

<https://doi.org/10.31891/2307-5732-2025-349-6>

УДК 332.873: 658.18

БЕРІДЗЕ ТЕТЯНА

Криворізький національний університет

<https://orcid.org/0000-0003-2509-3242>e-mail: Beridzet2016@gmail.com**СІНЧУК ІГОР**

Криворізький національний університет

<https://orcid.org/0000-0003-3938-0744>e-mail: speet@ukr.net**ФЕДОТОВ ВЛАДИСЛАВ**

Криворізький національний університет

<https://orcid.org/0000-0002-6536-5591>e-mail: fedotov@knu.edu.ua**КОТЯКОВА МАРИНА**

Політехнічний коледж КНУ

<https://orcid.org/0000-0001-5667-1354>e-mail: kotyakova@ukr.net**ШЕПЕЛЕВ КОСТЯНТИН**

ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг

e-mail: speet@ukr.net

ЗАСАДНИЧІ ІМПЕРАТИВИ МОДЕЛЮВАННЯ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ

В роботі наведено результати досліджень щодо підходів до моделювання якості електроенергії. Запропоновано методику моделювання якості споживання електроенергії протягом доби за наявності тарифу граничних цін на внутрішньодобовому ринку. Наведено доцільність та можливість використання запропонованої методики.

Ключові слова: якість електроенергії, моделювання, вартість, тарифи

BERIDZE TETIANA

Kryvyi Rih National University

SINCHUK IGOR

Kryvyi Rih National University

FEDOTOV VLADISLAV

Kryvyi Rih National University

KOTYAKOVA MARINA

Polytechnic College of KNU

SHEPELEV KOSTYANTYN

PJSC "ArcelorMittal Kryvyi Rih

BASIC IMPERATIVES OF ELECTRICITY QUALITY MODELING

The establishment of market relations in the electric power industry leads to the fact that electric energy is considered as a commodity that must meet a certain quality. The relevant legislative acts determine the responsibility of electric power sales organizations and electricity suppliers to consumers for the reliability and quality of their electric energy supply in accordance with technical regulations and other mandatory requirements. At mining enterprises, the issue of electric energy quality has become acute, since in modern conditions, the extraction of minerals is largely determined by significant electricity consumption. Scientific research in the direction of modeling electric energy quality is mostly aimed at determining the relevant technical characteristics. The proposed methodology for research and building a mathematical model is based on the assumption that the corresponding quality is inherent in the cost indicators of EE. At present, there is a need to take into account the interests of EE consumers regarding the cost of EE. Thus, a dual task is formed. From the point of view of ensuring the highest quality of consumed electric energy during the day, it is important that its consumption corresponds to the lowest cost according to the price schedule on the intraday market. This makes it possible to mathematically formulate the corresponding task. Knowing the grid of electricity tariffs during the day and the required volume of electricity consumption per day, it is possible to distribute the costs of this volume of electricity per day in such a way that the total amount of electricity consumption is minimal. This approach to the use of electricity makes it possible to save electricity, that is, to ensure its appropriate quality with rational use. The formed mathematical model opens the way to its widespread application in practice. The given example proved the feasibility and possibility of using the proposed methodology.

Keywords: electricity quality, modeling, cost, tariffs

Постановка проблеми у загальному вигляді

та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

Розвиток ринкових відносин в електроенергетиці призводить до необхідності розгляду електроенергії, котра транспортується по магістральним мережам електропостачання, не тільки як фізичне явище, а й як товар, який має відповідати певній якості та вимогам ринку. Одним із завдань національної економіки є забезпечення енергоефективності, де не останню роль відіграє якість електроенергії, котра регламентується рядом показників (ПЯЕ) [1]. Відповідними законодавчими актами визначається відповідальність електрозбутових організацій та постачальників електроенергії перед споживачами щодо надійності та якості забезпечення їх електричною енергією щодо технічних регламентів й інших обов'язкових вимог. На гірничорудних підприємствах питання якості електричної

