

В. В. ЧЕРКАШИНА, В. М. БАКЛИЦЬКИЙ

ФОРМУВАННЯ І АНАЛІЗ ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНОЇ МОДЕЛІ ТРАНСФОРМАЦІЇ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ КРИТЕРІАЛЬНОГО МЕТОДУ

Сформовано техніко-економічну модель трансформації електричної енергії відповідно стратегії розвитку електроенергетики України. У зв'язку з оновленням цінностей, які закладені в стратегію розвитку електричних мереж України, постає необхідність пошуку найбільш оптимальних характеристик силових трансформаторів. Для реалізації даної задачі використано техніко-економічну модель, яка має мінімум цільової функції, що дає змогу прийняти економічно доцільне й обґрунтоване рішення щодо параметрів трансформаторів під час проектування електричних мереж. Для виконання поставленої задачі наведено процес формування техніко-економічної моделі, яка дозволяє проводити її аналіз критеріальним методом. Процес формування техніко-економічної моделі виконано на основі технічних характеристик двообмоткових трансформаторів з вищою напругою 110 кВ в діапазоні потужності від 10 до 63 МВА. Початкова техніко-економічна модель спрощена шляхом апроксимації основних складових частин степеневими функціями за допомогою застосування методу найменших квадратів. Наведено основні умови, які використовувалися для знаходження коефіцієнтів апроксимації. На основі знайдених коефіцієнтів апроксимації побудовані графіки, які дозволяють оцінити точність апроксимації, порівнюючи апроксимовані значення параметрів силових трансформаторів та значення параметрів існуючих силових трансформаторів. Графіки, також, вказують на ключові складові, які впливають на загальне значення витрат на трансформацію електричної енергії. Викладено алгоритм знаходження критеріїв подібності за допомогою показників ступеня основних апроксимуючих параметрів. Виконані перетворення техніко-економічної моделі, які дозволяють проводити аналіз витрат на трансформацію електричної енергії за допомогою критеріального методу. Знайдено показники критеріїв подібності, на основі яких техніко-економічна модель представлена в критеріальній формі. Проведена оцінка достовірності отриманих критеріїв подібності шляхом порівняння значень співвідношень складових в техніко-економічній моделі та співвідношення, яке отримане на основі критеріїв подібності. Обґрунтовано, що отримані критерії подібності, за першого наближення, можна вважати близькими за значеннями до існуючих співвідношень.

Ключові слова: апроксимація, подібність, критерій, силові трансформатори, критеріальний метод, техніко-економічна модель, критеріальна форма, аналіз, трансформація.

V. V. CHERKASHYNA, V. M. BAKLYTSKYI

FORMATION AND ANALYSIS TECHNICAL-ECONOMIC MODEL OF TRANSFORMATION ELECTRICITY WITH APPLYING CRITERION METHOD

The article presents the formation technical-economic model of electricity transformation in accordance with the strategy of development electric power industry in Ukraine. In connection with the renewal of the values included in the strategy of development of electric networks of Ukraine, there is a need to find the most optimal characteristics of power transformers. To implement this task, it is advisable to use a technical-economic model that has a minimum of objective function, which allows to make economically feasible and reasonable decisions about the parameters of transformers in the design of electrical networks. To fulfill this task, the process of forming a technical-economic model, which allows its analysis by the criterion method. The process of forming the technical-economic model is performed on the basis of technical characteristics of two-winding transformers with a higher voltage of 110 kV in the power range from 10 to 63 MVA. Given the initial technical-economic model, which simplified by approximating the main components by power functions using the least squares method. Given the main conditions used to find the approximation coefficients. Graphs are constructed on the basis of the found approximation coefficients, which allow to estimate the accuracy of the approximation, comparing the approximated values of the parameters of power transformers and the values of the parameters of existing power transformers. The graphs also indicate the key components that affect the overall cost of electricity transformation costs. Presented an algorithm for finding similarity criteria using indicators of the degree of basic approximable parameters. Transformations of the technical-economic model have been performed, which allow to analyse the costs of electricity transformation using the criterion method. Found indicators of similarity criteria on the basis of which the technical-economic model is presented in the criterion form. The reliability of the obtained similarity criteria was assessed by comparing the values of the ratios of the components in the technical-economic model and the ratio obtained on the basis of the similarity criteria. It is substantiated that the obtained similarity criteria, on the first approximation, can be considered close in values to the existing relations.

