

ПАРАМЕТРИЧНА ОПТИМІЗАЦІЯ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ЕНЕРГІЇ РІЗНИХ ТИПІВ

Мінко О. М.

Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут»

Анотація. Розглянуто методологію параметричної оптимізації електричних машин різного виду, які є складниками енергетичної установки. Досліджено підхід параметричної оптимізації електромеханічних перетворювачів енергії з декількома змінними (ефект мультипараметричності). Сформовано склад і послідовність етапів такої оптимізації та наведено приклад мультипараметричної оптимізації трансформатора напруги.

Ключові слова: електромеханічний перетворювач енергії, параметричне проектування, багатofізичні процеси, енергетична установка, оптимізація.

Вступ

Одним із основних компонентів обладнання блочно-модульних, наземних енергетичних установок (ЕУ) на основі перетворювачів різних типів енергії, як-от паротурбінні та газотурбінні установки, – це електромеханічні перетворювачі енергії (ЕМПЕ). Загалом ЕМПЕ є достатньо широким спектром енергетичних машин і обладнання для енергетичної та машинобудівної галузі.

До них належать енергетичні машини (ЕМ), які працюють у режимі перетворення електричної енергії в механічну (двигуни), перетворення механічної енергії в електричну (генератори) й перетворення показників енергії (трансформатори, компенсатори тощо). Саме це устаткування є основою технологічності та надійності роботи підприємств із генерації різних видів енергії (теплові й атомні електричні станції) та підприємств металургійного й нафтохімічного сектору промисловості.

ЕМПЕ є невід'ємним складником енергетичних комплексів і розглядаються як структурні елементи ЕУ, в яких відбуваються термодинамічні, гідродинамічні, газодинамічні та електродинамічні процеси перетворення енергії [1].

З огляду на регулярні зміни вимог до енергетичного обладнання (зокрема в частині екологічних і безпекових норм), зміни кон'юнктури ринку й гостру конкуренцію на світовому ринку машинобудування необхідно постійно шукати підходи й методи покращення конструкційних, масогабаритних і режимних показників роботи вищезазначених ЕУ. Тому методичний інструмент параметричної оптимізації ЕМПЕ є актуальним і затребуваним.

Аналіз останніх досліджень

У різний час виконувались роботи з покращення експлуатаційних показників паротурбінних і газотурбінних установок щодо електромеханічного перетворення енергії з боку збільшення ККД [2]. Удосконалювалися методи об'єктно-орієнтованого проектування ЕМПЕ [3], де результатом стало суттєве зниження строків виконання проектних робіт. Досліджувались методи й моделі створення нових типів турбомашин і установок [4], що значно покращило експлуатаційні показники стабільності роботи ЕУ в електричній мережі.

Окремо в роботах висвітлено оптимізацію енергетичних показників блочно-модульних ЕУ незначної потужності (1–2 МВт), в яких проаналізовано підходи щодо зниження показників маси й габаритів [5]. Для турбогенераторів середнього класу потужності (120–350 МВт) запропоновано науково-технічні заходи з оптимізації режимів робіт і проведення ремонтних і ремонтно-відновлювальних робіт в умовах виробництва.

Крім того, досліджувались задачі оптимізації систем забезпечення електромеханічних перетворювачів енергії [6], основною метою яких було зниження питомих витрат систем охолодження.

Проте питання розвитку методологічних засад параметричної оптимізації ЕМПЕ розкрито недостатньо змістовно й потребують додаткового дослідження.

Мета й постановка завдання

Метою цієї роботи є систематизація та узагальнення параметричного підходу оптимізації структурних елементів ЕМПЕ, які розглядаються як невід'ємний компонент ЕУ.

Для досягнення окресленої мети необхідно виконати такі завдання:

– адоптувати параметричний підхід проектування (оптимізації) ЕМПЕ до виконання процедури з декількома параметрами (ефект мультипараметричності);

– сформулювати склад і послідовність методологічних етапів мультипараметричної оптимізації для різних видів ЕМ (на прикладі трансформатора, асинхронного електродвигуна, синхронного турбогенератора);

– навести приклад мультипараметричної оптимізації базового ЕМПЕ.

Параметричне проектування перетворювачів енергії

У межах теорії електричних машин параметрична функція з декількома змінними має неklasичний математичний вигляд і може містити додаткові цільові параметри. У разі мультипараметризації для розв'язання задач, наприклад прогнозування технічного стану ЕМПЕ, загалом (у згорнутому вигляді) може бути подано узагальненим вектором [7]:

$$X^T = [x_1, x_2, \dots, x_n] \quad (1)$$

де x_1, x_2, x_j – параметри, що визначають показники ЕМ у межах моделі та можуть змінюватись під час роботи ЕУ.

Сукупність параметрів x рекомендовано складати за допомогою:

а) скалярного виразу (показник струму обмотки, товщина ізоляції, об'ємні витрати охолоджувального газу / води);

б) векторного виразу (швидкість охолоджувального середовища, електродинамічні навантаження, реакція конструктивних елементів на механічні навантаження й коливання тощо);

в) тензорного виразу (деформація конструктивних елементів від механічних, електродинамічних і теплових навантажень);

г) незалежними функціями (серед яких можливі показники шуму, коливань і вібрації).

Крім того, вищезазначені компоненти можуть бути розподіленими по всій системі ЕМ або зосереджені в конкретному функціональному вузлі (елементі).

Необхідно зазначити, що вектор (1) функціонально має відповідати вектору системних показників Y (насамперед це характеристики режиму роботи ЕМПЕ – режим двигуна або режим генератора, динаміка навантажень, динаміка нагріву й охолодження тощо). Відповідність обох зазначених векторів

можна виконати оператором H , який забезпечує виконання обраного методу розрахунку в межах прийнятої моделі:

$$X(t) = HY(t), \quad (2)$$

де t – час, год.

Тоді рух вектора X у багатопараметричному просторі Φ функції – це не що інше, як зміни технічного стану ЕМ, який можна подати таким чином:

$$X(t_i) = X(t_0) + \int_{t_0}^{t_i} \alpha_s(X, Y) dt, \quad (3)$$

де α_s – загальна швидкість змін технічного стану ЕМ, яка залежить від показника поточного стану X і вектора системних показників Y .

Для того, щоб відокремити стан вектора X , який задовольняє критеріальну умову, розділимо простір Φ поверхнею ознак Ω . Процес $X(t)$ складно передбачуваний в проміжку часу (t_0, t) і складається з імовірності розташування вектора X в області Ω :

$$P(t) = P[X(\tau) \in \Omega, \tau \in (t_0, t)], \quad (4)$$

де, τ – поточний час стану, год.

Розв'язання задачі зміни технічного стану ЕМПЕ реалізується введенням відносно незначного проміжку часу δt від зміни його стану. Тоді узагальнений вираз швидкості зміни стану $\alpha_s = dX/dt$ можна апроксимувати до такого вигляду:

$$\alpha_s \cdot X(t_i) = \frac{X(t_{i+1}) - X(t_i)}{\delta t}. \quad (5)$$

У цьому разі вираз (5) перетворюється в рекурентне рівняння $X(t_{i+1}) = A \cdot X(t_i)$, яке розв'язується програмним способом у будь-якому розрахунковому середовищі, якщо початкова умова $X(t_i = 0) = X_0$.

Оператор A переходу від i -го до $(i+1)$ -го стану не містить довільних за часом. Лінеаризація оператора в проміжку часу δt дає змогу розглядати його як суперпозицію параметрів елементарних процесів $X_1, X_2, X_3 \dots$ на цьому проміжку:

$$\bar{\delta X}_i = (\delta X_{1,i}, \delta X_{2,i}, \delta X_{3,i}, \dots) \quad (6)$$

де

$$\delta X_{1,i} = \alpha_{1,i} [X_1(t_i), X_2(t_i), X_3(t_i), \dots] \delta t;$$

$$\delta X_{2,i} = \alpha_{2,i} [X_1(t_i), X_2(t_i), X_3(t_i), \dots] \delta t;$$

$$\delta X_{3,i} = \alpha_{3,i} [X_1(t_i), X_2(t_i), X_3(t_i), \dots] \delta t;$$

$\alpha_{1,i}$, $\alpha_{2,i}$, $\alpha_{3,i}$ – швидкості елементарних на початку проміжку часу, які залежать від технічного стану ЕМ, на початку цього проміжку часу.

У кінці кожного проміжку часу маємо новий технічний стан, за яким визначаються швидкість і вектор переходу до наступного проміжку часу технічного стану ЕМ і т. д.

Зважаючи на те, що за лінеаризації переходу від одного стану до іншого накопичується похибка, для його обчислення використовується відомий метод Рунге – Кутта. Найбільш часто застосовується в пакетах інженерних програм чотирьохетапний метод Рунге – Кутта, який має такий алгоритм:

$$X_{i+1} = X_i + k_i \cdot \delta t, \quad i = 1, 2, 3 \dots \quad (7)$$

$$\text{де } k_i = \frac{[k_i(1) + 2k_i(2) + 2k_i(3) + k_i(4)]}{6};$$

$$k_i(1) = \alpha_s(t_i, X_i);$$

$$k_i(2) = \alpha_s\left(t_i + \frac{\delta t}{2}, X_i + k_i(1) \cdot \frac{\delta t}{2}\right);$$

$$k_i(3) = \alpha_s\left(t_i + \frac{\delta t}{2}, X_i + k_i(2) \cdot \frac{\delta t}{2}\right);$$

$$k_i(4) = \alpha_s(t_i + \delta t, X_i + k_i(3) \cdot \delta t).$$

Метод демонструє кращі показники за невеликого значення δt . У цьому разі ресурс ЕМ може бути визначено за умов досягнення заданого показника.

Параметрична оптимізація перетворювачів енергії різних типів

Основні методологічні етапи оптимізації ЕМПЕ різного типу в межах мультипараметричного проектування було узагальнено завдяки аналізу останніх досліджень у цьому напрямі [8–10]. Склад і послідовність методологічних етапів мультипараметричної оптимізації для різних видів ЕМ побудовано на прикладі трансформатора напруги, асинхронного електродвигуна (АД) і трифазного синхронного турбогенератора (ТГ).

Процес оптимізації з математичного погляду традиційно полягає в дослідженні функції на екстремум (або пошуку критичної точки функції). Проте відмінність від класичного пошуку екстремуму функції за мультипараметричної оптимізації полягає в тому, що змінна проектування x за своїм типом не є

значенням, а є переліком (іноді може бути виразом, системою рівнянь, рядом чи індивідуальною функцією). Тобто $x_1 \neq a$, $x_2 \neq b$, $x_3 \neq c$, а наприклад, $x_1 = [a, b, \dots]$, або $x_2 = f(a)$, або $x_3 = a+b+c$ залежно від мети та умов оптимізації. Нижче подано етапи виконання оптимізації для трьох вищезгаданих типів ЕМ у табличній формі.

1. Організація етапів виконання мультипараметричної оптимізації для трансформатора напруги.

Мета оптимізації – мінімізація втрат електричної потужності й мінімізація показника маси за умови одночасного обмеження за нагрівом і напругою короткого замикання обмоток.

У табл. 1 подано реалізацію етапів оптимізації мультипараметричної змінної $x = [x_g, x_w, x_m]$, де x_g – сукупність геометричних показників осердя трансформатора; x_w – сукупність функціональних показників обмоток трансформатора; x_m – сукупність фізико-технологічних показників матеріалу, з якого виготовлено трансформатор.

Таблиця містить такі позначки: h_c – висота стрижня (осердя) магнітопровода, мм; w_c – ширина стрижня (осердя), мм; S_c – площа поперечного перетину осердя трансформатора, мм²; n_1 – кількість витків первинної обмотки трансформатора, шт; n_2 – кількість витків вторинної обмотки трансформатора, шт.; S_{Cu} – площа поперечного перетину провідника (міді), мм²; k_f – коефіцієнт заповнення обмотки трансформатора, в.о.; r_{Fe} та r_{Cu} – питомий електричний опір електротехнічної сталі осердя й міді обмоток трансформатора, Ом; ρ_{Fe} та ρ_{Cu} – густина електротехнічної сталі осердя й міді обмоток трансформатора, кг/м³; B_{max} – максимальна допустима індукція в осерді трансформатора, Гн; t_l – товщина листів сталі в магнітопроводі, мм; k_h – коефіцієнт втрат на гістерезис, в.о.; k_e – коефіцієнт втрат на вихрові струми, в.о.; f – частота мережі, Гц; I_1 та I_2 – струм у первинній і вторинній обмотці трансформатора, А; R_1 та R_2 – активний опір первинної та вторинної обмотки, Ом; V_{Fe} та V_{Cu} – об'єм сталі в магнітопроводі (осерді) та міді обмоток трансформатора, мм³; ΔT – показник температури трансформатора, °C; w_1, w_2, w_3 – вагові коефіцієнти в сумарному критерії оптимізації (значення визначається умовами задачі), в.о.; u_k – напруга короткого замикання трансформатора, В; g_1, g_2 – показники функції обмежень, в.о.; J – сумарна цільова функція оптимізації (комбінація втрат у сталі, втрат у міді та конкуренція показника маси), в.о.; λ – множники Лагранжа в методі Karush – Kuhn – Tucker.

2. Організація етапів виконання мультипараметричної оптимізації для асинхронного електродвигуна.

Мета оптимізації – максимальне збільшення ККД й пускового моменту за умови одночасного обмеження показників струму й загального рівня шуму (вібрації) АД (табл. 2).

У табл. 2 подано реалізацію етапів оптимізації мультипараметричної змінної $x = [x_r, x_s, x_m]$, де x_r – сукупність функціональних і геометричних показників ротора АД; x_s – сукупність функціональних і геометричних показників статора АД; x_m – сукупність функціональних показників електромагнітної складової роботи АД.

Таблиця 1 – Реалізація методологічних етапів мультипараметричної оптимізації трансформатора напруги

Найменування етапів		x_g	x_w	x_m
1. Визначення складу мультипараметричних змінних		$x_g = (h_c, w_c, S_c)$	$x_w = (n_1, n_2, S_{Cu}, k_f)$	$x_m = (r_{Cu}, \rho_{Fe}, B_{max})$
2. Визначення цільової функції	Втрати в осерді	$P_{Fe}(x) = k_h \cdot f \cdot B_{max}^2 \cdot V_{Fe} + k_e \cdot f \cdot B_{max}^2 \cdot t_l^2 \cdot V_{Fe}$;		
	Втрати в міді	$P_{Cu}(x) = I_1^2 \cdot R_1(x) + I_2^2 \cdot R_2(x)$;		
	Визначення маси	$G(x) = \rho_{Fe} \cdot V_{Fe} + \rho_{Cu} \cdot V_{Cu}$;		
3. Встановлення обмежень оптимізації	Напруга короткого замикання	$u_k(x) \in [u_k^{min}, u_k^{max}]$		
	Перевищення температури	$\Delta T(x) \leq \Delta T_{max}$		
	Монтажні габарити	$g_1(x) = S_c - S_{max} \leq 0$; та $g_2(x) \leq 0$;		
4. Побудова результуючої функції мультипараметричної оптимізації		$J(x) = w_1 \cdot P_{Fe}(x) + w_2 \cdot P_{Cu}(x) + w_3 \cdot G(x)$;		
5. Виконання дослідження функції		$\nabla J(x^*) + \sum_i \lambda_i \cdot \nabla g_i(x^*) = 0$; якщо $g_i(x^*) \leq 0$; та $\lambda_i \cdot g_i(x^*) = 0$;		

Таблиця 2 – Реалізація методологічних етапів мультипараметричної оптимізації асинхронного електродвигуна

Найменування етапів		x_r	x_s	x_m
1. Визначення складу мультипараметричних змінних		$x_r = (n_r, q_r, r_{Cu}, \tau_r)$	$x_s = (n_s, q_s, N_s)$	$x_m = (g_m, B_{max})$
2. Визначення цільової функції	Коефіцієнт корисної дії	$\eta(x) = \frac{P_{out}(x)}{P_{in}(x)}$;		
	Пусковий момент	$s(x) = \frac{n_s - n}{n_s}$;		
	Втрати в АД	$Q_{em}(x) = Q_{Cu}(x) + Q_{Fe}(x) + Q_{mech}(x)$;		
3. Встановлення обмежень оптимізації	Струм пуску АД	$I_{st}(x) \leq I_{max}$		
	Рівень шуму	$THD(x) \leq THD_{max}$		
	Перевищення температури	$\Delta T(x) \leq \Delta T_{max}$		
4. Побудова результуючої функції мультипараметричної оптимізації		$J(x) = -[w_1 \cdot \eta(x) + w_2 \cdot T_{st}(x)] + w_3 \cdot Q_{em}(x)$;		
5. Виконання дослідження функції		$\nabla J(x^*) + \sum_i \lambda_i \cdot \nabla g_i(x^*) = 0$; за умови $\lambda_i \geq 0$; та $\lambda_i \cdot g_i(x^*) = 0$;		

Таблиця 3 – Реалізація методологічних етапів мультипараметричної оптимізації турбогенератора

Найменування етапів		x_{sr}	x_w	x_{om}
1. Визначення складу мультипараметричних змінних		$x_{sr} = (D_r, I_s, \delta)$	$x_w = (n_f, I_f, R_f, X_d, X_q)$	$x_{om} = (k_T, \rho_{Cu}, \rho_{Fe})$
2. Визначення цільової функції	Активна потужність	$P_{em}(x) = \frac{E_f \cdot V}{X_d(x)} \cdot \sin \phi;$		
	Запас статичної стійкості	$AS_s(x) = \max_{\phi \in (0, \pi)} \left[\frac{E_f \cdot U_s}{X_d(x)} \cdot \sin \phi - P_{mech} \right];$		
	Втрати й температура	$Q_{em}(x) = Q_{Cu}(x) + Q_{Fe}(x) + Q_{vent}(x);$		
3. Встановлення обмежень оптимізації	Механічна міцність ротора	$\sigma_r(x) \geq \sigma_a$		
	Перевищення температур	$\Delta T_s(x) \leq \Delta T_s^{max}$ та $\Delta T_r(x) \leq \Delta T_r^{max}$		
	Реактивні опори	$Q(x) \in [Q_{min}, Q_{max}]$		
4. Побудова результуючої функції мультипараметричної оптимізації		$J(x) = -[w_1 \cdot P_{em}(x) + w_2 \cdot AS_s(x)] + w_3 \cdot Q_{em}(x);$		
5. Виконання дослідження функції		$\nabla J(x^*) + \sum_i \lambda_i \cdot \nabla g_i(x^*) = 0;$ за умови $\lambda_i \geq 0;$ та $\lambda_i \cdot g_i(x^*) = 0;$		

Таблиця містить такі позначки: n_r – кількість пазів ротора, шт.; q_r – коефіцієнт заповнення пазів ротора (частка міді в пази), в.о.; r_{Cu} – питомий опір матеріалу стрижнів ротора (зазвичай алюміній або мідь), Ом; τ_r – геометричні параметри ротора (наприклад, крок пазів), в.о.; n_s – кількість пазів статора, шт.; q_s – коефіцієнт заповнення пазів статора, в.о.; N_s – кількість витків у фазній обмотці статора, шт.; g_m – повітряний зазор між ротором і статором, мм; B_{max} – максимальна індукція в електротехнічній сталі осердя статора, Гн; Q_{em} – втрати електричної енергії в АД, Вт; I_{st} – струм пуску АД, А; THD – коефіцієнт гармонічних спотворень, в.о.; T_{st} – пусковий момент, в.о.; ΔT – показник температури АД, °C; P_{out}, P_{in} – показники електричної енергії на виході та вході АД, Вт.

3. Організація етапів виконання мультипараметричної оптимізації для синхронного турбогенератора.

Мета оптимізації – максимальне збільшення показника потужності й стійкості за умови одночасного обмеження показників нагрівання та механічного навантаження ТГ.

У табл. 3 подано реалізацію етапів оптимізації мультипараметричної змінної $x = [x_{sr}, x_w, x_{om}]$, де x_{sr} – сукупність функціональних та геометричних показників статора й ротора ТГ; x_w – сукупність функціональних показників обмоток статора й ротора ТГ; x_{om} –

сукупність функціональних показників системи охолодження ТГ й сукупність теплофізичних показників елементів конструкції, залучені в процесі відведення надлишкового тепла з ТГ.

Табл. 3 містить такі позначки: D_r – діаметр ротора турбогенератора, мм; I_s – довжина статора турбогенератора, мм; δ – повітряний зазор між ротором і статором, мм; n_f – кількість витків обмотки збудження турбогенератора, шт.; I_f – струм збудження турбогенератора, А; R_f – опір обмотки збудження, Ом; X_d, X_q – синхронні реактивності по поздовжній (d) та поперечній (q) осях турбогенератора, в.о.; k_T – узагальнений коефіцієнт ефективності системи охолодження ТГ, в.о.; E_f – електрорушійна сила збудження (ЕРС ротора), В; U_s – вихідна напруга на клеммах статора ТГ, В; σ_r – фактичні механічні напруження в роторі в процесі обертання, Па; σ_a – допустимі напруження для матеріалу ротора, Па; Q – реактивна потужність турбогенератора, ВАр.

Приклад реалізації параметричної оптимізації

Параметрична оптимізація трансформатора напруги потужністю 250 кВА для мінімізації втрат і маси з огляду на обмеження за нагрівом і напругою короткого замикання розраховуються таким чином.

Вхідні показники: потужність $S_n = 250$ кВА; напруга $U_1 = 10,0$ кВ, $U_2 = 0,4$ кВ; частота мережі $f = 50$ Гц. Допустима напруга короткого замикання $u_k = 6$ %; допустиме перевищення температури $\Delta T \leq 65$ °С. Показники щодо матеріалу: сталь $\rho_{Fe} = 7650$ кг/м³; $k_h = 2,5$ в.о.; $k_e = 0,5$ в.о.; мідь $\rho_{Cu} = 8900$ кг/м³; $\sigma_{Cu} = 1,7 \cdot 10^{-8}$ Ом·м. Приймаємо такі вагові коефіцієнти: $w_1 = 0,4$; $w_2 = 0,4$; $w_3 = 0,2$.

Мультипараметричні змінні проекту: $x_g = (h_c, w_c, S_c)$; $x_w = (n_p, n_c, S_{Cu}, k_f)$ та $x_m = (r_{Cu}, \rho_{Fe}, B_{max})$. Прийmemo такі показники з довідникових джерел [11]: $B_{max} = 1,5$ Т; $t_1 = 0,3$ мм, $V_{Fe} = 0,12$ м³; $I_1 = 25$ А, $R_1 = 0,8$ Ом; $I_2 = 625$ А, $R_2 = 0,002$ Ом; $V_{Fe} = 0,05$ м³.

Відповідно до табл. 1 отримаємо:

$$P_{Fe}(x_g; x_w; x_m) \approx 33,8 \text{ Вт};$$

$$P_{Cu}(x_g; x_w; x_m) \approx 1281 \text{ Вт};$$

$$G(x_g; x_w; x_m) = 1118 \text{ кг}.$$

В умовах обмежень $u_k = 5,8\% \leq 6$ % і $\Delta T = 62 \leq 65$ °С маємо цільову функцію $J(x_g; x_w; x_m) \approx 887,5$.

Результати оптимізації: отримані показники втрат у міді домінують (1281 Вт), тому варто збільшити площу провідника S_{Cu} або коефіцієнт заповнення k_f .

Втрати в сталі відносно незначні (34 Вт), але їх можна ще зменшити за допомогою більш тонких листів осердя t_1 . Цільова функція може бути знижена способом зміни співвідношення вагових коефіцієнтів або оптимізації обмоток.

Висновки

Узагальнення й основні висновки з розроблених методичних етапів параметричної оптимізації, подані в табл. 1–3, такі:

– вагові коефіцієнти w_i мають суттєве значення в складанні результуючої функції параметричної оптимізації; необхідно ретельно нормувати ці показники за допомогою поділення на еталонні значення й виконувати добір w_i , зважаючи на їх пріоритети, зокрема ефективність охолодження, масу агрегата, ККД тощо;

– для розв'язання задач мультипараметричної оптимізації доцільно застосовувати мультиточкові методи: застосування глобальної евристики для старту (генетичний алгоритм (GA), оптимізація рою часток (PSO)), і на наступному етапі для локальної доводки можна використати більш точний інстру-

ментарій (послідовне квадратичне програмування (SQP), градієнтні методи) у знайдений області;

– певною мірою необхідно аналізувати чутливість отриманих результатів з метою розуміння стану компромісів і стабільності рішення; для цього рекомендовано оцінити $\partial J / \partial x$ і вплив обмежень на робочу точку.

Література

- Insepov A., Lesbayev Z., Tanirbergenova B. T., Alsar S., Kalybay Z., Mansurov A. (2025). Small Modular Nuclear Power Reactors as a Driver of Development of Nuclear Technologies. *Energies*, 2025. No. 18(21), pp. 5766. <https://doi.org/10.3390/en18215766>
- Petrovic M., Milic S., Petkovic D., Madzar T., Markovic N. Improving Steam Turbine Plants Performance Through Advanced Testing and Simulation. *Energies*, 2025. No. 18(7), pp. 1615. <https://doi.org/10.3390/en18071615>
- Pliugin V., Shilkova L., Letl J., Buhr K., Fajtl R. Analysis of the Electromagnetic Field of Electric Machines Based on Object-oriented Design Principles, *PIERS 2015, Prague*, 2015. pp. 2522–2527.
- Мацевитий Ю. М., Шульженко М. Г., Голощанов В. М., Гонтаровський П. П., Дедов В. Г., Костіков А. О. та ін. Підвищення енергоефективності роботи турбоустановок ТЕС і ТЕЦ шляхом модернізації, реконструкції та удосконалення режимів їхньої експлуатації. Київ: *Наукова думка*. 2008. 250 с.
- Jaszczur M., Borowski M., Halibart J., Zwolińska-Gładys K., Marczak P. Optimization of the Small Wind Turbine Design – Performance Analysis. *Computation*, 2024. No. 12(11), p. 215. <https://doi.org/10.3390/computation12110215>
- Chowdhury T., Mohsin F., Tonni M., Mita M., Ehsan M. A critical review on gas turbine cooling performance and failure analysis of turbine blades. *International Journal of Thermofluids*, 2023. 18, 100329. <https://doi.org/10.1016/j.ijft.2023.100329>
- Мінко О. М. Проектування електромеханічних перетворювачів енергії за допомогою параметризації. *Електроенергетика, електромеханіка та технології в АПК: [Електронний ресурс]: матеріали міжнар. наук.-практ. конф., 6 листопада 2024 р. / Держ. біотехнологічний ун-т. Харків, 2024. 149–150 с.* <http://btu.kharkov.ua/nauka/konferentsiyi/>
- Omar M., Sulaiman E., Soomro I. Design optimization methods for electrical machines: A review. *Journal of Electrical Engineering & Technology*, 2023. No. 18, pp. 2783–2800. <https://doi.org/10.1007/s42835-022-01358-y>
- Nell M., Kubin A., Hameyer K. Multi-Stage Optimization of Induction Machines Using Methods for Model and Parameter Selection. *Energies*, No. 2021. 14(17), pp. 5537. <https://doi.org/10.3390/en14175537>

10. Pendokhare D., Kalita K., Chakraborty S., Ćep R. A comprehensive review of parametric optimization of electrical discharge machining processes using multi-criteria decision-making techniques. *Frontiers in Mechanical Engineering*, 2024. No. 10, 1404116. <https://doi.org/10.3389/fmech.2024.1404116>
11. Електричні машини і трансформатори: навч. посібник / М. О. Осташевський, О. Ю. Юр'єва; за ред. д-ра техн. наук, професора. В. І. Милих, Київ: Каравела, 2018. 452 с.

References

1. Insepov, Z., Lesbayev, B. T., Tanirbergenova, S., Alsar, Z., Kalybay, A. A., & Mansurov, Z. A. (2025). Small Modular Nuclear Power Reactors as a Driver of Development of Nuclear Technologies. *Energies*, 18(21), 5766. <https://doi.org/10.3390/en18215766>
2. Petrovic, M. V., Milic, S., Petkovic, D., Madzar, T., & Markovic, N. M. (2025). Improving Steam Turbine Plants Performance Through Advanced Testing and Simulation. *Energies*, 18(7), 1615. <https://doi.org/10.3390/en18071615>
3. Pliugin, V., Shilkova, L., Letl, J., Buhr K., & Fajtl, R. (2015) Analysis of the Electromagnetic Field of Electric Machines Based on Object-oriented Design Principles, *PIERS 2015, Prague*, pp. 2522–2527.
4. Matsevytij, Yu. M., Shulzhenko, M. H., Holo-shchanov, V. M., Hontarovskiy, P. P., Diedov, V. H., Kostikov, A. O., et al. (2008). *Pidvyshchennia enerhoefektyvnosti roboty turbostanovok TES i TEC shliakhom modernizatsii, rekonstruktsii ta udoskonalennia rezhymiv yikhnoi ekspluatatsii* [Improving the energy efficiency of thermal power plant turbine units through modernization, reconstruction, and optimization of operating modes]. Kyiv: Naukova dumka. [in Ukrainian].
5. Jaszczur, M., Borowski, M., Halibart, J., Zwolińska-Gładys, K., & Marczak, P. (2024). Optimization of the Small Wind Turbine Design – Performance Analysis. *Computation*, 12(11), 215. <https://doi.org/10.3390/computation12110215>
6. Chowdhury, T. S., Mohsin, F. T., Tonni, M. M., Mita, M. N. H., & Ehsan, M. M. (2023). A critical review on gas turbine cooling performance and failure analysis of turbine blades. *International Journal of Thermofluids*, 18, 100329. <https://doi.org/10.1016/j.ijft.2023.100329>
7. Minko, O. (2024, November 6). *Proektuvannia elektromekhanichnykh peretvoriuvachiv enerhii za dopomohoiu parametrizatsii* [Design of electromechanical energy converters using parametrization]. In *Elektroenerhetyka, elektromekhanika ta tekhnolohii v APK: Proceedings of the International Scientific and Practical Conference* [Electronic resource] (pp. 149–150). Kharkiv: State Biotechnological University. <http://btu.kharkov.ua/ nauka/konferentsiyi/> [in Ukrainian].
8. Omar, M. F. B., Sulaiman, E. B., Soomro, I. A., & others. (2023). Design optimization methods for electrical machines: A review. *Journal of Electrical Engineering & Technology*, 18, 2783–2800. <https://doi.org/10.1007/s42835-022-01358-y>
9. Nell, M., Kubin, A., & Hameyer, K. (2021). Multi-Stage Optimization of Induction Machines Using Methods for Model and Parameter Selection. *Energies*, 14(17), 5537. <https://doi.org/10.3390/en14175537>
10. Pendokhare, D., Kalita, K., Chakraborty, S., & Ćep, R. (2024). A comprehensive review of parametric optimization of electrical discharge machining processes using multi-criteria decision-making techniques. *Frontiers in Mechanical Engineering*, 10, 1404116. <https://doi.org/10.3389/fmech.2024.1404116>
11. Ostashevskiy, M. O., Yur'yeva, O. Yu., & Milykh, V. I. (Ed.). (2018). *Elektrychni mashyny i transformatory: Navchalnyi posibnyk* [Electrical machines and transformers: Textbook]. Kyiv: Karavela. [in Ukrainian].

Мінко Олександр Миколайович, канд. техн. наук, с.д., начальник науково-дослідної частини, ORCID 0000-0003-3206-0131, dr.alexandr.minko@gmail.com, тел. +38 095-602-32-72.

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

Parametric optimization of electromechanical energy converters of various types

Problem. Due to regular changes in requirements for power equipment (in particular, in terms of environmental and safety standards), changes in the market situation and fierce competition in the global mechanical engineering market, it is necessary to constantly search for approaches and methods to improve the design, weight, dimensions and operating parameters of the above-mentioned power plants. Therefore, the methodological tool of parametric optimization of electromechanical energy converters is currently relevant and in demand. **Goal.** The purpose of the present work is to systematize and generalize the parametric approach to optimizing the structural elements of electromechanical energy converters, which are considered as an integral component of a power plant. **Methodology.** The research methodology is based on the mathematical apparatus of parametric design of electrical machines and systems. The article analyzes the parametric design of electrical machines and shows the transition to multiparametric design and optimization of electromechanical energy converters of various types. The methodology covers such converters as: voltage transformer, asynchronous electric motor and synchronous turbogenerator. **Results.** The result of the work is the adoption of a parametric approach

to the design (optimization) of electrical machines to perform the optimization procedure with several parameters (multiparametric effect). The composition and sequence of methodological stages of multiparametric optimization for various types of electromechanical energy converters are formulated. An example of multiparametric optimization of a basic voltage transformer is given. **Originality.** The formulated scientific and technical principles for performing parametric optimization of structural components of power plants significantly expand the functionality of the methodological tools when performing work on modeling and calculating electrical machines, and significantly increase the intellectual level of development. **Practical value.** The conclusions provide practical recommendations for implementing parametric optimization of electromechanical energy converters, which help organize research, modeling, and optimization of power plants and improve their overall level of competitiveness during real design.

Key words: electromechanical energy converter, parametric design, gas-physical processes, power plant, optimization.

Minko Oleksandr, Ph.D., Senior Researcher, Head of Research Department,
ORCID 0000-0003-3206-0131,
dr.alexandr.minko@gmail.com,
tel. +38 095-602-32-72.

National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute", 17 Vadym Manko St., Kharkiv, 61070, Ukraine.

Стаття надійшла до редакції / Received:
12.01.2026.

Прийнята до друку після рецензування / Revised and Accepted: 23.01.2026.

Дата публікації статті / Published: 11.05.2026.
