

УДК 621.315

**П. Д. Лежнюк, д. т. н., проф.; М. М. Черемісін, к. т. н., проф.,
В. В. Черкашина, к. т. н., доц.**

УНІФІКАЦІЯ ПОВІТРЯНИХ ЛІНІЙ В УМОВАХ РИНКУ ДВОСТОРОННІХ ДОГОВОРІВ ТА БАЛАНСУВАЛЬНОГО РИНКУ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ

Показано один з напрямків розвитку повітряних ліній електропередач в умовах ринку двосторонніх договорів і балансувального ринку електроенергії за рахунок оптимізації параметричних рядів перерізу проводів.

Ключові слова: *повітряні лінії електропередач, переріз проводів, критеріальний метод.*

Вступ. Розвиток конкурентних відносин в електроенергетичній галузі України пов'язаний з впровадженням моделі ринку двосторонніх договорів та балансувального ринку електроенергії (РДДБ), що значно розширює можливості постачальників, споживачів і виробників електроенергії. Модель РДДБ складається із сегментів, які забезпечують реалізацію конкурентних відносин його учасників. Умови РДДБ вимагають нового наукового осмислення насамперед при створенні наукової платформи в напрямку розвитку електричних мереж (ЕС) [1, 2]. Перспективною зміною в цьому напрямку є методологія пошуку оптимальних рішень, яка обґрунтовує раціональну структуру і формує параметричні ряди електромережевого обладнання.

Постановка проблеми. Основою раціональної структури для повітряних ліній (ПЛ) є рівень стандартизації та уніфікації параметричного ряду перерізів проводів, який відображає можливість використання типових конструктивних рішень під час проектування, типових технологічних процесів, типового обладнання при виготовленні і ремонті ПЛ.

Практика проектування і будівництва ПЛ призводить до розширення використання уніфікованих (стандартизованих) елементів ПЛ. Ефективність уніфікації найбільшою мірою виявляється за системного підходу в організації проектування та будівництва ПЛ. Очевидно, що такий підхід забезпечує:

- скорочення термінів розробки та спорудження ПЛ за рахунок використання обмеженого числа опор, фундаментів, марок проводів, ізоляції та арматури;
- проведення якісного контролю надійності під час їх виготовлення;
- зменшення помилок персоналу під час будівництва та експлуатації ПЛ;
- скорочення експлуатаційного запасу окремих елементів ПЛ;
- зниження вартості спорудження ПЛ за рахунок конкуренції між окремими виробниками елементів ПЛ [3].

Отже, щоб виробити рекомендації щодо створення наукової платформи в напрямку розвитку ПЛ, необхідно виявити доцільне скорочення окремих типорозмірів елементів, з яких вона складається. До таких елементів, насамперед, будуть належати опори і провади ПЛ. Завдання щодо скорочення типорозмірів опор певною мірою розв'язано, а переріз проводів ПЛ нормують за ПУЕ України [4], але відсутнє техніко-економічне обґрунтування вибору перерізів проводів, що в умовах РДДБ є актуальним.

Мета статті – показати один із напрямків розвитку ПЛ в умовах РДДБ за рахунок оптимізації параметричних рядів перерізу проводів; сформулювати критерій оптимальності параметричних рядів перерізів проводів і запропонувати рекомендації щодо уніфікації ПЛ.

Аналіз публікацій. Як показує аналіз інформаційних джерел, оптимізація електромережевого обладнання на принципах уніфікації, серед чого й параметричного ряду перерізів проводів, є актуальною для світової електроенергетики.