Keywords: approximation, criterion, similarity, power transformers, criterion method, feasibility model, criterion form, analysis, transformation, similarity criteria.

Постановка проблеми. Тенденції щодо впровадження європейських стандартів в електроенергетику України спонукають до вирішення питань оптимізації параметрів обладнання електричних мереж (ЕМ), що відображено в контексті оновлення цінностей, які закладено в стратегію розвитку ЕМ України [1]. Вище наведене стосується й силових трансформаторів та впровадження «Технічного регламенту щодо вимог до екодизайну для малих, середніх та великих силових трансформаторів» [2], що приведе, на ряду з покращенням технічних характеристик, до збільшення інвестицій в обладнання ЕМ.

Для вирішення даного питання необхідно виконувати пошук найбільш оптимальних характеристик обладнання шляхом реалізації техніко-економічних задач. У більшості випадків техніко-економічні показники обладнання ЕМ описуються за допомогою рівнянь у вигляді многочленів, які приймають значення більші за нуль і представляють собою нелінійні цільові функції [3].

У випадку пошуку оптимальної потужності трансформаторів постає необхідність у аналізі великої кількості даних, які мають змінний або постійний характер. Для реалізації даної задачі доцільно використовувати техніко-економічну модель, яка має

мінімум цільової функції, що дає змогу прийняти економічно доцільне й обґрунтоване рішення щодо параметрів трансформаторів під час проектування ЕМ.

Аналіз публікацій. Вирішення техніко-економічних задач в області електроенергетики полягає в прийнятті рішень за обмеженої кількості початкової інформації або за інформацією, яка має невизначений характер. Також слід мати на увазі, що в рамках поставлених завдань під час проектування ЕМ виникає ряд комбінованих задач для рішення яких існує велика кількість методів [3–6].

Запропоновані у [3–5] методи, на відміну від критеріального методу [6], не є ефективними для реалізації великих задач при неповній та невизначеній початковій інформації. Застосування критеріального методу допомагає в розв'язанні таких задач шляхом введення критеріїв подібності, які відображають техніко-економічну пропорцію досліджуваного об'єкта, що дозволяє спрогнозувати співвідношення участі частин цільової функції.

Застосування критеріального методу представляє собою комплекс досліджень до складу якого входять:

- пошук економічної співрозмірності значень параметрів оптимізації, які б відповідали найменшому значенні цільової функції як з технічними обмеженнями, так і без них;
- знаходження економічної співрозмірності досліджуваного об'єкту в оптимальному варіанті цільової функції;
- дослідження стійкості цільової функції до зміни параметрів оптимізації;
- аналіз чуттєвості заданої функції до точності початкової інформації [6].

На сьогодні існують роботи, в яких автори застосовували критеріальний метод аналізу для рішення задач оптимізації обладнання ЕМ. Так, в [7] авторами проведено аналіз техніко-економічних моделей повітряних ліній за допомогою критеріального методу для оптимізації параметрів ліній електропередач середніх та високих класів напруг. Роботи щодо обґрунтування потужності застосовуваних трансформаторів на основі критеріального методу проводились ще в 70-х роках минулого століття [8–9]. Ці роботи становлять основу для аналізу техніко-економічних моделей трансформації електричної енергії критеріальним методом в умовах впровадження європейських стандартів в електроенергетику України.

Мета статті. Сформувані техніко-економічну модель трансформації електричної енергії відповідно стратегії розвитку електроенергетики України й проаналізувати її критеріальним методом на прикладі двообмоткових трансформаторів з вищою напругою 110 кВ в діапазоні потужності від 10 до 63 МВА для оптимізації параметричних інтервалів силових трансформаторів в Українських електричних мережах 110 кВ.

