

DOI <https://doi.org/10.32782/2078-0877-2025-25-2-11>

УДК 621.3.045.53

І. М. Трунова¹, канд. техн. наук

ORCID: 0000-0001-7510-4291

А. І. Середа¹, канд. техн. наук

ORCID: 0000-0002-7670-6822

О. А. Савченко¹, канд. техн. наук

ORCID: 0000-0002-6401-0852

С. А. Попадченко¹, ст. викладач

ORCID: 0000-0003-2537-9769

С. В. Галько², канд. техн. наук, доцент

ORCID: 0000-0001-7991-0311

¹Державний біотехнологічний університет, м. Харків²Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного

e-mail: trunova_iryana@btu.kharkov.ua

ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНА МОДЕЛЬ КАПІТАЛЬНОГО РЕМОНТУ СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА ІЗ ЗАМІНОЮ ОБМОТОК

Анотація. Запропоновано вдосконалення оптимізаційної моделі визначення технічних характеристик силового трансформатора під час капітального ремонту із заміною обмоток шляхом виявлення найбільш впливових чинників на результат оптимізації. Розроблено техніко-економічну модель капітального ремонту силового трансформатора із заміною обмоток на основі багатокритеріальної оптимізації, а саме з групами цільових функцій: за конструктивними критеріями; за технічними критеріями (втратами неробочого ходу та короткого замикання); за економічними критеріями, зокрема з використанням строку окупності інвестицій. Приведено приклад апробації запропонованої техніко-економічної моделі капітального ремонту силового трансформатора із заміною обмоток із використанням комп'ютерних технологій.

Ключові слова: багатокритеріальна оптимізація, техніко-економічні показники, ремонт, обмотки трансформатора, комп'ютерні технології.

Постановка проблеми. Ефективна робота енергетичного обладнання є основою енергетичної безпеки [1; 2], яка неможлива без значної уваги до технічного стану обладнання [3; 4], до реконструкції та модернізації обладнання [5–7]. Найбільш відповідальними об'єктами розподільних мереж є силові трансформатори, відмова яких призводить до значних економічних збитків, зокрема, окрім наслідків перерв в електропостачанні, ще й тому, що їхня вартість може становити (залежно від потужності) майже половину вартості трансформаторної підстанції [8; 9]. Відповідно, велика увага приділяється своєчасному виявленню та усуненню дефектів, не допускаючи їхнього розвитку до відмови силових трансформаторів [10; 11]. Однак і внаслідок певних технологічних порушень, і внаслідок ракетних обстрілів існують відмови силових трансформаторів, зокрема з пошкодженням обмоток [12–14]. У планах розвитку Операторів систем розподілу (ОСР) на основі якісної оцінки технічного стану об'єктів розподільних мереж, згідно з [15–17], плануються роботи з усунення дефектів, реконструкції та модернізації обладнання, до яких відносяться і роботи з капітального ремонту (КР) силових трансформаторів, зокрема із заміною обмоток [18]. Тому у разі, коли залишився неушкодженим магнітопровід, але є необхідність заміни обмоток, необхідно провести відповідні розрахунки та визначити конструктивні розміри обмоток і технічні характеристики, які будуть у відремонтованого трансформатора, ураховуючи певні вимоги стандарту [19] щодо їх можливих відхилень та новий сучасний сортамент обмоткових проводів, що є на ринку відповідної продукції. Однак також є важливим обґрунтування і економічних показників КР силового трансформатора із заміною обмоток, оскільки, наприклад, можна вибрати той чи інший обмотковий провід, що впливатиме не лише на технічні характеристики, а й на економічні показники ремонту [20; 21].



Також, можливо, КР із заміною обмоток може виявитися економічно недоцільним порівняно з придбанням нового трансформатора. Тому вдосконалення оптимізаційної моделі КР силового трансформатора із заміною обмоток є актуальним.

Формулювання мети статті. Метою дослідження є вдосконалення оптимізаційної моделі КР ремонту силового трансформатора із заміною обмоток. Для досягнення вказаної мети поставлене завдання – розробити техніко-економічну модель КР силового трансформатора на основі багатокритеріальної оптимізації.