Перші роботи в цьому напрямку були проведені ще у 80-х роках минулого століття [5]. На сучасному етапі у стратегію розвитку електроенергетики багатьох країн закладені принципи уніфікації. Так, у комплексну програму модернізації електроенергетики Росії до 2030 року закладено принцип уніфікації та типізації, в тому числі й уніфікації ряду обладнання, технологічних розв'язків і комплектації [3]. Такий підхід реалізовано і в низці країн далекого зарубіжжя. Він заснований на скороченні кількості марок проводів, які випускають. У якості базисного перерізу для різних класів напруги використовують один переріз, який з урахуванням коефіцієнта наростання шкали задовольняє номенклатурі перерізів за пропускну здатністю. Так, у Великобританії в лініях напругою 132-275-400 кВ використовують проводи перерізом АС 175 мм², АС 400 мм². У Німеччині для ліній 110-220-400 кВ застосовують одну марку сталевалюмінієвого проводу перерізом АС 560 / 50 мм² (для ПЛ 220 – 400 кВ по два проводи у фазі). В Італії для широкого застосування рекомендують тільки три перерізи проводів для ПЛ 132-380 кВ - 128 / 21 мм², 265 / 43 мм², 520 / 66 мм². У Чехії в мережах 110 кВ і вище застосовують три марки проводів АС 240 мм², АС 450 мм², АС 670 мм². У Франції під час спорудження ПЛ напругою 225 – 400 кВ широко використовують стандартний переріз проводу 570 мм² [1 – 6].

Основні матеріали дослідження. Під час пошуку оптимальних розв'язків, які обґрунтовують раціональну структуру та формують параметричні ряди електромережевого обладнання, була проведена робота й отримані рекомендації з уніфікації шкали перерізів проводів. В її основу покладено твердження, що ПЛ має економічні інтервали потужності тільки в тому разі, якщо виконується обмеження, яке забезпечує відмінність окремих варіантів за їхньою економічною ознакою. Умови існування економічних інтервалів мають вигляд:

$$\frac{r_i}{r_{i+1}} > 1, \quad \frac{K_{i+1}}{K_i} > 1, \quad \frac{K_i - K_{i-1}}{K_{i+1} - K_i} < \frac{r_{i-1} - r_i}{r_i - r_{i+1}}, \quad (1)$$

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

Критерії (1) відображають тільки технічну сторону й зумовлюють необхідні умови існування економічних інтервалів потужності. Оскільки ПЛ – це об'єкт техніко-економічного характеру, то необхідно виконання певних обмежень, які відображають економічні зв'язки уніфікованого об'єкта. До таких вимог належить умова розрізнення двох варіантів електропередачі, виконаних проводами різних перерізів. Отже, якщо припустити, що існує економічний інтервал i -го перерізу, то повинна виконуватися умова рівноекіномічності:

$$\frac{Z_{i+1}}{Z_i} \geq 1 + \varepsilon, \quad (2)$$

де Z_i – дисконтні витрати у ВЛ; ε – допустима величина, що визначає зону рівноекіномічності.

Умова (2) є не тільки необхідною, але й достатньою для i -го проводу, невиконання якої суперечить умові існування економічного інтервалу потужності з позиції рівноекіномічності для i -го перерізу (див. рис. 1).

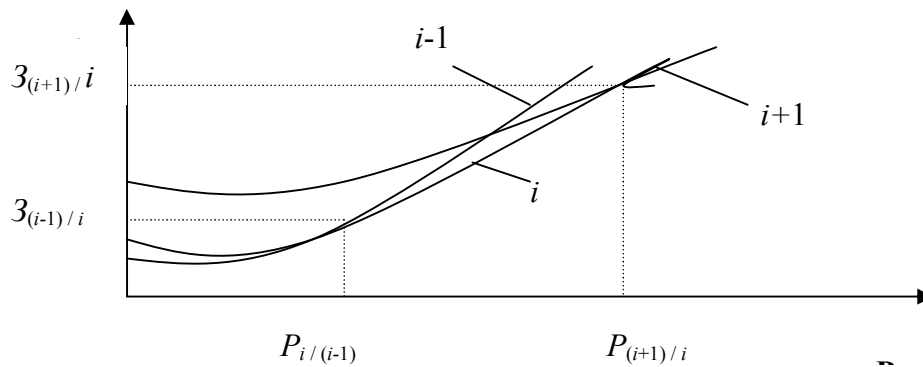


Рис. 1. Економічні інтервали потужності для проводів перерізом F_i, F_{i+1}, F_{i-1}

Відомо, що під час аналізу техніко-економічних показників ПЛ в умовах РДДБ одним з головних критеріїв оптимальних техніко-економічних зв'язків є мінімум дисконтних витрат [5]:

$$Z(x) \rightarrow \min, \quad x \in X.$$

У практиці побудови та реалізації техніко-економічних моделей не існує загальноприйнятої концепції. У кожному конкретному випадку побудова розрахункової моделі та метод її розв'язання тісно взаємопов'язані. Крім того, розв'язуючи загальну проблему оптимальності, необхідно враховувати характер вихідної інформації, достовірність якої буває низькою, що й призводить до невизначеності вихідної інформації [5 – 7].

