

Ю.М. ВАСЬКОВСЬКИЙ, Д.С. НЕСТЕРЕНКО

ВПЛИВ ПАРАМЕТРІВ СИСТЕМИ ОХОЛОДЖЕННЯ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЯГОВИХ СИНХРОННИХ МАГНІТОЕЛЕКТРИЧНИХ ДВИГУНІВ

Досліджується вплив геометричних параметрів аксіальної системи охолодження на характеристики тягового синхронного двигуна з постійними магнітами (СДПМ) потужністю 140 кВт, призначеного для використання в залізничному локомотиві потягу. Нагрів постійних магнітів (ПМ) під час роботи СДПМ призводить до зниження їх магнітних характеристик, що в свою чергу веде до зниження потужності двигуна. За результатами математичного моделювання отримана інформація щодо залежності вихідної потужності тягового СДПМ від геометрії його системи охолодження. Встановлено, що оптимальний вибір діаметра вентиляційних каналів та їх оптимальне розташування відносно ПМ сприяє температурній стабілізації ПМ та збільшує вихідну потужність СДПМ. Однак надмірна зміна цих параметрів призводить до її зменшення. З'ясовано, що використання "підпазових" каналів для безпосереднього охолодження ПМ є доцільним лише в разі ризику значного нагріву ПМ. Показано, що неправильний підбір геометричних параметрів системи охолодження досліджуваного двигуна, при умові однакового нагріву його обмотки статора, може знизити вихідну потужність в номінальному режимі роботи на 5%. При перевантаженні за струмом 50% зменшення потужності двигуна може досягати 10%.

Ключові слова: синхронний двигун з постійними магнітами, нагрів постійних магнітів, система охолодження, вихідна потужність.

Y. VASKOVSKIY, D. NESTERENKO

INFLUENCE OF COOLING SYSTEM PARAMETERS ON THE TRACTION SYNCHRONOUS MAGNETO-ELECTRIC MOTORS CHARACTERISTICS

The influence of axial cooling system geometric parameters on the characteristics of a 140 kW traction permanent magnet synchronous motor (PMSM), used in electric locomotives is investigated. Permanent magnets (PM) heating during PMSM operation leads to a reduction of their magnetic properties, which decreases motor's power. The dependence of traction PMSM cooling system geometry on its output power has been established based on mathematical modeling results. It is shown that the optimal choice of ventilation channels diameter and their spatial arrangement provides better thermal stabilization of the PM and improves the output power of the PMSM. However, excessive variation of these parameters leads to a decrease in output power. It is shown that usage of "sub-slot" channels for PM direct cooling is necessary only at a risk of significant PM overheating. Furthermore, it is demonstrated, that an improper selection of motor's cooling system geometric parameters, under the term of its stator winding identical heating, may result in 5% reduction of its output power. Under 50% current overload, this difference reaches 10%.

Keywords: permanent magnet synchronous motor, permanent magnets heating, cooling system, output power.

Вступ. Синхронні двигуни з постійними магнітами (СДПМ) є сучасними електромеханічними перетворювачами енергії та широко використовуються у різних галузях техніки, зокрема в електротранспорті, безпілотних літальних апаратах тощо. Значний інтерес до цих машин зумовлений їх здатністю створювати високий електромагнітний момент при відносно невеликій масі та габаритах, що забезпечує високі питомі масо-габаритні показники (кВт/кг). Наявність постійних магнітів (ПМ) підвищує енергетичну ефективність двигунів даного типу.

Водночас робочі характеристики СДПМ, такі як електромагнітний момент, потужність, коефіцієнт корисної дії тощо, значною мірою залежать від нагріву активної частини машини і, насамперед, від нагріву ПМ.

Відомо, що нагрів ПМ призводить до погіршення їх основних магнітних параметрів, зокрема, до зменшення залишкової магнітної індукції B_r і коерцитивної сили H_c . Це у свою чергу знижує тягові та енергетичні характеристики СДПМ [1–7]. У зв'язку з цим однією з ключових задач під час проектування СДПМ є оптимальний вибір параметрів системи охолодження для забезпечення допустимого теплового режиму ПМ та стабілізації їх температури в широкому діапазоні навантажень та потужностей двигуна [8].

