

РОЗДІЛ IV. ЕНЕРГЕТИКА, ЕЛЕКТРОТЕХНІКА ТА ЕЛЕКТРОМЕХАНІКА

DOI: [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2026-2\(44\)-400-410](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2026-2(44)-400-410)

УДК 620.9.001.5

**Тетяна Михайлівна Берідзе¹, Ірина Віталіївна Касаткіна²,
Віктор Олександрович Левченко³, Михайло Олександрович Лохман⁴**

¹доктор економічних наук, професор кафедри електрична інженерія,
Криворізький національний університет (Кривий Ріг, Україна)

E-mail: Beridzet2016@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-2509-3242>. **Researcher ID:** L-9618-2018

²кандидат технічних наук, доцент кафедри електрична інженерія,
Криворізький національний університет (Кривий Ріг, Україна)

E-mail: Irina.vital@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-8967-6442>

³аспірант кафедри електрична інженерія,
Криворізький національний університет (Кривий Ріг, Україна)

E-mail: levchenko-vo@knu.edu.ua. **ORCID:** <https://orcid.org/0009-0001-3946-7148>

⁴провідний спеціаліст ПП «SolMedia» (Ужгород, Україна)

E-mail: LokhmanMA@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-7966-6256>

СЦЕНАРІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ДОДАТКОВОЇ ПОТУЖНОСТІ ЕНЕРГОПОТЕНЦІАЛУ ПІДПРИЄМСТВА

Досліджено два випадки постачання - споживання необхідного обсягу електроенергоресурсів. У першому випадку досліджено детермінований підхід, тобто обсяги електроенергоресурсів визначається постійною величиною. У другому випадку постачання - споживання є стохастичним процесом. Залежно від визначеного процесу реалізується алгоритм оптимального споживання електроенергоресурсів. При визначенні стохастичного процесу на основі теорії викидів знаходяться середні викиди електроенергії, значення яких дозволяють реалізувати алгоритм оптимального споживання електроенергоресурсів. Запропоновані методичні підходи доцільно використовувати під час вирішення наукових задач щодо визначення оптимальних показників споживання електроенергії.

Ключові слова: моделювання; потужність; детермінованість; стохастичність; енергетичний потенціал.

Рис.: 1. Бібл.: 11.

Актуальність теми дослідження У зв'язку з прагненням державницьких інституцій у сфері енергетики до стандартів Європейського Союзу, енергетичну складову національної економіки розглядають як товар, що має певну вартість. Відповідний закон визначає відповідальність енергозбутових організацій та постачальників енергоресурсів перед споживачами за надійність забезпечення їх енергоресурсами загалом та електричною енергією зокрема [1].

Важливо, щоб підприємство, яке постачає електроенергію, робило це вчасно і в повному обсязі. Разом з цим, можливо, що певному підприємству дуже важко впоратися з цією задачею. Іншими словами, для вирішення постачання необхідного обсягу електроенергії цьому підприємству бракує власної потужності. І тут природно використовувати підстанції, які дозволяють ліквідувати нестачу потужності. Зрозуміло, що таких підстанцій може бути декілька, оскільки потужності однієї може не вистачати. Таким чином, існує необхідність дослідити і змодельовати процес, що реалізує ланцюг постачання-споживання енергоресурсів. Це дозволить забезпечити безперебійність постачання електроенергії споживачу з визначеними вартісно-цільовими параметрами.

Постановка проблеми. Складні умови сьогодення в енергетичній площині вимагають від науковців-практиків вирішення науково-практичних завдань щодо забезпечення електроенергією споживачів вчасно, відповідної якості. Отже, постає науково-практичне завдання – дослідити та змодельовати можливі випадки постачання-споживання електричної енергії. Провести оцінювання вартісно-цільових характеристик ланцюга постачання-споживання електричної енергії.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Сьогодення вимагає від науковців-практиків нових інноваційних рішень щодо побудови ефективного ланцюга постачання-споживання електричної енергії. Дослідження, що містяться у монографії за загальною редакцією С. О. Кудрі, обґрунтовують засади ефективного використання різних видів енергетичного обладнання. Наведені кількісні показники енергетичного потенціалу джерел енергії [2]. Борисяк О. В. зосереджує увагу на формуванні енергетичного ринку. Запропонована концептуальна модель позиціонування «зеленої» енергії. Автор зосереджується на дослідженні ринку альтернативної енергетики [3]. Питанням енергоефективності присвячені дослідження авторів Попової О. Ю., Каїра З. С., Вакулішиної О. Р., Колодій Ю. А. Авторами запропоновано узагальнюючий показник на засадах керування щодо ефективності енергоспоживання [4]. Авторкою Кіт А. В. досліджує поняття «енергетичний потенціал» та його елементи. Зініційовано критерії для оцінювання ефективності управління потенціалом підприємства в парадигмі енергоресурсів. Визначено комплекс аналітичних показників, які системно та всебічно характеризують процеси виробництва на підприємстві [5]. Матвійчук Л. звертає увагу на функціонування паливно-енергетичного комплексу в розрізі державної площини. Акцентовано увагу на основних недоліках при формуванні паливно-енергетичних ресурсів на регіональному рівні [6]. Питанням енергозбереження присвячено дослідження Бевз В. В. Зазначено про необхідність використання інноваційних технологій для забезпечення раціонального використання енергоресурсів [7]. Дослідження Сак Т. В. присвячені проблемі розробки системи стратегії енергоресурсів. Наведено етапи, що визначають побудови стратегії за Міжнародними стандартами [8]. Дослідження Потапова В. Є. визначають конкурентоспроможність підприємства на засадах системного дослідження зберігання електричної енергії. Автор зазначає «... в умовах трансформації енергетичного сектору та зростання частки відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) традиційні енергетичні підприємства та великі промислові споживачі стикаються з новими викликами, зокрема нестабільністю генерації, проблемами прогнозування, коливанням попиту та необхідністю гнучкого управління виробництвом і розподілом електроенергії...» [9]. Науковці Квач Я., Кузьминчук Н., Куценко Т. дослідили шляхи забезпечення енергоефективності та енергозбереження. Доведено доцільність проведення змін ринку електроенергетики, провадження програм енергоефективності [10]. Системне дослідження проведено науковцем Козирським В. В. Автор дослідив історичний досвід використання та споживання енергії [11].