енергії стало з усією гостротою, оскільки в сучасних умовах видобуток корисних копалин багато в чому визначається значним рівнем електроспоживання, котре має стійку тенденцію до зростання по факту збільшення глибин добутку. Проблемні питання щодо ПЯЕ мають різні причини [2]. Такі проблеми, як відхилення частоти напруги, розмах її змін тощо виникають у власних установках клієнтів енергогенеруючих організацій та можуть поширюватися в живлячих мережах й впливати на інших клієнтів. Експериментально дослідити всі фактори впливу складно, а інколи взагалі неможливо. Формування відповідних аналітичних співвідношень дозволяє дослідити процеси відтворення структури якості електроспоживання. Задача постає як дієва та актуальна. Проте для достатньо адекватних отриманих рішень потрібні нові, сучасно спрямовані формати моделей. На вирішення цієї задачі і спрямовано представлене дослідження.

Аналіз досліджень та публікацій

Наукові дослідження в напрямку моделювання якості електроенергії спрямовані в більшості на визначення відповідних технічних характеристик. Слід зазначити, що вимоги до якості ЕЕ визначені Національною комісією, що здійснює державне регулювання в сферах енергетики та комунальних послуг [3]. Привертає увагу дослідження науковців Возняка О. М., Штуць А. А., Тихонова В. К., які зазначили необхідність розробки нового підходу до комплексної стандартизації у сфері електроенергетики в сучасних умовах, розробці моделі комплексної стандартизації, методики, класифікацію завдань та визначити пріоритетність напрямів стандартизації в галузі електроенергетики [4]. Науковцями-практиками Праховником А.Ф., Новським В.О., Гриб О.Г. та інш. проаналізовані системи обліку та якості електричної енергії [5, 6]. Загалом, основним методом моделювання якості електроенергії в електроенергетичних системах прийнято модельно-орієнтований підхід, який притаманний програмному комплексу MATLAB. Прикладом робіт, що базуються на даному підході можуть слугувати наукові доробки викладені в [7, 8]. Відмічається, що їх використання характеризується простотою побудови й аналізу електроенергетичних й електромеханічних комплексів, зокрема, впливу їх роботи на показники якості електроенергії. В царині наукових досліджень щодо моделювання якості ЕЕ виділяється метод TOPSIS, який поєднує спосіб аналізу ієрархій (АНР), міжкритеріальну кореляцію (CRITIC) та метод ентропійної ваги (EWM) [9]. Комплексна оцінка якості електроенергії в системі з розподіленою генерацією з залученням багатофакторного дисперсійного аналізу представлена в наукових дослідженнях [10]. Багатовекторність наукових досліджень свідчить про актуальність проблематики моделювання якості ЕЕ. Разом з тим, слід зазначити, що поза уваго наукових досліджень zostались вартісно-цільових характеристик якості ЕЕ, хоча саме в них віддзеркалюється значна частина похідних якості ЕЕ.

Формулювання цілей статті

Метою статті є формування математичної моделі якості електроенергії в парадигмі системно-параметричних складових.

Виклад основного матеріалу

Пропонована методика дослідження й побудови математичної моделі ґрунтується на припущенні – в вартісних показниках ЕЕ закладена відповідна якість ЕЕ. На тепер існує необхідність враховувати інтереси споживачів ЕЕ щодо вартості ЕЕ. Таким чином, формується двоїсна задача. З точки зору забезпечення протягом доби найбільшої якості споживаної електроенергії важливо, щоб її споживання відповідало найменшій вартості згідно графіка цін на внутрішньодобовому ринку. Це дає можливість математично сформулювати відповідне завдання.

По-перше, треба визначити об'єм електроенергії, яку необхідно спожити протягом доби

$$W_0 = \int_0^T N(t)dt, \quad (1)$$

де W_0 – заданий обсяг електроенергії, МВт-год,

$T = 24$ год (довжина доби),

$N(t)$ – потужність спожитої електроенергії, МВт.

