

АНАЛІЗ ПИТОМИХ ВАГОГАБАРИТНИХ ПОКАЗНИКІВ ВИСОКОШВИДКІСНОГО СИНХРОННОГО ДВИГУНА ІЗ ПОСТІЙНИМИ МАГНІТАМИ

- КОВАЛЕНКО М.А. канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри електромеханіки національного технічного університету України “Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського” Київ, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5602-2001>, e-mail: kovalenko87ma@gmail.com;
- ЦИВІНСЬКИЙ С.С. канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри електромеханіки національного технічного університету України “Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського” Київ, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2800-6709>, e-mail: ntuukafem@gmail.com;
- КОВАЛЕНКО І.Я. старший викладач, PhD, кафедри відновлювальних джерел енергії національного технічного університету України “Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського” Київ, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1097-2041>, e-mail: 2048141@ukr.net;
- ГАЙДЕНКО Ю.А. канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри електромеханіки національного технічного університету України “Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського” Київ, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5862-2812>, e-mail: gaidenko@ukr.net;
- ТРУХАНОВ О.В. аспірант кафедри електромеханіки національного технічного університету України “Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського” Київ, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-4040-2204>, e-mail: oleg.trukhanov@gmail.com.

Мета роботи. Визначення залежностей питомої потужності та питомого об'єму від розрахункової потужності та конструктивних розмірів для формування критеріїв оцінки ефективності ваго-габаритних показників високошвидкісного синхронного двигуна із постійними магнітами та зовнішнім ротором.

Методи дослідження. Класичні методи електромагнітного розрахунку основних розмірів синхронних двигунів із магнітоелектричним збудженням.

Отримані результати. За результатами розрахунків ваго-габаритних показників високошвидкісних синхронних двигунів із постійними магнітами, виконаного класичним методом, визначено вагу та об'єм активних матеріалів: магнітного осердя, постійних магнітів та міді обмотки статора. Для розрахунку прийнято діапазон потужності від 250 Вт до 15 кВт при 10000 об/хв, що відповідає найбільш часто використовуваними двигунами по потужності в різних галузях техніки та застосуваннях. Встановлено нелінійний характер зміни питомих показників синхронних двигунів із постійними магнітами. Визначено, що максимальна питома потужність (близько 80 кВт/кг) досягається в діапазоні 7–9 кВт, після чого цей показник знижується через теплові обмеження та зростання маси конструктивних елементів. Оптимальний діапазон потужності за критерієм питомого об'єму, при циліндричній конструкції прототипу із зовнішнім ротором, становить 1,5–4,5 кВт. Результати досліджень показують, що зі зростанням потужності змінюється баланс мас: відносна частка міді в обмотці статора збільшується, тоді як частка магнітного осердя зменшується. Це зумовлено необхідністю мінімізації електричних втрат для підтримки високого ККД та обмеженнями щодо тепловідведення.

Наукова новизна. Систематизовано залежності питомих характеристик високошвидкісних показників синхронних двигунів із постійними магнітами із зовнішнім ротором від їх геометричних параметрів та рівня використання активних матеріалів, що дозволило ідентифікувати зони найвищої ефективності конструкції при незмінній швидкості обертання.

Практична цінність. Запропонований підхід надає інженерні критерії для обґрунтованого вибору топології та основних розмірів високошвидкісних двигунів на ранніх етапах проектування, забезпечуючи досягнення найкращих масо-габаритних характеристик.

Ключові слова: питомі показники; синхронні двигуни; постійні магніти; високошвидкісний двигун.

I. ВСТУП

Високошвидкісними синхронними двигунами умовно називаються електричні машини швидкість обертання ротора яких перевищує 10000 об/хв. Такі двигуни мають кращі питомі показники, менші габаритні розміри, що обумовлює їх широке використання у різноманітних технічних пристроях різного функціонального призначення.

Сучасний розвиток електромеханічних систем характеризується зростанням вимог до енергоефективності, питомих ваго-габаритних показників та динамічних властивостей електричних машин, що зумовлює підвищений інтерес до високошвидкісних електродвигунів із постійними магнітами (ПМ). Такі двигуни знаходять широке застосування в автономних енергоустановках, електроприводах транспортних засобів, авіаційній та космічній техніці, а також у високошвидкісних компресорних і насосних агрегатах [1].

Розвиток автономної енергетики, авіабудування та електротранспорту характеризується стійкою тенденцією до підвищення частоти обертання електричних машин. Перехід до високошвидкісних режимів роботи (понад 10 000 об/хв) дозволяє суттєво зменшити габаритні розміри та вагу електромеханічних перетворювачів енергії, що є дуже важливим для мобільних та автономних об'єктів. Серед розмаїття типів електричних машин найбільш перспективними для таких областей застосування є двигуни з постійними магнітами, які мають найвищі значення питомої потужності та коефіцієнта корисної дії.

