

A. O. SEMENOV, P. M. KHARAK, V. M. ARENDARENKO, YA. M. BYCHKOV

РОЗРАХУНОК ВТРАТ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ В РОЗПОДІЛЬЧИХ МЕРЕЖАХ ПРИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННІ З ВИКОРИСТАННЯМ МАСЛЯНИХ ТА ВАКУУМНИХ ВИМИКАЧІВ

Запропоновано метод приблизної оцінки розрахунку втрат навантаження в розподільчих мережах від 6 до 10 кВ, а також для мереж нижчої напруги. Основна перевага цього методу полягає в тому, що середньоквадратичний струм розраховується лише один раз для серії розрахунків. Такий підхід значно скорочує час на проведення розрахунків та підвищує їх точність, оскільки усуває необхідність багаторазового визначення середньоквадратичного струму для кожного окремого розрахунку. Запропонований підхід сприяє кращому розумінню впливу різних факторів на втрати навантаження, що дозволяє здійснювати більш ефективне планування та управління розподільчими мережами. Це особливо важливо в умовах зростання навантаження на електричні мережі та підвищення вимог до їх надійності та ефективності. При розрахунках втрат електричної енергії в розподільчих мережах від 6 до 10 кВ широко застосовуються методи, які використовують узагальнені коефіцієнти електричних схем та режимів роботи у вигляді регресійних рівнянь. Найбільш значущі та незалежні фактори, такі як вхід активної енергії, загальна довжина лінії, кількість ділянок лінії, загальна кількість трансформаторів та їх загальна встановлена потужність повинні бути враховані та входить до розрахункового рівняння. Крім того, важливу роль при втратах електричної енергії в електричних мережах відіграють використані комплектуючі та їх регулярне технічне обслуговування. Основним напрямком досліджень є оптимізація параметрів розподільчих мереж з урахуванням новітніх технологій та матеріалів, а також впровадження автоматизованих систем моніторингу та управління, які дозволять своєчасно виявляти та усувати проблеми, пов'язані з втратами електричної енергії. Запропонований метод оцінки втрат навантаження в розподільчих мережах є перспективним напрямком розвитку енергетичної галузі, який сприятиме підвищенню ефективності та надійності роботи електричних мереж, а також зниженню витрат на їх експлуатацію та обслуговування.

Ключові слова: електропостачання, розподільча мережа, втрати електричної енергії, вакуумні вимикачі, масляні вимикачі.

A. O. SEMENOV, R. M. KHARAK, V. M. ARENDARENKO, YA. M. BYCHKOV

CALCULATION OF ELECTRICAL ENERGY LOSSES IN DISTRIBUTION NETWORKS FOR POWER SUPPLY USING OIL AND VACUUM CIRCUIT BREAKERS

A method for approximate estimation of load losses in distribution networks from 6 to 10 kV, as well as for lower voltage networks, has been proposed. The main advantage of this method is that the root mean square current is calculated only once for a series of calculations. This approach significantly reduces the time required for calculations and improves their accuracy, as it eliminates the need for multiple determinations of the root mean square current for each individual calculation. The proposed approach contributes to a better understanding of the influence of various factors on load losses, which allows for more effective planning and management of distribution networks. This is particularly important in the context of increasing loads on electrical networks and higher demands for their reliability and efficiency. In the calculation of electrical energy losses in distribution networks from 6 to 10 kV, methods that use generalized coefficients of electrical circuits and operating modes in the form of regression equations are widely applied. The most significant and independent factors, such as the input of active energy, total line length, number of line sections, total number of transformers, and their total installed capacity, must be taken into account and are included in the calculation equation. Additionally, the components used and their regular maintenance play an important role in electrical energy losses in electrical networks. The main direction of research is the optimization of distribution network parameters, taking into account the latest technologies and materials, as well as the implementation of automated monitoring and control systems that will allow timely detection and elimination of problems associated with electrical energy losses. The proposed method for estimating load losses in distribution networks is a promising direction for the development of the energy sector, which will contribute to improving the efficiency and reliability of electrical networks, as well as reducing the costs of their operation and maintenance.

