

**ОБҐРУНТУВАННЯ ВИБОРУ ВІДНОВЛЮВАЛЬНИХ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ  
З УРАХУВАННЯМ ГРАФІКІВ НАВАНТАЖЕННЯ В УМОВАХ  
НЕВИЗНАЧЕНОСТІ**

*В. Є. Кривоносов, доктор технічних наук, професор*

*Є. О. Антипов, кандидат технічних наук, доцент*

*С.С. Макаревич, кандидат технічних наук, доцент*

*А. В. Петренко, кандидат технічних наук, доцент*

*В. В. Кривоносов, майстер виробничого навчання*

*С. Г. Афінович, аспірант*

*Національний університет біоресурсів і природокористування України*

E-mail: [kryvvonosov@nubip.edu.ua](mailto:kryvvonosov@nubip.edu.ua)

**Анотація.** Одним з показників, який дає змогу проводити аналіз зменшення прибутку, є питома значення енергетичних витрат на одиницю продукції, що виробляється.

Цей показник може бути як загальним по підприємству, так і міжцеховим. Він впливає на збільшення собівартості, визначення причин погіршення якості та відсутності попиту, що робить продукцію неконкурентоспроможною.

Зростання значення цього показника пов'язане з невизначеними перервами енергії, яку підприємство отримує від електроенергетичної системи (ЕЕС). Невизначеність полягає як в терміні перерви, так і в її тривалості.

У статті проведено аналіз літературних джерел, присвячених визначенню методик вибору відновлюваних джерел енергії. Найбільш сучасною є методика, яка базується на ймовірно-статистичних даних. У роботі розглянуті графіки навантаження, які отримані при дослідженні ефективності роботи підприємства, достовірність технічного обліку, дослідження показників якості електроенергії та виявлення необхідної потужності ВДЕ. Введення коефіцієнту ймовірних перерв енергопостачання дає змогу коректно обґрунтувати вибір ВДВ. У статті зазначено, що визначення коефіцієнта ймовірності перерви електропостачання дозволяє уточнити потужності відновлювальних джерел енергії. Урахування зростання енергозатрат на одиницю продукції дозволить планувати роботу підприємства в умовах невизначеності відключень.

**Ключові слова:** графік навантаження, відновлювальні джерела енергії, ймовірність, питомі витрати на одиницю продукції

**Актуальність.** Основним показником ефективності роботи будь-якого підприємства в Україні є отриманий прибуток. Одним з показників, який дає змогу проводити аналіз зменшення прибутку є питома значення енергетичних витрат на одиницю продукції, що виробляється -  $C$ , який визначається так:

$$C = Z/W, \text{ (одиниця продукції/кВт.год),}$$

де  $Z$  - обсяг виробленої продукції (кошти за добу, місяць, рік);  $W$  – витрачена електрична енергія (за добу, місяць, рік).

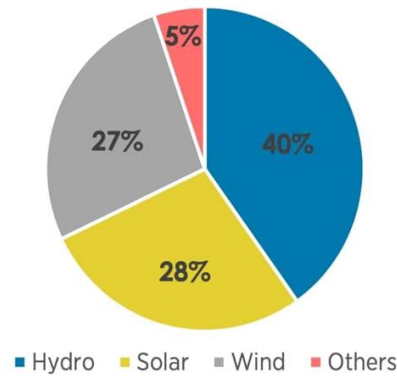
Цей показник може бути як загальним по підприємству, так і міжцеховим або для окремих ділянок. Неefективне використання енергетичного потенціалу призводить до збільшення собівартості, погіршення якості та відсутності попиту, що робить продукцію неконкурентоспроможною.

Зростання значення  $C$  пов'язане з невизначеними перервами енергії, яку підприємство отримує від електроенергетичної системи (ЕЕС). Невизначеність полягає як у терміні перерви, так і в її тривалості.

Забезпечення живучості підприємства в умовах невизначеності полягає у впровадженні відновлюваних джерел енергії (ВДЕ).