З загальної теорії електромеханічних перетворювачів енергії відомо, що високі швидкості обертання дозволяють зменшити габарити та масу двигуна при збереженні або підвищенні вихідної потужності, що робить аналіз питомих показників одним із ключових напрямків на етапі проектування.

У наукових дослідженнях, присвячених двигунам із постійними магнітами, значна увага приділяється електромагнітним характеристикам, втратам, тепловим режимам та методам чисельного моделювання. Водночас аналіз питомих показників високошвидкісних машин часто обмежується узагальненими емпіричними залежностями або результатами оптимізації для окремих класів конструкцій [2]. Це ускладнює порівняльну оцінку різних топологій двигунів та не завжди дозволяє однозначно визначити вплив швидкості обертання, геометричних параметрів і властивостей магнітних матеріалів на питомі масо-габаритні показники та величину потужності в цілому.

Крім того, у сучасних дослідженнях спостерігається певна суперечність між прагненням до максимального зменшення маси та габаритів двигуна і обмеженнями, пов'язаними з механічною міцністю ротора, тепловими навантаженнями та зростанням втрат

на високих частотах. Високошвидкісний режим роботи зумовлює необхідність врахування додаткових факторів, зокрема механічних напружень у постійних магнітах, впливу повздовжніх та поперечних магнітних потоків та кінцевих ефектів, а також зміни ефективності використання активних матеріалів [3]. У результаті наявні підходи до оцінки питомих показників не завжди забезпечують достатню точність і універсальність для різних діапазонів потужності та швидкості обертання.

У зв'язку з цим актуальним є комплексний аналіз питомих показників високошвидкісних двигунів із постійними магнітами з урахуванням конструктивних, електромагнітних та експлуатаційних особливостей. Такий підхід дозволяє виявити закономірності зміни питомої потужності, питомої маси та масо-габаритних показників залежно від швидкості обертання і геометрії активної частини машини, а також сформулювати обґрунтовані рекомендації для вибору оптимальної конструкції.

Дане дослідження спрямоване на оцінку питомих ваго-габаритних показників високошвидкісних синхронних двигунів із постійними магнітами для порівняльної оцінки при проектуванні таких двигунів на різну потужність за умови постійної швидкості обертання.

II. АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Аналіз сучасних наукових публікацій свідчить, що високошвидкісні синхронні двигуни із постійними магнітами є одним із найбільш перспективних напрямів розвитку електромеханічних перетворювачів енергії для систем, де ключовими вимогами є висока питома потужність, мінімальні масо-габаритні показники та підвищена енергоефективність [4]. Такі двигуни використовуються в автономних енергоустановках, авіаційних та космічних системах, транспортних приводах, високошвидкісних компресорах та насосних агрегатах, що обумовлює інтенсивний розвиток досліджень в даній галузі [5], [6].

Перший етап формування наукових підходів до високошвидкісних двигунів із постійними магнітами був зосереджений на загальних фізичних принципах розрахунку електромагнітного поля [7], проектування із використанням аналітичних та чисельних підходів та аналізі втрат у магнітопроводі і обмотках [8]. У більшості відомих роботах [9], [10] основна увага приділяється підвищенню коефіцієнта корисної дії та забезпеченню стабільної роботи при підвищених частотах обертання, при цьому масо-габаритні показники розглядалися переважно як похідні від потужності та швидкості обертання без глибокого системного аналізу [11].

Подальший розвиток досліджень характеризується переходом до мультифізичних моделей [12], у яких одночасно враховуються електромагнітні, теплові та механічні процеси [13]. Багато досліджень прис-

вчені огляду і прикладним розробкам в яких аналізуються напружено-деформований стан ротора, обмеження, пов'язані з міцністю постійних магнітів, а також зростання втрат на високих частотах [14]. Це дозволило обґрунтувати допустимі швидкісні діапазони та запропонувати конструктивні рішення для підвищення надійності високошвидкісних двигунів із ПМ [15]. Водночас питомі вагогабаритні показники в більшості випадків оцінюються для конкретних конструкцій або прикладних задач і не узагальнюються у вигляді універсальних закономірностей.

У сучасних публікаціях значна увага приділяється підвищенню питомої потужності шляхом оптимізації геометрії активної частини електричної машини [16], вибору високоєфективних магнітних матеріалів та застосування нетрадиційних топологій статора і ротора [17]. Проте в таких дослідженнях часто спостерігається протиріччя між прагненням до мінімізації маси і габаритів та необхідністю забезпечення механічної міцності, теплової стійкості й допустимого рівня втрат. Як наслідок, порівняння питомих показників різних високошвидкісних СДПМ здійснюється за різними критеріями, що ускладнює об'єктивну оцінку ефективності конструктивних рішень.