Виходячи з вищевикладеного, розрахункову модель дисконтних витрат в 1 км ПЛ можна представити як

$$Z = Z_1 + Z_2 = (E + p)(a + vF) + (3I^2 \rho \tau \beta) \cdot F^{-1}, \quad (3)$$

де Z_1 – інвестиційний складник техніко-економічної моделі ПЛ (інвестиційні вкладення); Z_2 – технічний складник техніко-економічної моделі ВЛ (експлуатаційні витрати); E – банківська ставка, %; p – коефіцієнт відрахувань на амортизацію, ремонт та обслуговування лінії; a – постійний складник вартості 1 км ПЛ, що залежить від типу опор, конструктивного виконання ПЛ, класу напруги, грошові одиниці (г. о.)/км; v – коефіцієнт дорожчання, що враховує зміну вартості 1 км ПЛ залежно від перерізу проводу, що нормується у відповідному класі напруги, г. о./ $(\text{км} \cdot \text{мм}^2)$; F – переріз проводу, мм^2 ; I – максимальний струм лінії, А; ρ – питомий опір провідникового матеріалу, $\text{Ом} \cdot \text{мм}^2 / \text{км}$; τ – час максимальних втрат, год / рік; β – питома вартість втрат електроенергії, г. о. / $(\text{кВт} \cdot \text{год})$.

Інвестиційні вкладення в умовах РДДБ включають у вартість ПЛ вартість земельної ділянки, а також виплати за кредитами, амортизаційні відрахування і враховує інфляцію. Для різних класів напруги в загальному вигляді Z_i можна представити як

$$Z_i = \left(\frac{E_{\text{ном}} + 100}{\alpha + 100} - 1 \right) \left(1 + \left[\left(\frac{E_{\text{ном}} + 100}{\alpha + 100} \right)^{T_{\text{ср}}} - 1 \right]^{-1} \right) K_i, \quad (4)$$

де $E_{\text{ном}}$ – номінальна банківська ставка, %; α – темп інфляції; $T_{\text{ср}}$ – нормативний термін служби, рік; K_i – вартість 1 км ВЛ i -го класу напруги з урахуванням вартості земельної ділянки, г. о. /км [7].

Ураховуючи вищевикладене, у точці $P_{\frac{i+1}{i}}$ значення дисконтних витрат у ПЛ, яка виконана проводом i -го перерізу, збігається зі значенням дисконтних витрат у ПЛ, виконаній $(i+1)$ перерізом проводу (див. рис. 1), правомірні такі вирази:

$$\begin{aligned} Z_{\frac{i+1}{i}} &= p_s \frac{K_{i+1}r_i - K_i r_{i+1}}{r_i - r_{i+1}}, \\ Z_{\frac{i}{i-1}} &= p_s \frac{K_i r_{i-1} - K_{i-1} r_i}{r_{i-1} - r_i}. \end{aligned} \quad (5)$$

Відношення виразів (5) представляє собою:

$$\frac{Z_{\frac{i+1}{i}}}{Z_{\frac{i}{i-1}}} = \frac{K_{i+1}r_i - K_i r_{i+1}}{K_i r_{i-1} - K_{i-1} r_i} \frac{r_{i-1} - r_i}{r_i - r_{i+1}} = \text{idem}. \quad (6)$$

Вираз (6) використовуємо у співвідношенні (2):

$$\frac{K_{i+1}r_i - K_i r_{i+1}}{K_i r_{i-1} - K_{i-1} r_i} \frac{r_{i-1} - r_i}{r_i - r_{i+1}} \geq 1 + \varepsilon \quad (7)$$

або

$$\frac{K_{i+1}r_i - K_i r_{i+1}}{K_i r_{i-1} - K_{i-1} r_i} \geq \frac{r_{i-1} - r_i}{r_i - r_{i+1}} (1 + \varepsilon). \quad (8)$$

Отриманий критерій відображає не тільки технічну, а й економічну основу побудови уніфікованих ПЛ.