Метою роботи є аналіз впливу геометричних параметрів системи охолодження на енергетичні характеристики СДПМ. Мета досягається шляхом математичного моделювання з використанням мультифізичної математичної моделі.

Математична модель. Електромагнітне поле відносно комплексної амплітуди векторного магнітного потенціалу \underline{A} в активній зоні СДПМ описується наступним рівнянням [9]:

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu(T)} (\nabla \times \underline{A} - B_r(T)) \right) = J_{z \text{ ext}}, \quad (1)$$

де $B_r(T)$ – вектор залишкової магнітної індукції ПМ, $\mu(T)$ – магнітна проникність, яка в загальному випадку залежить від температури T , $J_{z \text{ ext}}$ – густина сторонніх струмів в фазах обмотки статора. На зовнішній границі осердя статора задається однорідна гранична умова першого роду, що означає відсутність магнітних потоків розсіювання через ярмо статора

Середнє значення електромагнітного моменту знаходиться інтегруванням миттєвого значення моменту в межах періоду часу T_ω повного обороту ротора

$$M_{Em \text{ Aver}} = \frac{1}{T_\omega} \int_0^{T_\omega} M_{Em}(t) dt. \quad (2)$$

Електропровідність в пазах статора приймається рівною нулю, але у відповідності до схеми обмотки задається густина струмів.

Миттєве значення електромагнітного моменту знаходиться за формулою, яка ґрунтується на використанні тензора магнітного натягу на поверхні ротора:

$$M_{Em}(t) = \frac{2pR_\delta l_r}{\mu(0)} \int_0^\tau B_n B_\tau dl, \quad (3)$$

де p , τ число пар полюсів і полюсна поділлка; l_r , R_δ – активна довжина і радіус ротора, B_n , B_τ – нормальна

© Ю.М. Васьковський, Д.С. Нестеренко, 2026

(направлена перпендикулярно до точки поверхні) і тангенціальна (направлена по дотичній до точки поверхні) проекції вектора магнітної індукції.

Залежність залишкової магнітної індукції $B_r(t)$ від температури T згідно з експериментальними результатами, отриманими в роботі [7] для ПМ типу NdFeB, апроксимується кубічним поліномом

$$B_r(T) = B_r(0) - 2,682 \cdot 10^3 \cdot T + 1,663 \cdot 10^{-5} \cdot T^2 - 5,613 \cdot 10^{-8} \cdot T^3, \quad (4)$$

де $B_r(0)$ – значення залишкової індукції ПМ при початковій температурі 0°C .

Середня потужність двигуна знаходиться так:

$$P_{Aver}(t) = \omega_R M_{Em Aver}. \quad (5)$$

Втрати потужності в обмотці і магнітопроводі статора знаходяться традиційним методом при заданих активному опорі і струмах в фазах обмотки статора і відомих величинах магнітної індукції в магнітопроводі.

Втратами в магнітопроводі ротора в першому наближенні можна нехтувати, а втрати в ПМ згідно з даними робіт [10,11] приймаються як

$$Q_{PM} = 0,001 P_2, \quad (6)$$

де P_2 – активна потужність двигуна. Теплове поле СДПМ описується стаціонарним диференціальним рівнянням теплопровідності, яке в декартових координатах записується так [12]:

$$\lambda \left[\frac{\partial^2 T(x,y)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T(x,y)}{\partial y^2} \right] = -Q(x,y), \quad (7)$$

де λ – коефіцієнт теплопровідності (Вт/м·град), $Q(x,y)$ – питомі втрати в СДПМ.