Виділення не досліджених частин загальної проблеми. Проведений аналіз сучасних досліджень і публікацій показав, що питанням моделювання процесу постачання – споживання електричної енергії приділено недостатньо уваги. Питання порівняння й оцінювання варіантів споживання електроенергії з урахуванням потужності наявних підстанцій досліджено фрагментарно та не надає повного системного бачення вирішення проблеми.

Метою статті є формування сценарного моделювання щодо визначення оптимального споживання електроенергії з урахуванням потужності наявних підстанцій.

Виклад основного матеріалу. Відповідно до завдань дослідження, розглянемо два випадки постачання необхідної потужності електроенергії споживача: детермінованим; стохастичним процесом.

1. Детермінована потужність споживання електроенергії.

Відповідно до вирішення задачі, схема якої зображена на рис. 1, до головного підприємства (ГП), яке постачає електроенергію, приєднані 4 підстанції – П1, П2, П3 і П4. Головне підприємство характеризується питомою вартістю електроенергії, що виробляється і обмеженням по потужності електроенергії \bar{W} , що продукується. В свою чергу, підстанції теж характеризуються питомими вартостями вироблюваної електроенергії і обмеженням

по вироблюваної потужності електроенергії. Так, перша підстанція П1 має питому вартість електроенергії c_1 і обмеження по потужності \overline{W}_1 . Друга підстанція П2 має питому вартість електроенергії c_2 і обмеження по потужності \overline{W}_2 . Третя підстанція П3 має питому вартість електроенергії c_3 і обмеження по потужності \overline{W}_3 . І, нарешті, четверта підстанція П4 має питому вартість електроенергії c_4 і обмеження по потужності \overline{W}_4 .

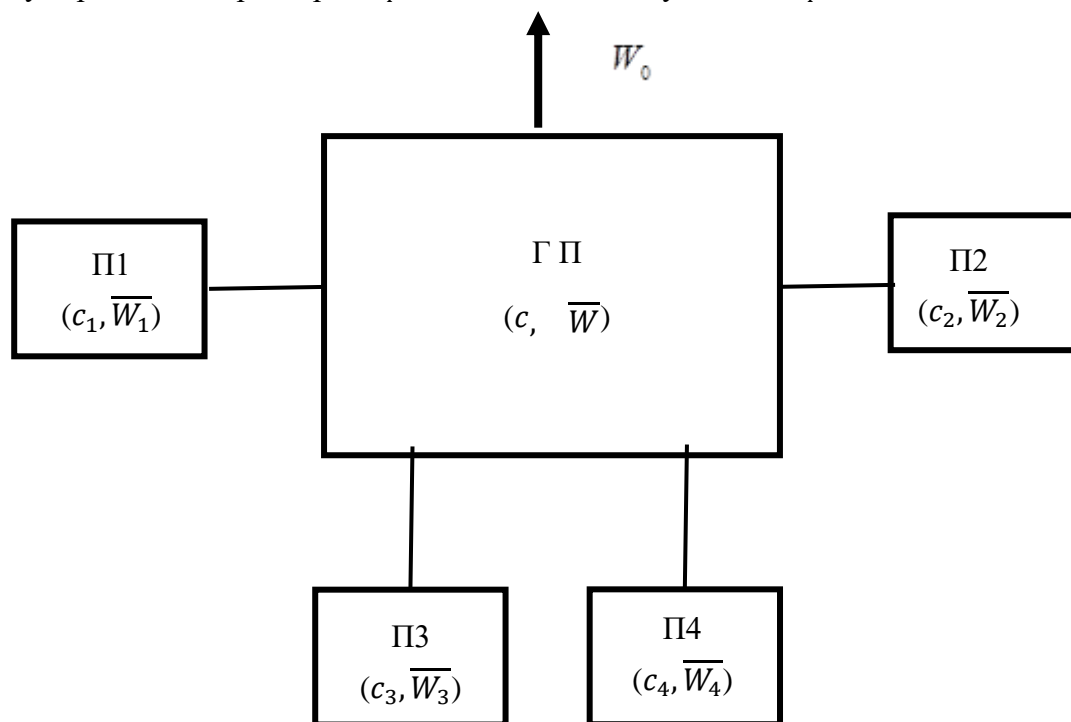


Рис.1. Схематичне зображення розподілу електроенергії при різних способах її споживання

Джерело: розроблено авторами.

Нехай ГП має постачати споживачу потужність електроенергії в обсязі W_0 .

Визначено 5 варіантів градації електроенергії за її потужністю. Розглянемо окремо кожний із них. По-перше, введемо обмеження на питомих вартостях електроенергії підстанцій

$$c_1 \leq c_2 \leq c_3 \leq c_4. \tag{1}$$

У подальшому це дозволить впорядкувати будування вартості застосованої електроенергії.

У першому випадку має місце обмеження

$$W_0 \leq \overline{W}, \tag{2}$$

тобто потужності електроенергії ГП споживачу вистачає.