Вищенаведені міркування можуть бути використані під час відпрацювання методів обмежень на основі вже наявної уніфікації. При цьому слід пам'ятати, що задоволення критеріїв призводить до найбільш правильного розв'язання питання уніфікації ПЛ.

Умова розрізнюваності двох варіантів ПЛ, зумовлена межами рівноекономічності, певною мірою залежить від шкали тих перерізів проводів, якими виконані ці лінії. З іншого боку, якщо не враховувати обмеження по рівноекономічності, то два варіанти виконаних суміжними перерізами проводів, будуть економічно рівноцінними, оскільки коефіцієнт наростання такої шкали не виправдано низький.

Обґрунтування зв'язку такого роду залежить від застосовуваного методу, математичного апарату, а також від характеру й точності опису об'єкта. В умовах неповноти вихідної інформації під час аналізу електромережних об'єктів необхідно використовувати узагальнювальні методи, що ґрунтуються на основі теорії подібності, математичного програмування та моделювання. До одного з таких напрямків належить і критерійний метод, розроблені алгоритми якого дозволяють кількісно описати оптимальні техніко-економічні зв'язки об'єкта як за відомої, так і неповної вихідної інформації.

Як інструмент досліджень був застосований цей метод, який дозволяє певною мірою обґрунтувати параметричний ряд перерізів проводів. Використана також математична модель ПЛ, прийнятна для умов РДДБ, основна відмінність якої полягає у зміні аналітичного зв'язку інвестиційних вкладань у ПЛ і перерізом проведення. Завдання сформульовано досить коректно зі збереженням фізичної сутності об'єкта [5].

Отже, математичну модель дисконтних витрат у ПЛ можна представити як:

$$Z = Z_1 + Z_2 = (A-1) \left(1 + [A^{T_{ca}} - 1]^{-1} \right) K_{110} + (3I^2 \rho \tau \beta) \cdot F^{-1}, \quad (9)$$

$$\text{де } A = \frac{E_{ном} + 100}{\alpha + 100}.$$

За певної похибки (9) можна представити однією загальною моделлю:

$$Z = A_1 F^{0,25} + A_2 F^{-1}, \quad (10)$$

Критерійний метод аналізу узагальненої техніко-економічної моделі (10) показав, що в точці мінімуму

$$Z_0 = \left(\frac{A_1}{\pi_1} \right)^{\pi_1} \left(\frac{A_2}{\pi_2} \right)^{\pi_2}, \quad (11)$$

де π_1 і π_2 – критерії подібності, $\pi_1=4/5$, $\pi_2=1/5$, які можуть бути отримані з систематичних процедур критеріального методу [5].

Значення економічно доцільних параметрів функції (10) визначають з умови

$$F_0 = \left(\frac{\pi_1 A_2}{\pi_2 A_1} \right)^{0,8}. \quad (12)$$

Виконаємо такі перетворення: уведемо узагальнену постійну $A'_2 = A_2/p^2$ та запишемо (11) у відносній формі за умови, що базисне значення узагальнених констант збігається з дійсним значенням цих констант A_i , тобто $A_1 = A'_2 = 1$

Тоді

$$Z = (A_1)^{\pi_1} (A_2 P^2)^{\pi_2} \quad (13)$$

або

$$Z = P^{0,4}. \quad (14)$$

Аналогічно для (12)

$$F = \left(\frac{A \cdot P^2}{A_1} \right)^{0,8} \quad (15)$$

або

$$F = P^{1,6}. \quad (16)$$

З (14) або (16) можна записати

$$F = Z^4. \quad (17)$$

У загальному випадку формування допустимої області існування розв'язку залежить від похибки вихідної інформації δ , точність якої і визначить значення ε . Результати такої оцінки:

$\delta, \%$	± 1	± 2	± 3	± 4	± 5	± 6	± 7	± 8	± 9	± 10
F	1.14	1.28	1.45	1.56	1.66	1.77	1.89	2.05	2.20	2.60.