Keywords: power supply, distribution network, electrical energy losses, vacuum breakers, oil circuit breakers.

Вступ. Економічне та відповідно організаційне розмежування процесів генерації, передачі, ремонту та інших видів діяльності в енергетичному секторі призвело до появи нових державних і приватних компаній, що спеціалізуються на окремих етапах від виробництва електроенергії до її постачання кінцевим споживачам [1, 2].

У результаті такого розподілу виникла необхідність у впровадженні нових методів управління та регулювання, які б забезпечували конкурентоспроможність і прозорість на ринку електроенергії: біржові торги електроенергією; системи електронних аукціонів; довгострокові та короткострокові контракти на постачання електроенергії.

Крім того, для забезпечення стабільного та надійного функціонування нових економічних

суб'єктів була розроблена система нормативно-правового регулювання, що включає ліцензування, стандартизацію та сертифікацію діяльності, а також використання математичних моделей та математичного моделювання для сталого розвитку [3]. У цьому контексті значну роль відіграє впровадження сучасних інформаційних технологій і автоматизованих систем управління, що дозволяють оптимізувати процеси планування, обліку та контролю. Розмежування енергетичних процесів створює умови для підвищення конкурентоспроможності галузі, стимулює інновації та сприяє розвитку ринку електроенергії [4, 5].

Особливу увагу в цьому питанні слід приділити моніторингу та оптимальному управлінню процесами виробництва, передачі, розподілу та споживання електроенергії [6]. Один із ключових показників

© А. О. Семенов, Р. М. Харак, В. М. Арендаренко, Я. М. Бичков, 2024

передачі електричної енергії, що впливає на економічну ефективність роботи енергосистеми в цілому – це величина втрати електричної енергії що відображається на її вартості [7]. Сьогодні ключовим економічним показником оцінки ефективності електричної енергії в світі є Levelized Cost of Electricity (LCOE). Цей показник є розрахунковою вартістю електричної енергії підприємства (вартість виробництва електроенергії протягом всього життєвого циклу підприємства з урахуванням інвестицій) [8]. Точність та надійність визначення цього показника є важливим фактором для вирішення завдань аналізу втрат електроенергії, розробки організаційно-технічних заходів для ефективного управління, встановлення нормативних величин втрат електроенергії, а також прогнозованих тарифів на електричну енергію [9].

Мета дослідження. Розрахунок втрат електричної енергії у електричній мережі з використанням методів наближеного оцінювання.

Методи та результати дослідження. Залежно від кліматичних умов та періоду доби виконання розрахунків втрат електроенергії на сьогодні виділяють декілька методів [10]. Розглянемо їх більш детально в залежності від цілей та призначення.

Ретроспективні розрахунки визначають втрати електроенергії за минулі часові інтервали та використовуються для визначення: структури втрат електроенергії; оцінки комерційних втрат із виявленням груп елементів мережі з підвищеними втратами; складання балансів електроенергії, з аналізом її структурних підрозділів та підстанцій; визначення техніко-економічних показників енергосистеми.

Оперативні розрахунки визначають втрати за поточні часові інтервали та використовуються для: контролю за поточними величинами втрат електроенергії; оперативного коригування поточного режиму з метою мінімізації втрат енергії; формування ретроспективної бази даних для визначення структури втрат електроенергії за групами елементів електричної мережі.

Перспективні розрахунки визначають очікувані втрати електроенергії на наступні та подальші роки і використовують для: визначення очікуваних втрат електроенергії на наступні роки; оцінки очікуваної ефективності запланованих заходів щодо зменшення втрат; порівняння варіантів реконструкції електричних мереж.

Важливо роль відіграє і класифікація методів розрахунку втрат навантаження електроенергії [11], що представлена на рис. 1.