Формування техніко-економічної моделі трансформації електричної енергії. Техніко-економічна модель дисконтованих витрат ($B_{\text{тр}}$)

на трансформацію електричної енергії для знаходження економічно доцільного значення потужності силового трансформатора має вигляд [10]:

$$B_{\text{тр}} = B_1 + B_2 + B_3 = (P_H + P_{\text{тр}})K_{\text{тр}} + \sigma \Delta P_{\text{xx}} T_{\text{в}} C_{\text{т}} + \sigma \Delta P_{\text{к.з.}} C_{\text{т}} \tau \left(\frac{S_{\text{max}}}{S} \right)^2, \quad (1)$$

де P_H – коефіцієнт ефективності;

$P_{\text{тр}}$ – сумарний коефіцієнт щорічних відрахувань на амортизацію, ремонт і обслуговування;

$K_{\text{тр}} = a + bS$ – вартість трансформатора, яка має лінійну залежність;

σ – коефіцієнт, що враховує збільшення вартості електроенергії в залежності від відстані мережі до джерела живлення;

S – потужність трансформатора;

S_{max} – максимальне завантаження трансформатора;

ΔP_{xx} – втрати потужності холостого ходу трансформатора;

$\Delta P_{\text{к.з.}}$ – втрати потужності трансформатора при номінальних режимах роботи;

$T_{\text{в}}, \tau$ – річна тривалість включення й втрат;

$C_{\text{т}}, C_{\text{т}}$ – витрати на 1 кВт-год. втрат електроенергії при тривалості $T_{\text{в}}, \tau$.

Модель (1) використовуємо для формування техніко-економічної моделі дисконтованих витрат на трансформацію електричної енергії відповідно впровадження європейських стандартів в електроенергетику України й аналізу її критеріальним методом [6]. Для цього виконуємо наступні перетворення:

1. Вартість трансформатора ($K_{\text{тр}}$) апроксимуємо нелінійним виразом:

$$K_{\text{тр}} = \alpha_i S^{b_i}, \quad (2)$$

де α_i – коефіцієнт апроксимації, який залежить від типу трансформатора та номінальної потужності, грош. од./МВА;

S – номінальна потужність трансформатора, змінна величина, МВА;

b_i – показник ступеня апроксимованого виразу, отриманий з певною мірою точності методом найменших квадратів.

2. Складову потужності (ΔP_{xx}) трансформатора апроксимуємо нелінійним виразом:

$$\Delta P_{\text{xx}} = \alpha_j S^{b_j}, \quad (3)$$

де α_j – коефіцієнт апроксимації, який залежить від типу трансформатора та номінальної потужності, грош. од./МВА;

S – номінальна потужність трансформатора, змінна величина, МВА;

b_j – показник ступеня апроксимованого виразу, отриманий з певною мірою точності методом найменших квадратів.

Використовуючи вирази (2) і (3), перші дві частини моделі (1) будуть становити:

$$B_{\Sigma} = B_1 + B_2 = (P_H + P_{Tp})\alpha_i S^{b_i} + \sigma\alpha_j S^{b_j} T_B C_T.$$

Записуємо у вигляді апроксимованого виразу:

$$B_{\Sigma} = \alpha S^b. \quad (4)$$

Складову потужності ($\Delta P_{к.з.}$) моделі (1), яка змінюється залежно від завантаження трансформаторів, приймаємо в точці номінального значення потужності й апроксимуємо виразом тотожним виразу (3):

$$\Delta P_{к.з.} = \alpha_1 S^{b_1}, \quad (5)$$

де a_1 – коефіцієнт апроксимації, який залежить від завантаження трансформатору та номінальної потужності, грош. од./МВА;

S – номінальна потужність трансформатору, змінна величина, МВА;

b_1 – показник апроксимованого виразу, отриманий з певною мірою точності методом найменших квадратів.

Для розрахунків коефіцієнтів апроксимації a і b в (4) та a_1 і b_1 в (5) використовуємо технічні характеристики двообмоткових трансформаторів з вищою напругою 110 кВ в діапазоні потужності від 10 до 63 МВА, які наведено в табл. 1 [11].