На зовнішніх границях розрахункової області, у тому числі на поверхнях вентиляційних каналів, задаються граничні умови третього роду:

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = -\alpha(v)(T - T_{0x}), \quad (8)$$

де $\alpha(v)$ – коефіцієнт тепловіддачі з поверхонь (Вт/м²·град), T_{0x} – усереднена температура охолоджуючого холодоагенту, задана з урахуванням його підігріву при русі уздовж вентиляційного каналу. Коефіцієнт тепловіддачі залежить від швидкості v руху холодоагенту (повітря) відносно поверхні. Його числове значення отримують експериментальними методами. Надалі використовується приведена в роботі [13] формула для визначення коефіцієнту тепловіддачі від стінки круглого каналу до повітря, яка справедлива для конструкцій більшості електричних машин

$$\alpha(v) = 0,027 \lambda \cdot a^{-0,78} \cdot d_k^{-0,22} \cdot v^{0,78}, \quad (9)$$

де $a = \lambda(T) / C_p = 2,4 \cdot 10^{-5}$ (м²/с) – температуропровідність повітря при 40°C , $\lambda = 0,0267$ (Вт/м·град) – теплопровідність повітря при температурі 40°C ; $C_p = 1020$ (Дж/кг·град) – питома теплоємність, d_k – діаметр каналу. Швидкість руху v_i в i -му вентиляційному каналі визначається через витрати холодоагенту P_i у каналі і площу поперечного перерізу каналу s_i :

$$v_i = P_i / s_i. \quad (10)$$

Підставляючи (10) в (9), маємо залежність коефіцієнтів тепловіддачі від витрат холодоагенту.

При виконанні вентиляційного розрахунку обґрунтовується конструкція системи вентиляції і параметри нагнітальних елементів, які забезпечують витрати холодоагенту, потрібні для підтримання допустимої температури усіх елементів ЕМ. При повітряному охолодженні вентиляційна мережа електричної машини складається з послідовно і паралельно з'єднаних між собою вентиляційних каналів і порожнин різної площі перерізу. Вентиляційний розрахунок доцільно проводити на основі зосереджених схем заміщення вентиляційної системи [13].

У розглянутому надалі прикладі схема заміщення складається з 4-х паралельних гілок, які відповідають аксіальним каналам статора і ротора, кільцевому вентиляційному каналу навколо ярма осердя статора і повітряному проміжку між статором і ротором. Кожна гілка характеризується відповідним аеродинамічним опором. Надалі використовується схема заміщення вентиляційної системи, яка характерна для машин з аксіальною системою вентиляції [6].

Об'єкт дослідження. Дослідження реалізовано на прикладі тягового СДПМ потужністю 140 кВт, призначеного для приводу локомотивів потягів. На зовнішній поверхні ротора встановлені постійні магніти типу NdFeB, які при температурі 20°C мають залишкову індукцію 1,3 Тл. Пази статора виконані відкритими. Номінальні дані двигуна наведено в табл.1

Таблиця 1 – Номінальні дані СДПМ

Показник	Величина
Потужність, кВт	140
Струм обмотки статора, А	58
Фазна напруга, В	1080
Частота обертання ротора, об/хв	1000
Кількість полюсів	$2p = 6$
Висота повітряного проміжку, мм	3
Діаметр статора, м	0.4
Довжина статора, м	0.3
Кількість пазів	36
Ширина пазів, мм	11
Висота пазів, мм	45

В осердях статора і ротора виконано аксіальні вентиляційні канали. Для охолодження статора навколо зовнішньої поверхні ярма статора виконано кільцевий вентиляційний канал. Охолодження – повітряне примусове за допомогою компресора, який в режимі холостого ходу (при нескінченно великому аеродинамічному опорі вентиляційної системи) утворює тиск 10 кПа, а в режимі короткого замикання (при нульовому опорі системи) спроможний видати обсяг повітря $1 \text{ м}^3/\text{с}$.