Проведений аналіз літератури показує, що на даний момент недостатньо систематизовані залежності питомих вагогабаритних показників високошвидкісних синхронних двигунів із постійними магнітами циліндричної конструкції із зовнішнім ротором від швидкості обертання, геометричних параметрів активної частини та рівня використання магнітних і електропровідних матеріалів. Більшість відомих робіт зосереджені або на детальному аналізі окремих конструкцій [18], або на чисельній оптимізації без формування узагальнених інженерних критеріїв для порівняльного аналізу [18].

Тому актуальним науково-практичним завданням є розвиток проблематики оцінки та аналізу питомих вагогабаритних показників високошвидкісних синхронних двигунів із постійними магнітами з точки зору узагальнення та порівняння при проектуванні таких двигунів різної потужності для різних потреб та пошук оптимальної потужності, з якої питомі показники є найкращими.

Запропонований підхід дозволяє оцінити вплив швидкості обертання та конструктивних параметрів на питому потужність і вагогабаритні характеристики, що створює підґрунтя для обґрунтованого вибору топології та основних розмірів двигуна на ранніх етапах проектування. Таким чином, робота доповнює наявні дослідження та розвиває напрямок комплексної оцінки ефективності високошвидкісних синхронних двигунів із ПМ та зовнішнім ротором.

III. МЕТА РОБОТИ

Визначення залежностей питомої потужності та питомого об'єму від розрахункової потужності та

конструктивних розмірів для формування критеріїв оцінки ефективності вагогабаритних показників високошвидкісного синхронного двигуна із постійними магнітами та зовнішнім ротором.

IV. ВИКЛАДЕННЯ ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ І АНАЛІЗ ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

Оцінка питомих вагогабаритних показників проводиться для високошвидкісного синхронного двигуна із постійними магнітами та зовнішнім ротором, що топологічно відноситься до класу циліндричних електромеханічних перетворювачів енергії з радіальним магнітним потоком. Основний магнітний потік у таких двигунах збуджується рідкоземельними висококоерцитивними постійними магнітами. Загальний вигляд прототипу досліджуваного двигуна із постійними магнітами наведено на рис. 1.

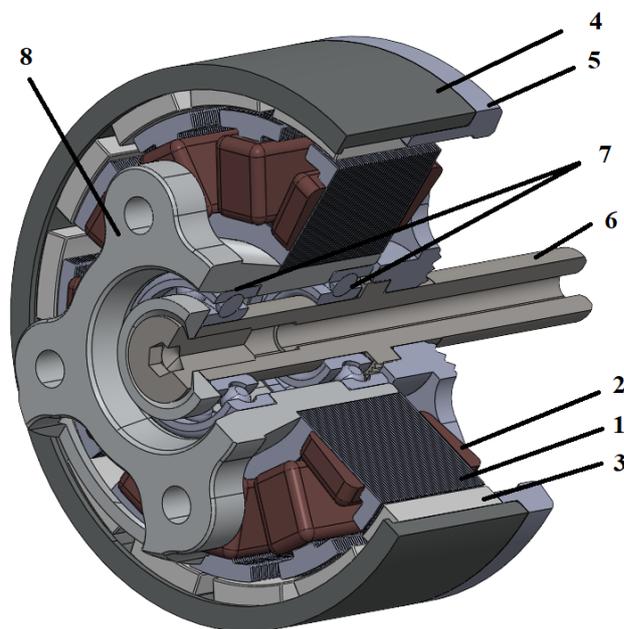


Рисунок 1. Загальний вигляд прототипу досліджуваного двигуна

На рис. 1 показано: 1 – шихтоване магнітне осердя статора; 2 – трифазна обмотка статора; 3 – постійні магніти ротора; 4 – втулка ротора (що одночасно виконує роль корпусу); 5 – конструктивна втулка ротора; 6 – вал двигуна; 7 – підшипники; 8 – конструктивна втулка статора.

