

В. В. Черкашина¹
Г. В. Омеляненко¹
А. О. Макаров¹

ВРАХУВАННЯ ДИСКРЕТНОСТІ ПАРАМЕТРИЧНОГО РЯДУ ПЕРЕРІЗІВ ПРОВІДІВ ПОВІТРЯНИХ ЛІНІЙ 10 КВ В ЗАДАЧАХ ПРОЄКТУВАННЯ

¹Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

Проаналізовано та обґрунтовано необхідність врахування дискретності параметричного ряду перерізів проводів повітряних ліній 10 кВ під час проєктування електричних мереж. Аналіз параметрів повітряних ліній 10 кВ виконано для електричних мереж Східної частини України за умови появи щільності струму на ділянці лінії як випадкової величини. Показано недоцільність використання економічної щільності струму як основного параметра оптимізації, який характеризує та визначає вибір варіанта лінії під час проєктування. Доведено, що для того, щоб за оптимальний параметр брати економічну щільність струму, то потрібне її значення має бути забезпечене на всіх ділянках мережі, що практично неможливо через дискретність параметричного ряду перерізів проводів та зміну навантаження в електричній мережі. Запропоновано вибрати переріз проводів, як параметр оптимізації, який характеризує та визначає вибір варіанта лінії в процесі проєктування. Для цього удосконалено і проаналізовано техніко-економічну модель повітряних ліній 10 кВ критеріальним методом. За результатами аналізу визначено, що в залежності від похибки вихідної інформації у першому наближенні найприйнятнішим є коефіцієнт наростання параметричного ряду перерізів проводів повітряних ліній 10 кВ на рівні 2. Побудовано статистичні ряди для розподілу перерізу проводів як випадкової величини. Для визначення інтервалу влучання відносного перерізу проводів повітряних ліній 10 кВ припущено, що закон зміни щільності розподілу перерізів проводів досить близький до нормального закону розподілу. Під час перевірки запропонованої гіпотези з використанням критерію Пірсона та оцінки дисперсії виявлено, що ця гіпотеза не суперечить реальним даним. Це обґрунтовує використання перерізу проводів повітряних ліній 10 кВ, як параметр оптимізації, який характеризує та визначає варіант ліній в процесі проєктування електричних мереж.

Ключові слова: електрична мережа, критеріальний метод, критерій Пірсона, оптимізація, параметричний ряд, повітряна лінія, провід, техніко-економічна модель.

Вступ

Проєктування повітряних ліній електропередачі (ПЛ) — це складний процес, де електричні вимоги мають відповідати механічним обмеженням. Водночас з міжнародними нормативами, що надають схеми розрахунку для підтримки інженерного проєкту, національні нормативи визначають граничні умови та навантаження, які варто брати за основу в задачах проєктування [1], [2]. Також останнім часом в задачах проєктування зосередилися на оптимізації та зниженні витрат [3].

На етапі проєктування необхідно враховувати, як будуть змінюватися параметри ПЛ з плином часу, динаміка цих змін залежить від темпів і зростання навантаження, що обумовлює доцільність оптимізації під час проєктування. Також варто звернути увагу на те, що проєктування ПЛ вимагає вибору економічно доцільних значень параметрів, отриманих за результатами реалізації техніко-економічних моделей, які відображають специфіку та перспективу розвитку. До того ж, актуальними є питання економічної стійкості та чутливості вирішення подібних завдань, що дозволяють робити певні відступи від отриманого оптимального варіанта для проєктування. Одним із критеріїв вибору оптимального варіанта в задачах проєктування є мінімум дисконтованих витрат. Враховуючи цей критерій, а також доцільні параметри оптимізації і проєктується ПЛ.

Вибір струмопровідної частини ПЛ виконується в процесі проєктування електричних мереж

(ЕМ). Переріз проводів для ПЛ 35–750 кВ нормується в [2], а для розрахунку перерізу проводів ПЛ нижче 35 кВ необхідно мати схему конфігурації ЕМ та розрахункові навантаження на кожній її ділянці. Переріз проводів ПЛ 0,4 – 10 кВ рекомендується розраховувати за економічним інтервалом потужності за умови, що економічно доцільний переріз проводу забезпечить мінімум дисконтованих витрат [4].

Метою роботи є дослідження та обґрунтування доцільності врахування параметричного ряду перерізів проводів повітряних ліній 10 кВ в задачах проектування електричних мереж для вибору економічно доцільних параметрів ліній з урахуванням перспективи їх розвитку.

Результати досліджень

Під час проектування для проведення аналізу ПЛ 10 кВ формується техніко-економічна модель.