У цьому випадку вартість спожитої електроенергії обчислюється за формулою

$$C = c \cdot W_0. \tag{3}$$

У другому випадку мають місце нерівності:

$$\overline{W} < W_0 \leq \overline{W} + \overline{W}_1, \tag{4}$$

тобто потужності електроенергії ГП не вистачає, але якщо застосувати потужність першої підстанції П1, то суми потужностей буде достатньо. У цьому випадку вартість спожитої електроенергії обчислюється за формулою

$$C = c \cdot \overline{W} + c_1 \cdot (W_0 - \overline{W}). \tag{5}$$

У цьому випадку вартість складається із суми вартостей електроенергії ГП і П1.

У третьому випадку мають місце нерівності:

$$\bar{W} + \bar{W}_1 < W_0 \leq \bar{W} + \bar{W}_1 + \bar{W}_2, \quad (6)$$

тобто суми потужностей електроенергії ГП і П1 не вистачає, але якщо скористатися потужністю другої підстанції П2, то суми потужностей буде достатньо. У цьому випадку вартість спожитої електроенергії обчислюється за формулою

$$C = c \cdot \bar{W} + c_1 \cdot \bar{W}_1 + c_2 \cdot (W_0 - \bar{W} - \bar{W}_1). \quad (7)$$

У цьому випадку вартість складається із суми вартостей електроенергії ГП, П1 і П2.

У четвертому випадку мають місце нерівності

$$\bar{W} + \bar{W}_1 + \bar{W}_2 < W_0 \leq \bar{W} + \bar{W}_1 + \bar{W}_2 + \bar{W}_3, \quad (8)$$

тобто суми потужностей електроенергії ГП, П1 і П2 не вистачає, але якщо скористатися потужністю третьої підстанції П3, то суми потужностей буде достатньо. У цьому випадку вартість спожитої електроенергії обчислюється за формулою

$$C = c \cdot \bar{W} + c_1 \cdot \bar{W}_1 + c_2 \cdot \bar{W}_2 + c_3 \cdot (W_0 - \bar{W} - \bar{W}_1 - \bar{W}_2). \quad (9)$$

У цьому випадку вартість складається із суми вартостей електроенергії ГП, П1, П2 і П3.

У п'ятому випадку мають місце нерівності

$$\bar{W} + \bar{W}_1 + \bar{W}_2 + \bar{W}_3 < W_0 \leq \bar{W} + \bar{W}_1 + \bar{W}_2 + \bar{W}_3 + \bar{W}_4, \quad (10)$$

тобто суми потужностей електроенергії ГП, П1, П2 і П3 не вистачає, але якщо скористатися потужністю четвертої підстанції П4, то суми потужності буде достатньо. У цьому випадку вартість спожитої електроенергії обчислюється за формулою

$$C = c \cdot \bar{W} + c_1 \cdot \bar{W}_1 + c_2 \cdot \bar{W}_2 + c_3 \cdot \bar{W}_3 + c_4 \cdot (W_0 - \bar{W} - \bar{W}_1 - \bar{W}_2 - \bar{W}_3). \quad (11)$$

У цьому випадку вартість спожитої електроенергії складається із суми вартостей електроенергії ГП, П1, П2, П3 і П4.

Таким чином, щоб скористатися описаним алгоритмом, треба на першому кроці визначити обмеження, які застосовуються в алгоритмі: $\bar{W}, \bar{W}_1, \bar{W}_2, \bar{W}_3, \bar{W}_4$. Далі ввести питомі вартості: c, c_1, c_2, c_3, c_4 . У подальшому треба перевірити умови (2), (4), (6), (8) і (10) на належність величини потужності електроенергії, необхідної споживачу в обсязі W_0 , вибраному інтервалу. Далі згідно умови виконання належності заданої величини потужності W_0 вибраному інтервалу, необхідно скористатися однією із формул (3), (5), (7) або (11) для обчислення вартості спожитої електроенергії.

Треба підкреслити, що розташування питомих вартостей згідно з (1) дозволяє одночасно оптимально формувати вартість спожитої електроенергії.

Необхідно підкреслити, що розроблений алгоритм оптимізації вартості спожитої електроенергії може бути адаптований до іншого кількісного складу підстанцій, які приєднані до ГП.

2. Стохастична потужність споживання електроенергії.

У подальшому представляється доцільним ускладнити задачу, розглядаючи процес споживання потужності електроенергії як випадкову функцію. Побудуємо математичну модель викидів потужності електроспоживання. Нехай $W(t)$ – потужність споживання електроенергії, яка є диференційованим стаціонарним випадковим процесом, тобто таким процесом свого аргументу, значення якого при будь-якому значенні часу t є випадковою величиною. Нехай β – значення потужності споживання електроенергії $W(t)$, викиди за яку досліджуються.

Тобто треба знайти середню потужність електроенергії \tilde{W} , обмежену реалізацією випадковою функцією $W(t)$ вище за заданий рівень β під час викиду, яка витрачається підстанціями протягом одного викиду. Введемо для цієї мети допоміжну функцію, яка визначається рівністю

$$I(w) = \begin{cases} 1, & w > 0 \\ \frac{1}{2}, & w = 0. \\ 0, & w < 0 \end{cases} \quad (12)$$

Тоді електроенергія всіх викидів E , що мали місце протягом часу T , може бути представлена так

$$E = \int_0^T I[W(t) - \beta] \cdot W(t) dt - \beta \cdot \bar{\tau}_\beta \cdot \bar{v}_\beta \cdot T, \quad (13)$$

де $\bar{\tau}_\beta$ – середня тривалість викиду за рівень β ,

\bar{v}_β – середня кількість викидів в одиницю часу за рівень β .

