

## ПОБУДОВА СТРУКТУРИ СІЛЬСЬКИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ З УРАХУВАННЯМ НАЯВНОСТІ ВІДНОВЛЮВАНИХ ДЖЕРЕЛ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ

*Зазначено, що хоча частка відновлюваних джерел електричної енергії продовжує зростати і стрімко розвивається, однак галузь все ще стикається з багатьма проблемами, зокрема, як продовжувати знижувати втрати електричної енергії та річні приведені витрати, покращити ефективність експлуатації та обслуговування, підтримувати стабільність електромережі, забезпечити безпеку та надійність роботи системи електропостачання що містять відновлювані джерела електричної енергії.*

*Показано, що ефективне рішення зазначених проблем можливе лише на основі аналізу перспектив розвитку локальних електроенергетичних систем, які містять відновлювані джерела електричної енергії, розробки механізмів технічного та організаційного забезпечення, які сприятимуть побудові сучасних системних (схемотехнічних) рішень.*

*Запропоновано застосувати метод потенційної поверхні для побудови оптимальної структури сільської електричної мережі при її проектуванні та модернізації в умовах присутності в ній відновлюваних джерел електричної енергії, який дозволяє оптимізувати структуру мережі з точки зору втрат електричної енергії та зниження річних приведених витрат.*

*Описано алгоритм формування структури систем електропостачання, який реалізує одночасне вирішення завдань визначення кількості вузлів навантаження, розподілу між ними електроприймачів, визначення конструкції джерел живлення, врахування дискретності конструкції елементів системи.*

*Наведено результати чисельного моделювання на основі запропонованого алгоритму на прикладі розв'язання задачі реконструкції ділянки сільської електромережі.*

**Ключові слова:** *сільські електричні мережі, відновлювані джерела енергії, метод потенційних поверхонь, структура систем електропостачання, вузол навантаження, електроприймач, джерело живлення, втрати електричної енергії.*

### Вступ

У сучасних умовах повномасштабної війни та зростання цін на первинні енергоносії всі галузі промислового виробництва України гостро потребують розосереджених та альтернативних джерел електричної енергії. Особливу потребу в них відчуватимуть у післявоєнні роки агропромислові комплекси (АПК), на яких буде покладено завдання якнайшвидшого відновлення економіки країни. Сільські електричні мережі (СЕМ), як відомо, відрізняються великою протяжністю, розгалуженістю при порівняно малій потужності, що передається, а також використанням низьких класів напруги. Тенденції зростання тарифів на електричну енергію обумовлюють значне збільшення складової вартості втрат електричної енергії (ВЕЕ) в мережах при її передачі та розподілі й як наслідок - збільшення річних приведених витрат.

Ще у довоєнний період спостерігалось постійне зростання частки «малої» генерації в енергобалансі підприємств АПК. Це пов'язано з широким впровадженням відновлюваних джерел електроенергії (ВДЕ). Найбільш широке впровадження отримали сонячні та вітроелектростанції, малі ГЕС, когенераційні установки на біопаливі тощо. Останнім часом, все більш широко стали вводитися в експлуатацію об'єкти з комплексним використанням декількох ВДЕ, які виробляють вже промислові обсяги електроенергії як для власних цілей з можливістю мережевого підключення, так і для продажу електроенергії в мережу або іншим споживачам [1].

На жаль, на сьогоднішній день АПК при використанні електроустановок на основі альтернативних джерел енергії стикаються із низкою проблем системного характеру. Так, якщо питання оцінки потенціалу сонячної, вітрової енергії та енергії річок досить докладно вирішені, то при підключенні ВДЕ до існуючої мережі виникає задача пошуку місця її підключення. Найчастіше підключення таких джерел генерації до СЕМ неузгоджене, що призводить до складності керування та прогнозування режимів роботи мереж,

зростання складової втрат електричної енергії ВЕЕ, оскільки структура їх перестає бути оптимальною з точки зору мінімуму приведених витрат. Крім того, збільшення частки ВДЕ в загальному обсязі генерованої електроенергії створює ряд загальносистемних технічних проблем [2-4]:

- ускладнення диспетчерського управління електроенергетичною системою;
- кожне ВДЕ має свої динамічні характеристики і можливості управління, що тягне необхідність вирішення проблем електромагнітної сумісності;
- ускладнення системи релейного захисту та автоматики, а також протиаварійного управління;
- збільшення струмів короткого замикання, що призводить до заміни комутаційних апаратів, зміни налаштувань захистів та ін.

