

Мінко Олександр Миколайович, к.т.н., ст. досл., начальник науково-дослідної частини, +38(095)602-32-72, dr.alexandr.minko@gmail.com, ORCID ID: 0000-0003-3206-0131

*Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут»
вул. Вадима Манька, 17, м. Харків, 61070*

РОЗРОБКА ТРАНСФОРМАТОРА НАПРУГИ ЗА ДОПОМОГОЮ МУЛЬТИПАРАМЕТРИЗАЦІЇ

***Анотація.** Розроблено мультипараметричну математичну модель електромеханічного перетворювача енергії (на прикладі трансформатора напруги), який є невід'ємною складовою енергетичної установки з генерації електричної енергії. Модель враховує конструкційні показники трансформатора, параметри властивостей конструкційного матеріалу та електричні навантаження. Модель описує взаємний вплив електродинамічних, механічних та тепло-вентиляційних процесів що відбуваються в трансформаторі. Отримані результати функціонально розширюють інформативність про проектування електромеханічних перетворювачів енергії та дозволяють враховувати багатофізичні процеси при розробці та моделюванні різних видів електромеханічних перетворювачів енергії.*

***Ключові слова:** електромеханічний перетворювач енергії, трансформатор, мультипараметрична модель, електрична машина, багатофізичні процеси.*

Minko Oleksandr, Ph.D., Senior Researcher, Head of Research Department, +38(095)602-32-72, dr.alexandr.minko@gmail.com, ORCID ID: 0000-0003-3206-0131
*National Aerospace University «Kharkiv Aviation Institute»
17 Vadym Manko St., Kharkiv, Ukraine, 61070*

VOLTAGE TRANSFORMER DESIGN USING MULTIPARAMETERIZATION

***Abstract.** Multiparametric mathematical model of an electromechanical energy converter (using the example of a voltage transformer), which is an integral part of a power plant for generating electrical energy, has been developed. The model takes into account the structural parameters of the transformer, the parameters of the properties of the structural material and electrical loads. The model describes the mutual influence of electrodynamic, mechanical and heat-ventilation processes occurring in the transformer. The results obtained functionally expand the information content of the design of electromechanical energy converters and allow us to take into account multiphysical processes in the development and modeling of various types of electromechanical energy converters.*

***Keywords:** electromechanical energy converter, transformer, multiparametric model, electric machine, multiphysics processes.*

Вступ. Для розподілення електричної енергії від джерел енергії до споживача, використовуються трансформатори напруги (ТР) в комплексі з генеруючою енергетичною установкою (ЕУ). Особливу актуальність використання ТР набувають

умови автономної роботи електромережі для обмеженої кількості споживачів і коли необхідно транспортувати електричну енергію на відносно великі відстані від ЕУ до споживача. Тому склад та проектування електричної мережі необхідно розглядати разом із ТР який знижує (або підвищує) показник напруги [1].

У зв'язку з тим що створення ТР є достатньо трудомістким та багатогранним процесом розробки, необхідно застосовувати сучасні методи проектування. Слід зазначити, що основні функціональні вузли ТР перебувають під багатофізичними динамічними навантаженнями, такими як електромагнітні навантаження, електромеханічні та теплові. Все це, та режим роботи показників, які постійно змінюються, залежно від режиму роботи ЕУ вимагає охопити багато показників конструкції ТР під час його розробки. Враховувати багато показників проектування (або критеріїв) можливо за допомогою використання мультипараметричного проектування вузлів ЕМПЕ, який базується на основі математичного апарата параметричного проектування, але має свої особливості [2]. Для застосування такого підходу проектування необхідно розробити мультипараметричну математичну модель та сформулювати особливості її використання. Окремо параметричному та класичному проектуванню різних типів ЕМПЕ присвячено ряд наукових та науково-практичних робіт, які детально розглянуто в [3–6].