Таблиця 1 – Технічні характеристики силових трансформаторів

Тип	Сном, МВА	Напруга, кВ		P _{хх} , кВт	P _{кз} , кВт	Вартість, тис. грн
		ВН	НН			
ТДН-10000/110	10	115	34,5	14	58	12693, 790
ТДН-16000/110	16	115	34,5	18	85	14724, 709
ТДН-25000/110	25	115	38,5	25	120	19091, 440
ТДН-40000/110	40	115	38,5	34	170	30546, 304
ТДН-63000/110	63	115	38,5	50	245	48110, 430

Функції (4) та (5) є загальним апроксимуючим виразом, значення коефіцієнтів яких визначаємо методом найменших квадратів:

$$\frac{dR}{dA} = 0, \frac{dR}{db} = 0, \quad (6)$$

де R – сума квадратів відхилень апроксимованої кривої:

$$R = (Y_i - A - bX_i)^2, \quad (7)$$

де $Y_i = \lg y_i$, y_i – значення параметру, який апроксимується;

$A = \lg a$, a і b – шукані значення коефіцієнта \lg показника ступеня в апроксимуючих виразах;

$X_i = \lg x_i$, x_i – значення номінальних потужностей трансформаторів.

Таким чином, для визначення значень a і b розв'язуємо систему:

$$(n+1)A + b \sum_{i=1}^n X_i - \sum_{i=1}^n Y_i = 0, \quad (8)$$

$$A \sum_{i=1}^n X_i + b \sum_{i=1}^n X_i^2 - \sum_{i=1}^n Y_i X_i = 0, \quad (9)$$

Тоді

$$A = \frac{\begin{vmatrix} \sum_{i=1}^n Y_i & \sum_{i=1}^n X_i \\ \sum_{i=1}^n X_i Y_i & \sum_{i=1}^n X_i^2 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} n & \sum_{i=1}^n X_i \\ \sum_{i=1}^n X_i & \sum_{i=1}^n X_i^2 \end{vmatrix}}, \quad (10)$$

$$b = \frac{\begin{vmatrix} n & \sum_{i=1}^n Y_i \\ \sum_{i=1}^n X_i & \sum_{i=1}^n X_i Y_i \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} n & \sum_{i=1}^n X_i \\ \sum_{i=1}^n X_i & \sum_{i=1}^n X_i^2 \end{vmatrix}}, \quad (11)$$

Розраховані значення коефіцієнтів апроксимації a та b в (4) і a_1 та b_1 в (5) становлять:

$$a = 13,332; b = 0,738; a_1 = 0,045; b_1 = 0,777.$$

Використовуючи розраховані коефіцієнти, визначаємо розподілення витрат на трансформацію електричної енергії (рис. 1) та втрат потужності короткого замикання силових трансформаторів (рис. 2) залежно від номінальної потужності трансформатору.

Як слідує з рис. 1 та 2, зі збільшенням потужності трансформаторів збільшується як їх вартість, так і втрати короткого замикання, що обумовлює необхідність пошуку оптимальної потужності силового трансформатору в діапазоні передаваної по ЕМ потужності.

Спираючись на вище викладене, узагальнена модель дисконтованих витрат на трансформацію електричної енергії з врахуванням прийнятих допущень та апроксимацій буде мати вигляд:

$$B_{Tp} = B_1 + B_2 + B_3 = B_{\Sigma} + B_3 = (P_H + P_{Tp})\alpha S^b + \sigma\alpha S^{b_j} T_B C_T + \sigma\alpha_1 S^{b_1} C_T \tau S^{-2} S_{max}^2. \quad (12)$$

Реалізація сформованої моделі (12) представлено на рис. 3.

Використовуючи розраховані коефіцієнти записуємо модель (12) у вигляді:

$$B_{Tp} = A_1 S^{0,738} + A_2 S^{-1,22}, \quad (13)$$

де A_1 і A_2 – узагальнені константи, які мають вигляд: $A_1 = a$; $A_2 = \sigma\alpha_1 C_T S_{max}$.

Співвідношення у моделі (13) відображають часткову участь складових у виразі.

Знаходження критеріїв подібності за допомогою показників ступеня параметру, що апроксимується. Для аналізу сформованої моделі (12) критеріальним методом й знаходження критеріїв подібності, спираючись лише на показники ступеня параметру, що оптимізується, в якості початкового візьмемо рівняння вигляду:

$$Z_{тр} = A_1 S^b + A_2 S^{-b_1}, \quad (14)$$

яке являється подібним до рівняння (13).