Крім того, потужність електроенергії обмежена межами

$$N_{min} \leq N(t) \leq N_{max} \quad (2)$$

де N_{min} – нижня межа потужності електроенергії, МВт,

N_{max} – верхня межа потужності електроенергії, МВт,

В свою чергу, споживання електроенергії протягом доби для забезпечення найбільшої якості повинно відповідати, як підкреслено вище, найменшій вартості спожитої електроенергії згідно графіка на внутрішньодобовому ринку, що визначається умовою

$$C = \int_0^T c(t)N(t)dt \rightarrow \min_{N(t)}, \quad (3)$$

де $c(t)$ – ціна електроенергії залежно від часу згідно тарифу цін на внутрішньодобовому ринку, МВт-год.

Враховуючи кусочно постійний спосіб завдання тарифу граничних цін на внутрішньодобовому ринку, який представлений на рис.1, інтеграл в умові (3) може бути представлений у вигляді суми інтегралів по відрізкам постійних значень, тобто

$$\int_0^T c(t)N(t)dt = \int_0^{T_1} c_1 \cdot N(t)dt + \int_{T_1}^{T_2} c_2 \cdot N(t)dt + \int_{T_2}^{T_3} c_3 \cdot N(t)dt + \int_{T_3}^T c_4 \cdot N(t)dt \quad (4)$$

де $T_1 = 7$ год, $T_2 = 17$ год, $T_3 = 23$ год, $T_4 = 24$ год,
 $c_1 = 5600$ грн/МВт-год, $c_2 = 6900$ грн/МВт-год, $c_3 = 9000$ грн/МВт-год,
 $c_4 = 6900$ грн/МВт-год.

Враховуючи сталість тарифних цін, їх значення можливо винести за знаки інтегралів, тобто записати у вигляді

$$\int_0^{T_1} c_1 \cdot N(t) dt + \int_{T_1}^{T_2} c_2 \cdot N(t) dt + \int_{T_2}^{T_3} c_3 \cdot N(t) dt + \int_{T_3}^T c_4 \cdot N(t) dt =$$

$$= c_1 \int_0^{T_1} N(t) dt + c_2 \int_{T_1}^{T_2} N(t) dt + c_3 \int_{T_2}^{T_3} N(t) dt + c_4 \int_{T_3}^T N(t) dt \quad (5)$$

або, згідно (4),

$$\int_0^T c(t) N(t) dt = c_1 \cdot W_1 + c_2 \cdot W_2 + c_3 \cdot W_3 + c_4 \cdot W_4, \quad (6)$$

де $W_1 = \int_0^{T_1} N(t) dt$ – об'єм спожитої електроенергії за проміжок часу $[0; T_1]$,

$W_2 = \int_{T_1}^{T_2} N(t) dt$ – об'єм спожитої електроенергії за проміжок часу $[T_1; T_2]$,

$W_3 = \int_{T_2}^{T_3} N(t) dt$ – об'єм спожитої електроенергії за проміжок часу $[T_2; T_3]$,

$W_4 = \int_{T_3}^T N(t) dt$ – об'єм спожитої електроенергії за проміжок часу $[T_3; T]$.

Маючи на увазі формулу (1) і позначання (6), можна записати умову, яка накладається на об'єм спожитої електроенергії протягом доби

$$W_1 + W_2 + W_3 + W_4 = W_0. \quad (7)$$

Враховуючи умову (2), знаходимо обмеження на об'єми спожитої електроенергії у виділені тарифні часи доби. Для проміжка часу $[0; T_1]$ отримуємо

$$\int_0^T N_{min} dt \leq \int_0^T N(t) dt \leq \int_0^T N_{max} dt$$

$$N_{min} \int_0^{T_1} dt \leq \int_0^{T_1} N(t) dt \leq N_{max} \int_0^{T_1} dt$$

$$N_{min} T_1 \leq W_1 \leq N_{max} T_1 \quad (8)$$

Для проміжка часу $[T_1; T_2]$ маємо обмеження

$$N_{min}(T_2 - T_1) \leq W_2 \leq N_{max}(T_2 - T_1) \quad (9)$$

для проміжка часу $[T_2; T_3]$ маємо обмеження

$$N_{min}(T_3 - T_2) \leq W_3 \leq N_{max}(T_3 - T_2) \quad (10)$$

для проміжка часу $[T_3; T]$ маємо обмеження

$$N_{min}(T - T_3) \leq W_4 \leq N_{max}(T - T_3) \quad (11)$$

Враховуючи (3) і (6), можна записати умову оптимізації споживання електроенергії протягом доби

$$C(W_1; W_2; W_3; W_4) = c_1 W_1 + c_2 W_2 + c_3 W_3 + c_4 W_4 \rightarrow \min_{W_1, W_2, W_3, W_4}. \quad (12)$$