Результати дослідження. Задача проектування системи охолодження полягає у виборі оптимального співвідношення її геометричних параметрів. Для систем охолодження з аксіальним потоком холодоагенту (повітря) характерними є наступні геометричні параметри:

- Діаметр вентиляційних каналів;
- Діаметр розташування вентиляційних каналів;
- Кількість каналів;

Водночас, оптимізація системи охолодження досліджуваного СДПМ проводилася з наступними обмеженнями:

- Задля забезпечення умови однакового нагріву обмотки статора, геометрія системи охолодження статора (діаметр, кількість і розташування вентиляційних каналів) а також його струм є незмінними;
- Вентиляційні канали ротора розташовані рівномірно на заданому діаметрі а їх кількість є фіксованою і складає 10 шт.

Цільовою функцією оптимізації є визначення максимуму потужності СДПМ при варіації двох геометричних параметрів обраної вентиляційної системи – діаметру вентиляційних каналів і діаметру кола, на якому розташовані канали відносно ПМ.

Використання мультифізичної моделі дозволило врахувати взаємний вплив фізичних процесів різної природи (електромагнітних, теплових та вентиляційних) на характеристики досліджуваного двигуна і зробити розрахункову модель більш достовірною.

На рис. 1 у вигляді тривимірної епюри зображено результати оптимізації параметрів вентиляційної системи – залежність потужності СДПМ від двох зазначених варійованих параметрів.

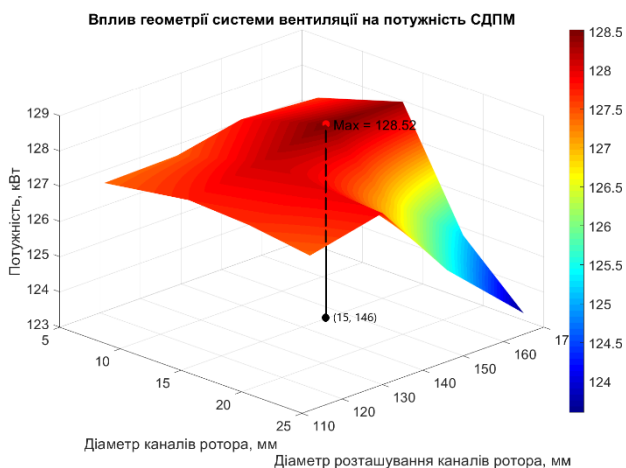


Рис. 1. Вплив геометричних параметрів системи охолодження на потужність СДПМ

Переріз активної зони “оптимального” СДПМ в номінальному режимі роботи, а також картина його теплового поля зображені на рис. 2. В табл. 2 наведені його основні параметри а також температури основних конструктивних елементів.