Аналіз останніх досліджень та публікацій в області розробки трансформаторів та електричних машин загалом, свідчить про розвиток та вдосконалення методів розробки магнітопроводів [7] за рахунок використання аморфних та нанокристалічних магнітних матеріалів для зменшення втрат у осерді ТР. Досліджується цифровізація та інтеграція ТР до інтелектуальних систем [8] шляхом використання систем онлайн-діагностики та предиктивного аналізу для прогнозування відмов ТР, та електричної мережі в цілому. Перспективним є проектування ТР з додержанням екологічних вимог [9] що можливо реалізувати заміною традиційних мінеральних масел на біоолії та синтетичні рідини з високою пожежостійкістю. Окремим направлення розвитку електромашинобудування, зокрема

трансформаторобудування, є розробка ТР, здатних працювати з нестабільними потоками енергії від сонячних та вітрових станцій (автономні системи живлення) [10] де пропонуються методи та підходи підвищена стійкість до перевантажень та коливань напруги в ТР. Проте покращення методології проектування ТР та питання параметричного моделювання математичними засобами розглянуто недостатньо.

Мета роботи полягає в розробці мультипараметричної математичної моделі, яка розширює розрахунковий функціонал та дозволяє враховувати багатофізичні процеси, які властиві ТР напруги під час його роботи.

Основна частина.

Побудова мультипараметричної математичної моделі. Відповідно до загальної теорії електричних машин (ЕМ) та теорії електромагнітного поля, основними функціональними ознаками ТР напруги, в математичному представленні, є рівняння первинної та вторинної обмотки, які враховують опори, індуктивності та взаємний магнітний зв'язок між цими обмотками. Найчастіше вони подаються у вигляді рівнянь у просторі Лапласа [11]:

$$\begin{cases} U_1(s) = R_1 \cdot I_1(s) + L_1 \cdot s \cdot I_1(s) + M \cdot s \cdot I_2(s), \\ U_2(s) = R_2 \cdot I_2(s) + L_2 \cdot s \cdot I_2(s) + M \cdot s \cdot I_1(s), \end{cases} \quad (1)$$

де $U_1(s)$ та $U_2(s)$ – напруги на первинній та вторинній обмотках у зображеннях Лапласа, В; $I_1(s)$ та $I_2(s)$ – показник струму первинної та вторинної обмоток, А; R_1 та R_2 – показник активного опору відповідних обмоток, Ом; L_1 та L_2 – власні індуктивності відповідних обмоток, Гн; M – взаємна індуктивність обмоток, Гн.

Для дослідження роботи ТР напруги в динаміці та моделювання його властивостей пропонується використовувати передаточну функцію, яка виходить з виразу (1):

$$W(s) = \frac{R_1 \cdot I_1(s) + L_1 \cdot s \cdot I_1(s) + M \cdot s \cdot I_2(s)}{R_2 \cdot I_2(s) + L_2 \cdot s \cdot I_2(s) + M \cdot s \cdot I_1(s)} = \frac{k_{tr}}{1 + T_1 \cdot s + T_2 \cdot s^2}, \quad (2)$$

де k_{tr} – коефіцієнт трансформації, в.о.; T_1 та T_2 – сталі часу обмоток, що залежать від параметрів обмоток та взаємної індуктивності, в.о.

При проєктуванні ТР напруги мультипараметрично, змінними стають не лише електричні параметри, а й геометрія, матеріали, схеми з'єднання, обмеження за електричним струмом й навантаженням. Тому рівняння $U_1(s)$ та $U_2(s)$ мають бути представлені з залежністю від вектору параметрів \mathbf{p} і охоплювати як магнітну (намагнічувальну) гілку, так і додаткові елементи (індуктивності розсіювання та ємності). Склад вектору може варіюватись та в базовому значенні повинен містити наступні інформаційні блоки, згідно виразу [12]:

$$\mathbf{p} = f = (N_1, N_2, l_m, S_{os}, \mu(\omega), \sigma_{cu}, d_{sp}, R_1, R_2, L_{\sigma 1}, L_{\sigma 2}, C_1, C_2, R_m, L_m, \dots) \quad (3)$$

а) геометричні параметри:

N_1 та N_2 – кількість витків первинної та вторинної обмотки, шт. Визначають коефіцієнт трансформації $n_{tr} = N_1/N_2$; l_m – середня довжина магнітного шляху в осерді, м. Має стійкий зв'язок з індуктивністю та магнітними втратами електричної енергії. S_{os} – площа поперечного перетину осердя, м².