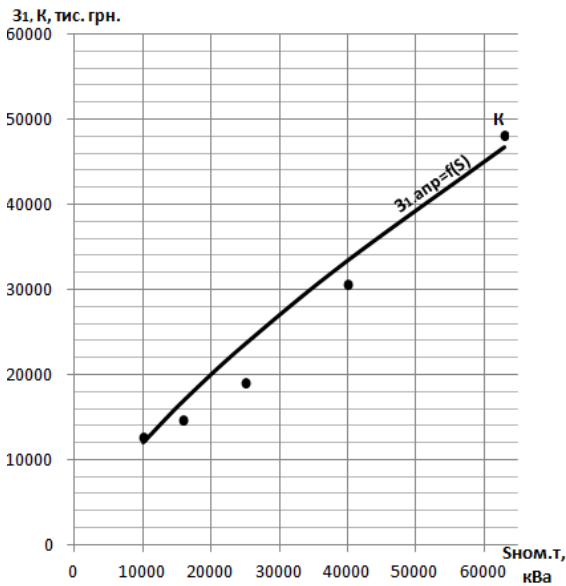


Рисунок 1 – Розподілення витрат на трансформацію електричної енергії (Z_i) в залежності від номінальної потужності трансформатору ($S_{ном.т}$)

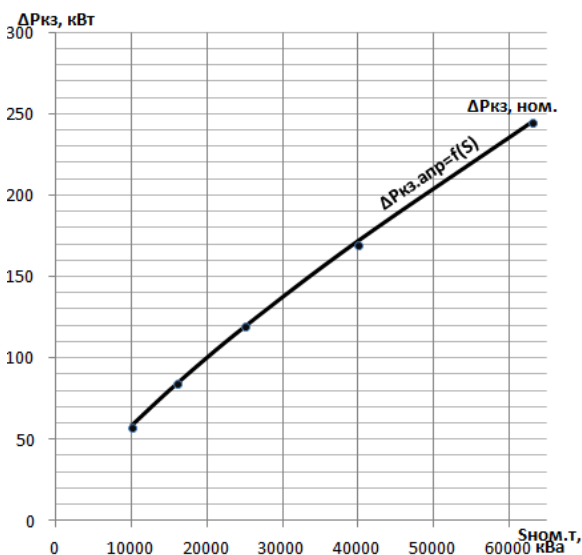


Рисунок 2 – Розподілення втрат потужності короткого замикання силових трансформаторів ($\Delta P_{кз.ном}$) в залежності від номінальної потужності трансформатору ($S_{ном.т}$)

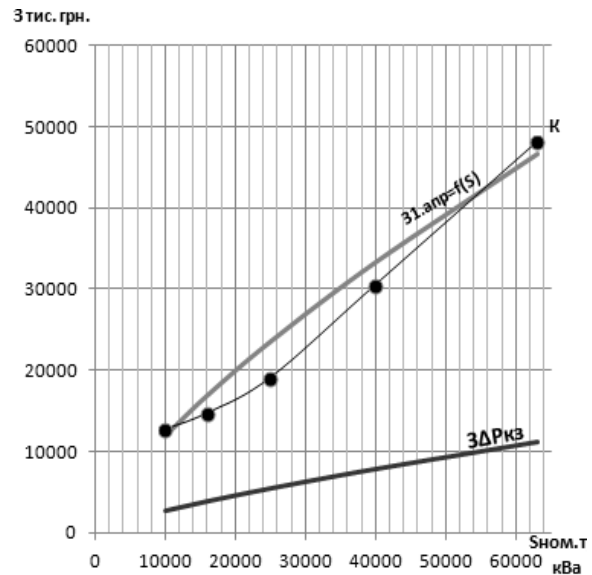


Рисунок 3 – Залежність складових дисконтованих витрат ($Z_{тр}$) від номінальної потужності $S_{ном}$

Реалізуючи рівняння (14) критеріальним методом [6] проводиться аналіз сформованої техніко-економічної моделі трансформації електричної енергії.