Враховуючи умову (12) і обмеження (7),..., (11), ми здобуємо математичну постановку задачі мінімізації витрат електроенергії протягом доби на внутрішньодобовому ринку згідно заданих граничних цін. З математичної точки враховуючи лінійність мінімізованого функціонала (12) і лінійність обмежень (7),..., (12) має місце задача лінійного програмування, розв'язання якої проводиться стандартним алгоритмом за допомогою «симплекс-метода».

Для спрощення розв'язання сформульованою задачі (7),..., (12) представляється доцільним перейти до питомих величин, розділивши усі змінні на заданий об'єм споживання електроенергії (1). В результаті математична постановка задачі мінімізації витрат електроенергії протягом доби на внутрішньодобовому ринку прийме вигляд

$$\hat{C}(\hat{W}_1, \hat{W}_2, \hat{W}_3, \hat{W}_4) = c_1 \hat{W}_1 + c_2 \hat{W}_2 + c_3 \hat{W}_3 + c_4 \hat{W}_4 \rightarrow \min_{\hat{W}_1, \hat{W}_2, \hat{W}_3, \hat{W}_4} \quad (13)$$

$$\hat{W}_1 + \hat{W}_2 + \hat{W}_3 + \hat{W}_4 = 1 \quad (14)$$

$$\frac{N_{min} T_1}{W_0} \leq \hat{W}_1 \leq \frac{N_{max} T_1}{W_0} \quad (15)$$

$$\frac{N_{min}(T_2 - T_1)}{W_0} \leq \hat{W}_2 \leq \frac{N_{max}(T_2 - T_1)}{W_0} \quad (16)$$

$$\frac{N_{min}(T_3 - T_2)}{W_0} \leq \hat{W}_3 \leq \frac{N_{max}(T_3 - T_2)}{W_0} \quad (17)$$

$$\frac{N_{min}(T - T_3)}{W_0} \leq \hat{W}_4 \leq \frac{N_{max}(T - T_3)}{W_0} \quad (18)$$

де $\hat{W}_i = \frac{W_i}{W_0}$, $(i=1,2,3,4)$

$$\hat{C}(\hat{W}_1, \hat{W}_2, \hat{W}_3, \hat{W}_4) = \frac{C(W_1, W_2, W_3, W_4)}{W_0}$$

Нехай розв'язання задачі за допомогою програми Microsoft Excel алгоритма «лінійне програмування» дало наступний результат

$$\hat{W}_i = \hat{W}_{i\text{opt}} \quad (i = 1, \dots, 4) \quad (19)$$

Зрозуміло, що

$$\hat{C}(\hat{W}_{1\text{opt}}; \hat{W}_{2\text{opt}}; \hat{W}_{3\text{opt}}; \hat{W}_{4\text{opt}}) = \hat{C}_{\min} \quad (20)$$

при виконанні умов (14),..., (18)

$$\hat{W}_{1\text{opt}} + \hat{W}_{2\text{opt}} + \hat{W}_{3\text{opt}} + \hat{W}_{4\text{opt}} = 1, \quad (21)$$

$$\frac{N_{\min} T_1}{W_0} \leq \hat{W}_{1\text{opt}} \leq \frac{N_{\max} T_1}{W_0} \quad (22)$$

$$\frac{N_{\min}(T_2 - T_1)}{W_0} \leq \hat{W}_{2\text{opt}} \leq \frac{N_{\max}(T_2 - T_1)}{W_0} \quad (23)$$

$$\frac{N_{\min}(T_3 - T_2)}{W_0} \leq \hat{W}_{3\text{opt}} \leq \frac{N_{\max}(T_3 - T_2)}{W_0} \quad (24)$$

$$\frac{N_{\min}(T - T_3)}{W_0} \leq \hat{W}_{4\text{opt}} \leq \frac{N_{\max}(T - T_3)}{W_0} \quad (25)$$