б) параметри властивостей конструкційного матеріалу:

$\mu(\omega)$ – комплексна магнітна проникність матеріалу осердя, яка залежить від частоти електричного струму, Гн/м; σ_{cu} – електропровідність міді (або іншого матеріалу обмотки), См; d_{sp} – діаметр проводу з якого виконуються обмотки ТР, м.

в) електричні параметри:

R_1 та R_2 – активні опори первинної та вторинної обмотки, Ом; $L_{\sigma 1}$ та $L_{\sigma 2}$ – показники індуктивності розсіювання первинної та вторинної обмотки, Гн. Досить часто виникають через неповний магнітний зв'язок. C_1 та C_2 – паразитні ємності обмоток ТР (між витками, шарами, до осердя), Ф.

г) електромагнітні показники:

R_m – еквівалентний опір намагнічувальної гілки, що моделює втрати в осерді (гістерезисні та вихрові струми), в.о.; L_m – індуктивність намагнічувальної гілки, яка визначає здатність осердя накопичувати магнітну енергію, в.о.

В табл. 1 наведено співзіставлення інформаційних блоків (змінних) з характеристикою їх впливу на ТР.

Враховуючи вектор параметрів \mathbf{p} перепишемо значення взаємної індуктивність трансформатора:

$$M(p) \approx k(p) \cdot \sqrt{L_1(p) \cdot L_2(p)}; \quad (4)$$

де, $k(p)$ – коефіцієнт зв'язку, покликаний навести відповідність індуктивності параметричним даним, в.о.

Таблиця 1 – Співвідношення інформаційних змінних з характеристикою їх впливу на трансформатор

Параметр	Вплив на трансформатор
N_1, N_2	Визначають коефіцієнт трансформації, похибки залежать від точності співвідношення витків
l_m	Впливає на індуктивність намагнічувальної складової трансформатора та втрати в осерді
S_{os}	Визначає здатність передавати магнітний потік; цей параметр особливо важливий для насичення
$\mu(\omega)$	Визначає індуктивність та втрати, впливає на точність у широкому діапазоні частот
σ_{cu}	Визначає активні втрати та нагрівання активних частин трансформатору
d_{sp}	Впливає на опір, тепловий режим та паразитні ємності в активній частині трансформатору
R_1, R_2	Викликають втрати потужності та похибку трансформації
$L_{\sigma 1}, L_{\sigma 2}$	Знижують точність передачі напруги, особливо при навантаженні
C_1, C_2	Важливі для високочастотних процесів, можуть викликати резонансні явища
R_m	Моделює втрати в осерді (гістерезис, вихрові струми, тощо)
L_m	Визначає здатність осердя накопичувати магнітну енергію

Виконавши перетворення виразу (2) з урахуванням (4) та представивши струми через показник напруги отримаємо наступну систему мультипараметричних рівнянь вузлів ТР напруги:

$$\begin{cases} I_{C1}(s) = \frac{U_1(s)}{Z_{C1}(s, p)} = s \cdot C_1(p) \cdot U_1(s), \\ I_{C2}(s) = \frac{U_2(s)}{Z_{C2}(s, p)} = s \cdot C_2(p) \cdot U_2(s), \\ I_m(s) = Y_m(s, p) \cdot U_1(s). \end{cases} \quad (5)$$

де $Y_m(s, p)$ – комплексна провідність двополюсника для гармонійного сигналу (адмітанс) намагнічувальної складової, в.о. Тоді мультипараметрична математична модель сукупності потозчеплень ($\lambda_1(s)$ та $\lambda_2(s)$) обмоток буде мати такий вигляд:

$$\begin{cases} \lambda_1(s) = L_1(p, s) \cdot I_1(s) + M(p, s) \cdot I_2(s), \\ \lambda_2(s) = L_2(p, s) \cdot I_2(s) + M(p, s) \cdot I_1(s). \end{cases} \quad (6)$$