Оперативні методи розрахунку передбачають отримання необхідної інформації та виконання розрахунків режиму та втрат навантаження електроенергії за «процесом».

Аналітичні методи базуються на розрахунку втрат потужності електроенергії у обмеженій кількості

режимів та використанні характеристик кривих навантаження (розрахунок режиму під час максимального періоду, на основі середніх показників тощо) [12, 13].

Оціночні методи базуються на використанні ймовірнісних характеристик та узагальненої інформації.



Рисунок 1 – Розрахунок втрат навантаження електричної енергії

Наступні детерміністичні методи можуть бути використані для розрахунку втрат навантаження електроенергії за розрахунковий період, залежно від кількості доступної інформації про схеми та навантаження мереж: типові дні; середні навантаження; години найбільших втрат потужності; середньоквадратичний струм.

Серед цих методів найбільш точним є метод розрахунку втрат енергії в мережі за «типовий» день і є еквівалентним кількості днів їх тривалості. За цим методом «типовий» день виділяється в межах розрахункового періоду. Для кожного з обраних днів складаються графіки навантаження, які представлені у вигляді ступінчастих ліній, і на кожному етапі графіка навантаження залишається незмінним. Формула для розрахунку втрат за цим методом є наступною:

$$\Delta W_t = \sum_{i=1}^n \Delta W_{ti} N_{\text{екв}i}, \quad (1)$$

де n – кількість «типових» днів, втрати електроенергії для кожного з яких, розраховані згідно з відомими кривими навантаження в вузлах мережі, і є ΔW_{ti} ;

$N_{\text{екв}}$ – еквівалентна кількість днів у i -му розрахунковому інтервалі.

Для приблизних розрахунків орієнтуються лише на два дні, які називають «еталонні дні». Це дні максимального та мінімального навантаження електричної мережі за певний період (наприклад, зимового та літнього). Тоді втрати енергії можна записати в наступному вигляді:

$$\Delta W_t = \Delta W_t^3 N_{\text{екв}}^3 + \Delta W_t^l N_{\text{екв}}^l. \quad (2)$$

В експлуатаційних умовах криві навантаження формуються на основі спеціальних вимірювань у

типовий день року [10]. Основними недоліками цього методу є те, що він використовує графіки загальної потужності, які є менш точними в порівнянні із залежностями активної потужності. Крім того, результати розрахунків враховують зміни в мережі протягом року, динаміку навантажень і зміни навантажень електростанцій, що означає, що втрати енергії, розраховані для типового дня, не залишаються постійними протягом усього року.

Похибка методу зумовлена міжсезонною неоднорідністю графіків і в мережах з малою кількістю генераційних вузлів вона становить 3–5 %. Цей метод також можна використовувати для розрахунку змінних втрат енергоефективності основних мереж, коли відсутні початкові дані для оперативних розрахунків, а також для мереж нижчої напруги [9].

Цікавим є метод розрахунку втрат енергії з використанням ймовірнісної характеристики середнього навантаження в числовій дискретній формі [12]. Розрахунок змінних втрат електроенергії в елементах електричної мережі здійснюється на основі певних втрат потужності, отриманих з результатів розрахунку експлуатаційних параметрів мережі. За цією методикою для розрахунку втрат енергії використовується формула:

$$\Delta W_l = \Delta P_{вт} K_f^2 T, \quad (3)$$

де $\Delta P_{вт}$ – втрати потужності в мережі при середніх навантаженнях вузлів (або мережі в цілому) за розрахунковий період T ;

K_f – коефіцієнт форми графіка навантаження.

У практичних розрахунках $P_{вт}$ можна визначити з показань лічильників або з відомих меж зміни навантаження. Слід зазначити, що при невеликій похибці інформації для схем з конфігурацією, незмінною протягом періоду, і мало змінюваних навантаженнях цей метод може дати точність, прийнятну для практичних цілей. Очікувана точність методу знаходиться в межах 9–11 %. Методи середнього навантаження застосовуються при відносно рівномірних кривих навантаження вузлів. Вони рекомендуються для відкритих мереж за наявності даних про передану електроенергію через головну ділянку мережі протягом розглянутого періоду.