Але основна проблема неузгодженого приєднання розрізаних ВДЕ до мережі - це складність керування та прогнозування режимів роботи енергосистеми, пов'язані з перетіканням потужностей у мережі та як наслідок – збільшення ВЕЕ [5].

Зменшення складової вартості ВЕЕ можливо лише шляхом оптимізації (побудові сучасних схемотехнічних рішень) структури СЕМ під час реконструкції існуючих мереж електропостачання.

#### **Аналіз стану питання**

Ключовою проблемою при формуванні оптимальної структури мережі електропостачання є задача визначення кількості джерел живлення і розподіл за ними приймачів електроенергії, а також обладнання проміжних вузлів навантаження (рівнів розподільчої мережі) з урахуванням розрізаних ВДЕ.

Основні підходи при вирішенні задачі побудови оптимальної структури мережі електропостачання базуються на використанні оціночних та оптимізаційних моделей [6]. Перші служать для визначення техніко-економічних показників для заданого проектувальником варіанту мережі. Другі - для визначення оптимального варіанту конфігурації мережі в межах прийнятих проектувальником припущень відповідно до прийнятого критерієм оптимальності. При цьому в оптимізаційних моделях необхідно враховувати дискретність деяких величин (переріз проводів та кабелів, потужність і кількість трансформаторів, кількість приєднань до ВДЕ та ін.).

Визначальним чинником формування схеми електричної мережі є місце розташування джерела живлення та траси прокладання її ділянок, які отримані в результаті оптимізації топологічної задачі з урахуванням метричних обмежень, зумовлених розташуванням природних та технологічних об'єктів. Щодо установки ВДЕ, то їх потужність обумовлена потенціалом первинної енергії, соціально-екологічними обмеженнями, а також технічними факторами (встановленою потужністю, коефіцієнтом корисної дії, напругою генерації та ін.). Останні тісно пов'язані з конструктивними та техніко-економічними показниками мережі.

Існуючі підходи до оцінки ефекту від запровадження ВДЕ засновані на обчисленні наступних техніко-економічних показників: початкові капітальні вкладення для будівництва енергетичного об'єкта; вартість землі, що відведена під об'єкт, вартість заходів на охорону навколишнього середовища, витрати на демонтаж об'єктів при виведенні основних фондів або реконструкції; поточні витрати на обслуговування та ремонт, а також амортизаційні відрахування на реновацію основних фондів об'єкта, які є витратною частиною проекту [7].

Очевидний взаємозв'язок між техніко-економічними показниками електричної мережі та ВДЕ вимагає розробки нової моделі електричної мережі, яка буде покладена у методологічну основу її оптимізації з урахуванням застосування всього ряду альтернативних джерел електроенергії. Аналіз існуючих підходів до формування структури систем електропостачання показав, що існує метод, здатний вирішувати вище перераховані задачі одночасного - це метод еквіпотенціальних контурів [6].

#### **Мета роботи.**

Пропонується застосувати метод еквіпотенціальних контурів з метою формування оптимальної структури електричної мережі сільськогосподарського району, що містить ВДЕ з точки зору мінімуму ВЕЕ та зниження річних приведених витрат.

#### **Методи дослідження.**

Суть методу еквіпотенціальних контурів полягає в проведенні аналогії між навантаженням приймачів ( $P_i$ ), розташованих в точках  $(x_i, y_i)$ , і потенціалами деяких джерел енергії, розташованих у тих же точках. Потенціали цих джерел дорівнюють навантаженням приймачів. При віддаленні від точки розташування приймача потенціал від джерела, розташованого в тій самій точці, зменшуватиметься і в

деяких віддалених точках потенціал буде близький до нуля [6]. Сукупність усіх потенціалів джерел енергії утворює потенційну поверхню, яку можна описати потенційною функцією:

$$\Pi(x, y) = \sum_{i=1}^n P_i \cdot e^{-1 \cdot \alpha_{\Delta P_i} [(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2]}, \quad (1)$$

де:  $\alpha_{\Delta P_i}$  – коефіцієнт, який враховує втрати потужності від джерела живлення до приймача

$$\alpha_{\Delta P_i} = \frac{P_i^2 \rho}{U^2 F(P_i)}, \quad (2)$$

де:  $P_i$  - потужність приймача;  $\rho$  – питомий опір матеріалу провідника;  $U_i$  - напруга;  $F(P_i)$ - переріз провідника визначається як функція від переданої потужності.