Магнітне осердя прототипу двигуна виконується із тонколистової електротехнічної сталі ($\approx 0,1 \dots 0,15$ мм) для зменшення втрат на вихрові струми. Трифазна обмотка статора виконується із круглого обмотувального проводу в декілька паралельних гілок та має, як правило, один зубцевий крок. Для всіх значень розрахункових потужностей використовуються висококоерцитивні неодимові магніти постійні магніти типу N35. Корпус ротора в даному двигуні є обертовою частиною (разом із постійними магнітами, валом та

конструктивною втулкою ротора) і виконується литою із магнітопровідного матеріалу, що забезпечує зменшення магнітного опору основному магнітному потоку. Конструктивна втулка ротора виготовляється методом лиття чи фрезерування заготовки із алюмінію і має складну конфігурацію, що забезпечує додаткове охолодження двигуна та одночасне заощадження ваги обертової частини, зменшення моменту інерції та швидкодії такого двигуна. Вал виготовляється із конструктивної сталі та має наскрізний отвір. Втулка статора виконує конструктивну функцію та забезпечує фіксацію двигуна та є місцем для розміщення підшипників кочення чи ковзання.

Очевидно, що оцінка питомих вагогабаритних показників проводиться для різних величин потужності досліджуваного двигуна. Для об'єктивної оцінки зміни питомих показників при зміні величини потужності ряд вихідних параметрів повинні залишатись незмінними у процесі розрахунку основних розмірів, ваги та об'єму синхронного двигуна. У табл. 1 наведено вихідні параметри, що залишаються незмінними у процесі оцінки питомих показників та зміні потужності для ряду досліджуваних двигунів.

Таблиця 1. Постійні величини

Параметр	Величина
Швидкість обертання, об/хв	10000,0
Кількість пар полюсів, p	1
Кількість фаз, m	3
Індукція в повітряному проміжку, Тл	0,7
Лінійне навантаження, А/м	20000,0
Номинальна напруга живлення, В	25,0
Густина струму в обмотках, А/мм ²	8,0
Геометричний коефіцієнт λ	0,50
$\cos\varphi$	0,9
ККД	0,9
Відношення внутрішнього діаметру статора до зовнішнього діаметру статора	0,32
Коефіцієнт полюсного перекриття	0,7
Залишкова магнітна індукція ПМ, Тл	1,2
Коерцитивна сила	900000,0

ПМ, А/м	
Величина повітряного проміжку, мм	0,2
Коефіцієнт заповнення паза міддю	0,67
Відносна магнітна проникність ПМ	1,1

Для оцінки питомих вагогабаритних показників необхідно розрахувати основні розміри двигуна, параметри обмотки та магнітної системи. Це дозволить визначити об'єм та вагу активних матеріалів для двигунів із зовнішнім ротором та постійними магнітами різної потужності. В даній роботі використовується методика, що наведена у літературних джерелах [4], [5], [6], [12]. Алгоритм розрахунку ваги та об'єму активних матеріалів наведено нижче.

Розраховується діаметр статора за наступним виразом [4]:

$$D_m = 3 \sqrt{\frac{T_{em}}{C_t \cdot k_c \cdot \lambda}}$$

де k_c – коефіцієнт ефективної довжини (коефіцієнт заповнення сталлю), λ – геометричний коефіцієнт.

При попередньому розрахунку конструктивної сталі та електромагнітного моменту [12]:

$$T_{em} = 9,55 \cdot \frac{P}{n},$$

$$C_t = \frac{\pi}{2} \cdot B_\delta \cdot A_l \cdot k_l$$

де P – потужність, n – швидкість обертання, де B_δ – індукція в проміжку, A_l – питоме електричне навантаження, k_l – обмотувальний коефіцієнт.

Активна довжина магнітного осердя статора розраховується за наступним виразом [4]:

$$L_l = \lambda \cdot D_m$$

де λ – геометричний коефіцієнт, що обирається по відомим рекомендаціям [4] чи виходячи із практичного досвіду інженера-проектувальника чи по іншим вимогам (технічному завданню, вимогам, особливостям використання).

Вага магнітного осердя визначається виходячи із розрахунку повного геометричного об'єму статора (без урахування пазів) [5]:

$$V_{cyl} = \frac{\pi}{4} \cdot (D_m^2 - D_i^2) \cdot L_l$$

де D_i – внутрішній діаметр статора (під вал).

Об'єм пазів розраховується виходячи із наступних міркувань [6]:

$$V_s = Z \cdot h_s \cdot b_s \cdot L_l$$

де Z – кількість пазів (зубців), h_s – висота паза, b_s – середня ширина паза.

Об'єм "чистого" заліза феромагнітного осердя статора розраховується наступним чином [6]:

$$V_{fe} = (V_{cyl} - V_s) \cdot k_c$$

Розрахувавши об'єм, визначається вага магнітного осердя статора [6]:

$$m_{fe} = V_{fe} \cdot \rho_{fe}$$

де $\rho_{fe} = 7700(\text{кг} / \text{м}^3)$ – питома густина електротехнічної сталі.