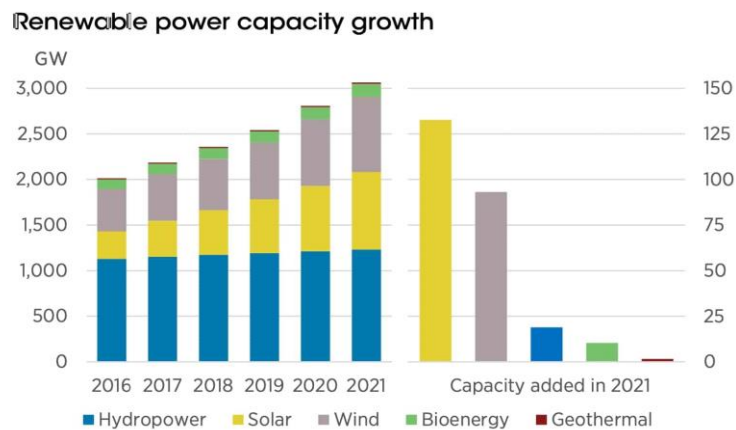
Згідно звіту міжнародного агентства з відновлюваної енергетики (IRENA) [1] потужності ВДЕ щорічно зростає, як показано на рис.1. На кінець 2021 року в усьому світі почали працювати 3064 ГВт потужностей відновлюваної генерації, в тому числі 40 % припало на гідроелектростанції (1230 ГВт), 28 % - на сонячні електростанції та 27 % - на вітрові електростанції. За статистикою, сонячна енергетика та вітер з роками зростали у рази швидше, ніж гідроенергетика.

Сонячна та вітрова енергетика займають майже рівні частки ринку з потужністю 849 ГВт (843 ГВт фотоелектричної та трохи більше 6 ГВт сонячної теплової генерації) та 825 ГВт, відповідно. Інші відновлювані джерела енергії з сумарною часткою близько 5 % включають 143 ГВт біоенергії, 16 ГВт геотермальної та 524 МВт морської енергії.



**Рис 1. Розподіл виробленої електричної енергії**

Потужність відновлюваної генерації зросла на 257 ГВт (+9,1 %) у 2021 році. Сонячна енергетика продовжувала лідирувати в нарощуванні потужностей зі збільшенням на 133 ГВт (+19 %), за нею йде енергія вітру з 93 ГВт (+13 %). Потужність гідроенергетики зросла на 19 ГВт (+2 %), біоенергетика – на 10 ГВт (+8 %). Геотермальна енергія збільшилася на 1,6 ГВт. На рис.2. наведено гістограму розвитку потужностей ВДЕ.



**Рис. 2. Гістограма динаміки розвитку ВДЕ**

В Україні розвиток ВДЕ закріплено на державному рівні в Національному плані дій. Згідно цих документів до 2035 р. частка ВДЕ в загальній структурі енергоспоживання країни повинна скласти до 35 %.

Особливістю використання ВДЕ як вітровими (ВЕС), так і сонячними енергетичними системами(СЕС) носить імовірнісний характер. За [2], ВДЕ дає можливість створювати умови для розгляду електричних мереж з відновлюваними

джерелами енергії як локальну електричну систему (ЛЕС). Існуючі методики вибору потужності ВДВ для підприємства не завжди ураховують невизначеності обумовлені військовим станом.

Таким чином, підвищення живучості підприємства в умовах невизначеностей є ключовим завданням для будь-якого підприємства. Вибір виду ВДЕ та його потужності є актуальною задачею сьогодення.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** У роботі [2] розглянуто традиційний підхід до оцінки правильності конфігурації потужностей ЕЕС та ВДЕ, який полягає у забезпеченні балансової надійності системи генерації та балансу потужності споживача. При цьому на перший план виходять показники забезпечення попиту. Однак при оцінці економічних показників енергосистем, що використовують ВДЕ, потрібно зважати також на раціональне використання виробленої енергії. Автори пропонують індекси ефективності енергосистеми, при яких можливою є як недостатня потужність генерації, так і надлишкова генерація. Базовими показниками адекватності генерування стосовно рівня споживання вважаються такі індекси, як очікувана втрата навантаження LOLE (loss of load expectation), ймовірність втрати навантаження LOLP (loss of load probability), частота втрати навантаження LOLF (loss of load frequency) та тривалість втрати навантаження LOLD (loss of load duration), а також індекс очікуваної недоданої енергії EENS (expected energy not served)

Вибір потужностей ВДЕ базується на графіках потужності ЕЕС та споживача з урізуванням сонячної та вітрової інсталяції в регіонах.