Для переходу до реальних значень величин (19) і (20) треба помножити їх на заданий об'єм споживання електроенергії (1), тобто скористатися формулами

$$W_{i\text{opt}} = \hat{W}_{i\text{opt}} \cdot W_0 \quad (i = 1, \dots, 4). \quad (26)$$

$$C_{\min} = C(W_{1\text{opt}}; W_{2\text{opt}}; W_{3\text{opt}}; W_{4\text{opt}}) = \hat{C}(\hat{W}_{1\text{opt}}; \hat{W}_{2\text{opt}}; \hat{W}_{3\text{opt}}; \hat{W}_{4\text{opt}}) \cdot W_0. \quad (27)$$

Середня величина споживаної потужності електроенергії на кожній ділянці розглянутої тарифної сітки протягом доби визначається за формулами

$$\bar{N}_{1\text{opt}} = \frac{1}{T_1} W_{1\text{opt}}, \quad (28)$$

$$\bar{N}_{2\text{opt}} = \frac{1}{T_2 - T_1} W_{2\text{opt}}, \quad (29)$$

$$\bar{N}_{3\text{opt}} = \frac{1}{T_3 - T_2} W_{3\text{opt}}, \quad (31)$$

$$\bar{N}_{4\text{opt}} = \frac{1}{T - T_3} W_{4\text{opt}}. \quad (32)$$

Здобуті результати (26),..., (32) розв'язання задачі (7),..., (12) визначають максимальну якість споживання електроенергії протягом доби за наявності тарифу граничних цін на внутрішньодобовому ринку, визначених графіками на рис.1.

В якості прикладу було розглянуто чисельний розрахунок розв'язання задачі про максимальну якість споживання електроенергії протягом доби за наявності тарифу граничних цін на внутрішньодобовому ринку, визначених графіками на рис.1 при таких параметрах

$$W_0 = 2400 \text{ МВт-год}, \quad N_{\min} \text{ МВт}, \quad N_{\max} \text{ МВт}. \quad (33)$$

З урахуванням (33) задача мінімізації споживання електроенергії (7),..., (12) запишеться у вигляді

$$C(W_1; W_2; W_3; W_4) = 5600 \cdot W_1 + 6900 \cdot W_2 + 9000 \cdot W_3 + 6900 \cdot W_4 \rightarrow \min_{W_1, W_2, W_3, W_4}, \quad (34)$$

$$W_1 + W_2 + W_3 + W_4 = 2400, \quad (35)$$

$$50 \cdot 7 \leq W_1 \leq 150 \cdot 7, \quad 350 \leq W_1 \leq 1050, \quad (36)$$

$$50 \cdot (17 - 7) \leq W_2 \leq 150 \cdot (17 - 7), \quad 500 \leq W_2 \leq 1500, \quad (37)$$

$$50 \cdot (23 - 17) \leq W_3 \leq 150 \cdot (23 - 17), \quad 300 \leq W_3 \leq 900, \quad (38)$$

$$50 \cdot (24 - 23) \leq W_4 \leq 150 \cdot (24 - 23), \quad 50 \leq W_4 \leq 150. \quad (39)$$

Далі переходимо до питомих величин, що приводе до такої постановки задачі

$$\hat{C}(\hat{W}_1; \hat{W}_2; \hat{W}_3; \hat{W}_4) = 2.333 \cdot \hat{W}_1 + 2.875 \cdot \hat{W}_2 + 3.75 \cdot \hat{W}_3 + 2.875 \cdot \hat{W}_4 \rightarrow \min_{\hat{W}_1, \hat{W}_2, \hat{W}_3, \hat{W}_4}, \quad (40)$$