Критерії подібності знаходяться із співвідношень:

$$\pi_1 = (A_1/Z_{тр})S^b + (A_2/Z_{тр})S^{-b_1} \quad (15)$$

При цьому сума критеріїв подібності буде становити:

$$\pi_1 + \pi_2 = 1 \quad (16)$$

Для подальшого аналізу прирівняємо нулю похідну від $Z_{тр}$ до оптимізуемого параметру S :

$$\frac{\partial Z_{тр}}{\partial S} = bA_1 S^{b-1} - b_1 A_2 S^{-b_1-1} = 0 \quad (17)$$

Із виразу (15) знайдемо A_1 та, підставивши значення в (17), отримаємо вираз:

$$\begin{aligned} b\pi_1 Z_{тр} S^{-b} S^{b-1} - b_1 \pi_2 Z_{тр} S^{b_1} S^{-b_1-1} &= \\ = b \frac{\pi_1 Z_{тр}}{S} - b \frac{\pi_2 Z_{тр}}{S} &= 0 \end{aligned} \quad (18)$$

Виходячи з того, що $Z_{тр}/S \neq 0$, маємо:

$$b\pi_1 - b_1 \pi_2 = 0 \quad (19)$$

З виразу (19) можемо знайти значення π_1, π_2 :

$$\pi_1 = \frac{b_1}{b + b_1}; \pi_2 = \frac{b}{b + b_1}. \quad (20)$$

Отже, спираючись на вирази (20) та (13) розрахуємо критерії подібності для техніко-економічної моделі дисконтованих витрат на трансформацію електричної енергії:

$$\pi_1 = \frac{1,22}{0,738 + 1,22} = 0,62, \quad (21)$$

$$\pi_2 = \frac{0,738}{0,738 + 1,22} = 0,38. \quad (22)$$

Варто відмітити, що знайти критерії подібності, спираючись тільки на ступінь змінних параметрів, можливо лише в тому разі коли в початковій функції число змінних параметрів дорівнює числу постійних або коли початкову функцію можна звести до такої умови.

Таким чином, використовуючи алгоритми критеріального методу [6] і розраховані критерії подібності (21) і (22), вираз (13) буде мати вигляд:

$$Z_{\text{тр}} = \pi_1 \dot{S}^{0,738} + \pi_2 \dot{S}^{-1,22} \quad (23)$$

Оцінювання достовірності отриманих критеріїв подібності. Для оцінювання достовірності отриманих результатів проведемо порівняння отриманих критеріїв (21) і (22) та співвідношень, які визначимо підставляючи початкові дані в сформовану модель дисконтованих витрат на трансформацію електричної енергії (12). Під час розрахунків використано наступні розрахункові значення:

$$\begin{aligned} P_{\text{H10MBA}} &= 0,9941; P_{\text{H16MBA}} = 0,9941; \\ P_{\text{H25MBA}} &= 0,9941; P_{\text{H40MBA}} = 0,9941; \\ P_{\text{H63MBA}} &= 0,9941; P_{\text{тр}} = 0,061; \\ \sigma &= 1,1; T_{\text{в}} = 8760 \text{ год}; \tau = 2405 \text{ год}; \\ C_{\text{т}} &= 1,68 \text{ грн} \frac{\text{кВт}}{\text{год}}, C_{\text{с}} = 19 \text{ грн} \frac{\text{кВт}}{\text{год}}. \end{aligned}$$

Результати розрахунку наведені в табл. 2.

Таблиця 2 – Співвідношення складових в моделі дисконтованих витрат на трансформацію електричної енергії (13) та критеріїв подібності (21) і (22)

Sn, МВА	Співвідношення отримані на основі рівняння приведених затрат, %	Співвідношення на основі отриманих критеріїв подібності, %
10	60/40	62/38
16	65/35	
25	63/37	
40	66/34	
63	68/32	

Дивлячись на отримані співвідношення складових витрат існуючих силових трансформаторів і отриманих критеріїв подібності (табл. 2) можна вважати, що отримані критерії подібності близькі за значенням до реальних значень та дозволяють проводити оцінювання витрат на трансформацію електричної енергії в умовах обмеженої кількості початкових даних для оптимізації параметричних інтервалів силових трансформаторів в Українських електричних мережах 110 кВ.