У роботі [3] автором запропоновано визначати інтегральний показник якості функціонування електричних мереж та ВДЕ. Доведено, що підхід визначення інтегрального показника якості функціонування дозволяє враховувати індивідуальні особливості споживачів і під час розв'язання проектних задач надавати пріоритет певним складовим, які характеризують якість функціонування електричної мережі. Проведений аналіз інформаційного забезпечення в розподільних електричних мережах показав, що найкращим джерелом інформації є автоматизовані системи комерційного обліку електроенергії (АСКОЕ).

У роботі [4] розглянуто питання автономного живлення домогосподарства з високим споживанням електроенергії. Отримані результати дослідження доводять таке: для отримання максимального прибутку від встановлення СЕС у приватному домогосподарстві доцільно встановлювати максимально допустиму потужність СЕС, особливо якщо власне електроспоживання високе. Доведено вихідними даними, що для визначення економічної ефективності використання сонячних електростанцій (СЕС) ключовим є середньомісячна денна енергетична освітленість  $E$ , кВт/м<sup>2</sup>; середні річні суми сумарної радіації на горизонтальну поверхню, кВт·год/м<sup>2</sup>; середньомісячні суми сумарної радіації на горизонтальну поверхню  $E_{мес}$ , кВт·год/м<sup>2</sup>.

У роботі [5] авторами зазначено, що сучасний інструментарій проектно-аналітичного дослідження інноваційних проектів містить інтегральні критерії, що дозволяє встановлювати градацію їх значень та порівнювати результативність.

У роботі [6] розглянуто політику нульового чистого викиду, а також зниження вартості відновлюваних джерел енергії, акумуляторних батарей і електромобілів (EV), що прискорюють перехід до чистіших і стійкіших енергетичних систем. У цьому документі проведено всебічний техніко-економічний аналіз будівель з нульовим енергоспоживанням (NZEB) у рамках енергетичного переходу Флориди до 2050 року. Аналіз зосереджується на фінансових перевагах інтеграції фотоелектричних (PV) систем на даху, накопичувачів акумуляторів і електромобілів.

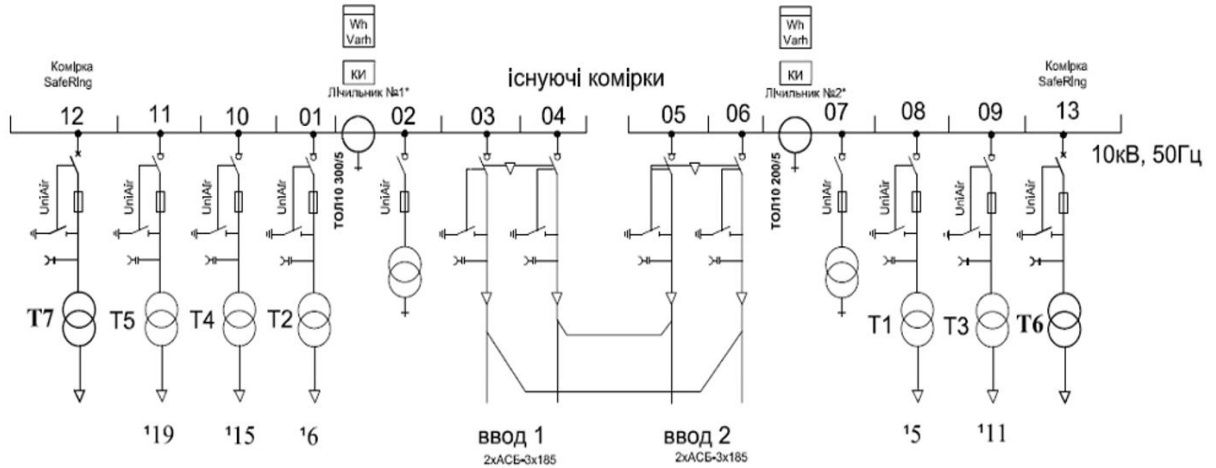
У роботі [7] розглянуто емпіричні результати інвестиції в сонячну енергію, які помітно зменшують викиди вуглецю.