Використання запропонованого коефіцієнта  $\alpha_{\Delta P_i}$  (вираз (2)) дає можливість відразу оцінити ступінь майбутніх ВЕЕ в провідниковому матеріалі під час визначення центру електричних навантажень. Крім того, запропоновано використання замість еквіпотенціальних контурів, як критерію формування вузлів навантаження, додаткові критерії відбору "потенційний" та "технічний" критерії.

Функція (1) є основою для "потенційного" критерію відбору, за яким на потенційній поверхні, яку утворює функція, визначається точка максимуму потенціалу. Ця точка надалі виступає в ролі центру електричних навантажень. Приймачі, які будуть отримувати живлення від цього центру електричних навантажень за "потенційним" критерієм визначаються як приймачі, які брали участь у формуванні максимуму функції (1). Ці приймачі зараховуються до "потенційної" групи.

Аналогічну поверхню можна побудувати і для ВДЕ, де  $P_i$  приймає значення рівне величині енергії, що генерується таким джерелом енергії, але зі знаком мінус [8].

Накладення цих двох поверхонь призводить до зміни координат максимуму, тим самим уточнюються координати встановлення джерела живлення. Важливим моментом у визначенні цих координат є урахування зон неприпустимості прокладання ліній та встановлення джерел живлення.

«Потенційна група» є закінченим структурним елементом майбутньої розподільчої мережі, але той факт, що при формуванні "потенційної" групи були враховані лише розташування приймачів відносно один одного і очікувані ВЕЕ в розподільчій мережі, не дає можливості запровадити "потенційну" групу в майбутню розподільчу мережу, так як крім врахованих факторів ще необхідно провести узгодження майбутньої "потенційної" групи з можливим конструктивним виконанням вузла мережі.

Для вирішення цієї задачі використовується "технічний" критерій. "Технічний" критерій відбору виконує функцію узгодження приймачів "потенційної" групи з можливим конструктивним виконанням її джерела живлення. Критерій діє на основі принципу надлишковості "потенційної" групи по відношенню до граничних умов "технічного" критерію. На основі взаємодії "потенційного" і "технічного" критеріїв відбору складається алгоритм методу.

Принцип роботи алгоритму базується на утворенні зворотних зв'язків, які охоплюють обидва критерії і створюють умови для становлення алгоритму як самоорганізуючої моделі побудови структури мережі.

Розглядаючи критерії відбору як граничні умови функціонування моделі, запропонований підхід дає можливість закладення в них дискретності конструктивних умов виконання структури мережі, яка містить ВДЕ, і чим повніше враховані ці умови в критерії відбору, тим більше можливостей якісно вирішити поставлену задачу [8].

Таким чином, побудову структури системи електропостачання, що містить ВДЕ, можна представити у вигляді наступного алгоритму.

На першому етапі будується потенційна поверхня для електроприймачів в режимі споживання.

На другому етапі будується поверхня для режиму, в яких ВДЕ виробляють електроенергію в мережу.

Потім проводиться накладення цих поверхонь і на сумарній поверхні виділяється максимум функції, в координатах якого і буде розташоване джерело живлення.

Важливим моментом у визначенні цих координат є облік зон неприпустимості прокладки ліній і встановлення джерел живлення. Для цього можливо використовувати методи розпізнавання образів, відповідно до яких передбачено розбиття простору об'єкта, на області, які не перетинаються, кожна з яких відповідає відображенню одного і того ж класу, до якого допустимо елементарний математичний опис [8].

На наступному етапі проводиться відбір електроприймачів за «потенційним» критерієм, а потім за «технічним» з урахуванням дискретності конструктивного виконання елементів.

Згідно з "потенційним" критерієм відбору на потенційній поверхні, визначається точка максимуму потенціалу. Ця точка надалі виступає в ролі центру електричних навантажень. Приймачі, які будуть отримувати живлення від цього центру електричних навантажень зараховують до "потенційної" групи.