$$\hat{W}_1 + \hat{W}_2 + \hat{W}_3 + \hat{W}_4 = 1, \quad (41)$$

$$0.146 \leq \hat{W}_1 \leq 0.4375, \quad (42)$$

$$0.208 \leq \hat{W}_2 \leq 0.625, \quad (43)$$

$$0.125 \leq \hat{W}_3 \leq 0.375, \quad (44)$$

$$0.0208 \leq \hat{W}_4 \leq 0.0625. \quad (45)$$

Розв'язання задачі (40),..., (45) за допомогою програми Microsoft Excel алгоритма «лінійне програмування» дало наступний результат

$$\hat{W}_{1\text{opt}} = 0.4375, \quad \hat{W}_{2\text{opt}} = 0.4187, \quad \hat{W}_{3\text{opt}} = 0.125, \quad \hat{W}_{4\text{opt}} = 0.0208. \quad (46)$$

При цьому мінімальна величина цільової функції (40) становить

$$\hat{C}_{\min} = 6593.7 \quad (47)$$

Для переходу до реальних значень треба скористатися формулами (46), (47) з урахуванням (26) і (27)

$$W_{1\text{opt}} = 0.4375 \cdot 2400 = 1050 \text{ МВт-год}, \quad (48)$$

$$W_{2\text{opt}} = 0.4187 \cdot 2400 = 1000.08 \text{ МВт-год}, \quad (49)$$

$$W_{3\text{opt}} = 0.125 \cdot 2400 = 300 \text{ МВт-год}, \quad (50)$$

$$W_{4opt} = 0.0208 \cdot 2400 = 49.92 \text{ МВт-год}, \quad (51)$$

$$\hat{C}_{min} = 6593,75 \quad (52)$$

Середня величина споживаної потужності електроенергії на кожній ділянці розглянутої тарифної сітки протягом доби визначається з урахуванням (48),..., (51) за формулами (28),..., (32)

$$\bar{N}_{1opt} = \frac{1050}{7} = 150 \text{ МВт}, \quad (53)$$

$$\bar{N}_{2opt} = \frac{1000.08}{10} = 100.008 \text{ МВт}, \quad (54)$$

$$\bar{N}_{3opt} = \frac{300}{6} = 50 \text{ МВт}, \quad (55)$$

$$\bar{N}_{4opt} = \frac{49.92}{1} = 49.92 \text{ МВт}. \quad (56)$$

На рис.1 представлені графіки оптимальних величин витрат заданої величини електроенергії (33) протягом доби. Аналіз приведених графіків показує, що найбільші витрати припадають на часи доби, коли граничні ціни на внутрішньодобовому ринку мінімальні. Так, на проміжку часу від 0.00 до 7.00 гранична ціна на електроенергію мінімальна, тому і витрати електроенергії повинні бути найбільшими. На проміжку часу від 17.00 до 23.00 гранична ціна на електроенергію найбільша, тому і витрати електроенергії є найменшими.