Отже, під час обґрунтування коефіцієнта наростання шкали значну роль відіграє похибка експлуатаційних характеристик. Із практики відомо, що точність інженерних розрахунків становить не менше 10%. Отже, найбільш прийнятний коефіцієнт наростання шкали перерізів проводів у цьому разі повинен бути не менше 2 – 2,5. Найпростіший шлях отримати такий коефіцієнт наростання – виключення проміжних стандартних значень шкали перерізів проводів.

З огляду на те, що ЕС представляють складну динамічну систему, питання уніфікації таких мереж певною мірою має розв'язувати й питання реконструкції. При цьому питання уніфікації ПЛ значною мірою впливає на термін реконструкції, під яким розуміють час заміни проводів одних перерізів проводами великих перерізів із метою збільшення пропускної здатності ПЛ і поліпшення якості електричної енергії [5, 6].

Покажемо, що час реконструкції пов'язано зі шкалою перерізів проводів, застосовуваної під час мережевого будівництва. Відомий закон зміни потужності у відносній формі.

$$P_* = P_0 (1 + q)^t, \quad (18)$$

де q – середнє значення приросту навантаження.

Скориставшись виразом (16) і (18), запишемо

$$P_* (1 + q)^t = F_*^{0,625}. \quad (19)$$

Отриманий вираз показує, як швидко за заданого характеру навантаження відбувається зміна відносного значення перерізу проводу. При цьому якщо в якості базисного перерізу F_0 прийняти значення перерізу проводу, що припадає на рік будівництва та введення в експлуатацію ПЛ, а в якості подальшого перерізу взяти переріз проводу на період реконструкції ПЛ, то відношення

$$\frac{F_2}{F_0} = F_* \quad (20)$$

представляє собою не що інше як коефіцієнт наростання шкали перерізів.

Нехай маємо дві різних шкали перерізів, які характеризуються коефіцієнтами F_1 та F_2 . Як в першому, так і в другому випадку прийемо темпи росту навантаження однаковими. Тоді згідно з (20)

$$P_* (1 + q)^{t_1} = F_*^{0,625} \quad (21)$$

і

$$P_* (1 + q)^{t_2} = F_*^{0,625}. \quad (22)$$

Відношення (21) та (22) можна записати у вигляді

$$\frac{t_2}{t_1} = \frac{\ln F_2}{n F_1} = idem. \quad (23)$$

У цьому виразі час t визначає інтервал від початку експлуатації до першої реконструкції. Отриманий вираз не залежить від темпів зростання навантаження і визначається тільки обраною шкалою перерізів проводів. Крім того, із (22) і (23) можна визначити час реконструкції, зумовлений пропускною здатністю ПЛ і заданим темпом навантаження q . При цьому вважаємо, що $P_0 = 1$, оскільки належить до початку експлуатації ВЛ. Тоді

$$t_0 = 0,625 \frac{\ln F}{\ln(1 + q)}. \quad (24)$$

У результаті розрахунку термінів реконструкції для шкал перерізів проводів з

коефіцієнтом $F_2^* = 2$ отримане середнє значення відношення часів дорівнює 2.

Отже, у якості основи для уніфікації ПЛ необхідно використання уніфікованої шкали перерізів, що дозволяє звести до мінімуму число реконструкцій.

Отримані характеристики уніфікації шкали перерізів ПЛ науково обґрунтовують основу методики уніфікації. При цьому з декількох варіантів ВЛ необхідно вибрати такий, який задовольнить умова економічної доцільності обраного об'єкта з урахуванням надійності, ремонтпридатності, додаткових інвестиційних вкладень під час реконструкції і т. д. Завдання спрощується, якщо аналіз різноманітних варіантів роботи цілеспрямовано. Для цього необхідно вибрати базис. Наприклад, у якості базисної можна використовувати ПЛ із перерізом з уніфікованої шкали, яке найчастіше зустрічається в наявних ПЛ.

Завдання формування базису уніфікації зводиться до досліджень перерізів проводів ПЛ залежно від кліматичних і навантажувальних характеристик. Низкою проектних інститутів проведено дослідження з метою отримання відносних частот навантажень ПЛ на підставі статистичної обробки. При цьому отримані результати показали, що найбільш прийнятним є коефіцієнт наростання шкали перерізів проводів, близький до 2 [5]. Приймавши цю інформацію за основу, було отримано значення перерізів проводів різних класів напруги.