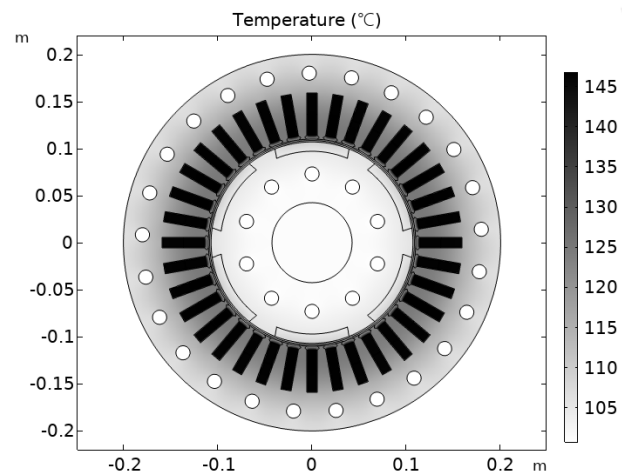


Рис. 2. Розподіл теплового поля “оптимального” СДПМ в номінальному режимі роботи

Таблиця 2 – Основні параметри “оптимального” СДПМ

Показник	Величина
Кількість вентиляційних каналів статора	25
Діаметр каналів статора ($d_{к.статора}$), мм	15
Кількість вентиляційних каналів ротора	10
Діаметр каналів ротора ($d_{к.ротора}$), мм	15
Діаметр розташування вентиляційних каналів ротора (d_p), мм	146
Діаметр каналу навколо зовнішньої поверхні ярма статора, мм	4
Швидкість повітря в повітряному проміжку, м/с	28,2
Швидкість повітря в кільцевому вентиляційному каналі між ярмом і статором, м/с	32,7
Швидкість повітря в каналах статора, м/с	28,53
Швидкість повітря в каналах ротора, м/с	28,55
Коефіцієнт тепловіддачі в каналі між ярмом і статором, Вт/(м ² ·°C)	77
Коефіцієнти тепловіддачі в аксіальних каналах статора і ротора, Вт/(м ² ·°C)	99,6
Температура обмотки статора, °C	144
Максимальна температура осердя статора, °C	108
Температура ПМ, °C	104
Потужність (P_2), кВт	128,52

З результатів оптимізації можна зробити наступні висновки:

- Зменшення діаметру вентиляційних каналів призводить до збільшення швидкості повітря в цих каналах і згідно з виразом (9) збільшує коефіцієнт тепловіддачі, що призводить до зменшення температури ПМ. Зменшення температури ПМ збільшує їх B_r та H_c і, як результат, потужність СДПМ зростає. Однак, надмірне зменшення діаметру вентиляційних каналів, навіть незважаючи на збільшення коефіцієнту тепловіддачі, призводить до того, що їх активної площі стає недостатньо для ефективного відведення тепла від ПМ. Як результат, температура ПМ зростає, а потужність СДПМ знижується.

- При збільшенні діаметру кола, на якому розташовані вентиляційні канали ротора (при наближенні каналів до ПМ) температура ПМ зменшується, оскільки зменшується відстань, яку проходить тепловий потік на шляху до каналів і як результат, потужність СДПМ

зростає. Надмірне наближення вентиляційних каналів, як і у випадку надмірного їх зменшення, призводить до зниження потужності СДПМ, навіть незважаючи на те, що температура ПМ знижується. Це пояснюється створенням додаткового опору для магнітного потоку ПМ (вентиляційні канали знаходяться надто близько до ПМ і заважають вільному проходженню магнітного потоку), виникає так звана “магнітна пробка”.

• Конструкція системи охолодження має значний вплив на характеристики СДПМ. При незмінному нагріві двигуна неоптимальний підбір її основних геометричних параметрів призводить до зменшення вихідної потужності. Різниця в вихідній потужності двох “найгірших” варіантів ($d_{к,ротора} = 25$ мм., $d_p = 165$ мм. та $d_{к,ротора} = 20$ мм., $d_p = 165$ мм.) в порівнянні з “оптимальним” ($d_{к,ротора} = 15$ мм., $d_p = 146$ мм) склала 5% ($P_2 = 123$ кВт) та 3% ($P_2 = 125,2$ кВт) відповідно через наявність “магнітних пробок” та низький коефіцієнт тепловіддачі.

Під час функціонування тягового двигуна внаслідок особливостей експлуатації локомотиву потягу можуть спостерігатись періоди навантаження СДПМ вище за номінальне (рух потягу на підйом тощо). При перевантаженні за струмом 25% різниця вихідної потужності між “оптимальним” ($P_{2,перевант.25\%} = 160,3$ кВт) та двома “найгіршими” варіантами склала 5% ($P_{2,перевант.25\%} = 152$ кВт) та 7% ($P_{2,перевант.25\%} = 149,5$ кВт) відповідно. При перевантаженні 50% потужність “оптимального” СДПМ зростає до 190,3 кВт, а різниця склала 7% ($P_{2,перевант.50\%} = 177$ кВт) та 10% ($P_{2,перевант.50\%} = 172$ кВт) відповідно. Збільшення різниці зі зростанням навантаження пояснюється посиленням впливу “магнітної пробки”, що зумовлено підвищенням магнітної індукції в ярмі ротора.

Одним із конструктивних варіантів системи охолодження ротора СДПМ є використання “підпазових” охолоджуючих каналів для безпосереднього охолодження ПМ повітрям.