Аналіз літературних джерел доводить, що статистично-імовірний метод розрахунку потужності ВДЕ є найбільш сучасним та дає змогу вирішити задачі оптимізації при виборі потужностей ВДЕ.

**Мета дослідження** – аналіз графіків споживання електричної енергії в умовах непередбачуваних відключень живлення СЕС та удосконалення методики вибору ВДЕ

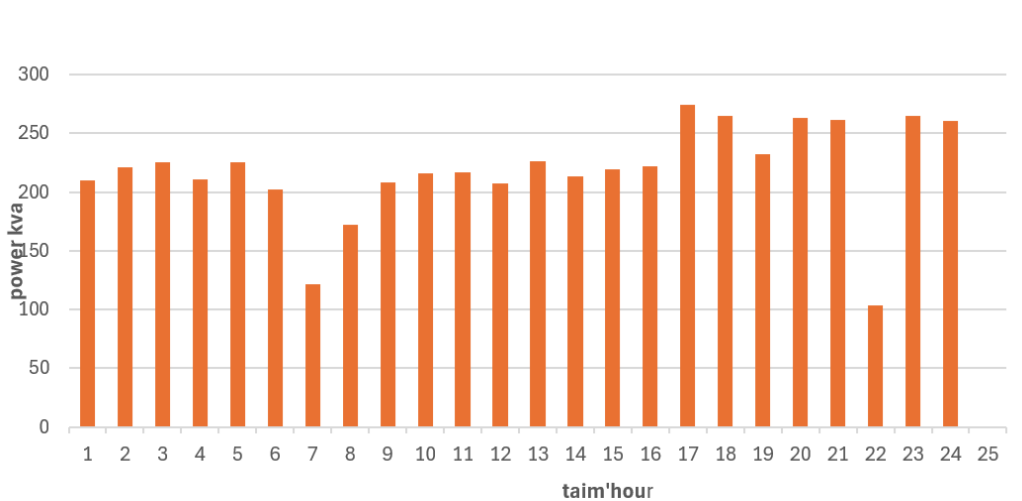
**Матеріали та методи дослідження.** При дослідженнях використовувалися статистичні та імовірнісні методи обробки даних.

**Результати досліджень та їх обговорення.** На рис.3, представлено типову однолінійну схему електропостачання двотрансформаторної підстанції напругою 10 кВ.



**Рис. 3. Однолінійна схема електропостачання підприємства середньої напруги 10кВ з точкою балансового розподілу та комерційним обліком**

На рис.4 наведено гістограму добового споживання повної потужності на фідері трансформатора Т2. Його параметри:  $S_T = 1000$  кВА;  $U_{вн} = 10$  кВ;  $U_{нн} = 0,4$  кВ; втрати короткого замикання  $\Delta P_{кз} = 9,456$  кВт; втрати холостого ходу  $\Delta P_{хх} = 2,160$  кВт; напруга короткого замикання  $U_{кз\%} = 6,01$  %; струм холостого ходу  $I_{хх\%} = 0,61$  %. Живлення Т2 від ЕЕС цілодобове.



**Рис. 4. Гістограма добового споживання повної потужності трансформаторі Т2**

Інтегральний показник споживання електричної енергії за добу визначається так:

$$W_d = \int_{i=1}^{24} W_i dt, \quad (1)$$

де  $W_i$ - миттєве значення споживчої енергії.