Розрахунок втрат із використанням спрощених моделей широко використовується у практичній діяльності. Цей підхід, що базується на фіксації часу максимальних втрат, не накладає суворих вимог до точності розрахунків. Алгоритм розрахунку енергетичної ефективності за часом максимальних втрат t , обґрунтовується для однієї ділянки мережі з типовим графіком навантаження:

$$\Delta W_l = \Delta P_{\max} t. \quad (4)$$

Максимальні втрати ΔP_{\max} визначаються з максимального навантаження, яке, в свою чергу, визначається з очікуваного потоку енергії та тривалості

використання максимального навантаження. Час найбільших втрат t – це час, протягом якого при передачі найбільшого навантаження в мережі відбуватимуться ті ж втрати електроенергії, що і при роботі мережі за фактичним графіком навантаження.

На практиці для визначення часу найбільших втрат також використовуються різні залежності. Кожна з цих залежностей отримана для конкретних умов і тому має свою визначену область застосування. Фундаментальним моментом цього методу є припущення, що максимальні втрати енергії в розрахунковому елементі мережі спостерігаються при максимальному навантаженні системи, а конфігурації графіків активної та реактивної потужності є однорідними ($\cos\varphi = \text{const}$). Через те, що остання умова виконується вкрай рідко навіть у розподільних мережах, з'явилися рекомендації щодо окремого визначення втрат для активних і реактивних навантажень. У цьому випадку розрахунок втрат здійснюється за наступною формулою:

$$\Delta W_n = \Delta P_{\max,a} t_a + \Delta P_{\max,p} t_p, \quad (5)$$

де t_a та t_p визначаються шляхом аналізу реальних графіків потоку.

Припущення, зроблені в цьому методі щодо моделі навантаження елемента (постійне максимальне навантаження протягом періоду T_{\max}) і щодо моделі мережі (мережа має постійні параметри протягом усього аналізованого періоду), обмежують сферу його застосування до розподільчих мереж з невеликою кількістю учасників або оціночних розрахунків втрат енергії в окремих лініях без урахування впливу режиму цієї лінії передачі на закритий режим мережі в цілому. Похибка методу оцінюється в межах ± 10 –20 % для відкритих розподільчих мереж.

За наявності необхідних вихідних даних методи середніх навантажень та кількості годин найбільших втрат дозволяють виконувати розрахунки втрат електроенергії в електричних мережах 0,4 кВ [11, 14].

Одним із перших методів за часом створення є метод середньоквадратичного струму [11]. Метод безпосередньо впливає з фізичної природи втрат потужності, які в кожній окремій ділянці мережі, пропорційні квадрату загального навантаження. Середньоквадратичний струм $I_{кв}$ є таким умовним постійним за величиною струмом, при протіканні якого через мережу протягом розрахункового періоду виділяються ті ж втрати енергії, що і при протіканні фактичного струму, який змінюється згідно з графіком навантаження.

Переходячи до втрат електричної енергії, за час T ми отримуємо наступний результат:

$$\Delta W_l = 3R \int_0^T I^2(t) dt = 3I_{кв}^2 RT. \quad (6)$$

Спочатку повна еквівалентна схема використовувалася як модель електричної мережі, для

якої розраховувалися втрати енергії. Але з розвитком мереж і виникненням труднощів в отриманні інформації про режим всіх елементів мережі, еквівалентна схема мережі почала зводитися до одного елемента з навантаженням головної ділянки і еквівалентним опором $R_{екв}$. При цьому значення $I_{кв}$ за розрахунковий період почали брати рівним значенню, розрахованому за добовим графіком навантаження. Розрахунок $I_{кв}$ за добовим графіком є приблизним моделюванням мережі. Похибки в цьому випадку можуть досягати до 25 %. Це спонукало до розвитку цього методу.