Для реалізації цієї моделі можна використовувати методи динамічного та лінійного програмування, які дозволяють знаходити оптимальний план розвитку ліній. Складність розв'язання задачі обумовлена тим, що динамічне програмування малоефективне у реалізації моделі, яка містить більше трьох параметрів оптимізації. Лінійне програмування реалізує лінійні моделі, що свідомо створює дійсний функціональний зв'язок всередині об'єкта оптимізації, оскільки лінійні моделі лінеаризують усі наявні нелінійні залежності [5].

З появою методів критеріального програмування став можливим аналіз нелінійних техніко-економічних моделей ПЛ [6].

Перш ніж реалізувати техніко-економічні моделі ПЛ 10 кВ необхідно проаналізувати параметри, які характеризують та визначають вибір варіанта лінії. Як такий параметр сьогодні переважно використовується економічна щільності струму ПЛ [7], [8].

Аналіз параметрів ПЛ 10 кВ виконано для ЕМ Східної частини України за умови появи щільності струму на ділянці лінії як випадкової величини. Отримані результати оформлено у вигляді статистичного ряду та подано в табл. 1.

Таблиця 1

Рейтинг статистичного аналізу ПЛ 10 кВ

I_i	0...0,1	0,1...0,2	0,2...0,3	0,3...0,4	0,4...0,5	0,5...0,6
m_i	5	24	18	23	21	11
P_i^*	0,038	0,180	0,140	0,170	0,155	0,080
I_i	0,6...0,7	0,7...0,8	0,8...0,9	0,9...1,0	1,0...1,1	1,1...1,2
m_i	8	11	6	3	2	1
P_i^*	0,060	0,083	0,045	0,023	0,015	0,007

В табл. 1 показано I_i — інтервал значень щільності струму; m_i — число спостережень в цьому інтервалі; P_i^* — відповідна частота появи.

Логарифмічно нормальний розподіл визначається двома параметрами: j_0 та δ_z . Величина $\lg j_0$ є математичним очікуванням випадкової величини $Z = \lg I$, а δ_z її середньоквадратичним відхиленням [9]. З відомими параметрами розподілу, визначається ймовірність влучання випадкової величини P_i на ділянці від α до β за виразом [9]

$$P_i(\alpha < j < \beta) = \Phi\left(\frac{\beta - \tilde{m}}{\delta}\right) - \Phi\left(\frac{\alpha - \tilde{m}}{\delta}\right), \quad (1)$$

де $m = -\lg j_0 = -0,482$ — математичне очікування випадкової величини P_i ; $\delta = \delta_z = -0,2881$ — середньоквадратичне відхилення випадкової величини P_i ; $\beta = \lg j_{i+1}$; $\alpha = \lg j_i$ — межі ділянки влучання випадкової величини P_i ; j_i — граничне значення щільності струму по інтервалах.

Результати розрахунку (1) у вигляді статистичного ряду подано у табл. 2.

Таблиця 2

Результати статистичного аналізу ПЛ 10 кВ

I_i	0...0,1	0,1...0,2	0,2...0,3	0,3...0,4	0,4...0,5	0,5...0,6
P_i	0,037	0,186	0,145	0,165	0,154	0,080
I_i	0,6...0,7	0,7...0,8	0,8...0,9	0,9...1,0	1,0...1,1	1,1...1,2
P_i	0,076	0,075	0,041	0,022	0,018	0,009

Для перевірки гіпотези використано критерій Пірсона (χ) [9]

$$\chi^2 = N \sum_{i=1}^k \frac{(P_i^* - P_i)^2}{P_i}, \quad (2)$$

де χ^2 — критерій Пірсона; P_i — ймовірність потрапляння випадкової величини на інтервалі; P_i^* — відповідна частота появи випадкової величини; N — сукупність випадкових чисел; k — число інтервалів.

Використовуючи (2) виявлено, що ця гіпотеза не суперечить реальним даним поданим у табл. 1, тому, що оцінка математичного очікування щільності струму дорівнює $\lg j_0 = -0,486$.

Враховуючи нормальний закон розподілу визначено інтервал значень щільності струму, який виявився достатньо великим — $(0,1 \dots 1,2)$ А/мм². Таке значення інтервалу отримано в результаті одночасності початку експлуатації мереж. В ньому будь-яке значення буде економічно доцільним, що свідомо не правильно. Тому пропонується недоцільним вважати отримане значення за інтервал економічної стійкості. Для того, щоб за оптимальний параметр брати економічну щільність струму значення її має бути витримано по всіх ділянках мережі. Це практично неможливо через дискретність параметричного ряду перерізів проводів, а також через зміну навантаження від ділянки до ділянки.