Аналіз останніх досліджень. Питанням оптимізації технічних та конструктивних параметрів електротехнічного обладнання присвячено багато публікацій, зокрема [22–25]. Під час конструювання обмоток силового трансформатора для певного магнітопроводу використовують відомі типові методики, що приведені, наприклад, у [26; 27], та орієнтуються на вимоги нормативних документів, зокрема ті, що вказані у [19] стосовно допустимих відхилень технічних характеристик (утрат неробочого ходу, утрат короткого замикання тощо). Тобто проєктують нову обмотку, при цьому внаслідок можливості використання комп'ютерних розрахунків для виконання багатьох ітерацій із різними змінними даними силовий трансформатор може отримати покращені технічні характеристики з новою обмоткою, що виконана сучасним проводом. Про відповідну математичну модель згадувалося у [28–30], при цьому можна відзначити, що, по-перше, необхідно більш детально проаналізувати групи параметрів оптимізації для виявлення найбільш впливових чинників на результат розрахунків. По-друге, ця оптимізаційна модель спрямована лише на пошук найбільш оптимальних технічних характеристик, при цьому, можливо, у математичному моделюванні КР силового трансформатора із заміною обмоток доцільно враховувати і техніко-економічні показники, які також базуються на певних нормативно-технічних документах, таких як [32–34].

Основна частина. Існують певні технічні та конструктивні параметри силового трансформатора, які перед початком його КР задані:

S_n – номінальна потужність трансформатора, кВ·А;

$U_{ВН}, U_{НН}$ – номінальна вища напруга (ВН) та нижча напруга (НН);

K – коефіцієнт трансформації за паспортними даними трансформатора;

P_0 – втрати неробочого ходу (н. х.) за паспортними даними трансформатора, Вт;

P_K – втрати короткого замикання (к. з.) за паспортними даними трансформатора, Вт;

u_K – напруга к. з. за паспортними даними трансформатора, %;

i_0 – струм н.х. за паспортними даними трансформатора, %;

$D_{СТ}$ – діаметр, описаний навколо стрижня, мм;

A, B – ширина та глибина стрижня (а також кількість і розміри ступенів стрижня та аналогічні розміри ярма), мм;

C – міжосьова відстань, мм;

h_{cm} – висота стрижня, мм тощо.

Також існує група параметрів для перевірки на відповідність вимогам [8], це такі параметри, як:

$K_p = \frac{W_{внIII}}{W_{нн}}$ – розрахунковий коефіцієнт трансформації (для трансформаторів із коефіцієнтом трансформації фазних напруг 3 та менше, а також на неосновному відгалуженні допустимі відхилення $\pm 1,0\%$, а для всіх інших трансформаторів – на основному відгалуженні $\pm 0,5\%$ [19]);

P_{op} – розрахункові втрати н. х., Вт (граничне відхилення $+15\%$ [19]);

P_{kp} – розрахункові втрати к. з. на основному відгалуженні, Вт (граничне відхилення для всіх дво- та триобмоткових трансформаторів та для основної пари обмоток триобмоткових авто-

трансформаторів +10%; для неосновних пар обмоток триобмоткових автотрансформаторів – +20% [19]);

u_{kp} – розрахункова напруга к. з., % (граничні відхилення $\pm 10\%$ [19]);

i_{0p} – розрахунковий струм н. х., % (граничне відхилення +30% [19]).

Група параметрів, що визначаються перевіркою можливості розміщення обмоток у вікні магнітопроводу без порушення вимог щодо ізоляційних відстаней, а саме:

h_{HH} та h_{BH} – дійсна висота обмотки НН та ВН, мм (має бути менша за орієнтовно визначені h'_{HH} та h'_{BH} з урахуванням певних ізоляційних відстаней);

параметр, що визначається перевіркою можливості розміщення обмоток у вікні магнітопроводу за умовою

$$C - D_{зов}^{BH} \geq \delta_{11}, \quad (1)$$

де $D_{зов}^{BH}$ – зовнішній діаметр обмотки ВН, мм;

δ_{11} – ізоляційна відстань між обмотками ВН суміжних стрижнів, мм.