Середньоквадратичний струм в залежності від значення середнього струму також визначається за формулою [10]:

$$I_{кв} = K_f I. \quad (7)$$

Існують також інші залежності для розрахунку $I_{кв}$ [11].

Порівняльні результати використання вимикачів. Крім того важливу роль при втратах електричної енергії в електричних мережах відіграють використані комплектуючі, та їх регулярне технічне обслуговування, такі як: трансформатори, вимикачі та перемикачі, кабелі та проводи, захисні пристрої, ізоляційні матеріали. Так, наприклад:

- втрати у трансформаторах можуть бути значними через вихрові струми та магнітні втрати у їхніх сердечниках.
- низька якість контактів у вимикачах та перемикачах може створювати додатковий опір і призводити до втрат електричної енергії;
- вибір матеріалу і перерізу кабелів впливає на опір і, відповідно, на втрати електричної енергії;
- автоматичні вимикачі, реле та інші захисні пристрої повинні бути налаштовані з максимальною точністю для забезпечення мінімальних втрат електричної енергії;
- високоякісна ізоляція проводів і кабелів зменшує витрати струму і втрати електричної енергії.

Більш детально розглянемо вплив вимикачів на втрати електричної енергії в електричних мережах. Для комутації електричних ланцюгів в мережах використовують масляні вимикачі, які поступово замінюють вакуумними. Вони застосовуються в мережах від 6 до 35 кВ. Загальний час відключення вакуумним вимикачем при граничних навантаженнях або аваріях становить близько 45 мс.

Переваги вакуумних вимикачів в порівнянні з масляними такі: простота конструкції; зниження споживання електроенергії; зручність ремонту; висока надійність при експлуатації; низька шумність роботи; висока екологічність; невеликі габаритні розміри.

Порівняльна характеристика роботи вимикачів у різних однорідних середовищах наведена на рис. 2.

Якщо порівнювати масляний і вакуумний вимикач то приходимо до наступного висновку:

споживання електроенергії на обігрів масляного вимикача в холодний період року (із жовтня по квітень) потребує певної кількості енергії [11].

Так, для вимикачів, котрі застосовуються в електричних мережах до 10 кВ потужність на обігрів одного масляного вимикача становить $B = 0,7$ кВт·год.

Тоді на обігрів одного масляного вимикача і його приводу необхідно затратити електричну енергію:

$$W_1 = B \cdot T, \quad (8)$$

де T – число годин роботи масляного вимикача в період коли температура навколишнього середовища нижче $+5$ °С, що визначається:

$$T = 24 \cdot D_p \text{ (кВт за рік)}, \quad (9)$$

де D_p – дні роботи масляного вимикача в холодний період або при температурі нижче $+5$ °С.

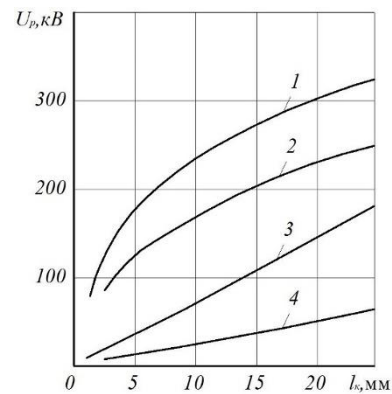


Рисунок 2 – Залежність напруги розряду U_p в однорідному полі від відстані між контактами l_k для різних ізоляційних середовищ:

1 – вакуум, 2 – масло, 3 – елегаз, 4 – повітря

Якщо D_p становить 200 днів тоді $T = 4800$ год. Тоді затрати на обігрів одного масляного вимикача будуть $W_1 = 3360$ кВт за рік.