На рис.5. представлено середньогодинне споживання електричної енергії. Кількість спожитої електроенергії з 5 %-ною похибкою:

$$W'_d = \sum_{i=1}^{24} W_i. \quad (2)$$

Питоме значення енергетичних витрат на одиницю продукції, що виробляється при безперервному енергопостачанні ЕЕС:

$$C = \frac{B_t \cdot n}{W'_d}, \quad (3)$$

де  $n$  - кількісний параметр продукції (штуки, кг, тощо);  $B_t$  - вартість одиниці продукції (послуги) цеху, яка визначається так:

$$B_t = B_1 + Z_2 + B_3 + B_4 + \Delta B_{\text{зар}} \quad (4)$$

де  $B_t$  - вартість сировини;  $Z_2$  - заробітна плата робітникам, що задіяні у виробництві;  $B_3$  - податкові витрати;  $B_4$  - цехові витрати (опалення, освітлення, тощо)  $\Delta B_{\text{зар}}$  - питомі витрати від загальних витрат підприємства.

На підприємстві  $\Delta B_{\text{зар}}$  - питомі витрати від загальних витрат підприємства та  $B_4$  - цехові витрати (опалення, освітлення, тощо) практично не змінюються.

Методика вибору ВДЕ відома [1,2,4]. При звітному графіку навантаження визначають загальну потужність споживання електроенергії:

$$P_{n,z} = \sum_{i=1}^n P_i, \quad (5)$$

де  $n$  – кількість споживачів, підключених до мережі на  $j$ -му інтервалі часу.

Загальну потужність сонячної електричної станції визначають так:

$$P_z = \max \{P_{n,z}\}, \forall i \in \overline{1m}, \quad (6)$$

де  $1_m$  – кількість інтервалів часу, які належать до інтервалу освітлення.

Розрахунок необхідної акумуляторної ємності для сонячної батареї розраховують за формулою:

$$\Delta C = \frac{P_z}{U_n} \Delta t_{nv}, \quad (7)$$

де  $P_z$  – номінальна потужність навантаження;  $U_n$  – номінальна напруга навантаження;  $\Delta t_{nv}$  – інтервал вночі (в літній час  $\Delta t_{nv} = 10$  год, взимку –  $\Delta t_{nv} = 16$  год).

Для визначення загальної генерації сонячної енергії треба користуватися регіональним графіком інсталяції, який наведений на рис.5.

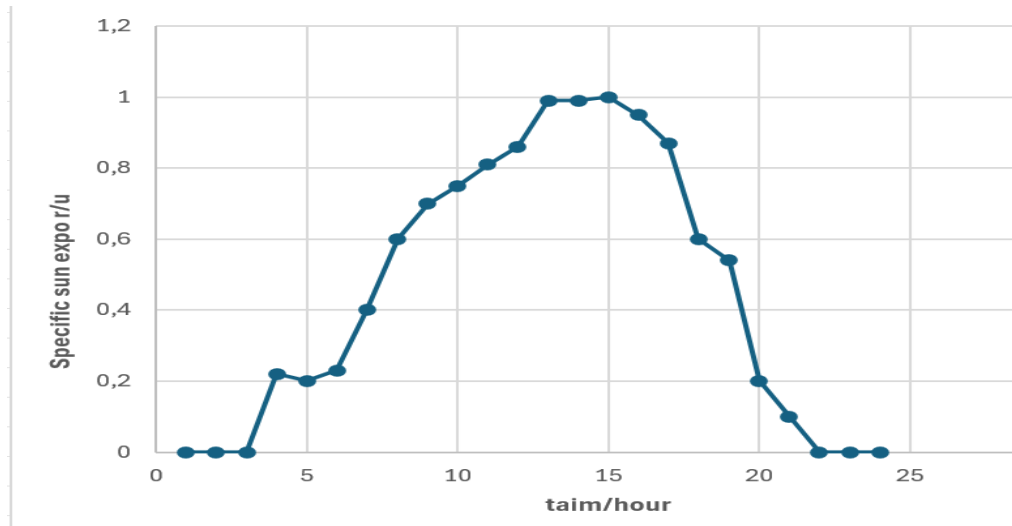


Рис. 5. Середньо-статистичний добовий графік сонячного випромінювання

На рис. 6 наведено гістограму середньо годинного споживання електричної енергії Т2 при дворазовому відключенні за добу з терміном відключення 6 год.