Проведені дослідження підтвердили необхідність враховувати дискретність параметричного ряду перерізів проводів для вибору економічно доцільних значень параметрів ліній з урахуванням перспективи їх розвитку в задачах проектування. Тому, як параметр оптимізації пропонується вибрати переріз проводів ПЛ 10кВ.

Для реалізації цього завдання використано техніко-економічну модель дисконтних витрат (B_i) ПЛ запропоновану в [10]. Основна відмінність розробленої моделі ПЛ 10 кВ від моделей ПЛ 110...750 кВ [11] полягає у зміні аналітичного зв'язку інвестицій у ПЛ 10 кВ із перерізом проводу (F)

$$B_i = (E + p)(a + bF) + (3I^2 \rho \tau \beta) \cdot F^{-1}, \quad (3)$$

де E — банківська ставка, %; p — коефіцієнт відрахувань на амортизацію, ремонт та обслуговування лінії; a — постійна складова вартості 1 км ПЛ, яка залежить від типу опор, конструктивного виконання ПЛ, класу напруги, грошової одиниці (г.о)/км; b — коефіцієнт подорожчання, що враховує зміну вартості 1 км ПЛ залежно від перерізу проводу, нормованого у відповідному класі напруги, г.о/(км · мм²); F — переріз проводу, мм²; I — максимальний струм лінії, А; ρ — питомий опір провідникового матеріалу, Ом·мм²/км; τ — час максимальних втрат, рік/год; β — питома вартість втрат електроенергії, г.о/(кВт·год).

Враховуючи те, що техніко-економічні моделі ПЛ з погляду теорії подібності є подібними, то відношення попередніх дисконтованих витрат до подальших у рамках параметричного ряду будуть тотожні, що є необхідною умовою побудови параметричного ряду перерізів проводів ПЛ [11]

$$\frac{B_{(i+1)/i}}{B_{i/i-1}} = \frac{K_{i+1}r_i - K_i r_{i+1}}{K_i r_{i-1} - K_{i-1} r_i} \frac{r_{i-1} - r_i}{r_i - r_{i+1}} \equiv \text{idem}, \quad (4)$$

де r_i — активний опір i -го проводу; K_i — інвестиційні вкладення в i -ту лінію.

Відповідно до теорії подібності у першому наближенні для пошуку оптимального параметричного ряду використано критеріальний метод [6], [10], який дозволив уникнути неповноти вихідної інформації. Для цього техніко-економічну модель ПЛ (3) записано в критеріальній формі

$$B = \pi_1 F^{0,25} + \pi_2 F^{-1} \quad (5)$$

та проаналізовано для обґрунтування зміни аналітичного зв'язку інвестицій з перерізом проводу F_0 в умовних одиницях

$$F_0 = \left(\frac{\pi_1 F_2}{\pi_2 F_1} \right), \quad (6)$$

де $\pi_1 = 4/5$, $\pi_2 = 1/5$ — критерії подібності, визначені із систематичних процедур критеріального методу [6], [10], [11].

Аналіз за критеріальним методом показав, що залежно від похибки вихідної інформації (δ) можна отримати у першому наближенні коефіцієнт наростання (K) параметричного ряду перерізів проводів ПЛ 10 кВ, задаючись тим чи іншим значенням. Результати досліджень подані у табл. 3

Таблиця 3

Результати обґрунтування коефіцієнта наростання параметричного ряду перерізів проводів ПЛ 10 кВ

$\delta, \%$	5	6	7	8	9	10
K	1,34	1,58	0,19	1,91	2,07	2,26

Як впливає з табл. 3, на значення коефіцієнта наростання параметричного ряду перерізів проводів ПЛ 10 кВ впливає похибка і найприйнятнішим є коефіцієнт $K \approx 2$.

Для оцінювання статичних характеристик розподілу відносного значення перерізів проводів для ПЛ 10 кВ припущено, що значення перерізу проводу на інтервалі варіювання є випадковою величиною. Тому для оцінювання статистичних характеристик зроблено «вибірку» з «генеральних сукупностей». Для цієї мети використовувалася методика планування експерименту, яка дозволяє зробити обмежену кількість дослідів за певним планом [12].

В цьому експерименті реалізовано два поєднання рівнів кожного фактора (верхній та нижній), кодовані значення факторів дорівнюють «+» і «-». Проведено повний факторний експеримент типу 2^k із загальною кількістю дослідів (N) [9], [12]

$$N = 2^k, \quad (7)$$

де k — число факторів, які впливають на переріз проводів ПЛ.