Середня тривалість викиду за рівень β обчислюється за формулою

$$\bar{\tau}_\beta = \frac{\int_\beta^\infty f(w) dw}{\int_\beta^\infty v \cdot f(\beta, v) dv}, \quad (14)$$

де $f(w)$ – щільність розподілу ординат w ,

$f(w, v)$ – щільність розподілу ординат w та її швидкості зміни v .

Середня кількість викидів в одиницю часу за рівень β обчислюється за формулою

$$\bar{v}_\beta = \int_\beta^\infty v \cdot f(\beta, v) dv. \quad (15)$$

Для нормального процесу, найважливішого з практичної точки зору, можуть бути отримані досить прості розрахункові формули. Для нормального стаціонарного процесу закон розподілу ординат випадкової функції однозначно виражається через математичне очікування випадкової функції \bar{w} та її дисперсію σ_w^2 , оскільки

$$f(w) = \frac{1}{\sigma_w \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(w-\bar{w})^2}{2\sigma_w^2}}. \quad (16)$$

Швидкість зміни ординати випадкової функції та ордината випадкової функції для того ж моменту часу є некорельованими випадковими величинами, а для нормального випадкового процесу ще й незалежними величинами. Тому двовимірна щільність розподілу ймовірності $f(w, v)$ розпадається на добуток нормальних щільностей розподілу для W і V . Тому можна написати

$$f(w, v) = \frac{1}{\sigma_w \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(w-\bar{w})^2}{2\sigma_w^2}} \cdot \frac{1}{\sigma_v \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{v^2}{2\sigma_v^2}}. \quad (17)$$

Дисперсія швидкості зміни ординати випадкової функції дорівнює

$$\sigma_v^2 = -\frac{d^2}{d\tau^2} K_w(\tau) |_{\tau=0}, \quad (18)$$

де $K_w(\tau)$ – кореляційна функція ординати випадкової функції.

Математичне очікування швидкості зміни ординати випадкової функції внаслідок стаціонарності випадкового процесу дорівнює нулю, тобто

$$\bar{v} = 0.$$

Підстановка (17) в (15) дає формулу для середньої кількості викидів в одиницю часу

$$\bar{v}_\beta = \frac{\sigma_v}{2\pi\sigma_w} e^{-\frac{(\beta-\bar{w})^2}{2\sigma_w^2}}. \quad (19)$$

Аналогічно, після підстановки (16) і (17) в (14) будемо мати

$$\bar{\tau}_\beta = \pi \frac{\sigma_w}{\sigma_v} e^{-\frac{(\beta-\bar{w})^2}{2\sigma_w^2}} \left[1 - \Phi\left(\frac{\beta-\bar{w}}{\sigma_w}\right) \right], \quad (20)$$

де $\Phi(w)$ – інтегральна функція Лапласа.

Перший множник у підінтегральному вираженні (13) протягом викиду дорівнює одиниці і дорівнює нулю в усіх інших випадках. Виразимо явно функцію (12). Для цього користуємося інтегралом Діріхле:

$$\frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\sin uw}{u} du = \begin{cases} 1, & w > 0 \\ \frac{1}{2}, & w = 0. \\ 0, & w < 0 \end{cases}$$

Якщо розглядати інтеграл

$$\frac{1}{\pi \cdot i} \int_{-\infty}^{\infty} e^{i \cdot u \cdot w} \frac{du}{u}, \quad (i = \sqrt{-1} \text{— уявна одиниця}),$$

у сенсі його головного значення, то

$$\frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\sin uw}{u} du = \frac{1}{\pi \cdot i} \int_{-\infty}^{\infty} e^{i \cdot u \cdot w} \frac{du}{u}. \quad (21)$$

Справді, оскільки у (21) інтеграл розуміється у сенсі головного значення, то

$$\frac{1}{\pi \cdot i} \int_{-\infty}^{\infty} e^{i \cdot u \cdot w} \frac{du}{u} = \frac{1}{\pi \cdot i} \lim_{\substack{\varepsilon \rightarrow 0 \\ L \rightarrow \infty}} \left\{ \int_{-L}^{-\varepsilon} e^{i \cdot u \cdot w} \frac{du}{u} + \int_{\varepsilon}^L e^{i \cdot u \cdot w} \frac{du}{u} \right\},$$

де ε і L – додатні величини, які прагнуть до своїх меж незалежно одне від одного. Представимо в останню формулу

$$e^{\pm i \cdot u \cdot w} = \cos u w \pm i \cdot \sin u w.$$

Оскільки

$$\lim_{\substack{\varepsilon \rightarrow 0 \\ L \rightarrow \infty}} \left\{ \int_{-L}^{-\varepsilon} \cos u w \frac{du}{u} + \int_{\varepsilon}^L \cos u w \frac{du}{u} \right\} = 0,$$

то

$$\frac{1}{\pi \cdot i} \int_{-\infty}^{\infty} e^{i \cdot u \cdot w} \frac{du}{u} = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\sin uw}{u} du,$$

тобто формула (21) виконується.