"Технічний" критерій відбору виконує функцію узгодження приймачів "потенційної" групи з можливим конструктивним виконанням її вузла живлення.

В результаті відбору електроприймачів за вищевказаними критеріями формується група електроприймачів першого джерела живлення, що виключається з подальшого розгляду при формуванні структури мережі.

Після цього, знову будуються дві (якщо залишилися ВДЕ), або одна (якщо всі ВДЕ приєднані до джерел живлення) потенційні поверхні і здійснюється формування групи електроприймачів другого джерела живлення.

У результаті циклічної дії (до того, поки всі електроприймачі не отримають своє джерело живлення) формується радіальна структура системи електропостачання, після чого здійснюється перевірка можливості організації проміжних джерел живлення [8].

На останньому етапі проводиться оцінка можливості (за критеріями мінімуму капітальних витрат і ВЕЕ) заміни окремих ділянок радіальної мережі на магістральні ділянки. Таким чином, метод порівняльної оцінки передбачає аналіз локального ділянки структури мережі з визначенням ряду технічно доцільних варіантів її виконання та подальше порівняння цих варіантів між собою.

Даний підхід дозволяє не тільки автоматизувати побудову оптимальної структури розподільної мережі, що містить джерела «малої генерації», а й знизити розміри капітальних вкладень при побудові такої мережі за рахунок застосування проміжних вузлів навантаження (визначення їх оптимальної кількості та розташування). Блок схема алгоритму побудови структури мереж електропостачання що містять ВДЕ подано на рис. 1.

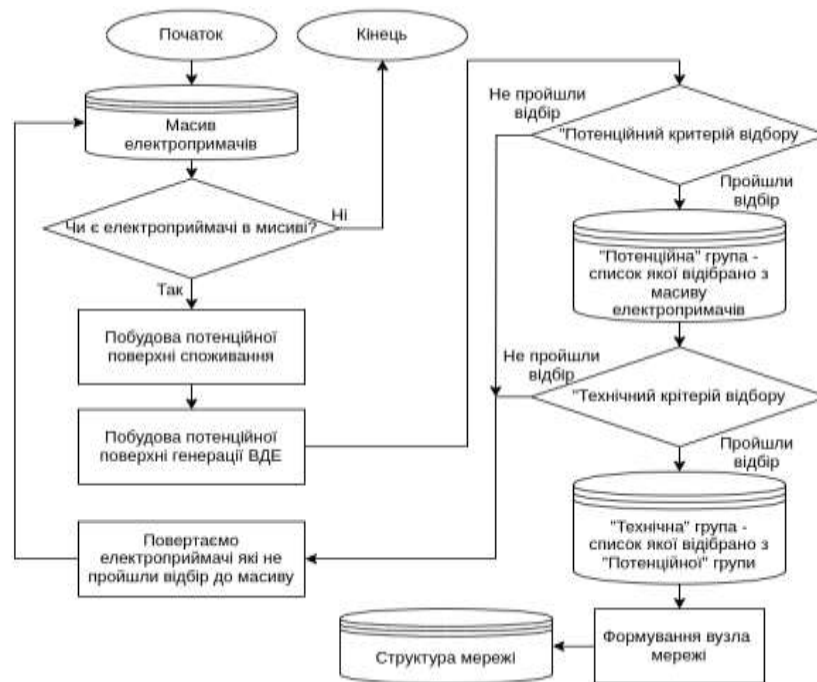


Рисунок 1 - Блок схема алгоритму побудови структури мереж електропостачання що містять ВДЕ.

Запропонований алгоритм був реалізований програмно за допомогою мови програмування Python і пакета математичного обчислення SciPy.

Використання даного алгоритму дозволяє побудувати інженерні методики для попереднього розрахунку структури розподільних мереж що містять ВДЕ, оцінити потенціал вже існуючих мереж, проводити оцінку ефективності їх роботи при модернізації, а також провести оцінку капіталовкладень при реконструкції частини мережі [9].

#### Результати чисельного моделювання.

Запропонований алгоритм було апробовано на прикладі вирішення задачі реконструкції ділянки СЕМ площею 12 км<sup>2</sup> з розрахунковим навантаженням на повну потужність 4,4 МВА.