На рис.3 зображений поперечний переріз та теплове поле досліджуваного СДПМ в номінальному режимі роботи із використанням “підпазових” охолоджуючих каналів. В табл.3 наведені його основні параметри.

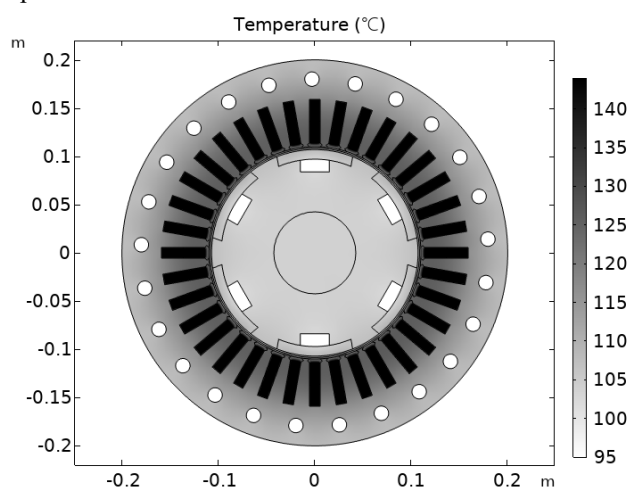


Рис. 3. Розподіл теплового поля СДПМ з “підпазовими” охолоджуючими каналами в номінальному режимі роботи

Таблиця 3 – Параметри СДПМ з “підпазовими” каналами

Показник	Величина
Кількість підпазових каналів ротора	6
Розмір каналів ротора (ШxВ), мм	30x12
Температура обмотки статора, °C	144
Температура ПМ, °C	96
Потужність (P_2), кВт	122

В порівнянні з “оптимальним” СДПМ з традиційними вентиляційними каналами, температура ПМ знизилась зі 104°C до 96°C. Це пояснюється тим, що частина тепла відводиться безпосередньо від ПМ у вентиляційний канал. Але за рахунок зменшення площі для проходження магнітного потоку (“підпазові” канали знаходяться відразу під ПМ), навіть при меншій температурі ПМ, потужність двигуна зменшилась на 5% ($P_2 = 122$ кВт).

Можна зробити висновок, що використання “підпазових” каналів є доцільним, коли є ризик значного нагріву ПМ, оскільки в цьому випадку відстань, яку проходить тепловий потік на шляху до каналів, є мінімальною, що знизить температуру ПМ. Застосування “підпазових” каналів для ПМ з помірним нагрівом не є доцільним, оскільки незважаючи на покращене охолодження ПМ, потужність СДПМ знижується через зменшення площі для проходження магнітного потоку.

Висновки. 1. Встановлено, що зменшення діаметру вентиляційних каналів ротора призводить до зростання вихідної потужності СДПМ внаслідок збільшення коефіцієнту тепловіддачі в цих каналах і зниження температури ПМ. Однак, надмірне зменшення діаметру каналів, призводить до того, що їх активної площі стає недостатньо для ефективного відведення тепла від ПМ. Як результат, температура ПМ зростає, а вихідна потужність СДПМ знижується.

2. Показано, що наближення вентиляційних каналів ротора до ПМ призводить до зростання вихідної потужності СДПМ, оскільки температура ПМ знижується внаслідок зменшення відстані, яку проходить тепловий потік. Надмірне наближення вентиляційних каналів, як і у випадку надмірного їх зменшення, призводить до зниження вихідної потужності СДПМ (навіть незважаючи на те, що температура ПМ знижується) внаслідок виникнення “магнітної пробки”.

3. З’ясовано, що використання “підпазових” каналів для безпосереднього охолодження ПМ є доцільним, коли є ризик їх значного нагріву, оскільки в цьому випадку частина тепла буде відводитись відразу від ПМ, що покращить їх температурний режим роботи. Застосування таких каналів для охолодження ПМ з помірним нагрівом є недоцільним через зниження вихідної потужності СДПМ внаслідок зменшення площі для проходження магнітного потоку.