Враховуючи (21), функцію (12) можна представити у вигляді

$$I(w) = \frac{1}{2} \left[1 + \frac{1}{\pi \cdot i} \int_{-\infty}^{\infty} e^{i \cdot u \cdot w} \frac{du}{u} \right]. \quad (22)$$

Підставляючи (22) в (13), отримаємо

$$E = \frac{1}{2} \int_0^T W(t) dt + \frac{1}{2\pi i} \int_0^T \int_{-\infty}^{\infty} e^{iu[W(t)-\beta]} W(t) \frac{du}{u} dt - \beta \cdot \bar{\tau}_\beta \cdot \bar{\nu}_\beta \cdot T. \quad (23)$$

Застосуємо до обох частин (23) операцію математичного очікування

$$M[E] = M \left[\frac{1}{2} \int_0^T W(t) dt + \frac{1}{2\pi i} \int_0^T \int_{-\infty}^{\infty} e^{iu[W(t)-\beta]} W(t) \frac{du}{u} dt - \beta \cdot \bar{\tau}_\beta \cdot \bar{\nu}_\beta \cdot T \right]. \quad (24)$$

У результаті будемо мати для лівої частини рівності (24)

$$M[E] = \bar{w} \cdot \bar{\nu}_\beta \cdot T - \beta \cdot \bar{\tau}_\beta \cdot \bar{\nu}_\beta \cdot T.$$

Для правої частини рівності (24)

$$\begin{aligned} M \left[\frac{1}{2} \int_0^T W(t) dt + \frac{1}{2\pi i} \int_0^T \int_{-\infty}^{\infty} e^{iu[W(t)-\beta]} W(t) \frac{du}{u} dt - \beta \cdot \bar{\tau}_\beta \cdot \bar{\nu}_\beta \cdot T \right] = \\ = \frac{1}{2} \int_0^T \bar{w} dt + \frac{1}{2\pi i} \int_0^T \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i\beta u} M[e^{iuW(t)} W(t)] \frac{du}{u} dt - \beta \cdot \bar{\tau}_\beta \cdot \bar{\nu}_\beta \cdot T. \end{aligned} \quad (25)$$

Математичне очікування, що стоїть у (25) під знаком інтеграла, може бути висловлене через характеристичну функцію $\hat{E}(u)$ процесу $W(t)$, яка визначається так

$$\hat{E}(u) = M[e^{iuW}] = \int_{-\infty}^{\infty} e^{i u w} f_w(w) dw, \quad (26)$$

де $f_w(w)$ – щільність ймовірності випадкової величини W .

Зручність застосування характеристичної функції (26) пов'язана з тим, що всі моменти випадкової функції можуть бути отримані з характеристичної функції (26) шляхом диференціювання. Ряд викладок простіше виконувати, користуючись не щільністю ймовірності, а характеристичними функціями, знаючи які завжди можна знайти щільності ймовірності випадкових величин, застосувавши зворотне перетворення Фур'є

$$f_w(w) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-iuw} \hat{E}(u) du. \tag{27}$$

Оскільки

$$\frac{1}{i} \frac{d}{du} \hat{E}(u) = \frac{1}{i} \frac{d}{du} \int_{-\infty}^{\infty} e^{iuw} f_w(w) dw = \int_{-\infty}^{\infty} e^{iuw} w \cdot f_w(w) dw = M[e^{iuW(t)} W(t)]. \tag{28}$$

Підставляючи (28) в (25), виконуючи інтегрування по t , оскільки підінтегральні вирази не залежать від часу, і скорочуючи обидві частини рівності на час T , отримаємо

$$\tilde{w} \cdot \bar{v}_\beta = \frac{1}{2} \bar{w} - \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-iu\beta} \frac{d\hat{E}(u)}{du} \frac{du}{u} - \beta \cdot \bar{t}_\beta \cdot \bar{v}_\beta. \tag{29}$$

Інтеграл

$$J = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i \cdot u \cdot \beta} \frac{d\hat{E}(u)}{du} \frac{du}{u} \tag{30}$$

може бути виражений через щільність ймовірності $f_w(w)$. Дійсно, розглядаючи інтеграл (30) як функцію β та диференціюючи обидві частини рівності по β , отримаємо

$$\frac{\partial J}{\partial \beta} = -\frac{i}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-iu\beta} \frac{d\hat{E}(u)}{du} du = \frac{\beta}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-iu\beta} \hat{E}(u) du = \beta \cdot f_w(\beta) \tag{31}$$

де $f_w(\beta)$ – щільність ймовірності випадкової величини $W(t)$, взята при аргументі β .

Інтегруючи (31) від $-\infty$ до поточного значення β , отримаємо

$$J(\beta) = \int_{-\infty}^{\beta} w f_w(w) dw + c. \tag{32}$$

Для визначення постійної інтегрування c підставимо (32) у (29) та покладемо $\beta = \infty$. Оскільки при цьому випадку

$$\tilde{w} \cdot \bar{v}_\beta = 0$$

(ймовірність викиду за дуже високий рівень прагне нуля), отримаємо

$$c = -\frac{1}{2} \bar{w}. \tag{33}$$

Таким чином,

$$\tilde{w} \cdot \bar{v}_\beta = \bar{w} - \int_{-\infty}^{\beta} w f_w(w) dw - \beta \cdot \bar{t}_\beta \cdot \bar{v}_\beta,$$

тобто середня потужність електроенергії \tilde{w} , яка обмежена реалізацією випадковою функцією вище за заданий рівень β під час викиду, якщо вважати випадкову функцію $W(t)$ стаціонарною, дорівнює

$$\tilde{w} = \frac{\bar{w}}{\bar{v}_\beta} - \frac{1}{\bar{v}_\beta} \int_{-\infty}^{\beta} w f_w(w) dw - \beta \cdot \bar{t}_\beta. \tag{34}$$

Для подальших обчислень необхідно задати вид закону розподілу ординат випадкової функції $W(t)$. Якщо процес нормальний, то

$$f_w(w) = \frac{1}{\sigma_w \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(w-\bar{w})^2}{2\sigma_w^2}}. \tag{35}$$

Тоді інтеграл в (34) може бути розрахований. Виконуючи обчислення, отримаємо з урахуванням (19) і (20) для середньої потужності електроенергії викиду

$$\tilde{w} = \frac{\sigma_w^2 \sqrt{2\pi}}{\sigma_v} + \frac{(\bar{w}-\beta)\sigma_w \pi}{\sigma_v} \left[1 - \Phi\left(\frac{\beta-\bar{w}}{\sigma_w}\right) \right] e^{\frac{(\beta-\bar{w})^2}{2\sigma_w^2}}, \tag{36}$$

де $\sigma_w^2 = K_w(0)$, $\sigma_v^2 = -\frac{d^2}{d\tau^2} K_w(\tau)|_{\tau=0}$,

$K_w(\tau)$ – автоковаріаційна функція потужності електроенергії $W(t)$.