Джерелом живлення є двотрансформаторна підстанція із трансформаторами 2хТМН – 4000/35. Електричні мережі напругою 35 кВ та 10 кВ конструктивно реалізовані повітряними лініями (ПЛ), прокладеними на залізобетонних опорах типу АС.



Таблиця 2 – Втрати електричної енергії в повітряних лініях

ПЛ на напрузі	Втрати електричної енергії МВт·год/рік		
	Варіанти СЕМ		
	I	II	III
10 кВ	233,9	206,8	197,0
35 кВ	142,5	118,0	114,0

Таблиця 3 – Техніко-економічні показники варіантів СЕМ

Техніко-економічні показники	Варіанти СЕМ		
	I	II	III
Витрати на амортизацію та експлуатацію, тис. грн/рік	8,2	7,0	6,4
Витрати на покриття втрат електричної енергії, тис. грн/рік	2559,4	2213,8	2119,8
Приведені витрати, тис. грн/рік	2567,6	2220,8	2126,2

### Висновки

Запропонований формалізований метод побудови структури СЕМ, що містять ВДЕ, дозволяє врахувати зміну режиму роботи таких мереж та оптимізувати їхню структуру з погляду зниження ВЕЕ в мережах при її передачі та розподілі й як наслідок - зменшення річних приведених витрат.

Крім того, на основі спільного використання оціночних та оптимізаційних моделей запропонований метод дає можливість побудувати оптимальну структуру мережі електропостачання підприємств АПК що містить ВДЕ за замкнутою схемою, що дозволить суттєво зменшити експлуатаційні витрати, що необхідні для підтримки потрібного рівня надійності мережі та підвищити пропускну здатність існуючих мереж в 1,3 - 1,5 разів без додаткових витрат на підвищення перерізу проводів та кабелів.

### Список використаної літератури

1. Денисюк С.П., Белоха Г.С., Чернецьук І.С., Лисий В.В. Світові тенденції впровадження відновлюваних джерел енергії та особливості їх реалізації при відновленні економіки України // *Енергетика: економіка, технології, екологія*. – 2022. – № 4. – С.7–28.
2. Jenkins N., Allan R., Grossly P., Kirschen D., Strbac G. *Embedded Generation*. London; IEE, 2000, 273 p.
3. Barker Ph. P., De Mello R.W. Determining the Impact of Distributed Generation on Power Systems: Part 1 - Radial Distribution Systems // 2000 IEEE PES Summer Meeting, Seattle, WA, USA, July 11-15, 2000, p. 222 - 233.
4. Papathanassiou S.A., Hatziargyriou N.D. Technical Requirements for the Connection of Dispersed Generation to the Grid // 2001 IEEE PES Summer Meeting, Vancouver, Canada, July 15 - 19, 2001, p. 134 - 138.
5. Денисюк С.П., Махлін П.В., Шрам О.А., Слинко В.М. Особливості аналізу режимів роботи енергосистеми у районах з альтернативними джерелами електроенергії (вітровими електростанціями) // *Техн. електродинаміка*. – 2022. – № 1. – С. 41–49.
6. V. Dyachenko, D. Fedosha and A. Zabolotnyi, "Algorithm for the Program of Energy Saving for Power Supply System," 2019 IEEE 2nd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON), 2019, pp. 420-425, doi: 10.1109/UKRCON.2019.8879915.
7. А.П. Заболотний, Д.В. Федоса, Ю.В. Даус Побудова структури мереж електропостачання споживачів АПК, що містять джерела «малої генерації» // *Вісник ХНТУСГ. Технічні науки «Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України»*. – 2011. – №. 116. – с. 20-21.
8. V. Dyachenko, D. Fedosha and A. Zabolotnyi, "Algorithm of synthesizing energy effective power supply system of industrial enterprises," 2020 IEEE 7th International Conference on Energy Smart Systems (ESS), 2020, pp. 320-325, doi: 10.1109/ESS50319.2020.9160288.
9. А.П. Заболотний, Ю.В. Даус Формалізація процедури підключення джерел розподіленої генерації до електричних мереж. // *Вісник ТДАТУ «Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України»*. – 2015. –№. 3. – с.37- 41.