4. Продемонстровано, що неоптимальний вибір геометричних параметрів системи охолодження може знизити вихідну потужність досліджуваного СДПМ в номінальному режимі роботи на 5%. При перевантаженні за струмом 50% зменшення потужності двигуна може досягати 10%

5. Підтверджено ефективність мультифізичного підходу для оптимізації конструкції потужних

синхронних магнітоелектричних двигунів, оскільки виявлення зазначених залежностей стало можливим завдяки всебічному врахуванню взаємного впливу фізичних процесів різної природи на досліджуваній СДПМ.

Список літератури

- 1 S. Magdaleno-Adame, G. J. Cunningham, D. Miller, S. O'Brien. Calculation of the Remnant Magnetization and Magnetic Saturation Characteristics for Sintered NdFeB Permanent Magnets Utilizing Finite Element Transient Simulations. IEEE Transactions on Magnetism, 2019, vol. 55, no. 12, pp. 1–9. doi: <http://doi.org/10.1109/tmag.2019.2940426>.
- 2 M. Sagawa and Y. Une, The status of sintered NdFeB magnets, Modern Permanent Magnets, 2022 pp. 135–168. doi: <http://doi.org/10.1016/b978-0-323-88658-1.00010-8>.
- 3 Y. Yoshida and N. Yoshikawa, Hot formed NdFeB magnets, Modern Permanent Magnets, 2022, pp. 251–304. doi: <http://doi.org/10.1016/b978-0-323-88658-1.00006-6>.
- 4 Температурні характеристики магнітів NdFeB URL: <https://tymagnets.com/ru/температурные-характеристики-спеченных-неодимовых-магнитов> (дата звернення 20.02.2026).
- 5 Physical Properties of Permanent Magnet Materials <https://www.allianceorg.com/pdfs/PhysicalPropertiesofMagnets.pdf> (дата звернення 25.02.2026).
- 6 Васьковський Ю.М., Нестеренко Д.С. Вплив нагріву постійних магнітів на характеристики потужних синхронних магнітоелектричних двигунів. Технічна електродинаміка. 2025. №6. с. 34–43. doi: <https://doi.org/10.15407/techne2025.06.034>.
- 7 O. Bilgin, F. A. Kazan, "The effect of magnet temperature on speed, current and torque in PMSMs," 2016 XXII International Conference on Electrical Machines (ICEM), pp. 2080–2085, Sep. 2016, doi: [10.1109/icelmach.2016.7732809](https://doi.org/10.1109/icelmach.2016.7732809).
- 8 Васьковський, Ю. М. Математичне моделювання електричних машин з постійними магнітами / Ю. М. Васьковський, Ю. А. Гайдено, М. А. Коваленко ; КПІ ім. Ігоря Сікорського.
- 9 Васьковський Ю.М., Коваленко М.А. Математичне моделювання електричних машин методами теорії поля Київ, НТУУ «КПІ», 2025. 262с. ISBN 978-617-8597-03-0.
- 10 I. Petrov, D. Egorov, J. Link, R. Stern, S. Ruoho, and J. Pyrhonen, "Hysteresis Losses in Different Types of Permanent Magnets Used in PMSMs," IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 64, no. 3, pp. 2502–2510, Mar. 2017, doi: <http://doi.org/10.1109/tie.2016.2548440>.
- 11 M. Baranski, A. Demenko, W. Szelag, and W. Lyskawinski, "Experimental verification of temperature effects on functional parameters in a line start permanent magnet synchronous motor," IET Science, Measurement & Technology, vol. 18, no. 9, pp. 491–498, May 2024, doi: <http://doi.org/10.1049/smt2.12206>.
- 12 Гольдберг О.Д., Гурін Я.С., Свириденко І.С. Проектирование электрических машин. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Высш. шк., 2001. 430 с.
- 13 Филипов И. Ф. Теплообмен в электрических машинах. Ленинград, 1986, 255 с.