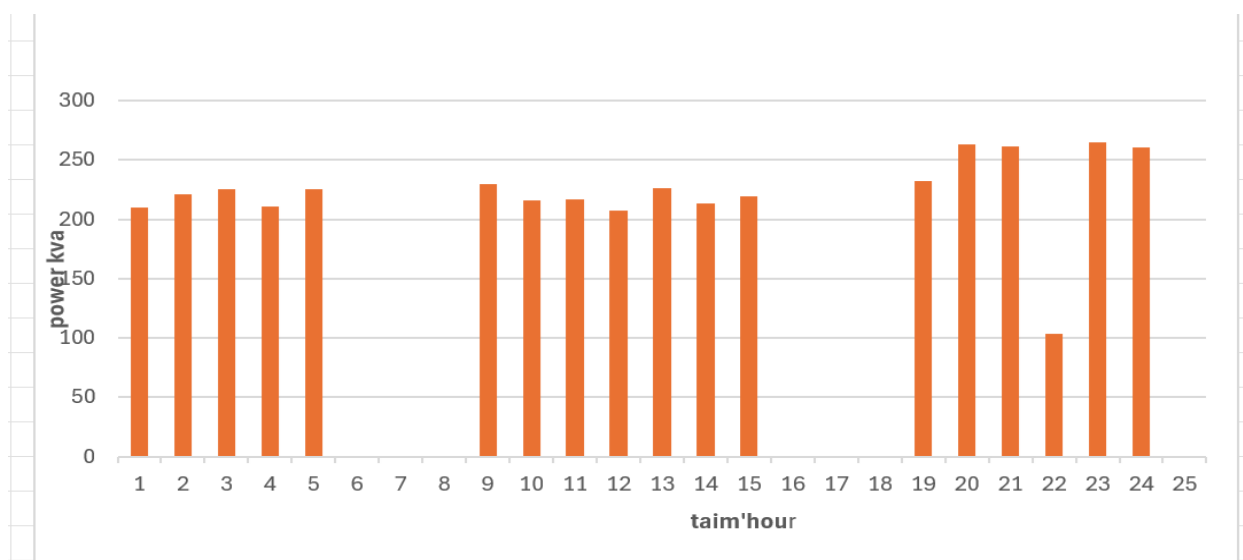


Рис. 6. Гістограма споживання електричної енергії Т2 з дворазовим відключенням за добу



Питоме значення енергетичних витрат на одиницю продукції, що виробляється, при невизначеній ймовірності відключень енергопостачання ЕЕС визначається так:

$$C_z^1 = \frac{B_t' \cdot n \cdot k + \Delta B_{\text{заг}}}{W_d' \cdot k}, \quad (5)$$

де  $B_t' = B_t - (B_4 + \Delta B_{\text{заг}})$ ;  $k$  - коефіцієнт добового ймовірного відключення:

$$k = f(\rho) = \frac{\sum_{i=1}^m t_{bi}}{24}, \quad (6)$$

де  $\rho=(0\div 1)$  – ймовірнісний показник відсутності енергопостачання ЕЕС;  $m$  - час відсутності енергопостачання.

Приймаючи за базове значення питому енергетичних витрат на одиницю продукції, що виробляється при безперервному енергопостачанні ЕЕС, коефіцієнт збільшення енергоемності випущеної продукції визначиться так:

$$\beta = \frac{C_z^1}{C_{\text{б}}}. \quad (7)$$

Додаткові енерговитрати на одиницю продукції:

$$\Delta C = \beta - 1. \quad (8)$$

На рис. 7 представлено графік зміни додаткових витрат при перервах електропостачання ЕЕС.