Розрахунок параметрів обмотки статора доцільно розпочати із розрахунку кількості витків за відомим виразом [12]:

$$W_l = \frac{U_l}{4,44 \cdot f_l \cdot \Phi \cdot k_l}$$

Середня довжина витка обмотки статора, для двигуна із внутрішнім статором визначається наступним чином [12]:

$$l_{tl} = 2 \cdot L_l + 2 \cdot \tau$$

де τ – полюсна поділлка.

Загальна довжина провідника, (для всієї обмотки) визначається наступним чином [12]:

$$L_{cu} = W_l \cdot l_{tl} \cdot m$$

де m – кількість фаз.

Відповідно об'єм обмотки статора:

$$V_{cu} = L_{cu} \cdot \frac{A_{cu1} \cdot 10^{-6}}{U_p}$$

де A_{cu1} – площа міді пазу та вага обмотки статора визначається за виразом:

$$m_{cu} = V_{cu} \cdot \rho_{cu1}$$

де $\rho_{cu1} = 8900(\text{кг} / \text{м}^3)$ – прийнята питома густина міді.

Для розрахунку параметрів постійних магнітів, спочатку необхідно визначити величину магнітного потоку на один полюс:

$$\Phi_p = B_\delta \cdot b_{pm} \cdot L_l \cdot k_\delta$$

де b_{pm} – ширина постійного магніту по дузі ротора, k_δ – коефіцієнт форми поля в повітряному проміжку.

Радіальна висота постійного магніту визначається

із наступних міркувань:

$$h_{pm} = \frac{B_\delta \cdot \delta}{\mu_0 \cdot H_c \cdot k_m}$$

де δ – величина повітряного проміжку, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}(\text{Гн} / \text{м})$ – магнітна проникність повітря, H_c – коерцитивна сила магніту, k_m – коефіцієнт використання магніту.

Загальний об'єм постійних магнітів та їх вага визначаються по наступним виразам [12]:

$$V_{pm} = 2 \cdot p \cdot V_{pm1},$$

$$m_{pm} = V_{pm} \cdot \rho_{pm}$$

де p – кількість пар полюсів; $\rho_{pm} = 7500(\text{кг} / \text{м}^3)$ – прийнята питома густина для даного матеріалу магніту.

Відповідно загальна вага активних матеріалів та їх об'єм визначається як сума всіх активних матеріалів (магнітного осердя статора та ротора, обмотки статора та постійних магнітів) [6]:

$$M_m = m_{fe} + m_{cu} + m_{pm}$$

$$V_m = V_{fe} + V_{cu} + V_{pm}$$

Оцінка питомих показників проводиться для наступного ряду двигунів із постійними магнітами по потужності: від 250 Вт до 15000 Вт. Вибір саме такого діапазону потужностей обумовлений тим, що це є найбільш часто використовуваними двигунами по потужності в різних галузях техніки та застосуваннях [10].

Завдання розрахунку питомих розмірів супроводжується проведенням серії ітераційних розрахунків із використанням класичної методики розрахунку основних розмірів та основних рівнянь синхронної машини, оскільки зміна потужності (при фіксованих електромагнітних навантаженнях та частоті A , B_δ , n) призводить до зміни умовного об'єму активних матеріалів двигуна $D^2 \cdot L$.

Питомими показниками, що розглядаються в даній роботі, є відношення розрахункової потужності двигуна V_m до ваги активних матеріалів kg та об'єму m^3 активних матеріалів. Активними матеріалами крім обмотки статора та магнітного осердя статора та ротора вважаються постійні магніти, що враховано в розрахунок.

Для практичного використання отриманих результатів та забезпечення можливості аналізу питомих вагогабаритних показників високошвидкісних двигунів із ПМ та зовнішнім ротором, отримані в подальшому залежності апроксимовані методами нелінійної регресії.

Залежність зовнішнього діаметра D статора від розрахункової потужності P можливо описати степеневою функцією, що узгоджується з теорією геометричної подібності електричних машин:

$$P(D) = a \cdot D^b$$

де a , b – коефіцієнти, що враховують електромагнітне навантаження та обмеження за відцентровими силами при $n=10000$ об/хв.

Залежність питомого об'єму (кВт/м³) від номінального значення розрахункової потужності (кВт) представлена у вигляді полінома другого порядку, що відображає наявність екстремуму (оптимального діапазону використання матеріалів):

$$p_v(P) = a \cdot P^2 + b \cdot P + c$$

Залежність питомої потужності (кВт/кг) від номінального значення розрахункової потужності (кВт) апроксимована логарифмічними залежностями:

$$m_{cm}(P) = k_1 \cdot \ln(P) + c_1$$

$$m_{cu}(P) = k_2 \cdot \ln(P) + c_2$$

Результат розрахунку питомої активної потужності від номінального значення розрахункової потужності для прототипу досліджуваного синхронного двигуна наведено на рис. 2.