References (transliterated):

- 1 Magdaleno-Adame, G. J. Cunningham, D. Miller, S. O'Brien. Calculation of the Remnant Magnetization and Magnetic Saturation Characteristics for Sintered NdFeB Permanent Magnets Utilizing Finite Element Transient Simulations. IEEE Transactions on Magnetism, 2019, vol. 55, no. 12, pp. 1–9. doi: <http://doi.org/10.1109/tmag.2019.2940426>.
- 2 M. Sagawa and Y. Une, The status of sintered NdFeB magnets, Modern Permanent Magnets, 2022 pp. 135–168. doi: <http://doi.org/10.1016/b978-0-323-88658-1.00010-8>.
- 3 Y. Yoshida and N. Yoshikawa, Hot formed NdFeB magnets, Modern Permanent Magnets, 2022, pp. 251–304. doi: <http://doi.org/10.1016/b978-0-323-88658-1.00006-6>.
- 4 Temperature characteristics of magnets NdFeB, URL: <https://tymagnets.com/ru/температурные-характеристики-спеченных-неодимовых-магнитов> (accessed 20.02.2026).
- 5 Physical Properties of Permanent Magnet Materials <https://www.allianceorg.com/pdfs/PhysicalPropertiesofMagnets.pdf> (accessed 25.02.2026).
- 6 Vaskovskiy Yu.M., Nesterenko D.S. "The impact of permanent magnets heating on the characteristics of powerful traction synchronous magneto-electric motors." Tekhnichna Elektrodynamika, no.6, 2025, pp. 34-43. (Ukr.). doi: <https://doi.org/10.15407/techne2025.06.034>.
- 7 O. Bilgin, F. A. Kazan, "The effect of magnet temperature on speed, current and torque in PMSMs," 2016 XXII International Conference on Electrical Machines (ICEM), pp. 2080–2085, Sep. 2016, doi: [10.1109/icelmach.2016.7732809](https://doi.org/10.1109/icelmach.2016.7732809).
- 8 Vaskovskiy, Yu. M. *Mathematical Modeling of Electric Machines with Permanent Magnets* / Yu. M. Vaskovskiy, Yu. A. Haidenko, M. A. Kovalenko; National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" (Ukr.).
- 9 Vaskovskiy, Yu. M., Kovalenko M. A. *Mathematical Modeling of Electrical Machines Using Field Theory Methods*. Kyiv, NTUU «KPI». 2025. 262с. ISBN 978-617-8597-03-0. (Ukr.).
- 10 I. Petrov, D. Egorov, J. Link, R. Stern, S. Ruoho, and J. Pyrhonen, "Hysteresis Losses in Different Types of Permanent Magnets Used in PMSMs," IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 64, no. 3, pp. 2502–2510, Mar. 2017, doi: <http://doi.org/10.1109/tie.2016.2548440>.
- 11 M. Baranski, A. Demenko, W. Szelag, and W. Lyskawinski, "Experimental verification of temperature effects on functional parameters in a line start permanent magnet synchronous motor," IET Science, Measurement & Technology, vol. 18, no. 9, pp. 491–498, May 2024, doi: <http://doi.org/10.1049/smt2.12206>.
- 12 Goldberg O.D., Gurin Ya.S., Sviridenko I.S. Design of electric machines. 2nd ed., revised and supplemented. Moscow: Vysshaya shkola, 2001. 430 p. (Rus).
- 13 Filippov I.F. Heat transfer in electric machines. Leningrad, 1986, 255 p. (Rus).

Надійшла (Received) 25.01.2026

Прийнята (Accepted) 06.02.2026

Опублікована (Published) 30.04.2026

Відомості про авторів / About the authors

Васьковський Юрій Миколайович (Yuriy Vaskovskiy) – доктор технічних наук, професор кафедри електромеханіки; Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»; м. Київ, Україна. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1262-0939>; e-mail: vun157@gmail.com

Нестеренко Денис Сергійович (Denys Nesterenko) – аспірант кафедри електромеханіки, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»; м. Київ, Україна. e-mail: denial112222@gmail.com