Вакуумні вимикачі не потребують обігріву, тоді $W_2 = 0$ (кВт·год). Відповідно річна економія електричної енергії при заміні в електричній мережі одного масляного вимикача на вакуумний становить:

$$W_{обігріву} = W_1 = 3360 \text{ (кВт за рік)} \quad (10)$$

Обігрів одного масляного вимикача визначається за формулою:

$$\Delta E_{обігріву} = C_e \cdot W_1 \quad (11)$$

де C_e – тариф на електроенергію, який, для прикладу, для підприємства складає 10 грн кВт·год. Таким чином $\Delta E_{обігріву} = 33600$ грн.

Крім того, масляні вимикачі потребують поточного та капітального ремонту кожні півроку, що впливає на кінцеву вартість обслуговування електричних мереж, а вакуумні вимикачі практично не потребують капітальних ремонтів.

Таким чином, використання вакуумних вимикачів є більш доцільним і економічно вигідним рішенням для сучасних електричних мереж, сприяючи зниженню втрат електричної енергії і підвищенню загальної ефективності роботи системи.

Висновки. Метод середньоквадратичного струму класифікується як приблизний і використовується для розрахунку втрат навантаження в розподільчих мережах від 6 до 10 кВ. Він також може бути рекомендований для мереж нижчої напруги. Основна перевага цього методу полягає в тому, що середньоквадратичний струм розраховується тільки один раз для серії розрахунків.

У практичній діяльності при розрахунках втрат електричної енергії в розподільчих мережах від 6 до 10 кВ використовують узагальнені коефіцієнти електричних схем та режимів роботи у вигляді регресійних рівнянь, які знайшли широке застосування. При цьому дуже важливо, щоб найбільш значущі та незалежні фактори входили до рівняння. Вхід активної енергії W , загальна довжина лінії L , кількість ділянок лінії n , загальна кількість трансформаторів $T_{\text{сум}}$ та їх загальна встановлена потужність $P_{\text{мр}}$ тощо розглядаються як фактори.

Важливу роль при втратах електричної енергії в електричних мережах відіграють використані комплектуючі та їх регулярне технічне обслуговування. Порівняльний аналіз показує, що заміна одного масляного вимикача на вакуумний може заощадити значну кількість електроенергії та фінансових ресурсів, оскільки вакуумні вимикачі не потребують обігріву та мають менші витрати на технічне обслуговування.