Звідси, техніко-економічна модель КР силового трансформатора із заміною обмоток матиме вигляд (вирази (2) – (7)):

– цільові функції за конструктивними критеріями:

а) для проводу круглого перерізу з діаметром d :

$$d_i \in D; d_i \rightarrow d_{opt}, \quad (2)$$

б) для проводу прямокутного перерізу з розмірами $w \times l$:

$$w_i \times l_i \in W \times L; w_i \times l_i \rightarrow w_{opt} \times l_{opt}; \quad (3)$$

– цільові функції за технічними критеріями:

$$P_{opi} \in P; P_{op\ opt} = P_{op\ min} \quad (4)$$

$$P_{kpi} \in P_{kp}; P_{kp\ opt} = P_{kp\ min}; \quad (5)$$

– цільова функція за економічними критеріями (наприклад, із використанням строку окупності інвестицій T_o):

$$T_{oi} \in T; T_{oi} \rightarrow T_{o\ min}; \quad (6)$$

– обмеження:

Вираз (7) справедливий у частині, що стосується втрат короткого замикання, для всіх дво- та триобмоткових трансформаторів та для основної пари обмоток триобмоткових автотрансформаторів (для неосновних пар обмоток триобмоткових автотрансформаторів $\left(\frac{P_{kp} - P_k}{P_k}\right) \leq 0,2$).

Розглянемо приклад апробації запропонованої техніко-економічної моделі КР силового трансформатора ТМ-40/10 із заміною обмоток. А саме: на етапі конструювання обмотки ВН вибір проводу виконуємо, використовуючи каталожні дані щодо продукції одного з провідних постачальників мідного та алюмінієвого дроту в Україні та Європі [34], зокрема, ПЕВТЛ-1-200, сортамент діаметрів якого від 0,16 мм до 2,5 мм. На рис. 1 приведено фрагмент результатів автоматизованого визначення декількох значень діаметру проводу (із загального масиву діаметрів) на певному етапі розрахунків. Осередки з проміжними результатами розрахунків та для діаметрів від 0,16 до 0,8 мм, де не виконується вимога щодо граничних утрат к. з., скриті. Зеленим кольором висвітлено рядки з результатами розрахунків для діаметрів проводів, що задовольняють таким вимогам приведеної моделі, як:

$$\left. \begin{aligned} h_{\text{HH}} &\leq h'_{\text{HH}}, h_{\text{BH}} \leq h'_{\text{BH}}; \\ C - D_{\text{ЗОВ}}^{\text{BH}} &\geq \delta_{11}; \\ \left(\frac{P_{\text{оп}} - P_0}{P_0} \right) &\leq 0,15; \\ \left(\frac{P_{\text{кр}} - P_{\text{к}}}{P_{\text{к}}} \right) &\leq 0,1; \\ -0,005 &\leq \left(\frac{K_{\text{р}} - K}{K_{\text{р}}} \right) \leq 0,005, K > 3; \\ -0,01 &\leq \left(\frac{K_{\text{р}} - K}{K_{\text{р}}} \right) \leq 0,01, K \leq 3; \\ -0,3 &\leq \left(\frac{i_{\text{оп}} - i_0}{i_0} \right) \leq 0,3; \\ -0,1 &\leq \left(\frac{U_{\text{кр}} - U_{\text{к}}}{U_{\text{к}}} \right) \leq 0,1. \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

- обмеження щодо ізоляційних відстаней $h_{\text{BH}} \leq h'_{\text{BH}}$ та $C - D_{\text{ЗОВ}}^{\text{BH}} \geq \delta_{11}$;
- обмеження щодо вимог [19] стосовно граничного відхилення розрахункових утрат к. з. на основному відгалуженні $\left(\frac{P_{\text{кр}} - P_{\text{к}}}{P_{\text{к}}} \right) \leq 0,1$.

Умовним форматуванням автоматично висвітлено червоним кольором результати розрахунків, які не відповідають зазначеним обмеженням. Таким чином, на цьому етапі визначені п'ять діаметрів проводу ПЕВТЛ-1-200 (1,06 мм; 1,12 мм; 1,18 мм; 1,25 мм та 1,4 мм). У подальших розрахунках цей перелік може скоротитися до єдиного проводу з оптимальним діаметром $d_{\text{опт}}$.