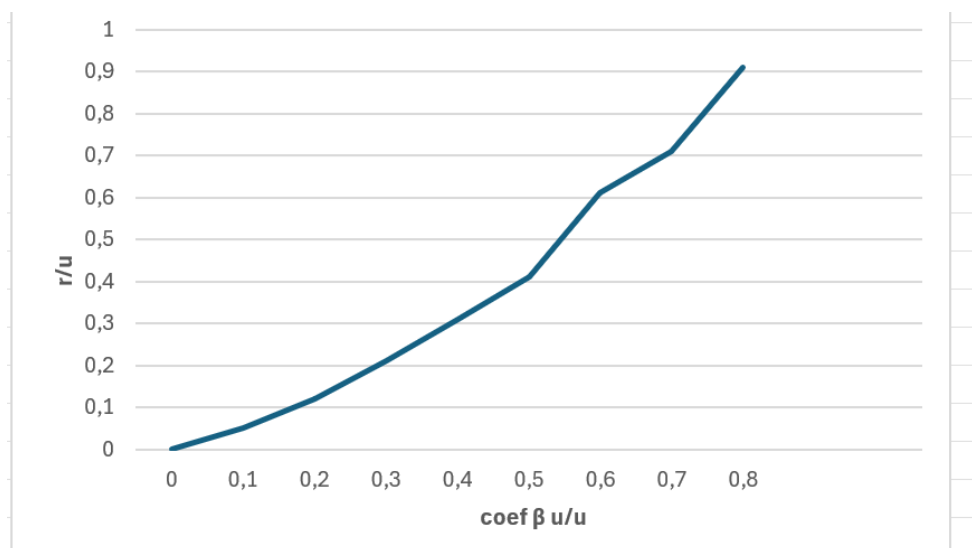


Рис. 7. Графік зміни додаткових витрат при перервах електропостачання ЕЕС

**Висновки та перспективи.** Визначення коефіцієнта ймовірності перерв електропостачання дозволяє уточнити потужності відновлювальних джерел енергії.

Врахування зростання енерговитрат на одиницю продукції дозволить планувати роботу підприємства в умовах невизначеності відключень.

### Список використаних джерел

1. Статистичний звіт (IRENA) за 2021 р. Режим доступу: <https://avenston.com/articles/renewable-capacity-2021>.
2. Кармазін О.О. Балансова надійність електроенергетичних систем в умовах зростання частки відновлюваної енергетики. Дисертація на здобуття вченого ступеня кандидата технічних наук «Перетворювання відновлюваних видів енергії». Інститут відновлюваної енергетики НАН України. Київ, 2019.
3. Комар В. О. Оцінювання якості функціонування електричних мереж з відновлюваними джерелами енергії. Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.14.02 – електричні станції, мережі і системи. Вінницький національний технічний університет, Вінниця, 2019. Національний університет «Львівська політехніка», Львів, 2019.
4. Щур І., Галайко Т., Дзьоба Т.. Економічна ефективність сонячної електростанції в індивідуальному домогосподарстві за різних сценаріїв динаміки «зеленого» тарифу. SEPES.2021. Вип. 3, №2. С. 87 – 102. Режим доступу: <https://doi.org/10.23939/sepes2021.01.087>
5. Вовк О., Бояринова К., Кравченко М. Проектно-аналітичний інструментарій дослідження ефективності інноваційної діяльності. Економіка та суспільство. 2024. Вип. 66. Режим доступу: <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2024-66-90>
6. Nared Haggi James M. Fenton. Techno-Economic Assessment of Net-Zero Energy Buildings: Financial Projections and Incentives for Achieving Energy Decarbonization Goals. December 2024. DOI:10.48550/arXiv.2412.00874.
7. Xue Wang, Xiaolei Zhang, Jianqi Song. The analysis of solar energy investment, digital economy, and carbon emissions in China Sec. Solar Energy. Vol. 11. 2023 Available at: <https://doi.org/10.3389/fenrg.2023.1183857>