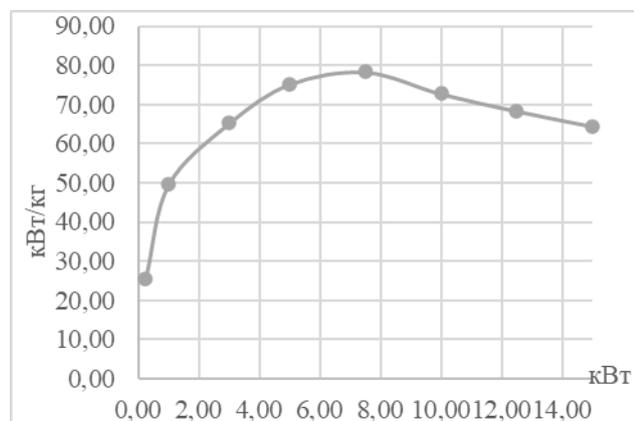


Рисунок 2. Залежність питомої потужності від номінального значення розрахункової потужності

По рис. 2 видно, що вага активних матеріалів збільшується пропорційно об'єму діаметра внутрішньої розтки статора D^3 , що впливає із основного рівняння для електромагнітної потужності, згідно з яким повна потужність пропорційна активній потужності та об'єму діаметра внутрішньої розтки статора $S \sim P \sim D^3$. На рис. 2 видно, що питома потужність Вт/кг починає зростати від 250 Вт, потім досягає свого максимуму у ≈ 80 Вт/кг для двигунів потужністю 7-9 кВт і починає зменшуватись для двигунів більшої потужності. Падіння питомої потужності після ≈ 9 кВт можливо пояснити за рахунок наступного:

– при збільшенні потужності значно зростають магнітні втрати та частково електричні, що призводить до критичного підвищення температури. Це обумовлює поступове зменшення електромагнітних навантажень A та B_s , що і призводить до падіння питомих показників;

– збільшення потужності призводить до росту механічних навантажень на конструктивні елементи двигуна. Тому збільшується також вага неактивних матеріалів таких як вал, корпус, підшипники і т.ін. Це є додатковим фактором, що впливає на падіння питомих показників.

Отримані результати є коректним фізичним відображенням того, що ефективність використання матеріалів (або питома потужність) зменшується для потужних електричних машин через обмеження охолодження та зростання частки конструктивних елементів та матеріалів.

Залежність потужності досліджуваного прототипу двигуна від об'єму активних матеріалів наведено на рис. 3.

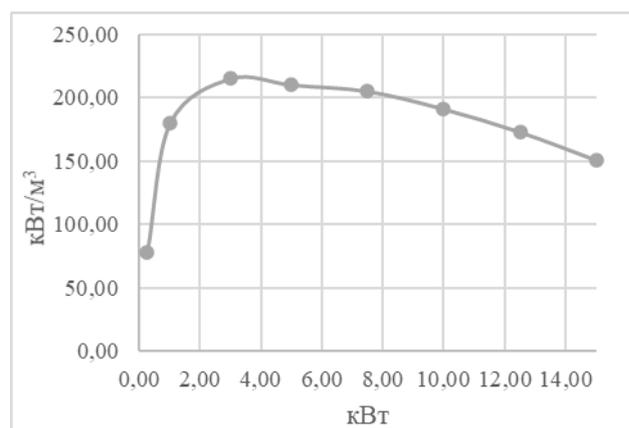


Рисунок 3. Залежність питомого об'єму від номінального значення розрахункової потужності

У двигунах малої потужності значну частку маси складають конструктивні елементи (корпус, вали, підшипники). При збільшенні потужності частка активних матеріалів зростає, що призводить до зростання питомої потужності (рис. 3). Після досягання максимуму питомого об'єму (при номінальному значенні розрахункової потужності $\approx 1,5-4,5$ кВт) збільшується довжина лобової частини обмотки статора та виникає необхідність збільшення повітряного проміжку для забезпечення жорсткості конструкції, що призводить до падіння питомого об'єму.

З іншого боку, при збільшенні номінальної потужності об'єм двигуна зростає швидше, ніж площа його поверхні. Оскільки потужність пропорційна об'єму, а ефективність відведення тепла через зовнішній ротор – площі (квадрату основних розмірів), у більш потужних двигунах збільшується об'єм теплового потоку від збільшених втрат. Це призводить до збіль-

шення маси та підвищення продуктивності системи охолодження, що сповільнює ріст питомої потужності відносно загальної потужності.