Техніко-економічні розрахунки, окрім витрат на той чи інший провід, мають урахувувати, наприклад, почасову оплату праці робітників і, відповідно, час, що ними витрачається [31]. Згідно з [33], заміну обмоток при КР силового трансформатора виконує бригада електрослюсарів з одного електрослюсаря 4-го розряду та одного електрослюсаря 3-го розряду протягом 44,9 год. Згідно з [34], демонтаж та монтаж силового трансформатора виконують електромонтер 4-го розряду та електромонтер 2-го розряду протягом 2,5 год. Також для цього використовується машина бригадна (1,25 маш. год) та кран на автомобільному ходу (0,51 маш. год).

У [30] вказана вартість 1 маш. год (хоча сьогодні цей стандарт чинний, однак вартісні показники необхідно враховувати сучасні з урахуванням інфляції). Після КР із заміною обмоток електромонтер 6-го розряду та електромонтер 3-го розряду виконують випробування силового трансформатора протягом 23,5 год (перелік випробувань та норми часу приведені в [35; 36]). Таким чином, капітальні витрати становитимуть витрати на зарплату, на витратні матеріали, на використання машини та крану, на провід [37–39]. Вартість проводів залежить від ваги про-

	A	G	J	N
183	Ø, мм	$h_{\text{BH}} \leq h'_{\text{BH}}$	$C - D_{\text{ЗОВ}}^{\text{BH}} \geq \delta_{II}$	Перевірка умови за стандартом [6]
184		$h'_{\text{BH}} - h_{\text{BH}}$	$C - D_{\text{ЗОВ}}^{\text{BH}} - \delta_{II}$	$\left(\frac{P_{\text{кр}} - P_{\text{к}}}{P_{\text{к}}}\right) \leq 0,1$
213	0,8	8,61	26,42	0,61
214	0,85	31,21	23,97	0,47
215	0,9	14,63	22,37	0,35
216	0,95	-2,95	20,68	0,25
217	1	18,75	18,36	0,16
218	1,06	0,42	16,37	0,07
219	1,12	18,05	13,73	-0,01
220	1,18	1,58	11,75	-0,07
221	1,25	14,15	8,79	-0,13
222	1,32	-3,28	6,48	-0,19
223	1,4	7,60	3,20	-0,24
224	1,5	10,89	-0,78	-0,29
225	1,6	-9,61	-3,98	-0,34
226	1,7	-4,96	-7,96	-0,37
227	1,8	-0,88	-11,88	-0,40
228	1,9	3,31	-15,87	-0,43
229	2	5,85	-19,79	-0,45
230	2,12	6,98	-24,41	-0,47
231	2,24	-10,82	-28,25	-0,49
232	2,36	-11,34	-32,88	-0,51
233	2,5	-12,50	-38,08	-0,52

Рис. 1. Фрагмент результатів проміжного етапу визначення $d_{\text{опт}}$

воду (тобто конструктивних розмірів), хоча в межах сортаменту відрізняється незначно. Тому в даному прикладі слід обрахувати строк окупності інвестицій як для КР трансформатора, так і на встановлення нового трансформатора та порівняти отримані результати, зробивши висновок щодо доцільності КР силового трансформатора із заміною обмоток, використовуючи вибраний провід оптимального діаметру, що дасть змогу отримати оптимальні технічні характеристики трансформатора (у разі кращих, аніж у стандартного трансформатора, це також можна врахувати у техніко-економічних розрахунках).

Висновки. Приведена техніко-економічна модель КР силового трансформатора із заміною обмоток на основі багатокритеріальної оптимізації може бути корисною для обґрунтування доцільності та забезпечення якісного ремонту пошкоджених обмоток за справного магнітопроводу для подальшої ефективної експлуатації відремонтованого обладнання.

Список використаних джерел

1. Redko K., Borychenko O., Chernyavskiy A., Sayenko V., Dudnikov S. Comparative analysis of innovative development strategies of the fuel and energy complex of Ukraine and EU countries: international experience. *International Journal of Energy Economics and Policy*. 2023. 13(2). 301–308. <https://doi.org/10.32479/ijeep.14035>
2. Korchevoi Y. State and prospects of solid fuel energy development of Ukraine. Heat energy – new challenges of the time. Lviv: Ukrainian Technologies Fund. 2009. 29–35.
3. Fialko. N. Environmental aspects of heat recovery systems of boiler plants. *E3S Web of Conf.* 2019. 10010. art. 00015. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201910000015>.
4. Миколук О., Желавська І., Ляховець В. Формування ключових векторів забезпечення енергетичної безпеки крізь призму інноваційного розвитку альтернативних джерел енергії. *Вісник Хмельницького національного університету*. 2023. 26(1). 1–10.