Аналізуючи вираз (6) та використовуючи додаткові елементи (індуктивності розсіювання та ємності), можна скласти рівняння напруги з урахуванням цих елементів:

$$\begin{cases} U_1(s) = R_1(p) \cdot I_1(s) + s \cdot \lambda_1(s) + Z_m(s, p) \cdot I_m(s) + \frac{1}{s \cdot C_1(p)} \cdot I_{C1}(s), \\ U_2(s) = R_2(p) \cdot I_2(s) + s \cdot \lambda_2(s) + \frac{1}{s \cdot C_2(p)} \cdot I_{C2}(s); \end{cases} \quad (7)$$

В результаті побудови вищенаведеного математичного апарата мультипараметрична зведена передаточна функція з параметричною чутливістю та використанням редукції до первинної сторони з коефіцієнтом $n(p)$ має вигляд, який зазначено на рис. 1, де позначено: $S_{U_1, U_2}^{p_i}(s)$ – локальна чутливість вихідної напруги $U_2(s)$ відносно вхідної $U_1(s)$ при зміні параметрів вектору p , в.о.; $S(s)$ – узагальнена векторна чутливість передаточної функції ТР до всіх параметрів одночасно, в.о.; ∇_p – вектор часткових похідних від p , який показує напрямок і швидкість зміни передаточної функції при варіюванні параметрів.

$$W(s) = \frac{U_1(s)}{U_2(s)} \approx \frac{1}{n(p)} \cdot \frac{Z_1(s) \left| \frac{1}{s \cdot C_2(p)} \right. \cdot s \cdot M(p, s)}{Z_1(s) \left| \frac{1}{s \cdot C_2(p)} \right. + R_2(p) + s \cdot L_{\sigma 2}(p) \cdot \left(R_1(p) + s \cdot L_{\sigma 1}(p) + Z_m(s, p) \right) \left| \frac{1}{s \cdot C_1(p)} \right.};$$

$S_{U_2, U_1}^{p_i}(s) = \frac{\partial}{\partial p_i} \left[\frac{U_2(s)}{U_1(s)} \right];$ — Мультипараметрична складова функції
 $S(s) = \nabla_p \cdot \left[\frac{U_2(s)}{U_1(s)} \right];$ — Мультипараметрична складова функції

Рисунок 1 – Мультипараметрична математична модель зведеної передаточної функції ТР напруги

З рис. 1 можна зробити наступні висновки щодо отриманої мультипараметричної математичної моделі ТР напруги, при її проектному використанні [13]:

- індуктивності розсіювання залежать від геометрії вікна, кроку та укладки обмотки, для обчислення варто використовувати моделі Гровера або FEM-кореляцію для уточнення $L_{\sigma 1,2}(\mathbf{p})$;

- намагнічувальна складова визначається головним чином за допомогою $Y_m(s, \mathbf{p})$ при цьому втрати осердя слід задавати через комплексну $\mu(\omega)$, або еквівалентний $R_m(\mathbf{p})$;

- ємності $C_{1,2}(\mathbf{p})$ формуються між шарами/секціями та до осердя, та критично впливають на високочастотну похибку та перенапруги ТР.

Застосування моделі при проектуванні. Метою мультипараметричного проектування ТР напруги, встановимо визначення його основних конструкційних показників (такі як висота магнітопровода, клас ізоляції, тощо) та електромагнітних (енергетичних) параметрів.

Об’єкт розробки: трифазний трансформатор напруги.

Початкові дані: понижувальний трансформатор, рівень напруги 10/0,4 кВт, потужність 250 кВА.

Результати проектування представлено в табл. 2.