При збільшенні потужності (та відповідно, зовнішнього діаметра ротора) тангенціальна швидкість зростає. Щоб надійно зафіксувати постійні магніти при великих діаметрах потужних машин, необхідно застосовувати значно товщі бандажі або масивніші конструкційні елементи з високоміцних матеріалів та композитів. Це призводить до росту конструктивної маси ротора порівняно з ростом активної електромагнітної потужності.

Початкове зростання потужності від 250 Вт (рис. 3) пояснюється покращенням коефіцієнта використання активних матеріалів, а подальше уповільнення – необхідністю зміцнення конструкції зовнішнього ротора проти відцентрових сил та обмеженнями щодо тепловідведення з внутрішнього статора.

Розрахунковий діаметр двигуна є основним розміром, що характеризує об'єм двигуна та вагу активних матеріалів. Результат розрахунку зовнішнього діаметру статора, виконаного для прототипу досліджуваного синхронного двигуна з ПМ та зовнішнім ротором показано на рис. 4

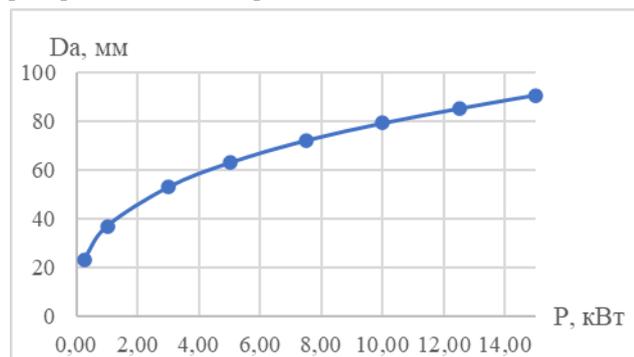


Рисунок 4. Залежність зовнішнього діаметру статора від розрахункової потужності двигуна

Згідно з класичною теорією електромеханічних перетворювачів енергії, потужність машини пропорційна квадрату діаметра ротора та його довжині. При пропорційному збільшенні зовнішнього діаметра спостерігається зростання номінальної потужності, оскільки збільшується не тільки плече прикладання тангенціальної сили, а й корисний об'єм активних матеріалів. Іншими факторами, що впливають на обмеження подальшого зростання діаметру та питомих показників є наступне:

лінійна швидкість на зовнішній поверхні ротора зростає прямо пропорційно. Збільшення діаметра призводить до зростання механічних напружень у ярі ротора та елементах кріплення постійних магнітів. Це призводить до збільшення товщини стінок ротора, що обмежує об'єм активних матеріалів;

– зі збільшенням діаметра зростає площа поверхні статора, що теоретично покращує тепловіддачу.

Проте, через високу частоту перемагнічування, втрати в магнітному осерді статора суттєво зростають. При великих діаметрах складніше забезпечити рівномірне охолодження внутрішніх частин обмотки, що вимагає обмеження густини струму, а отже стримує потенційне зростання потужності;

– при малих діаметрах та потужностях, значну частину перерізу займають конструктивні елементи (вал, підшипники). Зі збільшенням діаметра коефіцієнт використання внутрішнього простору під активні матеріали покращується, що пояснює крутий підйом графіку (рис. 4) на початковому етапі.

При зміні розрахункової потужності двигуна із постійними магнітами змінюється вага конструктивних матеріалів: міді обмотки статора, магнітного осердя статора та ротора та постійних магнітів. В роботі проведено оцінку зміни ваги активних матеріалів при зміні потужності. Характер відносної зміни ваги активних матеріалів до повної ваги двигуна показано на рис. 5.

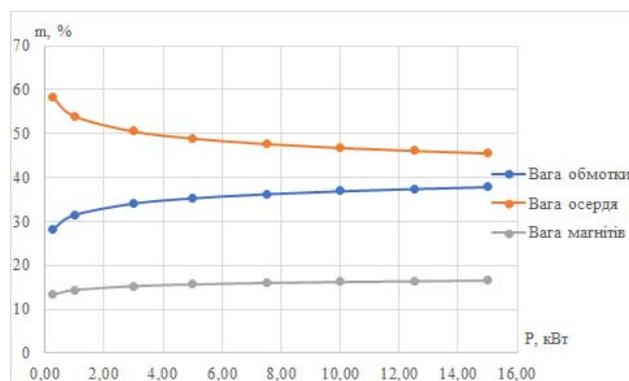


Рисунок 5. Відношення ваги активних матеріалів від розрахункової потужності двигуна

Отримані результати мають чітку фізичну інтерпретацію. Для високошвидкісних двигунів розміри та конфігурація магнітного осердя обирається (розраховується) з урахуванням обмежень за втратами на гістерезис і вихрові струми, які суттєво підвищуються із частотою. При збільшенні потужності, з одного боку, збільшується об'єм магнітного осердя (що виходить із основного рівняння для електромагнітної потужності), а з іншого боку підвищуються електромагнітні навантаження та проводиться оптимізація форми активної зони осердя (зубцево-пазової зони, ярма). У результаті абсолютна маса осердя зростає повільніше, ніж сумарна маса машини, що й проявляється як зменшення його відносної частки.