кого національного університету. *Економічні науки*. 2018. 3(1). С. 199–204. <http://elar.khnu.km.ua/jspui/handle/123456789/6698>

5. Al Issa H.A., et al. Databases Case Study in Substantiation of Reconstruction of Power Distribution Networks Objects. *2021 IEEE International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES)*, Kremenchuk, Ukraine. 2021. 1–6. <https://doi.org/10.1109/MEES52427.2021.9598684>

6. Trunova I., Miroshnyk O., Moroz O., Savchenko O., Pazyi V., Sereda A., Halko S., Buinyi R. The Substantiation of Reconstruction of Power Distribution Networks Objects. *2021 IEEE KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)*, Kharkiv, Ukraine. 2021. 126–131. <https://doi.org/10.1109/KhPIWeek53812.2021.9570107>

7. Al-Issa H.A., Qawaqzeh M., Kurashkin S., Halko S., Kvitka S., Vovk O., Miroshnyk O. Monitoring of power transformers using thermal model and permission time of overload. *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)*. 2022. 12(3). 2323–2334. <https://doi.org/10.11591/ijece.v12i3.pp2323-2334>

8. Krasnozhon A.V., Buinyi R.O., Dihtyaruk I.V., Kvytsynskyi A.O. The investigation of distribution of the magnetic flux density of operating two-circuit power line 110 kV «CHTPP-Chernihiv-330» in the residential area and methods of its decreasing to a safe level. *Electrical Engineering & Electromechanics*. 2020. 6. 55–62. <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2020.6.08>

9. Zamulko A., Chernetska Y. Benchmarking method for analyzing the efficiency of the electricity distribution system operators. *Power engineering: economics, technique, ecology*. 2018. 3. 35–44. <https://doi.org/10.20535/1813-5420.3.2018.164264>

10. Ikonnikova S., Schlüter A., Brandner B. The Rising Role of Prosumers in the Energy System/ 2022. 255–269. <https://doi.org/10.3139/9783446471757.018>

11. Medved' D., Kolcun M., Pavlik M., Bena L., Mester M. Analysis of Prosumer Behavior in the Electrical Network. *Energies*. 2021. 14. <https://doi.org/10.3390/10.3390/en14248212>

12. Josep Franklin Sihite. Failure Analysis of Power Transformer Based on Fault Tree Analysis. Kyoto University. 2013. <https://doi.org/10.14989/DOCTOR.K17885>

13. Matukhno V., Baidak Yu., Tomlein P. Thermal subsystem of voltage distribution transformer. *Refrigeration Engineering and Technology*, 2016. 52(6). 58–64.

14. Dwarakesh K., Jeyasekar C. Design and Implementation of Low-cost Remote Monitoring of Distribution Transformer with Consumer wise Energy recording, Load control & Power theft detection using Internet of Things. *IJAREE*, July 2018, 1(1). 71–79.

15. Трунова І.М., Дишлевський А.В., Куліш Л.О. Вдосконалення методики обґрунтування реконструкції об'єктів розподільних мереж. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія «Енергетика, надійність та енергоефективність»*. 2020. № 1(1). 84–88. <https://doi.org/10.20998/2224-0349.2020.01.12>

16. Al-Quraan T.M.A., Vovk O., Halko S., Kvitka S., Suprun O., Miroshnyk O., Nitsenko V., Zayed N.M., Islam A. Energy-Saving Load Control of Induction Electric Motors for Drives of Working Machines to Reduce Thermal Wear. *Inventions*. 2022. 7. 92. <https://doi.org/10.3390/inventions7040092>

17. Методичні вказівки з обліку та аналізу в енергосистемах технічного стану розподільних мереж напругою 0,38–20 кВ з повітряними лініями електропередачі: СОУ-Н МПЕ 40.1.20.576:2005. Київ : ГРІФРЕ, 2005. 67 с.