Таким чином, спираючись на отримані результати, має сенс стверджувати що за допомогою критеріального методу можна отримати техніко-економічну модель витрат на трансформацію електричної енергії в критеріальній формі, що є передумовою для подальшого аналізу оптимальної потужності силових трансформаторів в певному діапазоні передаваної потужності.

Висновки. Сформовано техніко-економічну модель трансформації електричної енергії відповідно стратегії розвитку електроенергетики України й проаналізовано її критеріальним методом на прикладі двообмоткових трансформаторів з вищою напругою 110 кВ в діапазоні потужності від 10 до 63 МВА. Під час аналізу встановлено, що:

- для вирішення техніко-економічних задач необхідно знати вплив похибки початкової інформації на початковий економічний варіант;
- для більш точного оцінювання отриманого співвідношення, щодо його наближення до оптимальних значень, може бути застосована апроксимація показників силових трансформаторів нелінійними залежностями, що дасть змогу отримати найбільш точний показник співвідношень складових у техніко-економічних моделях;
- запропонований підхід може використовуватись для аналізу оптимізації параметричних інтервалів силових трансформаторів в Українських електричних мережах 110 кВ.

Список літератури

1. Про схвалення Енергетичної стратегії України на період до 2035 року “Безпека, енергоефективність, конкурентоспроможність” : Розпорядж. Каб. Міністрів України від 18.08.2017 р. № 605-р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/605-2017-p#Text> (дата звернення: 07.02.2022).
2. Про затвердження Технічного регламенту щодо вимог до екологізації для малих, середніх та великих силових трансформаторів : Постанова Каб. Міністрів України від 27.02.2019 р. № 152. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/152-2019-p#Text> (дата звернення: 07.02.2022).
3. Лежнюк П. Д. Аналіз чутливості оптимальних рішень в складних системах критеріальним методом : Монографія. Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2003. 131 с.
4. Іноземцев Г. Б., Козирський В. В. Оптимізаційні задачі в енергетиці сільського господарства : навч. посіб. Київ : Вид. центр НУБіП України, 2014. 172 с.
5. Luenberger D. G., Ye Y. Linear and nonlinear programming. Cham : Springer International Publishing, 2016. 546 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-18842-3>.
6. Черемисин Н. М., Черкашина В. В. Критеріальний метод аналізу техніко-економічних задач в електричних сетях і системах : учебное пособие. Харьков : Факт, 2014. 88 с.
7. Бондаренко В. О., Черемисин М. М., Черкашина В. В. Системний підхід передпроектної оцінки повітряних ліній в умовах ринкових відносин : монографія. Харків : Факт, 2013. 260 с.
8. Астахов Ю. Н., Веников В. А., Горський Ю. М., Карасев Д. Д., Маркович И. М. Электрические системы. Кибернетика электрических систем. Москва : Высшая школа, 1974. 328 с.
9. Гительсон С. М. Экономические решения при проектировании электроснабжения промышленных предприятий. Москва : “Энергия”, 1971. 72 с.
10. Черемисин М. М., Мороз О. М., Черкашина В. В., Мірошник О. О. Економічні розрахунки в інженерній діяльності на прикладах задач електроенергетики. Харків : ФОП Панов А. М., 2018. 228 с.

11. Электротехнический справочник / ред.: В. Г. Герасимов та ін. 9-те изд. Москва : Издательство МЭИ, 2003. Т. 2 : Электротехнические изделия и устройства. 518 с.