Для знаходження статистичних характеристик реалізацій випадкових процесів природно скористатися розробленими в математичній статистиці методами обробки дослідного матеріалу. Для цього необхідно перейти до послідовності реалізації випадкової величини, отриманої шляхом дискретизації випадкового процесу:

$$w_1, w_2, \dots, w_i, \dots, w_n, \quad (37)$$

де $w_i = w(i \cdot \Delta)$, $i = 1, 2, \dots, n$, $n \cdot \Delta = T$.

Тоді оцінка математичного очікування, тобто середнє, знаходиться за формулою

$$\bar{w} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n w_i. \quad (38)$$

Вибіркова дисперсія визначається формулою

$$\sigma_w^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (w_i - \bar{w})^2. \quad (39)$$

Вибіркова оцінка автокореляційної функції знаходиться по формулі

$$\tilde{R}_w(k) = \frac{1}{\sigma_w^2(n-1)} \sum_{i=1}^{n-k} (w_i - \bar{w})(w_{i+k} - \bar{w}), \quad k = 0, 1, \dots, m. \quad (40)$$

Враховуючи особливості стаціонарного випадкового процесу потужності споживання електроенергії $W(t)$, структуру аналітичної формули автокореляційної функції доцільно вибрати у вигляді

$$R_w(\gamma, \tau) = e^{-\gamma \cdot |\tau|} \cdot (1 + \gamma \cdot |\tau|), \quad (41)$$

де γ - параметр.

Для знаходження параметра γ аналітичної формули (41) необхідно провести апроксимацію формули (40) шляхом мінімізації функціонала

$$F(\gamma) = \sum_{k=1}^m \left(R_w(\gamma, k \cdot \Delta) - \tilde{R}_w(k) \right)^2 \rightarrow \min_{\gamma}. \quad (42)$$

З урахуванням того, що

$$F(\gamma_0) = \min_{\gamma} \sum_{k=1}^m \left(R_w(\gamma, k \cdot \Delta) - \tilde{R}_w(k) \right)^2,$$

аналітична формула автоковаріаційної функції запишеться у вигляді

$$K_w(\gamma_0, \tau) = \sigma_w^2 \cdot R_w(\gamma_0, \tau). \quad (43)$$

Тоді, згідно (43), маємо

$$K_w(\gamma_0, 0) = \sigma_w^2 \cdot R_w(\gamma_0, 0) = \sigma_w^2, \quad (44)$$

Далі, знаходимо дисперсію випадкової функції $V(t)$ шляхом обчислення похідної другого порядку від автоковаріаційної функції (43)

$$\sigma_v^2 = -\sigma_w^2 \cdot [-\gamma_0^2 e^{-\gamma_0 \tau} (1 - \gamma_0 \tau)]|_{\tau=0} = \gamma_0^2 \cdot \sigma_w^2. \quad (45)$$

Враховуючи (45), формула (36) середньої потужності електроенергії викиду при стаціонарної випадкової потужності електроенергії W вище заданого рівня β прийме вигляд

$$\tilde{w}(\beta) = \frac{\sigma_w \sqrt{2\pi}}{\gamma_0} - \frac{(\beta - \bar{w}) \cdot \pi}{\gamma_0} \left[1 - \Phi \left(\frac{\beta - \bar{w}}{\sigma_w} \right) \right] e^{\frac{1}{2} \left(\frac{\beta - \bar{w}}{\sigma_w} \right)^2} \quad (46)$$

Аналіз формули (46) показує, що вона залежить від чотирьох незалежних аргументів $-\beta, \gamma_0, \bar{w}, \sigma_w$. Така кількість змінних викликає певні труднощі при дослідженні залежності формули (46) від цих розрізнених аргументів. Тому представляється доцільним об'єднати ці аргументи в групи у вигляді множників. Для цього виділені дві групи множників:

$$\Delta = \frac{\beta - \bar{w}}{\sigma_w} \text{ і } \lambda = \sqrt{2\pi} \frac{\sigma_w}{\gamma_0}. \quad (47)$$

Перша група множників визначає відхилення заданого рівня потужності спожитої електроенергії β від середнього значення потужності спожитої електроенергії \bar{w} , яка обчислена в одиницях середньо квадратичного відхилення потужності спожитої електроенергії σ_w . Друга група множників дорівнює величині спожитої електроенергії при нульовому відхиленні заданого рівня потужності спожитої електроенергії β від середнього значення спожитої електроенергії \bar{w} , тобто коли $\Delta = 0$.

У результаті застосування позначень (47) формула (46) набуде вигляду:

$$\tilde{w}(\Delta, \lambda) = \lambda \left\{ 1 - \Delta \cdot \sqrt{\frac{\pi}{2}} [1 - \Phi(\Delta)] e^{\frac{\Delta^2}{2}} \right\}. \quad (48)$$

Таким чином, формула (48) визначає необхідну величину потужності електроенергії для споживання.