Таблиця 2 – Результати проектування ТР напруги

Параметр	Модель (описова частина):	Тип значення, та результат
Висота магнітопровода	$\begin{cases} l_{sm} = l_{obm} + l_{obm1} + l_{obm2}; \\ l_{sm} = \frac{G_{sm}}{3 \cdot q_{st} \cdot \rho_s} \cdot 10^{-6}; \end{cases}$	Числовий: $l_{sm} = 825$ мм
Схема з’єднання обмоток		Категорія: понижувача схема

Параметр	Модель (описова частина):		Тип значення, та результат
Матеріал та форма обмоток	Проводимість: мідь: 59,6 МСм/м алюміній: 37,7 МСм/м	Форма перетину: – круглий – прямокутний	Категорія: прямокутний провід із алюмінію
Відстань між обмотками	$h_{obm} = \frac{l_{obm1} + l_{obm2}}{2};$		Числовий: $l_{obm} = 110$ мм
Тип охолодження	ONAN (Oil Natural Air Natura) ONAF (Oil Natural Air Force) OFAF (Oil Forced Air Forced)		Перелік: обрано ONAN – природна циркуляція масла і повітря.
Товщина міжвіткової ізоляції	$\delta_{ms} = \frac{a_1 - (d_{pr} \cdot n_{s1}) - a_{ss}}{(n_{s1} - 1)};$		Числовий: $\delta_{ms} = 1,2$ мм
Клас ізоляції	Категорія за нагрівостійкістю: клас А – температура 105 °С клас В – температура 130 °С клас F – температура 155 °С клас Н – температура 180 °С		Категорія: клас А: органічні матеріали (папір, шовк, бавовна), просочені маслом

З табл. 2 маємо, що ТР напруги не перевищує висоту 1000 мм по габариту корпусу, схема з'єднання обмоток понижуюча (10/0,4 кВ), обмотка – алюмінієвий прямокутний дріт, відстань між крайніми точками обмоток сягає 110 мм, що є нормою для такого класу напруги, охолодження організовується за природним принципом циркуляції масла та повітря, товщина міжвіткової ізоляції знаходиться в діапазоні 0,45 – 1,35 мм [14], що є цілком задовільним показником, очікувана температура не перевищує 105°С, тому обрано достатньо бюджетний матеріал ізоляції за класом нагрівостійкості – А.

В результаті мультипараметричного проектування визначено наступні ймовірні варіанти конструкції ТР, які наведено в табл. 3. Проте нас влаштовує лише варіант під номером 1, тому що тільки він має масляне охолодження, два інші варіанти слід розглядати як валідацію отриманих результатів за мультипараметричним проектуванням.

Таблиця 3 – Варіанти вибору ТР напруги по результатам проектування

№	Марка ТР	Тип охолодження	Потужність кВА	Напруга ВН/НН кВ	Втрати холостого ходу Вт	Втрати КЗ, Вт	Струм х. ходу %	Повна маса, кг
1	ТМГ-250/10	Масляне	250	10/0,4	560	4200	1,9	1118
2	ТМЗГ-250/10	Газове	250	10/0,4	560	4200	1,9	1100
3	ТСЗ-250/10	Повітряне	250	10/0,4	570	4300	1,8	1050

Висновки. Розроблена мультипараметрична математична моделі, яка функціонально розширює інформативність про ЕМПЕ (на прикладі ТР) та дозволяє враховувати багатофізичні процеси, критеріями яких є геометричні показники конструкції, параметри властивостей конструкційного матеріалу та електричні показники ТР.