References

- Ukraine, Cabinet of Ministers of Ukraine. (2017, Aug. 18). *Rozporiadzhennia Kabinetu Ministriv Ukrainy [Order of the Cabinet of Ministers of Ukraine] no. 605-p, Pro skhvalennia Enerhetychnoi stratehii Ukrainy na period do 2035 roku "Bezpeka, enerhoefektyvnist, konkurentospromozhnist" [On endorsement of the Ukrainian Energy Strategy until 2035 "Security, Energy Efficiency, Competitiveness]*. Accessed: Feb. 7, 2022. [Online]. Available: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/605-2017-p#Text> (in Ukrainian)
- Ukraine, Cabinet of Ministers of Ukraine. (2019, Feb. 27). *Rozporiadzhennia Kabinetu Ministriv Ukrainy [Order of the Cabinet of Ministers of Ukraine] no. 152, Pro zatverdzhennia Tekhnichnoho rehlementu shchodo vymoh do ekodyzainu dlia malykh, serednikh ta velykykh sylovykh transformatoriv [On approval of Technical Regulations regarding eco-design requirements for small, medium and large power transformers]*. Accessed: Feb. 7, 2022. [Online]. Available: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/152-2019-n#Text> (in Ukrainian)
- P. D. Lezhnyuk, *Analiz Chutlyvosti Optymal'nykh Rishen' v Skladnykh Systemakh Kryterial'nyim Metodom [Sensitivity Analysis of Optimal Solutions in Complex Systems Using the Criterion Method]*. Vinnytsya: UNIVERSUM-Vinnytsya, 2003. (in Ukrainian)
- H. B. Inozemtsev and V. V. Kozyrs'kyu, *Optymizatsiyni Zadachi v Enerhetytsi Sil'skoho Hospodarstva [Optimisation Challenges in Agricultural Energy]*. Kyiv: Vydavnychiy tsentr NUBiP Ukrainy, 2014. (in Ukrainian)
- D. G. Luenberger and Y. Ye, *Linear and Nonlinear Programming*. Cham: Springer International Publishing, 2016. doi: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-18842-3>.
- N. M. Cheremisin and V. V. Cherkashyna, *Kriterial'nyy Metod Analiza Tekhniko-Ekonomicheskikh Zadach v Elektricheskikh Setyakh i Sistemakh [Criterion-Based Method for Analysing Technical and Economic Problems in Electricity Networks and Systems]*. Kharkiv: Fakt, 2014. (in Russian)
- V. O. Bondarenko, M. M. Cheremisin, and V. V. Cherkashyna, *Systemnyy Pidkhid Peredproektnoyi Otsinky Povitryanykh Liniy v Umovakh Rynkovykh Vidnosyn [A Systematic Approach to Pre-Project Evaluation of Overhead Lines Under Market Conditions]*. Kharkiv: Fakt, 2013. (in Russian)
- Y. N. Astahov, V. A. Venikov, Y. M. Gorskiy, D. D. Karasev, and I. M. Markovich, *Elektricheskie Sistemy. Kibernetika Elektricheskikh Sistem [Electrical Systems. Cybernetics of Electrical Systems]*. Moscow: Vysshaya shkola, 1974. (in Russian)
- S. M. Gitelson, *Ekonomicheskie Resheniia Pri Proektirovanii Elektrosnabzheniia Promyshlennykh Predpriatii [Economic Solutions for the Design of Power Supply to Industrial Enterprises]*. Moscow: "Energiia", 1971. (in Russian)
- M. M. Cheremisin, O. M. Moroz, V. V. Cherkashyna, and O. O. Miroshnyk, *Ekonomichni Rozrakhunky v Inzhenerniy Diyal'nosti Na Prykladakh Zadach Elektroenerhetyky [Economic Calculations in Engineering Activities Using Examples From the Electricity Sector]*. Kharkiv: FOP Panov A. M., 2018. (in Ukrainian)
- V. G. Gerasimov et al., Eds., *Elektrotekhnicheskii Spravochnik [Electrician's Handbook], vol. 2, Elektrotekhnicheskii Izdeliia I Ustroistva [Electrical Products and Devices]*, 9th ed. Moscow: MEI Publishing, 2003. (in Russian)

Надійшла (received) 16.04.2022

Відомості про авторів / About the Authors

Черкашина Вероніка Вікторівна (Cherkashyna Veronika Viktorivna) – доктор технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», професор кафедри передачі електричної енергії; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5639-9722>; e-mail: veronika2473@gmail.com.

Баклицький Владислав Миколайович (Baklytskyi Vladyslav Mykolayovych) – аспірант кафедри передачі електричної енергії, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5210-5563>; e-mail: vlad95415@outlook.com.