Список літератури

1. Про затвердження Національної економічної стратегії на період до 2030 року : Постанова Кабінету Міністрів України від 03.03.2021 р. № 179 : станом на 4 трав. 2023 р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/179-2021-p#Text> (дата звернення: 06.05.2024).
2. Petrov K., Grote D. Electricity Markets Regulation - Lesson 4 - Regulatory Asset Base. *Webinar 4: Revenue Requirements and Regulatory Asset Base (RAB)*, 30 листоп. 2009 р. URL: <https://www.slideshare.net/slideshow/electricity-markets-regulation-lesson-4-regulatory-asset-base/2613878> (дата звернення: 08.05.2024).
3. Трифонова О. В., Тимошенко Л. В. Математичні моделі і методи прийняття рішень для сталого розвитку : навчальний посібник. Дніпро : НТУ «ДП», 2023. 240 с.
4. Vision for European Electricity Markets in 2030 / S. Viljainen et al. Lappeenranta : Lappeenranta University of Technology, 2011. URL: <https://lutpub.lut.fi/bitstream/handle/10024/69361/isbn%209789522650740.pdf?sequence=3&isAllowed=y> (дата звернення: 13.05.2024).
5. Sarfati M., Hesamzadeh M. R., Holmberg P. Production efficiency of nodal and zonal pricing in imperfectly competitive electricity markets. *Energy Strategy Reviews*. 2019. Vol. 24. P. 193–206. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.esr.2019.02.004>.
6. Про затвердження Правил технічної експлуатації електроустановок споживачів : Наказ Міністерства палива та енергетики України від 25.07.2006 р. № 258 : станом на 21 лют. 2017 р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1143-06#Text> (дата звернення: 15.05.2024).
7. Lazard. Lazard's Levelized Cost of Energy Analysis—Version 12.0. 2018. URL: <https://www.lazard.com/media/0hqfye2m/lazards-levelized-cost-of-energy-version-120-vfinal.pdf> (дата звернення: 16.05.2024).
8. Simple Levelized Cost of Energy (LCOE) Calculator Documentation. *National Renewable Energy Laboratory (NREL)*. URL: <https://www.nrel.gov/analysis/tech-lcoe-documentation.html> (дата звернення: 17.05.2024).
9. International Renewable Energy Agency. *Global Energy Transformation: A roadmap to 2050*. Abu Dhabi, 2018. URL: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2018/Apr/IRENA_Report_GET_2018.pdf (дата звернення: 18.05.2024).
10. Добровольська Л. Н., Кулик В. В., Лежнюк П. Д. Електроощадні технології в електричних мережах енергосистем / ред. П. Д. Лежнюк. Луцьк : ІВВ Луцького НТУ, 2018. 328 с.
11. Козирський В. В., Волошин С. М. Основи електропостачання : підручник. Київ : ЦК «Компринт», 2021. 497 с.
12. Омельчук А. О. Основи електропостачання : навчальний посібник. Київ : ЦК «Компринт», 2019. 415 с.
13. ДСТУ-Н Б В.2.5-80:2015. Настава з проектування систем електропостачання промислових підприємств. На заміну СН 174-75 ; чинний від 2016-07-01. Вид. офіц. Київ : Мінрегіон України, 2016. 148 с.
14. СОУ-Н ЕЕ 40.1-37471933-82:2013. Методичні рекомендації визначення технологічних витрат електричної енергії в трансформаторах і лініях електропередавання. Чинний від 2014-01-01. Вид. офіц. Київ : Міністерство енергетики та вугільної промисловості України, 2013. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0399732-13#Text> (дата звернення: 20.05.2024).

References

1. Ukraine, Cabinet of Ministers of Ukraine. (2021, Mar. 3). *Decree of the Cabinet of Ministers of Ukraine no. 179, Pro zatverdzhennia Natsionalnoi ekonomichnoi stratehii na period do 2030 roku [On approval of the National Economic Strategy for the period up to 2030]*. Accessed: May 6, 2024. [Online]. Available: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/179-2021-p#Text> (in Ukrainian)
2. K. Petrov and D. Grote, "Electricity Markets Regulation - Lesson 4 - Regulatory Asset Base", in *Webinar 4: Revenue Requirements and Regulatory Asset Base (RAB)*, Nov. 30, 2009. Leonardo ENERGY. Accessed: May 8, 2024. [Online]. Available: <https://www.slideshare.net/slideshow/electricity-markets-regulation-lesson-4-regulatory-asset-base/2613878>
3. O. V. Tryfonova and L. V. Tymoshenko, *Matematychni modeli i metody pryiniattia rishen dlia staloho rozvytku [Mathematical models and decision-making methods for sustainable development]*. Dnipro: NTU «DP», 2023. (in Ukrainian)
4. S. Viljainen, M. Makkonen, S. Annala, and D. Kuleshov, "Vision for European Electricity Markets in 2030", Lappeenranta University of Technology, Lappeenranta, Mar. 2011. Accessed: May 13, 2024. [Online]. Available: <https://lutpub.lut.fi/bitstream/handle/10024/69361/isbn%209789522650740.pdf?sequence=3&isAllowed=y>
5. M. Sarfati, M. R. Hesamzadeh, and P. Holmberg, "Production efficiency of nodal and zonal pricing in imperfectly competitive electricity markets", *Energy Strategy Reviews*, vol. 24, pp. 193–206, Apr. 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.esr.2019.02.004>
6. Ukraine, Ministry of Fuel and Energy of Ukraine. (2006, Jul. 25). *Order of the Ministry of Fuel and Energy of Ukraine no. 258, Pro zatverdzhennia Pravyt tekhnichnoi ekspluatatsii elektroustanovok spozhyvachiv [On Approval of the Rules for the Technical Operation of Consumer Electrical Installations]*. Accessed: May 15, 2024. [Online]. Available: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1143-06#Text> (in Ukrainian)
7. Lazard, "Lazard's Levelized Cost of Energy Analysis—Version 12.0", Nov. 2018. Accessed: May 16, 2024. [Online]. Available: <https://www.lazard.com/media/0hqfye2m/lazards-levelized-cost-of-energy-version-120-vfinal.pdf>