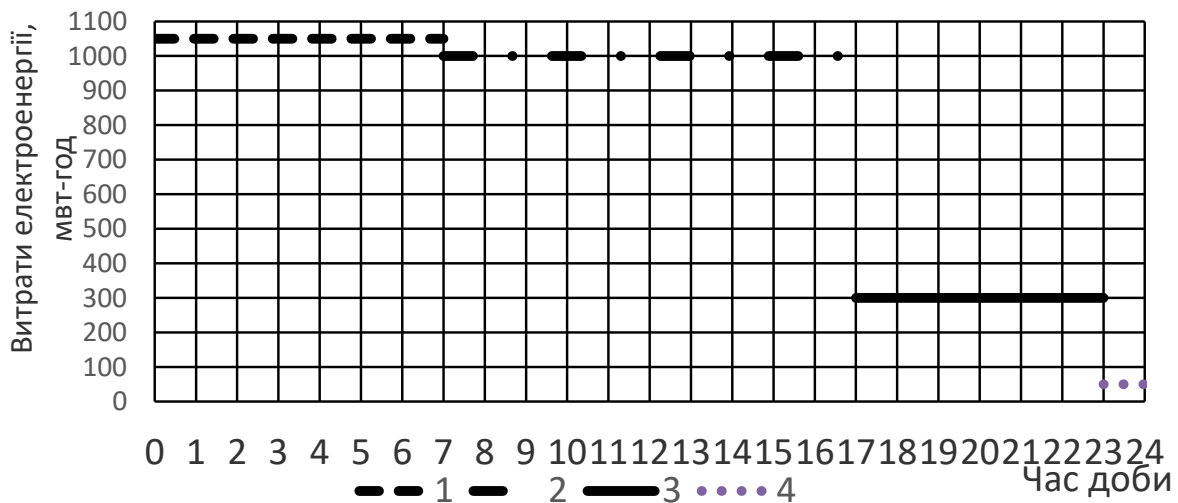


Рис.1. Графіки оптимальних величин витрат електроенергії протягом доби

Таким чином, візуалізовано розрахунки модельних аналітичних співвідношень доводить доцільність практики використання запропонованої методики.

Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

Встановлення ринкових відносин в електроенергетиці приводить до того, що електроенергія розглядається як товар, який повинен відповідати певній якості, що трансформується в якість її споживання приймачами. Тому, останній, з вищезазначених показників, можна визначити шляхом впливу тарифів на електроенергію. Знаючи сітку тарифів на електроенергію протягом доби і необхідні обсяги використання електроенергії за добу, можна так розподілити ці обсяги в добі, щоб загальна сума витрат електроенергії була мінімальною. Такий підхід до процесу, як товару, дає можливість зменшити витрати споживачів щодо сплати за електроенергію, заощадити електроенергію, тобто забезпечити її відповідну якість електроспоживання при раціональному використанні. Сформована математична модель відкриває шлях до її широкого застосування на практиці. Наведений приклад довів доцільність та можливість використання запропонованої методики.

Література

1. Норми якості електричної енергії у системах загального електропостачання ГОСТ 13109-97 (міждержавний стандарт, введений в Україні 01.01.2000 р.) URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=25837
2. Енергозбереження на підприємствах гірничовидобувної промисловості. Проблеми, шляхи реалізації: монографія / І. О. Сінчук [та ін.]; під ред. д-ра техн. наук, проф. Сінчука О. М.; Держ. ВНЗ "Криворізьк. ун-т", Кременчуцьк. ун-т ім. Михайла Остроградського. - Кривий Ріг; Кременчук: Щербатих О. В. 2016. 340 с. ISBN 978-617-639-106-7
3. Національна комісія, що здійснює державне регулювання в сферах енергетики та комунальних послуг. Якість електричної енергії. Опубліковано 06 квітня 2016 року о 17:43. Дата оновлення: 05.04.2024

4. Возняк О. М., Штуць А. А., Тихонов В. К. Дослідження моделі галузі електроенергетики та методики виконання вимірювань якості електроенергії. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. 2022. № 1 (116). С. 150-163.
5. Праховник А.Ф., Новський В.О., Гриб О.Г, Калінчик В.П., Карасінський О.Л., Довгалоук А.М., Васильченко В.І., Светелік О.Д. Автоматизовані системи обліку та якості електричної енергії. Монографія. Харків: ПП «Ранок-НТ», 2012. 516 с.
6. Цифровий облік електричної енергії з урахуванням показників її якості та визначенням відповідальності за погіршення / Монографія / Є. І. Сокол, Д.А., Гапон, О.Г., Гриб, А.О. та і загальною редакцією член-кореспондента НАН України, доктора технічних наук, професора Сокола Є. І. Харків: ФОП Бровін О.В., 2021.. 330 с.
7. Tan, R. H. G., & Ramachandaramurthy, V. K. (2015). A Com-prehensive Modeling and Simulation of Power Quality Disturbances Using MATLAB/SIMULINK. In Power Quality Issues in Distribut-ed Generation. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/61209>
8. Hussein, A., & Hawas, M. (2019). Power quality analysis based on simulation and MATLAB/Simulink. Indonesian Journal of Elec-trical Engineering and Computer Science, 16(3), 1144–1153. <http://doi.org/10.11591/ijeecs.v16.i3.pp1144-1153>
9. Yin, J., Du, X., Yuan, H., Ji, M., Yang, X., Tian, S., Wang, Q., & Liang, Y. (2021). TOPSIS Power Quality Comprehensive Assess-ment Based on A Combination Weighting Method. 2021 IEEE 5th Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2), Taiyuan, China, 2021, 1303–1307
10. Ding, H., Liu, P., Chang, X., & Zhang, B. (2023). A Novel Power Quality Comprehensive Estimation Model Based on Multi-Factor Variance Analysis for Distribution Network with DG. Pro-cesses, 11, 2385. <https://doi.org/10.3390/pr11082385>