18. Красножон А.В., Буйний Р.О., Пентегов І.В. Розрахунок втрат активної потужності в заземлювальному проводі повітряних ліній електропередачі. *Технічна електродинаміка*. 2016. № 4(2016). С. 23–25. <https://doi.org/10.15407/techned2016.04.023>

19. Трансформатори силові. Типова інструкція з експлуатації: СОУ 40.1-21677681-07:2009. Міненерго України, 2009. 111 с.

20. Pignati M., Zanni L., Romano P., Cherkaoui R., Paolone M. Fault detection and faulted line identification in active distribution networks using synchrophasors-based real-time state estimation. *IEEE Trans. Power Del.* 2017. 32(1). 381–392.

21. Ren J., Venkata S., Sortomme E. An accurate synchrophasor based fault location method for emerging distribution systems. *IEEE Trans. Power Del.* 2014. 29(1). 297–298.

22. Halko S., Halko K. Research of electrical and physical characteristics of the solar panel on the basis of cogeneration photoelectric modules. *Integración de las ciencias fundamentales y aplicadas en el paradigma de la sociedad post-industrial: Colección de documentos científicos «ΛΟΓΟΣ» con actas de la Conferencia Internacional*

Científica y Práctica, 24 de abril de 2020. Barcelona, España: Plataforma Europea de la Ciencia. 2020. 2. 39–44. <https://doi.org/10.36074/24.04.2020.v2.10>

23. Галько С.В. Експериментальне дослідження і визначення параметрів когенераційного фотоелектричного модуля для гібридних сонячних електростанцій. *Традиційні та інноваційні підходи до наукових досліджень* : матеріали Міжнар. наук. конф., 10 квітня 2020 р. Луцьк : МЦНД. 2020. Т. 1. 83–90. <https://doi.org/10.36074/10.04.2020.v1.10>

24. Галько С.В. Використання когенераційних фотоелектричних модулів для зарядки акумуляторів електромобілів. *Праці ТДАТУ. Технічні науки*. 2019. Вип. 19. Т. 3. 130–141. <https://doi.org/10.31388/2078-0877-19-3-130-141>

25. Alrefo I.F., Matsulevych O., Vershkov O., Halko S., Suprun O., Miroshnyk O. Designing the working surfaces of rotary planetary mechanisms. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2023. 4. 82–88. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2023-4/082>

26. Savchenko O., Miroshnyk O., Moroz O., Trunova I., Sereda A., Dudnikov S., Kozlovskyi O., Buinyi R., Halko S. Improving the Efficiency of Solar Power Plants Based on Forecasting the Intensity of Solar Radiation Using Artificial Neural Networks. *2021 IEEE 2nd KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)*, Kharkiv, Ukraine. 2021. 137–140, <https://doi.org/10.1109/KhPIWeek53812.2021.9570009>

27. Перевірочний розрахунок силового трансформатора : методичні вказівки до виконання розрахункових робіт з дисц. «Основи технічної експлуатації енергетичного обладнання систем електропостачання» для студентів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти денної та заочн. форм навч., спец.: 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка / упоряд.: В.Г. Пазій, І.М. Трунова. Харків : ДБТУ, 2022. 35 с.

28. Viacheslav B., Roman B., Andriy S., Volodymyr T. Integration of New Single-Phase-to-Ground Faults Detection Devices into Existing SmartGrid Systems. *2019 IEEE 6th International Conference on Energy Smart Systems (ESS)*, Kyiv, Ukraine. 2019. 84–87. <https://doi.org/10.1109/ESS.2019.8764237>

29. Розводюк М.П., Проценко Д.П., Бомбик В.С., Жуков О.А. Розрахунок і проектування трифазного силового масляного трансформатора. Курсове проектування : електронний навчальний посібник. Вінниця: ВНТУ, 2023. 149 с.

30. Четверіков Ю.А. Якісний розрахунок обмоток силового трансформатора як основа забезпечення якості ремонту. *Матеріали Всеукраїнської науково-практичної конференції «Електроенергетика, електромеханіка та технології в АПК: наукові пошуки молоді»*. Харків : ДБТУ, 2024 р. 44. URL: <https://btu.kharkov.ua/nauka/konferentsiyi> (дата звернення: 19.02.2025).