На підставі матриць статистичних сукупностей значень перерізів проводів для ПЛ 10 кВ побудовано статистичні ряди для розподілу випадкової величини перерізу проводів за умови, що параметри варіюються і знаходяться в таких межах:

$$P = (0,46...1,54); \quad \mu = (0,72...1,28); \quad \kappa = (0,5...1,5); \quad \cos \varphi = (0,99...1,01).$$

Для визначення інтервалу влучання відносного перерізу проводів ПЛ 10 кВ припущено, що закон зміни щільності розподілу перерізу досить близький до нормального закону розподілу. Під час досліджень інтервал оцінили з досить високою ймовірністю $P = 0,95$ за умови похибки (δ) від ± 5 до ± 10 . Результати аналізу подано у табл. 4.

Таблиця 4

Інтервал влучання відносного перерізу проводів ПЛ 10 кВ

$\delta, \%$	5	6	7	8	9	10
I_i	0,73...1,27	0,67...1,33	0,60...1,4	0,55...1,45	0,48...1,52	0,41...1,58

Гіпотезу перевірено з використанням критерію Пірсона (2). Результати подані у табл. 5.

Таблиця 5

Результати перевірки гіпотези за критерієм Пірсона для ПЛ 10 кВ

$\delta, \%$	5	6	7	8	9	10
χ^2	9,6	9,7	10,1	10,2	10,3	9,5
$P(\chi^2)$	0,537	0,564	0,463	0,472	0,481	0,525

Оцінка математичного очікування цього розподілу дорівнює 1, оскільки математичне очікування параметрів, що входять в (5) дорівнює 1.

Оцінка дисперсії \bar{D}_F розрахунків визначалася за виразом [9]

$$\bar{D}_F = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(F_{i*} - \bar{m}_F \right)^2, \quad (8)$$

де F_{i*} — переріз проводу, у.о; \bar{m}_F — математичне очікування.

Результати визначення оцінки дисперсії (8) залежно від похибки подано в табл. 6.

Результати визначення оцінки дисперсії залежно від похибки для ПЛ 10 кВ

$\delta, \%$	5	6	7	8	9	10
D	0,0216	0,0316	0,0432	0,0577	0,0743	0,0936

В результаті перевірки гіпотези з використанням критерію Пірсона (табл. 5) та оцінки дисперсії (табл. 6) виявлено, що запропонована гіпотеза не суперечить реальним даним.

Отже, представлене дослідження науково обґрунтовує переріз проводів ПЛ 10 кВ, як параметр оптимізації, який характеризує та визначає вибір варіанта лінії під час проектування.

Висновок

Для обґрунтування необхідності врахування дискретності параметричного ряду перерізів проводів повітряних ліній 10 кВ в процесі проектування електричних мереж:

- показано недоцільність використання економічної щільності струму як основного параметра, який характеризує та визначає варіант ліній;
- запропоновано як параметр оптимізації переріз проводів повітряних ліній 10 кВ та за критеріальним методом отримано коефіцієнт наростання параметричного ряду перерізів проводів для цього класу напруги;
- побудовано статистичні ряди для розподілу перерізу проводів як випадкової величини;
- проведено перевірку гіпотези з використанням критерію Пірсона та оцінки дисперсії залежно від похибки.