Розглянемо вищевикладене на прикладі формування шкали перерізів для ПЛ 110 кВ. Відомо, що масова електрифікація країни відбувалася в 70-х роках минулого століття і критерії вибору оптимального варіанту були дещо іншими. Цей фактор був прийнятий до уваги під час формування базового варіанту для дослідження. Шкала перерізів побудована з розрахунку, що $K_n \geq 2$ і використовується один переріз для заданого класу напруги. Можливі оптимальні рішення за такої постановки завдання наведено в таблиці з урахуванням перерозподілу довжин ПЛ.

Таблиця

Варіанти розподілу довжин ПЛ перерізом 70 мм², 120 мм², 240 мм² та дисконтні витрати по варіантам

№ варіанта дослідження	Розподіл довжин ПЛ за перерізами, %			З, %
	70 мм ²	120 мм ²	240 мм ²	
1 (базовий)	38	35	27	100
2	38	21	41	99,5
3	38	0	62	99,9
4	24	0	76	99,6
5	9	0	91	99,9
6	0	0	100	100
7	24	49	27	98,1
8	9	64	27	97,0
9	0	73	27	96,6
10	24	35	41	97,6
11	9	29	62	97,2
12	0	24	76	98,0
13	0	9	91	99,8
14	0	38	62	96,8
15	0	58	42	96,1
16	9	49	42	96,5
17	24	14	62	98,3
18	9	14	77	98,5

Із таблиці видно, що всі варіанти є рівноеконічними, але з погляду реконструкції, збільшення пропускної здатності ПЛ, зниження втрат електроенергії та підвищення надійності ЕС варіант 6 є оптимальним, що відповідає [4]. Проведені дослідження техніко-економічно обґрунтовують вибір перерізів проводів в умовах РДДБ і можуть бути використані під час розробки нормативної документації України.

Висновки. У статті показано один з напрямків розвитку ПЛ в умовах РДДБ за рахунок оптимізації параметричних рядів перерізу проводів. Сформовано критерій оптимальності параметричних рядів перерізів проводів і запропоновано рекомендації щодо уніфікації ПЛ, що дозволить звести до мінімуму число реконструкцій, збільшити пропускну здатність ПЛ, знизити втрати електроенергії й підвищити надійність ЕС.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Закон України про засади функціонування ринку електричної енергії України [Електронний ресурс // Режим доступу :]<http://zakon4.rada.gov.ua/laws/show/663-18>.
2. Кириленко О. В. Балансуючий ринок електроенергії і його математична модель / О. В. Кириленко, І. В. Блінов, Є. В. Парус // Технічна електродинаміка. – 2011. – № 2. – С. 36 – 43.
3. Энергетическая стратегия России на период до 2030 г. [Электронный ресурс] // Режим доступа: <http://minenergo.gov.ru/aboutminen/energostategy/>.
4. Правила устройства электроустановок. // Х.: Изд-во «Форт», 2009. – 704 с.
5. Будзко И. А. Унификация воздушных линий электропередачи / И. А. Будзко, Ю. Н. Астахов, Н. М. Черемисин // Электричество. – 1982. – № 2. – С. 1 – 11.
6. Файбисович Д. Л. Предложения по унификации сечений проводов воздушных линий напряжением 110 – 750 кВ / Д. Л. Файбисович // Энергетик. – 2003. – № 3. – С. 21 – 22.
7. Выбор приоритетного направления в проектировании воздушных линий электропередачи в условиях рыночных отношений / Н. М. Черемисин, В. В. Черкашина // Сборник трудов VI Всероссийской научно-технической конференции с международным участием “Энергетика: управление, качество и эффективность использования энергоресурсов”. – Россия. Благовещенск: АГУ – 2011. –Т.1.– С. 105 – 110.

Лежнюк Петро Дем'янович — д. т. н., проф., завідувач кафедри електричних станцій та систем. Вінницький національний технічний університет.

Черемісін Микола Михайлович – к. т. н., професор кафедри електропостачання сільського господарства

Харківський національний технічний університет сільського господарства.

Черкашина Вероніка Вікторівна – к. т. н., доцент кафедри передачі електричної енергії, cherk34@rambler.ru.

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут».