

**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*

## **МУЛЬТИПАРАМЕТРИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ФІЗИЧНИХ ПРОЦЕСІВ В ЕНЕРГЕТИЧНИХ МАШИНАХ НА ОСНОВІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ЕНЕРГІЇ**

***Анотація.** Предметом дослідження є систематизація та узагальнення методології мультипараметричного моделювання електромагнітних та електромеханічних процесів, що відбуваються в енергетичних машинах на основі перетворення різних видів енергії, зокрема на прикладі перетворення електричної енергії на механічну. Виокремлено показники енергетичної машини, які є основними для реалізації такого моделювання, запропоновано структуру організації моделювання електромагнітних та електромеханічних процесів, та описано зміст кожної мультипараметричної функції при встановленні показників моделювання. Наведено приклад реалізації мультипараметричного моделювання на прикладі асинхронного електродвигуна, за результатом якого виконано перехід від абстрактної електричної машини до електричної машини з індивідуальними показниками та атрибутами.*

***Ключові слова:** енергетична машина, електромеханічний перетворювач енергії, мультипараметричне моделювання, електромагнітні та електромеханічні процеси, методологія.*

**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*

## **MULTIPARAMETER MODELING OF PHYSICAL PROCESSES IN ENERGY MACHINES BASED ON ENERGY CONVERTERS**

***Abstract.** The subject of the study is the systematization and generalization of the methodology of multiparametric modeling of electromagnetic and electromechanical processes occurring in power machines based on the conversion of various types of energy, in particular, on the example of the conversion of electrical energy into mechanical energy. The indicators of the power machine that are basic for the implementation of such modeling are identified, the structure of the organization of modeling of electromagnetic and electromechanical processes is proposed, and the content of each multiparametric function when setting modeling indicators is described. An example of the implementation of multiparametric modeling is given on the example of an asynchronous electric motor, as a result of which the transition from an abstract electric machine to an electric machine with individual indicators and attributes is made.*

***Keywords:** energy machine, electromechanical energy converter, multiparametric modeling, electromagnetic and electromechanical processes, methodology*

**Вступ.** Мультипараметричне моделювання фізичних процесів в електромеханічних перетворювачах енергії (ЕМПЕ) це системний підхід до

аналізу складних взаємодій між електродинамічними, газодинамічними, електромагнітними, механічними та тепловими процесами, що відбуваються в енергетичних машинах (ЕМ) різних типів (електродвигуни, генератори, трансформатори, електричні компенсатори, тощо). Такий підхід дозволяє враховувати велику кількість змінних параметрів та враховувати їх вплив на ефективність, надійність та стабільність роботи електромеханічного пристрою, або установки. Особливості мультипараметричного моделювання фізичних процесів, що виникають під час роботи енергетичної установки (ЕУ), полягають у наступному [1]:

- нелінійність розрахунків: магнітне насичення, втрати, теплові залежності тощо [2];

- взаємозв'язок фізичних процесів: електромагнітне поле впливає на механіку, що змінює тепловий режим тощо [3];

- висока обчислювальна складність: необхідність ітераційних розрахунків або паралельних розрахунків [4];

- можливість оптимізації: пошук конструктивних рішень з найкращим заданим показником (критерієм), досягнення мінімальних втрат електричної потужності, забезпечення стабільної температури тощо [5];

- інтеграція зі стандартами: врахування стандартів (ДСТУ, ІЕС, ІЕЕЕ) під час моделювання фізичних процесів різної природи [6].

В дійсній роботі ми виокремлюємо дві області фізичних процесів, що притаманні всім типам ЕМПЕ (в іншій роботі охопимо процеси нагріву та охолодження), і саме на них ми будемо зосереджуватися під час вирішення задач, пов'язаних з мультипараметричним проектуванням ЕМ [7]:

- а) електромагнітні процеси;
- б) електромеханічні процеси.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій** у галузі свідчать про чи малу кількість робіт по розрахунку та моделюванню фізичних процесів ЕУ [8], в яких розглядаються розв'язання задач польовим методом; постановка та вирішення задач проектування ЕМПЕ методом кінцевих елементів [9]; побудова та

обчислення експлуатаційних процесів ЕМ в межах параметричного проектування [10]. Окремо досліджувались питання особливостей моделювання електродинамічних процесів в програмному середовищі FEMM [11], проводилось розрахунок показників активних частин ЕМ з урахуванням електромагнітних навантажень та навантажень перехідних процесів з використанням програмного комплексу MatLab [12]. Моделювання багатофізичних процесів в ЕМ з використанням проектного інструментарію Ansys докладно наведено в [13]. Реалізація об'єктно-орієнтованого підходу ЕМПЕ різних типів досліджена в [14]. Проте в цих роботах не достатньо змістовно охоплено явище мультипараметричного проектування вузлів ЕМ з урахуванням багатофізичного характеру процесів, що відбуваються в ЕМПЕ під час його роботи. Напрацьовані дослідження цього напрямку потребують систематизації та класифікації.

**Мета роботи.** В результаті теоретичного дослідження та узагальнення існуючих методів та моделей проектування енергетичних машин сформулювати організацію та систематизувати положення мультипараметричного підходу розробки ЕМПЕ, що комплексно входять до складу газотурбінної, або паротурбінної енергетичної установки, та ставлять на меті враховувати при розробці показники електромагнітних та електромеханічних навантажень. Для досягнення мети необхідно виконати такі завдання:

– виокремити параметри ЕМПЕ які можуть забезпечувати побудову математичних моделей щодо моделювання електромагнітних та електромеханічних процесів в ЕМ;

– узагальнити та систематизувати організацію мультипараметричного моделювання ЕМПЕ а обсязі електромагнітних та електромеханічних процесів;

– навести математичні моделі визначення основних показників ЕМПЕ загального виду, при реалізації мультипараметричного моделювання.

## **Основна частина.**

**1. Мультипараметричне моделювання електромагнітних процесів в ЕМ** є ключовим підходом до аналізу, оптимізації та проектування сучасних енергетичних агрегатів та систем. Це моделювання базується на сучасних

методиках та інструментарії вирішення польової задачі електромагнітного процесу. Вирішенню таких задач присвячено достатня кількість наукових робіт [15]. Багато з цих робіт розглядає польові задачі в плоскій сутності (2D), інші в об'ємній постановці задачі (3D), та роботи в якій задачі моделювання розв'язуються комплексно, з урахування де-кількох змінних електромагнітні процесу.

Основою організації такого моделювання є побудова математичної моделі, яка описує електромагнітні процеси як функцію змінних параметрів конструкції, матеріалів, режимів роботи тощо. В широкому представленні параметри що організовують це побудування є такі:

- а) геометричні параметри: довжина, діаметр, зазор, форма зубців, кількість витків обмотки;
- б) матеріальні показники: магнітна проникність, електропровідність, втрати на гістерезис і вихрові струми;
- с) електричні показники: напруга, струм, частота, фазність;
- д) супутні умови: тривалість режиму роботи, робоча температура, теплопровідність окремих вузлів, тип охолодження що застосовується.

Після аналізу технічної документації для виготовлення сучасних електричних машин [16], детального вивчення принципів моделювання засобами комп'ютерного середовища [17] та з дотриманням вимог фундаментальних та класичних досліджень [18] нами складено принцип організації мультипараметричного моделювання електромагнітних процесів в електричних машинах, який зображено на рис. 1.



Рисунок 1 – Організації мультипараметричного моделювання електромагнітних процесів в ЕМПЕ

В доповнення до рис. 1 розкриємо більш детально результати моделювання електромагнітних процесів в межах мультипараметричного підходу.

1.1. Під розподілом магнітного поля розуміється: векторні та скалярні карти магнітної індукції; визначення зон насичення феромагнітних матеріалів й аналіз симетрії та неоднорідності магнітного поля. В загальному випадку цей мультипараметричний блок можна представити системою диференційних рівнянь потокозчеплення:

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\psi_{s\alpha}}{dt} &= \cos(t) - \alpha'_s \cdot \psi_{s\alpha} + \alpha'_s \cdot K_r \cdot \psi_{r\alpha} \\ \frac{d\psi_{s\beta}}{dt} &= \sin(t) - \alpha'_s \cdot \psi_{s\beta} + \alpha'_s \cdot K_r \cdot \psi_{r\beta} \\ \frac{d\psi_{r\alpha}}{dt} &= -\alpha'_r \cdot \psi_{r\alpha} + \alpha'_r \cdot K_s \cdot \psi_{s\alpha} - \omega_r \cdot \psi_{r\beta} \\ \frac{d\psi_{r\beta}}{dt} &= -\alpha'_r \cdot \psi_{r\beta} + \alpha'_r \cdot K_s \cdot \psi_{s\beta} - \omega_r \cdot \psi_{r\alpha} \\ \frac{d\omega_r}{dt} &= \frac{K_r}{J \cdot x'_s} \cdot (\psi_{s\beta} \cdot \psi_{r\alpha} - \psi_{s\alpha} \cdot \psi_{r\beta}) - \frac{M_0}{J} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Де  $\psi_{s\alpha}, \psi_{s\beta}, \psi_{r\alpha}, \psi_{r\beta}$  – амплітуди сталих значень потокозчеплення статора та ротора ЕМ, в.о.;  $t$  – момент часу, с.;  $\alpha'_s$ , та  $\alpha'_r$  – коефіцієнти затухання обмоток статора та ротора, в.о.  $K_s$  та  $K_r$  – коефіцієнти зв'язку магнітного поля статора та ротору, в.о.;  $\omega_r$  – синхронне обертання поля ротора, в.о.;  $M_0$  – момент опору електромагнітного моменту в початковий час, в.о.;  $J$  – момент інерції магнітного поля, в.о.;  $x'_s$  – індуктивний опір обмотки статора, Ом.

2.1. Електромагнітні сили та моменти повинні містити: обчислення електромагнітного моменту ЕМ, сили взаємодії між елементами (наприклад, між обмотками), пульсації моменту, що впливають на вібрації. Найкращим чином можна проілюструвати мультипараметричне моделювання електромагнітних моментів за допомогою системи рівнянь сталого та гальмівного моменту:

$$\left. \begin{aligned} M_c &= \operatorname{Re} \cdot \left( j \cdot (\psi_c \cdot I_c^*) \right) \\ M_b &= \operatorname{Re} \cdot \left( j \cdot (\psi_1 \cdot I_1^* \cdot e^{2\delta_1 t} + \psi_2 \cdot I_2^* \cdot e^{2\delta_2 t}) \right) \end{aligned} \right\}, \quad (2)$$

де  $M_c, M_b$  – сталий та гальмівний момент магнітного поля, в.о.;  $I_c$  – струм обмотки статора ЕМ, А;  $I_1$  та  $I_2$  – амплітуди вільних струмів статора та ротора ЕМ, А;  $\delta_1$ , та  $\delta_2$  – коефіцієнти затухання електромагнітного моменту, в.о.

3.1. Індуковані електрорушійні сили та струми зазвичай складають: ЕРС у обмотках при різних режимах роботи; розподіл струмів у провідниках, включаючи вихрові струми; аналіз фазності та гармоніки. Так мультипараметрично миттєві значення струмів мають наступний вигляд:

$$\left. \begin{aligned} i_{s\alpha} &= \frac{1}{x'_s} \cdot (\psi_{s\alpha} - K_r \cdot \psi_{r\alpha}) \\ i_{s\beta} &= \frac{1}{x'_s} \cdot (\psi_{s\beta} - K_r \cdot \psi_{r\beta}) \\ i_{r\alpha} &= \frac{1}{x'_r} \cdot (\psi_{r\alpha} - K_s \cdot \psi_{s\alpha}) \\ i_{r\beta} &= \frac{1}{x'_r} \cdot (\psi_{r\beta} - K_s \cdot \psi_{s\beta}) \end{aligned} \right\}, \quad (3)$$

де  $i_{s\alpha}$ ,  $i_{s\beta}$ ,  $i_{r\alpha}$ ,  $i_{r\beta}$  – миттєві значення струмів обмотки статора та ротора в координатах  $(\alpha; \beta)$ , А;  $x'_s$  та  $x'_r$  – індуктивний опір обмотки статора та ротора ЕМ, Ом.

4.1. Втрати електромагнітної енергії мають втрати на гістерезис, втрати на вихрові струми, втрати в обмотках. Крім того, для більш доцільного відображення втрат треба визначити реактивні опори індуктивної та ємкісної складової навантаження, що при мультипараметричному моделюванні виглядає наступним чином:

$$\left. \begin{aligned} X_L &= 2 \cdot \pi \cdot f_n \cdot L \\ X_C &= \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f_n \cdot C} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

де,  $X_L$ ,  $X_C$  – реактивні опори індуктивної та ємкісної складової навантаження ЕМ, в.о.;  $L$  та  $C$  – узагальнені індуктивна та ємкісна складові навантаження ЕМ, в.о.

5.1. Оптимізаційні параметри електромагнітних показників, це може бути пошук геометрії, що забезпечує максимальний ККД; мінімізація маси активних та неактивних матеріалів; баланс між електромагнітними та тепловими характеристиками ЕМ. Так, наприклад для електромагнітного моделювання, є доцільним дослідити функцію синхронного обертання поля статора та обертання ротора на предмет пошуку оптимального значення. В межах мультипараметричного моделювання це можна виконати наступним чином:

$$\omega_{opt} = \sqrt{(\alpha'_s - \alpha'_r)^2 + 4 \cdot \alpha'_s \cdot \alpha'_r \cdot (1 - \sigma)}; \quad (5)$$

де  $\omega_{opt}$  – оптимального значення синхронного обертання поля статора та обертання ротора, в.о.;  $\sigma$  – коефіцієнт перехідного опору електромагнітної системи статора та ротора, в.о.

Згідно рис. 1 виконаємо мультипараметричне моделювання електромагнітних процесів електромеханічних перетворювачів енергії різних типів, проте треба враховувати, що кожна окрема ЕМ має свої індивідуальні конструкційні особливості та вимоги режимів експлуатації.

**2. Мультипараметричне моделювання електромеханічних процесів** в ЕМ займає основу функцію в перетворенні енергії, в режимі двигуна, або в режимі генератора. Мультипараметричне моделювання саме цих процесів є основною складовою забезпечення надійності, якості та безпеки роботи електромеханічного перетворювача енергії будь-якого типу. Здебільшого це моделювання виконується за допомогою сучасних комп'ютерних програм та комплексів для вирішення задач перетворення енергії та розрахунків електричних та механічних показників ЕМ. Аналізу та вирішенню таких задач присвячено багато наукових робіт [19, 20], проте ширина та багатогранність проблем що досліджуються настільки велика, що досі не існує єдиної методики, або підходу які б дозволяли систематизувати та враховувати всі особливості моделювання електромеханічних процесів. В дійсній роботі пропонується організувати моделювання комплексно, з урахування де-кількох змінних електромеханічного процесу перетворення енергії.

Головним чином організація електромеханічного моделювання полягає в розробці математичної моделі, за допомогою якої визначаються цільові показники електромеханічних процесів такі як, сила струму, електричний опір, частота обертання валу ротора, густина струму, перетин струмоведучого елемента, тощо. Особливостями розробки такої математичної моделі є такі:

- a) розгалуженість та нелінійність рівнянь, або системи рівнянь (при визначенні показників густини струму в залежності від режиму роботи ЕМ);
- b) врахування взаємозв'язку механічних та електричних процесів (необхідність одночасного розрахунку електричних та механічних навантажень, що діють на розрахункову область ,або елемент);
- c) висока обчислювальна здатність (потреба в розв'язанні системи рівнянь з декількома змінними, або в паралельних обчисленнях);
- d) можливість оптимізації (необхідно передбачити пошук оптимальної конструкцій ЕМ з найкращими показниками, враховуючи два, або більше критеріїв оптимальності);

е) виконання положень нормативних документів (мається на увазі, врахування моделлю діючих стандартів щодо вимог, які ставляться перед сучасними ЕМПЕ).

Враховуючи сучасні тенденції та вимоги щодо розробки та проектування ЕМПЕ різних типів в цілому – нами складено принцип організації мультипараметричного моделювання електромеханічних процесів в ЕМ, рис. 2.



Рисунок 2 – Організації мультипараметричного моделювання електромеханічних процесів в ЕМ

В якості більш детального пояснення до рис. 2 сформулюємо основні положення результатів моделювання електромеханічних процесів в межах мультипараметричного підходу.

1. Електричних показників та параметрів перетворення енергії, згідно з різними методиками та алгоритмами [21] достатньо багато, тому ми пропонуємо узагальнити їх в визначенні лінійного навантаження статора та ротора ЕМ, за такою мультипараметричною моделлю:

$$\left. \begin{aligned} AS_1 &= \frac{I_n \cdot S_{n1}}{a_1 \cdot t_1} \\ AS_2 &= \frac{i_n \cdot S_{n2}}{a_2 \cdot t_2} \end{aligned} \right\}, \quad (6)$$

де  $I_n, i_n$  – струм обмотки статора та струм збудження обмотки ротора, А;  $S_{n1}, S_{n2}$  – кількість ефективних провідників в пазу статора і ротора відповідно;  $a_1, a_2$  – кількість паралельних віток обмотки статора та ротора;  $t_1$  та  $t_2$  – розподіл на зубці поверхонь статора та ротора ЕМ відповідно, мм.

2. Енергетичний взаємозв'язок електричної та механічної складової перетворення енергії пропонується організувати через визначення показника ковзання електричного поля статора, відносно обертання валу ротора в номінальному режимі роботи ( $S_{nom}$ ) ЕМ та при критичному значенні ( $S_{kr}$ ), наступним чином:

$$\left. \begin{aligned} S_{nom} &= \frac{A - \sqrt{A^2 - \left(1 + \frac{x_1}{x_m}\right)^2 \cdot r_2' \cdot B}}{B} \\ S_{kr} &= \frac{\left[1 + \frac{x_1}{x_m}\right] \cdot r_2'}{\left(x_1 + \left[1 + \frac{x_1}{x_m}\right] \cdot x_2'\right)} \end{aligned} \right\}, \quad (7)$$

де  $A = (m_1 \cdot U_n^2) / (2 \cdot P_2' - r_1)$  – електромеханічний коефіцієнт, в.о.;  $B = 2 \cdot A + r_2'$  – електромеханічний коефіцієнт, в.о.;  $x_1$  – індуктивний опір обмотки статора, Ом;  $x_m$  – головний індуктивний опір обмотки статора, який відповідає основної гармоніки, Ом;  $r_2'$  – опір однієї фази обмотки ротора, Ом;  $x_2'$  – індуктивний опір однієї фази обмотки ротора, Ом.

3. Механічних характеристик перетворення енергії в ЕМ існує дуже багато, в залежності від її типу та конструктивного виконання, проте ми спробували виразити їх через показники прогину валу ротора ( $f_G$ ) під впливом механічних сил та прогин ( $f_E$ ) під впливом електричних сил, тому що саме ці показники визначають граничні можливості механічного використання ротора при максимальних електромагнітних навантаженнях ЕМ:

$$\left. \begin{aligned} f_G &= \frac{9,81 \cdot G_r}{3 \cdot E \cdot l_r^2} \cdot (S_b \cdot a^2 + S_a \cdot b^2) \\ f_E &= \frac{F_E \cdot \left(\frac{a+b}{2}\right)}{3 \cdot E \cdot l_r^2} \cdot \left[ \left(\frac{3}{2} \cdot l_r \cdot S_0 - S_b\right) \cdot a + S_a \cdot b \right] \end{aligned} \right\}, \quad (8)$$

де  $G_r$  – маса валу ротору з міддю та бандажними кільцями, кг;  $E$  – модуль пружності матеріалу валу ротора, Па;  $l_r$  – довжина валу ротору, мм;  $S_a, S_b$  – проекція моменту інерції валу ротора від підшипника  $a$  і до центру валу, та від підшипника  $b$  і до центру валу, в.о.;  $a$  та  $b$  – осьова відстань від центру валу ротора до підшипника  $a$  та  $b$  відповідно, мм;  $F_E$  – сила від електромагнітного моменту обмотки ЕМ, Н;  $S_0$  – проекція моменту інерції валу ротора від підшипника  $a$  і до приєднання до валу ротора вузлу навантаження (якщо режим двигуна), або турбіни (якщо режим генератора), в.о.

4. Динамічні та перехідні процеси перетворення енергії пропонується моделювати через показник пускового струму ( $I_0$ ) в залежності від номінального рівня напруги обмотки статора ( $U_n$ ) ЕМ та одночасній залежності від пускового моменту ( $M_0$ ), що має наступний вигляд:

$$\left. \begin{aligned} I_0(U_n) &= \frac{U_n}{\sqrt{r_{kp}^2 + x_{kp}^2}}, \\ I_0(M_0) &= \sqrt{\frac{2 \cdot \pi \cdot f_1 \cdot M_0}{p \cdot m_1 \cdot r_{2p}}} \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

де  $r_{kp}, x_{kp}$  – активний та індуктивний опір обмотки ротору, Ом;  $r_{2p}$  – активний опір обмотки ротору в пусковий момент часу, Ом.

5. Під оптимізацією параметрів електромеханічних показників ЕМ розуміється широке коло показників, ми зв'язали показник зовнішнього діаметру валу ротора ( $D_2$ ) та зубцевий поділ статора ( $t_1$ ) через показник повітряного зазору ( $\delta$ ). Саме показник  $\delta=f(D_2; t_1)$  суттєво впливає на магнітні, електричні, механічні та вентиляційні процеси в ЕМ, тому містить достатньо глибоку ступінь оптимізації конструкції ЕМ в цілому. Мультипараметрична модель в цьому випадку має наступний вигляд:

$$\delta(D_2; t_1) = \left. \begin{aligned} D_1 &= \frac{t_1 \cdot z_1}{\pi}, \\ D_1 &= D_2 + 2 \cdot \delta \end{aligned} \right\} = \frac{t_1 \cdot z_1}{2 \cdot \pi} - \frac{D_2}{2}. \quad (10)$$

де  $z_1$  – кількість пазів осердя статора, шт.,  $D_1$  – внутрішній діаметр осердя статора, мм.

Згідно рис. 2 виконаємо організацію мультипараметричного моделювання електромеханічних процесів ЕМПЕ різних типів, які максимально охоплюють найважливіші показники ЕМ такі як лінійне навантаження статора та ротор ( $AS_1$  та  $AS_2$ ), показник ковзання електричного поля статора  $s$  (для електричних двигунів), показники прогину валу ротора ( $f_G$ ) під впливом механічних сил та прогин ( $f_E$ ) під впливом електричних сил, показник пускового струму  $I_0(U_n; M_0)$  та показник повітряного зазору між статором і ротором  $\delta(D_2; t_1)$ . В даній роботі наведено лише загальний принцип реалізації мультипараметричного моделювання цих показників, та залежності від задач на проектування та вимог до ЕМ можуть мати різні інтерпретації за зовнішній вид.

**Реалізація мультипараметричного моделювання на прикладі асинхронного двигуна (АД).** Метою виконання моделювання є визначення основних геометричних та конструкційних показників (наприклад, такі як кількість пазів, діаметр статора та довжина осердя статора) та електромеханічних й електромагнітних параметрів (продуктивність). Для розробки такого АД ми будемо використовувати в тому числі положення які зазначено в [22]. Об'єкт розробки: асинхронний електродвигун.

Початкові дані: потужність 18,5 кВт, номінальна швидкість 1500 об/хв, напруга живлення мережі 220/380/660 В, частота 50 Гц. Результати моделювання представлено в табл. 1.

Із табл. 1 маємо, що АД забезпечує необхідну потужність при чотирьох полюсних обертах – 1470 об/хв, габарити осердя статора знаходяться у стандартизованій лінійці даного класу ЕМ ( $330 \times 230$  мм), кількість пазів ротора та статора також належить до рекомендованого діапазону значень: для статора – 48 ...72 паза, для ротору – 28 ... 36 пазів [23], з метою покращити показники пускового моменту та плавного регулювання швидкості АД обрано фазний тип ротора, тип кліматичного виконання – помірний (У), тип конструктивного

виконання найуніфікований – на лапах, з одним або двома підшипниковими щитами, охолодження реалізується за допомогою вбудованого вентилятора, у закритому корпусі, а також з тепловідводом ззовні від корпусу.

Таблиця 1 – Результати моделювання асинхронного електродвигуна

Параметр	Модель (описова частина):	Тип значення, та результат
Продуктивність	$\begin{cases} P_{em} = \frac{P_2}{\eta \cdot \cos \varphi} \cdot \frac{E_{f1}}{U_n}, \\ P_{em} = m_1 \cdot U_n \cdot I_n \cdot \frac{\cos \varphi}{\cos \varphi_g}; \end{cases}$	Числовий: 18,5 кВт
Частота обертання	$n_2 = \frac{60 \cdot f_n}{p} \cdot (1 - s);$	Числовий: 1470 об/хв (номінальна)
Зовнішній діаметр статора	$D_1 = \sqrt{\frac{6.1 \cdot P_{em} \cdot 10^4}{\alpha_i \cdot k_\Phi \cdot k_0 \cdot A \cdot B_\delta \cdot n_2 \cdot l_1}};$	Числовий: 330 мм.
Довжина осердя статора	$l_1 = \frac{E_{f1} \cdot I_n \cdot p \cdot m_1}{k_\Phi \cdot k_0 \cdot f_n \cdot \pi^2 \cdot \alpha_i \cdot A \cdot B_\delta \cdot D^2};$	Числовий: 230 мм.
Кількість пазів статора та ротору	$z_1 = 6 \cdot p \cdot q_1; \quad z_2 = 4 \cdot p \cdot q_2;$	Ціле число: 48 статора 28 ротору
Тип ротора	Визначається конструктивно: фазний, або короткозамкнений тип ротора	Категорія: фазний
Тип кліматичного виконання	Класифікація за ГОСТ 15150-69: У, УХЛ, ТВ, ТС, Т, О, М, ТМ, ОМ, В.	Перелік: обрано тип – У
Конструктивне виконання	Класифікація за ДСТУ ГОСТ 2479-79: ІМ101Х, ІМ202Х, ІМ301Х, ІМ401Х ...	Перелік: обрано – ІМ101Х
Тип охолодження	Класифікація за ДСТУ ГОСТ 20459-87: ІС01, ІС06, ІС411, ІС416, ІС410, ІС37 ...	Перелік: обрано – ІС411

**Висновки.** За допомогою методу мультипараметричного проектування було проведено моделювання багатofізичних процесів, що відбуваються в енергетичних машинах на основі перетворення різних типів енергії, під час їх роботи. Виконана систематизація підходу моделювання електромагнітних та електромеханічних процесів, яка створює підґрунтя для подальшого розвитку та удосконалення методології в цілому. В результаті виконання моделювання ЕМ, на прикладі АД, можна сформулювати послідовність та обсяг розрахункових робіт, для проектного синтезу будь-якого ЕМПЕ та виконати перехід від загального виду ЕМ до конкретного виду, який буде мати індивідуальні показники та характеристик, задля забезпечення вимог завдання на проектування.

## БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК:

1. Kim S., Myint M. H., Yu Y., Lee W., Kim T. W., Koo B. Application of Parametric Modeling Techniques for Automated Detailing of Exterior Finishes in Architectural BIM Models: A South Korean Case Study. *Buildings*, 2024. № 14(12). PP. 4013. <https://doi.org/10.3390/buildings14124013>
2. Plis V. Improvement of the method of calculating the parameters of the induction motors replacement scheme. *Proceedings of Odessa Polytechnic University*, 2024. № 1(69), PP. 75–83. DOI: <https://doi.org/10.15276/opu.1.69.2024.09>.
3. Serani A., Palma G., Wackers, J. Extending parametric model embedding with physical information for design-space dimensionality reduction in shape optimization. *Engineering with Computers*, 2025. № 41. PP. 4643–4663. <https://doi.org/10.1007/s00366-025-02211-2>
4. Qiao Z., Jiang D., Fu W. A Universal Parametric Modeling Framework for Electric Machine Design. *Energies*. № 16(16). PP. 5897. <https://doi.org/10.3390/en16165897>
5. Conti S., Aiello G. Coco S., Laudani A., Rizzo S. A., Salerno N., Tina G. M., Ventura C. Optimization and Machine Learning for Electric Vehicles Management in Distribution Networks: A Review. *Energies*, 2026. № 19(4). PP. 986. <https://doi.org/10.3390/en19040986>
6. Qian T, Wei Q., Yu Z. 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), PP. 1950–1958. <https://doi.org/10.17775/CSEEJPES.2020.02430>
7. Ma F., Zhang H., Cao H. An energy consumption optimization strategy for CNC milling. *Int J Adv Manuf Technol*, 2017. № 90. PP. 1715–1726. <https://doi.org/10.1007/s00170-016-9497-0>
8. Sadeghi S., Hassanpour A., Saeeidifard, M. Multi-objective design optimization of a dualsided permanent magnet linear motor for high-speed electric trains. In *IECON 2022–48th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, 2022. PP. 1–5. IEEE. <https://doi.org/10.1109/IECON49645.2022.9968732>
9. Choi H.-G., Byun Y. I., Song C. K., Jun M. B. G., Lee C., Kim S. A Solution Procedure to Improve 3D Solid Finite Element Analysis with an Enrichment Scheme. *Applied Sciences*, 2023. № 13(12). PP. 7114. <https://doi.org/10.3390/app13127114>
10. Frizzo S., Seman L., Schutel C., Nied A., Seganfredo D., Garcia F., Sabino P., Torreblanca J., Quietinho V. Electric Field Evaluation Using the Finite Element Method and Proxy Models for the Design of Stator Slots in a Permanent Magnet Synchronous Motor. *Electronics*, 2020. № 9(11). PP. 1975. <https://doi.org/10.3390/electronics9111975>
11. Milykh V. I., Polyakova N. V. Automated Calculations of the Dynamics of Turbogenerator electromagnetic Processes in software Environment FEMM. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2015. № (6). PP. 24–30. <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2015.6.04>
12. Patterson A. E., Peddada S. R. T. A practical and ready handbook for mechanical designers and design educators. A review of design optimization using Matlab and SolidWorks by Krishnan Suresh. *Journal of Engineering Design*, 2022. № 33(7). PP. 517–521. <https://doi.org/10.1080/09544828.2022.2098673>
13. Aishwarya M., Brisilla R.M. Design of Energy-Efficient Induction motor using ANSYS software, *Results in Engineering*, 2022. Vol. 16. P. 100616, <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2022.100616>.
14. Pliugin V., Milykh V., Polivianchuk A., Zablodskij N. Using of object-oriented design principles in mathematic modeling of electric machines. *TECA, LublinRzeszow*, 2025. Vol. 15. № 2., PP. 25–32.
15. Cuti L., Choquejahu S., Torres R. Design of an Automated System for the Benefit of Energy Consumption and Control of Industrial Equipment with Artificial Intelligence. *SSRG International Journal of Electrical and Electronics Engineering*, 2025. vol. 12. № 3. PP. 92–99. <https://doi.org/10.14445/23488379/IJEEE-V12I3P110>
16. Revuelta P., Litrán S., Thomas J. Active power line conditioners: design, simulation and implementation for improving power quality. *Elsevier Inc., Academic Press*, 2016. PP. 436. doi: <https://doi.org/10.1016/C2014-0-02915-2>.

17. Dubas F., Boughrara K. Mathematical Models for the Design of Electrical Machines. *Mathematical and Computational Applications*, 2020. № 25(4). pp. 77. <https://doi.org/10.3390/mca25040077>
18. Boukhnifer M., Djilali, L. Modeling, Control and Diagnosis of Electrical Machines and Devices. *Energies*, 2024. № 17(10). PP. 2250. <https://doi.org/10.3390/en17102250>
19. Ostroverkhov M., Spinul L., Veshchikov H. Energy conversion efficiency in the electromechanical system with magnetic gear of passenger electric transport rolling stock. *Technology Audit and Production Reserves*, 2025. № 6(186). pp. 64–74. <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2025.344863>
20. Bondarenko D. Developing Electrical Models to simulate The Conversion of solar Radiation into Electrical and Thermal Energy. *Vidnovlyvana Energetika*, 2024. № 4(79). PP. 59–63. [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2024.4\(79\).59-63](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2024.4(79).59-63)
21. Yaskiv V. Gurnik O. Domnin I. Experimental Researches of Electromagnetic Compatibility of the Magnetic Power Converter. *Energy Saving, Power Engineering, Energy Audit*, 2025. № 8 (211), PP. 82–94. DOI: <https://doi.org/10.20998/2313-8890.2025.08.05>
22. Minko O. Multiparametric mathematical model of the stator of a powerful electric machine. *VIII International Conference "Innovative Technologies in Science and Education. European Experience": Materials. Electronic edition*. Dnipro : 2025. PP. 118–122.
23. Суботін В. Г., Левченко Є. В., Швецов В. Л., Шубенко О. Л., Тарелін А. О., Суботович В. П. Створення парових турбін нового покоління потужністю 325 МВт. Харків : Фоліо, 2009. 256 с.

#### REFERENCES:

1. Kim S., Myint M. H., Yu Y., Lee W., Kim T. W., Koo B. Application of Parametric Modeling Techniques for Automated Detailing of Exterior Finishes in Architectural BIM Models: A South Korean Case Study. *Buildings*, 2024. № 14(12). PP. 4013. <https://doi.org/10.3390/buildings14124013>
2. Plis V. Improvement of the method of calculating the parameters of the induction motors replacement scheme. *Proceedings of Odessa Polytechnic University*, 2024. № 1(69), PP. 75–83. DOI: <https://doi.org/10.15276/opu.1.69.2024.09>
3. Serani A., Palma G., Wackers, J. Extending parametric model embedding with physical information for design-space dimensionality reduction in shape optimization. *Engineering with Computers*, 2025. № 41. PP. 4643–4663. <https://doi.org/10.1007/s00366-025-02211-2>
4. Qiao Z., Jiang D., Fu W. A Universal Parametric Modeling Framework for Electric Machine Design. *Energies*. № 16(16). PP. 5897. <https://doi.org/10.3390/en16165897>
5. Conti S., Aiello G. Coco S., Laudani A., Rizzo S. A., Salerno N., Tina G. M., Ventura C. Optimization and Machine Learning for Electric Vehicles Management in Distribution Networks: A Review. *Energies*, 2026. № 19(4). PP. 986. <https://doi.org/10.3390/en19040986>
6. Qian T, Wei Q., Yu Z. 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), PP. 1950–1958. <https://doi.org/10.17775/CSEEJPES.2020.02430>
7. Ma F., Zhang H., Cao H. An energy consumption optimization strategy for CNC milling. *Int J Adv Manuf Technol*, 2017. № 90. PP. 1715–1726. <https://doi.org/10.1007/s00170-016-9497-0>
8. Sadeghi S., Hassanpour A., Saedifard, M. Multi-objective design optimization of a dualsided permanent magnet linear motor for high-speed electric trains. *In IECON 2022–48th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, 2022. PP. 1–5. IEEE. <https://doi.org/10.1109/IECON49645.2022.9968732>
9. Choi H.-G., Byun Y. I., Song C. K., Jun M. B. G., Lee C., Kim S. A Solution Procedure to Improve 3D Solid Finite Element Analysis with an Enrichment Scheme. *Applied Sciences*, 2023. № 13(12). PP. 7114. <https://doi.org/10.3390/app13127114>
10. Frizzo S., Seman L., Schutel C., Nied A., Seganfredo D., Garcia F., Sabino P., Torreblanca J., Quietinho V. Electric Field Evaluation Using the Finite Element Method and Proxy Models for the

Design of Stator Slots in a Permanent Magnet Synchronous Motor. *Electronics*, 2020. № 9(11). PP. 1975. <https://doi.org/10.3390/electronics9111975>

11. Milykh V. I., Polyakova N. V. Automated Calculations of the Dynamics of Turbogenerator electromagnetic Processes in software Environment FEMM. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2015. № (6). PP. 24–30. <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2015.6.04>

12. Patterson A. E., Peddada S. R. T. A practical and ready handbook for mechanical designers and design educators. A review of design optimization using Matlab and SolidWorks by Krishnan Suresh. *Journal of Engineering Design*, 2022. № 33(7). PP. 517–521. <https://doi.org/10.1080/09544828.2022.2098673>

13. Aishwarya M., Brisilla R.M. Design of Energy-Efficient Induction motor using ANSYS software, *Results in Engineering*, 2022. Vol. 16. P. 100616, <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2022.100616>.

14. Pliugin V., Milykh V., Polivianchuk A., Zablodskij N. Using of object-oriented design principles in mathematic modeling of electric machines. *TECA, LublinRzeszow*, 2025. Vol. 15. № 2., PP. 25–32.

15. Cuti L., Choquejahu S., Torres R. Design of an Automated System for the Benefit of Energy Consumption and Control of Industrial Equipment with Artificial Intelligence. *SSRG International Journal of Electrical and Electronics Engineering*, 2025. vol. 12. № 3. PP. 92–99. <https://doi.org/10.14445/23488379/IJEEE-V12I3P110>

16. Revuelta P., Litrán S., Thomas J. Active power line conditioners: design, simulation and implementation for improving power quality. *Elsevier Inc., Academic Press*, 2016. PP. 436. doi: <https://doi.org/10.1016/C2014-0-02915-2>.

17. Dubas F., Boughrara K. Mathematical Models for the Design of Electrical Machines. *Mathematical and Computational Applications*, 2020. № 25(4). pp. 77. <https://doi.org/10.3390/mca25040077>

18. Boukhni M., Djilali, L. Modeling, Control and Diagnosis of Electrical Machines and Devices. *Energies*, 2024. № 17(10). PP. 2250. <https://doi.org/10.3390/en17102250>

19. Ostroverkhov M., Spinul L., Veshchikov H. Energy conversion efficiency in the electromechanical system with magnetic gear of passenger electric transport rolling stock. *Technology Audit and Production Reserves*, 2025. № 6(186). pp. 64–74. <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2025.344863>

20. Bondarenko D. Developing Electrical Models to simulate The Conversion of solar Radiation into Electrical and Thermal Energy. *Vidnovluyana Energetika*, 2024. № 4(79). PP. 59–63. [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2024.4\(79\).59-63](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2024.4(79).59-63)

21. Yaskiv V. Gurnik O. Domnin I. Experimental Researches of Electromagnetic Compatibility of the Magnetic Power Converter. *Energy Saving, Power Engineering, Energy Audit*, 2025. № 8 (211), PP. 82–94. DOI: <https://doi.org/10.20998/2313-8890.2025.08.05>

22. Minko O. Multiparametric mathematical model of the stator of a powerful electric machine. *VIII International Conference "Innovative Technologies in Science and Education. European Experience": Materials. Electronic edition*. Dnipro : 2025. PP. 118–122.

23. Subotin, V. H., Levchenko, Ye. V., Shvetsov, V. L., Shubenko, O. L., Tarelin A. O., Subotovych V. P. (2009) *Stvorenniya parovykh turbin novoho pokolinnya potuzhnisty 325 MVt* [Creation of steam turbines of a new generation with a capacity of 325 MW]. Kharkiv : Folio Publ. P. 256.

*Стаття надійшла до редакції: 02.12.2025; рецензування: 22.12.2025;*

*прийнята до публікації 05.01.2026. Автори прочитали и дали згоду рукопису.*

*The article was submitted on 02.12.2025; revised on 22.12.2025; and accepted for publication on 05.01.2026. The authors read and approved the final version of the manuscript.*