References

1. Normy yakosti elektrychnoi enerhii u systemakh zahalnoho elektropostachannia HOST 13109-97 (mizhderzhavnyi standart, vvedenyi v Ukraini 01.01.2000 r.,) https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=25837
2. Enerhozberezhennia na pidpriemstvakh hirnycovydobuvnoi promyslovosti. Problemy, shliakhy realizatsii [Tekst]: monohrafiia / I. O. Sinchuk [ta in.] ; pid red. d-ra tekhn. nauk, prof. Sinchuka O. M. ; Derzh. VNZ "Kryvoriz nats. un-t", Kremenchuts. nats. un-t im. Mykhaila Ostrohradskoho. - Kryvyi Rih ; Kremenchuk : Shcherbatykh O. V. 2016. 340 s. ISBN 978-617-639-106-7
3. Natsionalna komisiia, shcho zdiisniuie derzhavne rehuliuвання v sferakh enerhetyky ta komunalnykh posluh. Yakist elektrychnoi enerhii. Opublikovano 06 kvitnia 2016 roku o 17:43. Data onovlennia: 05.04.2024
4. Vozniak O. M., Shtuts A. A., Tykhonov V. K. Doslidzhennia modeli haluzi elektroenerhetyky ta metodyky vykonannia vymiriuvan yakosti elektroenerhii [Tekst]. Tekhnika, enerhetyka, transport APK. 2022. № 1 (116). S. 150-163.
5. Prakhovnyk A.F., Novskiy V.O., Hryb O.H, Kalinchyk V.P., Karasinskyi O.L., Dovhaliuk A.M., Vasylychenko V.I., Svetelik O.D. Avtomatyzovani systemy obliku ta yakosti elektrychnoi enerhii. Monohrafiia. Kharkiv: PP «Ranok-NT», 2012. 516 s.
6. Tsyfrovyi oblik elektrychnoi enerhii z urakhuvanniam pokaznykiv yii yakosti ta vyznachenniam vidpovidalnosti za pohirshennia / Monohrafiia / Ye. I. Sokol, D.A., Hapon, O.H., Hryb, A.O. ta i zahalnoiu redaktsiieu chlen-korespondenta NAN Ukrainy, doktora tekhnichnykh nauk, profesora Sokola Ye. I. Kharkiv: FOP Brovin O.V., 2021.. 330 s.
7. Tan, R. H. G., & Ramachandaramurthy, V. K. (2015). A Com-prehensive Modeling and Simulation of Power Quality Disturbances Using MATLAB/SIMULINK. In Power Quality Issues in Distribut-ed Generation. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/61209>
8. Hussein, A., & Hawas, M. (2019). Power quality analysis based on simulation and MATLAB/Simulink. Indonesian Journal of Elec-trical Engineering and Computer Science, 16(3), 1144–1153. <http://doi.org/10.11591/ijeecs.v16.i3.pp1144-1153>
9. Yin, J., Du, X., Yuan, H., Ji, M., Yang, X., Tian, S., Wang, Q., & Liang, Y. (2021). TOPSIS Power Quality Comprehensive Assess-ment Based on A Combination Weighting Method. 2021 IEEE 5th Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2), Taiyuan, China, 2021, 1303–1307
10. Ding, H., Liu, P., Chang, X., & Zhang, B. (2023). A Novel Power Quality Comprehensive Estimation Model Based on Multi-Factor Variance Analysis for Distribution Network with DG. Pro-cesses, 11, 2385. <https://doi.org/10.3390/pr11082385>