Результати досліджень не суперечать реальним даним, що підтверджує доцільність врахування дискретності параметричного ряду перерізів проводів повітряних ліній 10 кВ в задачах проектування.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] CEI EN 50341-1 *Overhead electrical lines exceeding AC 1 kV Part 1: General requirements* – Common specifications. [Electronic resource]. Available: <https://standards.globalspec.com/std/1643580/cei-en-50341-1>.
- [2] *Правила улаштування електроустановок*, офіційне видання. Київ, Україна: Міненерговугілля України, 2017, 617 с. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://zakon.isu.net.ua/sites/default/files/normdocs/pue.pdf>.
- [3] Paolo Cicconi, et. al., “A constraint-based approach for optimizing the design of overhead lines,” *Technical Paper Open access*, vol. 14, pp. 1121-1139, August 2020. <https://doi.org/10.1007/s12008-020-00680-x>.
- [4] В. С. Олійник, та ін. *Довідник сільського електрика*, В. С. Олійника, Ред. 3-тє вид., перероб. і допов. Київ, Україна: Урожай, 1989, 264 с. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://forca.com.ua/knigi/rizne/dovidnik-silskogo-elektrika.html>.
- [5] David G. Luenberger, and Yinyu Ye, *Linear and Nonlinear Programming*, monograph. Switzerland: Springer International Publishing, 2008, 546 p.
- [6] П. Д. Лежнюк, і С. В. Бєвз, *Методи оптимізації в електроенергетиці. Критеріальний метод*. Вінниця: ВДТУ, 1999, 176 с.
- [7] А. А. Маліновський, і Б. К. Хохулін, *Основи електроенергетики та електропостачання*, підруч. 2-ге вид., перероблене і доповнене. Львів, Україна: вид-во Львівської політехніки, 2009, 436 с.
- [8] Ю. В. Малогулко, О. Б. Бурикін, Т. Л. Кацадзе, В. В. Нетребський, *Електричні системи і мережі. Частина 1*: навч. посіб. П. Д. Лежнюк, Ред. Вінниця, Україна: ВНТУ, 2020, 203 с.
- [9] О. І. Огірко, Н. В. Галайко, *Теорія ймовірностей та математична статистика*: навч. посіб. Львів, Україна: Львівський держ. ун-т внутрішніх справ, 2017, 292 с.
- [10] В. В. Черкашина, *Структурування повітряних ліній електропередачі в умовах неповноти інформації*, моногр. Харків, Україна: Факт, 2016, 160 с.
- [11] В. В. Черкашина, «Методологія проектування повітряних ліній електропередачі з оптимізацією параметричного ряду перерізів проводів та розширенням функціональних можливостей», автореф. дис. д-ра техн. наук: 05.14.02. Київ: НАН України, Ін-т електродинаміки, 2019, 41 с.
- [12] George E. P. Box, J. Stuart Hunter, and William G. Hunter. *Statistics for Experimenters: Design, Innovation, and Discovery*. 2nd ed. John Wiley & Sons, 2005. ISBN-10: 0-471-71813-0; ISBN-13: 978-0-471-71813-0.

Рекомендована оргкомітетом міжнародної науково-технічної конференції
«Оптимальне керування електроустановками (ОКЕУ-2025)»

Стаття надійшла до редакції 20.01.2026

Черкашина Вероніка Вікторівна — д-р техн. наук, доцент, професор кафедри передачі електричної енергії, e-mail: veronika2473@gmail.com ;

Омеляненко Галина Вікторівна — канд. техн. наук, доцент, професор кафедри передачі електричної енергії, e-mail: omeljanenkgalina@gmail.com ;

Макаров Антон Олександрович — аспірант кафедри передачі електричної енергії, e-mail: ant.makarov1997@gmail.com .

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків

V. V. Cherkashyna¹
 H. V. Omelianenko¹
 A. O. Makarov¹

Consideration of the Discreteness of the Parametric Series of 10 kV Overhead Line Wire Cross-Sections in Design Problems

¹National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”

The article analyzes and justifies the necessity to take into account the discreteness of the parametric series of wire cross-sections of 10 kV overhead lines in the process of designing electrical networks. The analysis of the parameters of 10 kV overhead lines was performed for electrical networks of the Eastern part of Ukraine under the condition of the appearance of the current density on the line section as a random variable. The inexpediency of using economic current density as the main optimization parameter that characterizes and determines one or another line option during design is shown. It is proven that in order to accept the economic current density as the optimal parameter, its value must be maintained across all sections of the network, which is practically impossible due to the discreteness of the parametric series of wire cross-sections and the change in load in the electrical network. The cross-section of the wires is proposed as an optimization parameter that characterizes and determines a particular line option. For this purpose, technical and economic model of 10 kV overhead lines was improved and analyzed using the criterial method. According to the results of the analysis, it was determined that, depending on the error of the initial information, in the first approximation, the coefficient of increase of the parametric series of wire cross-sections of 10 kV overhead lines at level 2 is the most acceptable. Statistical series are constructed for the distribution of the wire cross-section as a random variable. To determine the interval of the relative cross-section of the wires of 10 kV overhead lines, it is assumed that the law of change in the density of the distribution of wire cross-sections is quite close to the normal distribution law. When testing the proposed hypothesis using the Pearson criterion and variance estimation, it was found that this hypothesis does not contradict real data, which justifies the cross-section of 10 kV overhead lines as an optimization parameter that characterizes and determines one or another line option when designing electrical networks.

Keywords: electrical network, criterion method, Pearson criterion, optimization, parametric series, overhead line, wire, technical and economic model.

Cherkashyna Veronika V. — Dr Sc. (Eng.), Associate Professor, Professor of the Chair of Electric Power Transmission, e-mail: veronika2473@gmail.com ;

Omelianenko Halyna V. — Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor, Professor of the Chair of Electric Power Transmission, e-mail: omeljanenkhalyna@gmail.com ;

Makarov Anton O. — Post-Graduate Student of the Chair of Power Transmission, e-mail: ant.makarov1997@gmail.com