A. Zabolotnyi<sup>1</sup>, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Prof, ORCID 0000-0002-8696-661X

D. Fedosha<sup>1</sup>, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Prof, ORCID 0000-0002-0683-0561

V. Diachenko<sup>1</sup>, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Prof, ORCID 0000-0002-8705-9683

Y. Liush<sup>1</sup>, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Prof

<sup>1</sup>National University "Zaporizhzhya Polytechnic"

## CONSTRUCTION OF THE STRUCTURE OF RURAL ELECTRIC NETWORKS TAKING INTO ACCOUNT THE AVAILABILITY OF RENEWABLE SOURCES OF ELECTRICITY

*It is noted that although the share of renewable electricity sources continues to grow and develop rapidly, the industry still faces many challenges, including how to continue to reduce electricity losses and annualized costs, improve operation and maintenance efficiency, maintain grid stability, ensure safety and reliability of the power supply system containing renewable sources of electrical energy.*

*It is shown that an effective solution to these problems is possible only on the basis of the analysis of the prospects for the development of local electric power systems that contain renewable sources of electric energy, the development of technical and organizational support mechanisms that will contribute to the construction of modern system (schematic) solutions.*

*It is proposed to apply the potential surface method for building the optimal structure of the rural electrical network during its design and modernization in the presence of renewable sources of electrical energy, which allows optimizing the structure of the network from the point of view of electrical energy losses and reducing annualized costs.*

*The algorithm for forming the structure of power supply systems is described, which implements the simultaneous solution of the tasks of determining the number of load nodes, distributing electrical receivers between them, determining the design of power sources, taking into account the discreteness of the design of system elements.*

*The results of numerical modeling based on the proposed algorithm are presented on the example of solving the problem of reconstruction of a section of the rural electricity network.*

**Keywords:** rural electrical networks, renewable energy sources, potential surface method, structure of power supply systems, load node, power receiver, power source, electrical energy losses.

### References

1. Denysiuk S., Bielokha H., Cherneshchuk I., Lysy V. Global trends in implementation of renewable energy sources and features of their implementation during the recovery of Ukraine's economy // *Energy: Economics, Technology, Ecology*. – 2022. – № 4. – P.7–28.
2. Jenkins N., Allan R., Grossley P., Kirschen D., Strbac G. *Embedded Generation*. London; IEE, 2000, 273 p
3. Barker Ph. P., De Mello R.W. Determining the Impact of Distributed Generation on Power Systems: Part 1 - Radial Distribution Systems // 2000 IEEE PES Summer Meeting, Seattle, WA, USA, July 11-15, 2000, p. 222 - 233.
4. Papathanassiou S.A., Hatziargyriou N.D. Technical Requirements for the Connection of Dispersed Generation to the Grid // 2001 IEEE PES Summer Meeting, Vancouver, Canada, July 15 - 19, 2001, p. 134 - 138.
5. Denysiuk S., Makhlin P., Shram O., Slynko V. Features of operating modes analysis of the power system in are as with alternative electric power sources (wind power plants) // *Tekhnichna elektrodynamika*. – 2022. – №1. – P. 41–49.
6. V. Dyachenko, D. Fedosha and A. Zabolotnyi, "Algorithm for the Program of Energy Saving for Power Supply System," 2019 IEEE 2nd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON), 2019, pp. 420-425, doi: 10.1109/UKRCON.2019.8879915.
7. A.P. Zabolotnyi, D.V. Fedosha, Yu.V. Daus Construction of the structure of power supply networks for consumers of agriculture, which contain sources of "small generation" // *Bulletin of KhNTUSG. Technical sciences "Problems of energy supply and energy saving in the agricultural sector of Ukraine"*. – 2011. – №. 116. – p. 20-21.
8. V. Dyachenko, D. Fedosha and A. Zabolotnyi, "Algorithm of synthesizing energy effective power supply system of industrial enterprises," 2020 IEEE 7th International Conference on Energy Smart Systems (ESS), 2020, pp. 320-325, doi: 10.1109/ESS50319.2020.9160288.
9. A.P. Zabolotnyi, Yu.V. Daus Formalization of the procedure for connecting sources of distributed generation to electrical networks. // *Bulletin of TDATU "Problems of energy supply and energy saving in the agricultural sector of Ukraine"*. – 2015. – №. 3. – p.37- 41.

Надійшла: 23.05.2024

Received: 23.05.2024