Якщо розглядати «викиди за нульовий рівень», тобто коли

$$\beta = \bar{w},$$

то формула (48) спрощується і набуває вигляду

$$\tilde{w}(0, \lambda) = \lambda,$$

або згідно з (47),

$$\tilde{w}(0) = \sqrt{2\pi} \frac{\sigma_w}{\gamma_0}. \quad (49)$$

Надалі, розглядаючи потужності електроенергії (48) як детерміновані величини, необхідно скористатися описаним вище алгоритмом використання детермінованою потужністю електроенергії підстанцій.

Висновки. У роботі вперше запропоновано підхід щодо формування сценарного моделювання споживання електричної енергії. Аналіз споживання електроенергії дозволив виділити два способи споживання: детермінований і стохастичний. При детермінованому споживанні електроенергії потужність електроенергії задається споживачем постійною. Залежно від величини заданої потужності реалізується алгоритм оптимального споживання електроенергії з урахуванням потужностей електроенергії наявних підстанцій. При стохастичному споживанні електроенергії на основі теорії викидів знаходяться середні викиди потужності електроенергії, величини яких дозволяють реалізувати алгоритм оптимального споживання електроенергії з урахуванням потужностей електроенергії наявних підстанцій. Надалі має сенс перевірки запропонованих алгоритмів на практиці.

Список використаних джерел

1. Міждержавна рада зі стандартизації, метрології та сертифікації. (1997). *Електрична енергія. Сумісність технічних засобів електромагнітна. Норми якості електричної енергії в системах електропостачання загального призначення* (ГОСТ 13109–97). https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=25837.
2. Кудря, С. О. (ред.). (2024). *Відновлювані джерела енергії* (2-ге вид., доповнене). Інститут відновлюваної енергетики НАН України.
3. Борисяк, О.В. (2022). Інноваційний потенціал підприємств енергетики і критичні кліматичні технології в умовах воєнного стану. *Інноваційна економіка*, (2-3), 21-28. <https://doi.org/10.37332/2309-1533.2022.2-3.4>.
4. Попова, О. Ю., Каїра, З. С., Вакулішина, О. Р., & Колодій, Ю. А. (2018). Науково-методичне забезпечення стимулювання підвищення ефективності енергетичного господарства підприємств промисловості. *Ефективна економіка*. 3. <http://www.economy.nayka.com.ua/?op=1&z=6298>.
5. Кіт, А. В. (2018). Сучасні підходи до оцінювання управління ефективністю використання енергетичного потенціалу підприємства. *Science Online: International Electronic Scientific Journal*, (12). <https://nauka-online.com/wp-content/uploads/2018/12/Kit.pdf>.

6. Матійчук, Л. (2023). Структура побудови та система функціонування паливно-енергетичного комплексу України. *Innovation and Sustainability*, (4), 109–118. <https://doi.org/10.31649/ins.2022.4.109.118>.

7. Бевз, В. В. (n.d.). Потенціал енергозбереження промислових підприємств. *Серія 18: Економіка і право*. <https://www.chasopys.law.npu.kiev.ua/archive/18/3.pdf>.

8. Сак, Т. В. (2016). Стратегія енергозбереження підприємства: сутність, чинники, етапи формування. *Глобальні та національні проблеми економіки*, (11), 494–497. <http://global-national.in.ua/archive/11-2016/104.pdf>.

9. Потапов, В. Є. (2024). Перспективи використання систем зберігання електроенергії для підвищення конкурентоспроможності енергетичного підприємства. *Економіка і управління*, (3), 32–37. <https://doi.org/10.36919/2312-7872.3.2024.32>.

10. Квач, Я., Кузьминчук, Н., & Куценко, Т. (2021). Енергоефективність як потенціал економічного розвитку країни. *Scientia fructuosa*, 137(3), 52–61. [https://doi.org/10.31617/visnik.knute.2021\(137\)04](https://doi.org/10.31617/visnik.knute.2021(137)04).

11. Козирський, В. В., & Волошин, С. М. (2021). *Основи електропостачання*. Компринт. <https://dglib.nubip.edu.ua/server/api/core/bitstreams/88433dfa-69a0-49fe-b951-09b270f5fe13/content>.

References

1. Interstate Council for Standardization, Metrology and Certification. (1997). *Elektrychna enerhiia. Sumisnist tekhnichnykh zasobiv elektromahnitna. Normy yakosti elektrychnoi enerhii v systemakh elektropostachannia zahalnoho pryznachennia (HOST 13109–97) [Electric energy. Electromagnetic compatibility of technical equipment. Power quality limits in public power supply systems]*. https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=25837.

2. Kudria, S. O. (Ed.). (2024). *Vidnovliuvani dzherela enerhii [Renewable energy sources]* (2nd ed.). Institute of Renewable Energy of the NAS of Ukraine.

3. Borysiak, O. V. (2022). Innovatsiyni potentsial pidpriemstv enerhetystyky i krytychni klimatychni tekhnolohii v umovakh voiennoho stanu [Innovative potential of energy enterprises and critical climate technologies under martial law]. *Innovatsiina ekonomika – Innovative Economy*, (2-3), 21–28. <https://doi.org/10.37332/2309-1533.2022.2-3.4>.

4. Popova, O. Yu., Kaira, Z. S., Vakulishyna, O. R., & Kolodii, Yu. A. (2018). Naukovometodychne zabezpechennia stymulivannia pidvyshchennia efektyvnosti enerhetychnoho hospodarstva pidpriemstv promyslovosti [Scientific and methodical support for stimulating the improvement of energy efficiency of industrial enterprises]. *Efektyvna ekonomika – Efficient Economy*, (3). <http://www.economy.nayka.com.ua/?op=1&z=6298>.