### References

1. Statystychnyi zvit (IRENA) za 2021 r. [Statistical report (IRENA) for 2021]. Available at: <https://avenston.com/articles/renewable-capacity-2021>.
2. Karmazin, O.O. (2019). Balansova nadiinist elektroenerhetychnykh system v umovakh zrostantia chastky vidnovliuvanoi enerhetyky [Balance reliability of electric power systems in the context of an increase in the share of renewable energy]. Dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences “Conversion of Renewable Energy Types”. Institute of Renewable Energy of the National Academy of Sciences of Ukraine. Kyiv, 2019.
3. Komar, V. O. (2019). Otsiniuvannia yakosti funktsionuvannia elektrychnykh merezh z vidnovliuvanymy dzherelamy enerhii [Assessment of the quality of functioning of electric networks with renewable energy sources]. Dissertation for the degree of Doctor of Technical Sciences in the specialty 05.14.02 – power plants, networks and systems.

Vinnitsia National Technical University, Vinnitsia, 2019. Lviv Polytechnic National University, Lviv, 2019.

4. Shchur, I., Galayko, T., Dzyoba, T. (2021). Ekonomichna efektyvnist soniachnoi elektrostantsii v individualnomu domohospodarstvi za riznykh stsenariiv dynamiky «zelenoho» taryfu [Economic efficiency of a solar power plant in an individual household under different scenarios of the dynamics of the "green" tariff]. SEPES.2021, 3(2), 87 – 102. Available at: <https://doi.org/10.23939/sepes2021.01.087>

5. Vovk, O., Boyarynova, K., Kravchenko, M. (2024). Proiektno-analitychnyi instrumentarii doslidzhennia efektyvnosti innovatsiinoi diialnosti [Design and analytical tools for researching the effectiveness of innovative activity]. Economy and society, 66. Available at: <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2024-66-90>

6. Hamed Haggi James M. Fenton (2024). Techno-Economic Assessment of Net-Zero Energy Buildings: Financial Projections and Incentives for Achieving Energy Decarbonization Goals. December 2024. DOI:10.48550/arXiv.2412.00874.

7. Xue Wang, Xiaolei Zhang, Jianqi Song (2023). The analysis of solar energy investment, digital economy, and carbon emissions in China Sec. Solar Energy, 11. Available at: <https://doi.org/10.3389/fenrg.2023.1183857>

## JUSTIFICATION OF THE SELECTION OF RENEWABLE ENERGY SOURCES TAKING INTO ACCOUNT LOAD SCHEDULES IN CONDITIONS OF UNCERTAINTY

*V. Kryvonosov, I. Antypov, S. Makarevych, A. Petrenko, V. Kryvonosov, S. Afinovych*

**Abstract.** *One of the indicators that allows analyzing the decrease in profit is the specific value of energy costs per unit of produced product.*

*This indicator can be both general for the enterprise and inter-departmental. It affects the increase in cost, determining the causes of quality deterioration and lack of demand, which make products uncompetitive.*

*The increase in the value of this indicator is associated with uncertain interruptions of energy that the enterprise receives from the electric power system (EPS). The uncertainty lies both in the duration of the interruption and in its duration.*

*The article analyzes literary sources devoted to determining the methods of selecting renewable energy sources. The most modern is the method based on probabilistic statistical data. The paper considers load schedules obtained during the study of the efficiency of the enterprise, the reliability of technical accounting, the study of electricity quality indicators and the identification of the required capacity of renewable energy sources. The introduction of the coefficient of probable power supply interruptions allows to correctly justify the choice of the RBV. The article states that determining the coefficient of probability of power supply interruption allows to clarify the capacity of renewable energy sources. Taking into account the growth of energy costs per unit of production will allow to plan the operation of the enterprise in conditions of uncertainty of outages.*

**Key words:** *load schedule, renewable energy sources, probability, specific costs per unit of production*