, O. (2020, September). Navigating The Politics Of Border Carbon Adjustments. [https://www.e3g.org/wp-content/uploads/E3G-Briefing\\_Politics\\_Border\\_Carbon\\_Adjustment.pdf](https://www.e3g.org/wp-content/uploads/E3G-Briefing_Politics_Border_Carbon_Adjustment.pdf)
3. Hansen, K., Breyer, C., & Lund, H. (2019). Status and perspectives on 100% renewable energy systems. *Energy*, 175, 471–480. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.03.092>.
4. Van Renssen, S. (2020). The hydrogen solution? *Nature Climate Change*, 10(9), 799–801. <https://doi.org/10.1038/s41558-020-0891-0>.
5. V. Kulyk, O. Burykin, M. Juliya and P. Viktor, "Optimization of Reactive Energy Flows in the Electric Grid Taking Into Account Allowable Voltage Fluctuations," *2018 IEEE 3rd International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS)*, Kharkiv, 2018, pp. 265-270. doi:10.1109/IEPS.2018.8559542.
6. De Chalendar, J. A., & Benson, S. M. (2019). Why 100% Renewable Energy Is Not Enough. *Joule*, 3(6), 1389–1393. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2019.05.002> .
7. Comello, S., Reichelstein, J., & Reichelstein, S. (2021). Corporate Carbon Reduction Pledges: An Effective Tool to Mitigate Climate Change? SSRN Electronic Journal. <https://doi.org/10.2139/ssrn.3875343> .
8. Will, C., Jochem, P., & Fichtner, W. (2017). Defining a day-ahead spot market for unbundled time-specific renewable energy certificates. 2017 14th International Conference on the European Energy Market (EEM). <https://doi.org/10.1109/EEM.2017.7981967>
9. Hamburger, K. (2019). Is guarantee of origin really an effective energy policy tool in Europe? A critical approach. *Society and Economy*, 41(4), 487–507. <https://doi.org/10.1556/204.2019.41.4.6>.
10. Sedlmeir, J., Völter, F., & Strüker, J. (2021). The next stage of green electricity labeling. *ACM SIGEnergy Energy Informatics Review*, 1(1), 20–31. <https://doi.org/10.1145/3508467.3508470>.
11. Abenov, A., Lezhnjuk, P. D., Kulik, V. V., Burykin, O. B., Malogulko, J. V., & Kacejko, P. (2018). Transmission loss allocation for a bilateral contract in deregulated electricity market. *Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments 2018*. <https://doi.org/10.1117/12.2501604>.
12. 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. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.265749>.

#### References

1. Kotilainen, K., Valta, J., Makinen, S. J., & Jarventausta, P. (2017). Understanding consumers' renewable energy behaviour beyond "homo economicus": An exploratory survey in four European countries. 2017 14th International Conference on the European Energy Market (EEM). <https://doi.org/10.1109/eem.2017.7981932>
2. E3G, LEHNE, J., & SARTOR, O. (2020, September). Navigating The Politics Of Border Carbon Adjustments. [https://www.e3g.org/wp-content/uploads/E3G-Briefing\\_Politics\\_Border\\_Carbon\\_Adjustment.pdf](https://www.e3g.org/wp-content/uploads/E3G-Briefing_Politics_Border_Carbon_Adjustment.pdf)
3. Hansen, K., Breyer, C., & Lund, H. (2019). Status and perspectives on 100% renewable energy systems. *Energy*, 175, 471–480. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.03.092>.
4. Van Renssen, S. (2020). The hydrogen solution? *Nature Climate Change*, 10(9), 799–801. <https://doi.org/10.1038/s41558-020-0891-0>.
5. V. Kulyk, O. Burykin, M. Juliya and P. Viktor, "Optimization of Reactive Energy Flows in the Electric Grid Taking Into Account Allowable Voltage Fluctuations," *2018 IEEE 3rd International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS)*, Kharkiv, 2018, pp. 265-270. doi:10.1109/IEPS.2018.8559542.
6. De Chalendar, J. A., & Benson, S. M. (2019). Why 100% Renewable Energy Is Not Enough. *Joule*, 3(6), 1389–1393. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2019.05.002> .
7. Comello, S., Reichelstein, J., & Reichelstein, S. (2021). Corporate Carbon Reduction Pledges: An Effective Tool to Mitigate Climate Change? SSRN Electronic Journal. <https://doi.org/10.2139/ssrn.3875343> .
8. Will, C., Jochem, P., & Fichtner, W. (2017). Defining a day-ahead spot market for unbundled time-specific renewable energy certificates. 2017 14th International Conference on the European Energy Market (EEM). <https://doi.org/10.1109/EEM.2017.7981967>
9. Hamburger, K. (2019). Is guarantee of origin really an effective energy policy tool in Europe? A critical approach. *Society and Economy*, 41(4), 487–507. <https://doi.org/10.1556/204.2019.41.4.6>.
10. Sedlmeir, J., Völter, F., & Strüker, J. (2021). The next stage of green electricity labeling. *ACM SIGEnergy Energy Informatics Review*, 1(1), 20–31. <https://doi.org/10.1145/3508467.3508470>.
11. Abenov, A., Lezhnjuk, P. D., Kulik, V. V., Burykin, O. B., Malogulko, J. V., & Kacejko, P. (2018). Transmission loss allocation for a bilateral contract in deregulated electricity market. *Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments 2018*. <https://doi.org/10.1117/12.2501604>.
12. 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. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.265749>.