5. Kit, A. V. (2018). Suchasni pidkhody do otsiniuvannia upravlinnia efektyvnistiu vykorystannia enerhetychnoho potentsialu pidpriemstva [Modern approaches to evaluating the efficiency management of the enterprise's energy potential]. *Science Online: International Electronic Scientific Journal*, (12). <https://nauka-online.com/wp-content/uploads/2018/12/Kit.pdf>.

6. Matiichuk, L. (2023). Struktura pobudovy ta systema funktsionuvannia palyvno-enerhetychnoho kompleksu Ukrainy [The structure and system of functioning of the fuel and energy complex of Ukraine]. *Innovation and Sustainability*, (4), 109–118. <https://doi.org/10.3149/ins.2022.4.109.118>.

7. Бевз, В. В. (n.d.). *Potentsial enerhozberezhennia promyslovykh pidpriemstv [Energy saving potential of industrial enterprises]*. Seriiia 18: Ekonomika i pravo. <https://www.chasopys.law.npu.kiev.ua/archive/18/3.pdf>.

8. Sak, T. V. (2016). Stratehiia enerhozberezhennia pidpriemstva: sutnist, chynnyky, etapy formuvannia [Enterprise energy saving strategy: Essence, factors, stages of formation]. *Hlobalni ta natsionalni problemy ekonomiky – Global and National Problems of Economy*, (11), 494–497. <http://global-national.in.ua/archive/11-2016/104.pdf>.

9. Potapov, V. Ye. (2024). Perspektyvy vykorystannia system zberihannia elektroenerhii dlia pidvyshchennia konkurentospromozhnosti enerhetychnoho pidpriemstva [Prospects for using electricity storage systems to increase the competitiveness of an energy enterprise]. *Економіка і управління – Economics and Management*, (3), 32–37. <https://doi.org/10.36919/2312-7872.3.2024.32>.

10.Kvach, Ya., Kuzmynchuk, N., & Kutsenko, T. (2021). Enerhoefektyvnist yak potentsial ekonomichnoho rozvytku krainy [Energy efficiency as a potential for the country's economic development]. *Scientia Fructuosa*, 137(3), 52–61. [https://doi.org/10.31617/visnik.knute.2021\(137\)04](https://doi.org/10.31617/visnik.knute.2021(137)04).

11.Kozyrskyi, V. V., & Voloshyn, S. M. (2021). *Osnovy elektropostachannia* [Fundamentals of power supply]. Komprynt. <https://dglib.nubip.edu.ua/server/api/core/bitstreams/88433dfa-69a0-49fe-b951-09b270f5fe13/content>.

Дата першого надходження статті до видання: 29.02.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 18.03.2026

UDC 620.9.001.5

Tatiana Beridze¹, Irina Kasatkina², Viktor Levchenko³, Mykhailo Lohman⁴

¹Doctor of Economic Sciences, Professor, Professor of the Department of Electrical Engineering
Kryvyi Rih National University University (Kryvyi Rih, Ukraine)

E-mail: Beridzet2016@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2509-3242>. Researcher ID: L-9618-2018

²PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Present Associate Professor of the Electrical Engineering Department
Kryvyi Rih National University ((Kryvyi Rih, Ukraine)

E-mail: Irina.vital@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3938-0744>

³Postgraduate Student (PhD Student) of the Department of Electrical Engineering
Kryvyi Rih National University (Kryvyi Rih, Ukraine)

E-mail: levchenko-vo@knu.edu.ua. ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-3946-7148>

⁴Leading specialist of SolMedia Private Limited Company (Uzhhorod, Ukraine)
E-mail: LohmanMA@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7966-6256>

SCENARIO MODELING OF ADDITIONAL CAPACITY OF THE ENERGY POTENTIAL OF AN ENTERPRISE

The development of market relations in the energy sector involves considering electricity not only as a physical phenomenon, but also as a commodity that has a certain value. The relevant law defines the responsibility of electricity sales organizations and electricity suppliers to consumers for the reliability of their electricity supply. It is this enterprise will not cope with this task. To solve the problem of supplying the required amount of electricity, in case of its shortage, it is advisable to use substations that will eliminate the capacity deficit. There may be several such substations if the capacity of one is not enough.

The analysis of modern research and publications has shown that insufficient attention has been paid to the issues of modeling the supply process - consumption of electricity. The issue of comparing and evaluating electricity consumption options taking into account the capacity of existing substations has been studied in a fragmentary manner and does not provide a complete systemic vision of the solution to the problem.

The purpose of the study is to form a scenario modeling for determining the optimal electricity consumption taking into account the capacity of existing substations. Two cases of supplying the required electricity capacity to the consumer were studied. In the first case, the electricity consumption capacity is deterministic, that is, it is determined by a constant value. In the second case, the electricity consumption capacity is a stochastic process. With deterministic electricity consumption, the electricity capacity is set by the consumer as a constant.

The paper proposes for the first time an approach to the formation of scenario modeling of electrical energy consumption. Approaches to determining the optimal electricity consumption taking into account the electrical capacities of existing substations have been further developed. With stochastic electricity consumption, average electricity emissions are based on the theory of emissions, the values of which allow implementing an algorithm for optimal electricity consumption taking into account the capacities of existing substations. The proposed methods are advisable to use when solving problems regarding optimal electricity consumption indicators.

Keywords: modeling; power; determinism; stochasticity; energy potential.

Fig.: 1. References: 11.