8. "Simple Levelized Cost of Energy (LCOE) Calculator Documentation." National Renewable Energy Laboratory (NREL). Accessed: May 17, 2024. [Online]. Available: <https://www.nrel.gov/analysis/tech-lcoe-documentation.html>
9. International Renewable Energy Agency, "Global Energy Transformation: A roadmap to 2050", Abu Dhabi, 2018. Accessed: May 18, 2024. [Online]. Available: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2018/Apr/IRENA_Report_GET_2018.pdf
10. L. N. Dobrovolska, V. V. Kulyk, and P. D. Lezhniuk, *Elektrooshchadni tekhnologii v elektrychnykh mrezhakh enerhosystem [Electricity-saving technologies in power grid networks]*. Lutsk: IVV Luts. NTU, 2018. (in Ukrainian)
11. V. V. Kozyrskyi and S. M. Voloshyn, *Osnovy elektropostachannia [Basics of power supply]*. Kyiv: TsK «Komprynt», 2021. (in Ukrainian)
12. A. O. Omelchuk, *Osnovy elektropostachannia [Basics of power supply]*. Kyiv: TsK «Komprynt», 2019. (in Ukrainian)
13. *Nastanova z proektuvannia system elektropostachannia promyslovykh pidpriemstv [Guidelines for the design of power supply systems for industrial enterprises]*, DSTU-N B V.2.5-80:2015, JSC «Kyivpromoelektroproekt», Kyiv, 2016. (in Ukrainian)
14. *Metodychni rekomendatsii vyznachennia tekhnolohichnykh vytrat elektrychnoi enerhii v transformatorakh i liniiahk elektropredavannia [Methodological recommendations for determining the technological consumption of electricity in transformers and power lines]*, SOU-NEE 40.1-37471933-82:2013, Ministry of Energy and Coal Industry of Ukraine, Kyiv, 2013. Accessed: May 20, 2024. [Online]. Available: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0399732-13#Text> (in Ukrainian)

Надійшла (received) 07.06.2024

Відомості про автора (-іє) / About the Author (-s)

Семенов Анатолій Олексійович (Anatolii Semenov) – кандидат фізико-математичних наук, доцент, Полтавський державний аграрний університет, професор кафедри механічної та електричної інженерії; м. Полтава, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3184-6925>; e-mail: anatolii.semenov@pdau.edu.ua.

Харак Руслан Миколайович (Ruslan Kharak) – кандидат технічних наук, доцент, Полтавський державний аграрний університет, доцент кафедри механічної та електричної інженерії; м. Полтава, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6131-8501>; e-mail: ruslan.kharak@pdau.edu.ua.

Арендаренко Володимир Миколайович (Volodymyr Arendarenko) – кандидат технічних наук, доцент, Полтавський державний аграрний університет, професор кафедри будівництва та професійної освіти; м. Полтава, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0701-7983>; e-mail: volodymyr.arendarenko@pdau.edu.ua.

Бичков Ярослав Михайлович (Yaroslav Bychkov) – кандидат технічних наук, доцент, Полтавський державний аграрний університет, доцент кафедри механічної та електричної інженерії; м. Полтава, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7559-127X>; e-mail: yaroslav.bychkov@pdau.edu.ua.