Наведений стислий приклад використання мультипараметризації для ТР напруги, в результаті якого отримано попередні значення базових показників ТР, та за показниками яких (необхідний рівень електричної потужності, тип системи охолодження, показник трансформації) можна обрати марку ТР з каталогу виробника.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Hunko I., Kudrya S., Komar V., Lezhniuk P. Mathematical model and algorithm for The determination of the Origin of Electricity from Renewable Energy sources in the Electric Power System. *Vidnovluyana Energetika*, 2024. № 2(77), P. 6–12. [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2024.2\(77\).6-12](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2024.2(77).6-12)
2. Shevchenko V.V., Minko A.N., Lazurenko K.A. Optimization of the Design and Parameters of Electromechanical Energy Converters Using Multiparametric Design Techniques – *Problems of the regional energetics, E-Journal*, 2025. № 4(68). P. 63–76 DOI: <https://doi.org/10.52254/1857-0070.2025.4-68.05>
3. Kachan Y., Shram O. On the possibility of creating Efficient Solar Power on the territory of in Industrial Enterprises. *Vidnovluyana Energetika*, 2024. № 1(76). P. 22–31. [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2024.1\(76\).22-31](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2024.1(76).22-31)
4. Zharkymbekova M., Mustafin M., Almuratova N., Chezhimbayeva K., Sakitzhanov M., Domalotov Y. Evaluation of the efficiency of energy characteristics of an asynchronous motor using frequency conversion with pulse-width modulation. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2025. № 48 (136). P. 16–25. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2025.337918>
5. Katsadze T., Chyzhevskiy V., Kovalenko M., Chumack, V., Buslova N. Normalization of non-sinusoidality indicators of magnetoelectric generator under an autonomous mode of operation. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2025. № 38 (135), p. 34–41. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2025.332187>

6. Kukhotskyi O., Gumeniuk D., Ligotskyu O., Potoskuiev O., Shyshuta A., Ostapovets A. Requirements for Maintenance of Equipment in Systems Important to Safety of Nuclear Power Plants. *Nuclear and Radiation Safety*, 2024. № 3(103). P. 52–59. [https://doi.org/10.32918/nrs.2024.3\(103\).06](https://doi.org/10.32918/nrs.2024.3(103).06)
7. Stavinskiy A. A., Tsyganov A. M. Design and Technological Proposals for Improving a Single-Phase Transformer with Laminated Magnetic Core. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2020. № 6, p. 11–17. <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2020.6.02>
8. Masud Khan. M. A. AI and Machine learning in Transformer Fault Diagnosis: a Systematic Review. *American Journal of Advanced Technology and Engineering Solutions*, 2025. № 1(01), P. 290–318. <https://doi.org/10.63125/sxb17553>
9. Wang H., Liu H., Luo Z. et al. *The Fire-Safe Insulating Oils for Power Transformers: A Critical Review. Fire Technol*, 2026. № 62, P. 6. <https://doi.org/10.1007/s10694-025-01832-9>
10. De Carne G., Zou Z., Buticchi G., Liserre M., Vournas C. Overload Control in Smart Transformer-Fed Grid. *Applied Sciences*, 2017. № 7(2), P. 208. <https://doi.org/10.3390/app7020208>
11. Теорія електричних і магнітних кіл: Підручник / С. В. Панченко, О. М. Ананьєва, М. М. Бабаєв та ін. – 2-ге вид., випр. та допов. Харків: УкрДУЗТ, 2020. 246 с., рис. 213, табл. 2. ISBN 978-617-654-135-6
12. Korovkin N. V., Sakhno L. I., Paramonov E. D., Sakhno O. I. Optimization of high-voltage test transformer design. *Power engineering research equipment technology*, 2025. № 27(3). P. 69–81. DOI:10.30724/1998-9903-2025-27-3-69-81
13. Qian T, Wei Q, Yu Z, et al. Multi-parametric Sensitivity Analysis of Improved Transformer Thermal Models Considering Nonlinear Effect of Oil Time Constant. *CSEE Journal of Power and Energy Systems*, 2023. № 9(5): 1950–1958. <https://doi.org/10.17775/CSEEJPES.2020.02430>
14. Електричні машини і трансформатори: навч. посібник / М. О. Осташевський, О. Ю. Юр'єва; за ред. д-ра техн. наук, професора. В. І. Мільх. Київ : Каравела, 2018. 452 с.