31. Krasnozhan A.V., Buinyi R.O., Pentegov I.V. Calculation of active power losses in the grounding wire of overhead power lines. *Technical Electrodynamics*. 2016. 4. 23–25. <https://doi.org/10.15407/techned2016.04.023>

32. Четверіков Ю.А., Трунова І.М. Дослідження математичної моделі оптимізації технічних характеристик трансформаторів напруги. *Матеріали XX Міжнародного форуму молоді «Молодь і індустрія 4.0 в XXI столітті»*. 2024. URL: <https://btu.kharkov.ua/nauka/konferentsiyi> (дата звернення: 19.02.2025).

33. Норми часу на ремонт основного і допоміжного енергетичного обладнання. Частина 06. Ремонт трансформаторів і реакторів. Методичні рекомендації. СОУ-Н МЕН 40.1-00130044-602/90:2014. ДП «Львівське конструкторське бюро». 2014. 184 с.

34. Норми часу на ремонт і технічне обслуговування електричних мереж. Том 1. Повітряні лінії електропередач напругою 0,4-20 кВ, трансформаторні підстанції напругою 6-20/0,4 кВ, розподільні пункти напругою 6-20 кВ СОУ 40.1-00130044-834:2010. Київ : Мінпаливенерго України, 2010. 221 с.

35. Норми часу на ремонт і технічне обслуговування електричних мереж. Роботи служби ізоляції. Том 8: СОУ-Н ЕЕ 05.837:2006. ДП «Львівське конструкторське бюро», 2006. 122 с.

36. Офіційний сайт ТОВ ВП «Акватон». URL: <https://akvaton.com/uk> (дата звернення: 19.02.2025).

37. Dwornicka R., Pietraszek J. The outline of the expert system for the design of experiment. *Production Engineering*. 2018. 20. 43–48. <https://doi.org/10.30657/pea.2018.20.09>

38. Kennedy O., Elizabeth A., Robert O., John S. Monitoring And Fault Detection System For Power Transmission Using GSM Technology. *World Congress in Computer Science Computer Engineering & Applied Computing*, July 2017. 93–97.

39. Krynke M., Klimecka-Tatar D. The use of Computer Simulation Techniques in Production Management. *Materials Research Proceedings*. 2022. 24. 126–133. <https://doi.org/10.21741/9781644902059-19>

Стаття надійшла до редакції 23.02.2025



I. Trunova¹, A. Sereda¹, O. Savchenko¹, S. Popadchenko¹, S. Halko²

¹*State Biotechnological University*

²*Dmytro Motornyi Tavria State Agrotechnological University*

TECHNO-ECONOMIC MODEL OF POWER TRANSFORMER OVERHAUL WITH REPLACEMENT OF WINDINGS

Summary

The techno-economic model of power transformer overhaul with replacement of windings based on multi-objective optimization has been developed. This model is defined groups of target functions. The first group of target functions is by sizes criteria (finding the optimal structural wire size to ensure that the winding is placed in the magnetic pipeline window without breaking the requirements for insulating distances, and ensuring deviations of technical indicators of transformer that do not exceed the maximum permissible values). The second group of targeted functions is by technical criteria (the choice of variations of calculations with minimal no-load losses and short circuit losses). The third group - according to economic criteria, in particular, is using the payback period of investments, which allows choosing the most economical design option of the power transformer winding or the feasibility of replacing the damaged transformer with a new one. An example of testing the proposed techno-economic model of power transformer overhaul with replacement of windings using computer technologies at the stage of choosing a structural wire size for high voltage winding under conditions of restrictions on the maximum permissible insulating percussions in the window of the magnetic pipeline and the maximum permissible deviations of short-circuit losses is given. An example of determining the components for economic substantiation of power transformer overhaul with the replacement of windings using current regulatory documents is also given. It is concluded that the proposed techno-economic model of power transformer overhaul with replacement of windings on the basis of multi-objective optimization can be useful for substantiating the feasibility and ensuring the quality repair of damaged windings with proper magnetic pipeline for further efficient operation of the repaired equipment.

Keywords: multi-objective optimization, techno-economic indicators, transformer winding, computer technologies.