REFERENCES:

1. Hunko I., Kudrya S., Komar V., Lezhniuk P. Mathematical model and algorithm for The determination of the Origin of Electricity from Renewable Energy sources in the Electric Power System. *Vidnovluyana Energetika*, 2024. № 2(77), P. 6–12. [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2024.2\(77\).6-12](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2024.2(77).6-12)
2. Shevchenko V.V., Minko A.N., Lazurenko K.A. Optimization of the Design and Parameters of Electromechanical Energy Converters Using Multiparametric Design Techniques – *Problems of the regional energetics, E-Journal*, 2025. № 4(68). P. 63–76 DOI: <https://doi.org/10.52254/1857-0070.2025.4-68.05>
3. Kachan Y., Shram O. On the possibility of creating Efficient Solar Power on the territory of in Industrial Enterprises. *Vidnovluyana Energetika*, 2024. № 1(76). P. 22–31. [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2024.1\(76\).22-31](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2024.1(76).22-31)
4. Zharkymbekova M., Mustafin M., Almuratova N., Chezhimbayeva K., Sakitzhanov M., Domalotov Y. Evaluation of the efficiency of energy characteristics of an asynchronous motor using frequency conversion with pulse-width modulation. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2025. № 48 (136). P. 16–25. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2025.337918>
5. Katsadze T., Chyzhevskiy V., Kovalenko M., Chumack, V., Buslova N. Normalization of non-sinusoidality indicators of magnetoelectric generator under an autonomous mode of operation. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2025. № 38 (135), p. 34–41. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2025.332187>
6. Kukhotskyi O., Gumeniuk D., Ligotskyu O., Potoskuiev O., Shyshuta A., Ostapovets A. Requirements for Maintenance of Equipment in Systems Important to Safety of Nuclear Power Plants. *Nuclear and Radiation Safety*, 2024. № 3(103). P. 52–59. [https://doi.org/10.32918/nrs.2024.3\(103\).06](https://doi.org/10.32918/nrs.2024.3(103).06)

7. Stavinskiy A. A., Tsyganov A. M. Design and Technological Proposals for Improving a Single-Phase Transformer with Laminated Magnetic Core. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2020. № 6, p. 11–17. <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2020.6.02>
8. Masud Khan. M. A. AI and Machine learning in Transformer Fault Diagnosis: a Systematic Review. *American Journal of Advanced Technology and Engineering Solutions*, 2025. № 1(01), P. 290–318. <https://doi.org/10.63125/sxb17553>
9. Wang H., Liu H., Luo Z. et al. *The Fire-Safe Insulating Oils for Power Transformers: A Critical Review. Fire Technol*, 2026. № 62, P. 6. <https://doi.org/10.1007/s10694-025-01832-9>
10. De Carne G., Zou Z., Buticchi G., Liserre M., Vournas C. Overload Control in Smart Transformer-Fed Grid. *Applied Sciences*, 2017. № 7(2), P. 208. <https://doi.org/10.3390/app7020208>
11. Теорія електричних і магнітних кіл: Підручник / С. В. Панченко, О. М. Ананьєва, М. М. Бабаєв та ін. – 2-ге вид., випр. та допов. Харків: УкрДУЗТ, 2020. 246 с., рис. 213, табл. 2. ISBN 978-617-654-135-6
12. Korovkin N. V., Sakhno L. I., Paramonov E. D., Sakhno O. I. Optimization of high-voltage test transformer design. *Power engineering research equipment technology*, 2025. № 27(3). P. 69–81. DOI:10.30724/1998-9903-2025-27-3-69-81
13. Qian T, Wei Q, Yu Z, et al. Multi-parametric Sensitivity Analysis of Improved Transformer Thermal Models Considering Nonlinear Effect of Oil Time Constant. *CSEE Journal of Power and Energy Systems*, 2023. № 9(5): 1950–1958. <https://doi.org/10.17775/CSEEJPES.2020.02430>
14. *Elektrychni mashyny i transformatory: navch. posib-nyk* [Electric machines and transformers: a textbook] / М. О. Ostashevsky, О. Yu. Yuryeva; edited by Dr. Tech. Sciences, Professor. V. I. Milikh. Kyiv : Karavela, 2018. 452 p.

Стаття надійшла до редакції: 14.02.2026; рецензування: 25.02.2026;

прийнята до публікації 05.03.2026. Автори прочитали и дали згоду рукопису.

The article was submitted on 14.02.2026; revised on 25.02.2026; and accepted for publication on 05.03.2026.

The authors read and approved the final version of the manuscript.