При підвищенні потужності, за умови незмінної швидкості обертання, зростає електромагнітний момент, що призводить до зростання струмів у обмотці статора. Для забезпечення допустимої густини струму та розрахункової потужності необхідно збільшувати сумарний переріз провідників, що безпосередньо призводить до зростання ваги міді. Крім того, зі збі-

льшенням активної потужності збільшуються втрати та температура, що додатково призводить до збільшення ваги обмотки для покращення тепловідведення та зменшення втрат від вищих гармонік та скін-ефекту.

Маса постійних магнітів визначається необхідною величиною магнітного потоку в повітряному проміжку, який при заданій швидкості обертання і допустимих механічних навантаженнях змінюється незначно. Для високошвидкісних машин магніти обмежені не стільки електромагнітними, скільки механічними та термічними навантаженнями (відцентрові сили, вплив розмагнічування від полів обмотки статора). При збільшенні потужності двигуна зростає магнітне поле реакції якоря, яке намагається розмагнітити магніти або спотворити основне магнітне поле. Для стабільної роботи при високих навантаженнях необхідно збільшувати об'єм магнітів, а не тільки їх площу. Тому при зростанні потужності відносна частка ваги постійних магнітів зростає, але повільніше за інші активні матеріали.

При збільшенні потужності двигуна часто доцільніше збільшувати діаметр D двигуна чим довжину L , з метою підвищення електромагнітного моменту ($M \sim D^2L$). Збільшення діаметра приводить до того, що довжина лобових частин обмотки статора зростає, що призводить до збільшення опору, втрат та ваги міді. У потужних двигунах це призводить до порушення балансу ваги активних матеріалів на користь збільшення активної довжини заліза, що призводить до збільшення відсотку ваги в бік електротехнічної сталі.

Отримані результати повністю відповідають фізичним процесам для високошвидкісних синхронних двигунів із постійними магнітами: зі зростанням потужності збільшуються електричні втрати та температура двигуна, тоді як габарити магнітної системи масштабуються в меншій мірі. Саме це призводить до збільшення питомої частки міді обмотки статора та зменшення відносної частки сталі магнітного осердя при мінливому збільшенні ваги магнітів у загальну масу активних матеріалів.

Крім того, збільшення відносної ваги обмотки статора та зменшення ваги магнітного осердя, при збільшенні потужності позитивно сприяє зміні співвідношення між втратами в магнітному осерді та електричними (змінними) втратами. Це призводить до зміщення точки з максимальним ККД в зону номінального навантаження.

Оптимальне співвідношення сталі та міді формується таким чином, щоб електромагнітна система працювала в зоні допустимих, але не критичних значень магнітної індукції, а густина струму забезпечувала мінімум втрат при заданій потужності та швидкості обертання. Для високошвидкісних двигунів із постійними магнітами це співвідношення, як правило, зміщується у бік збільшення частки міді порівняно з

традиційними низькошвидкісними машинами, оскільки зменшення електричних втрат більше впливає на ККД, ніж додаткове зниження магнітних втрат за рахунок нарощування маси сталі.

Конфлікт інтересів. Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів.

V. ВИСНОВКИ

На основі проведених досліджень можливо зробити наступні висновки.

1. Встановлено нелінійний характер зміни питомих вагогабаритних показників високошвидкісного синхронного двигуна із постійними магнітами в залежності від його номінальної розрахункової потужності. Для досліджуваного діапазону від 250 Вт до 15 кВт визначено, що питома потужність (кВт/кг) досягає свого максимуму (близько 80 кВт/кг) у діапазоні потужностей 7–9 кВт, після чого починає знижуватися через теплові та механічні обмеження.

2. Виявлено оптимальний діапазон потужностей за критерієм питомого об'єму, який становить 1,5–4,5 кВт. Подальше падіння показника кВт/м³ пояснюється збільшенням довжини лобових частин обмоток та необхідністю збільшення повітряного проміжку для забезпечення жорсткості конструкції при великих габаритах.

3. Досліджено зміну балансу маси активних матеріалів при зростанні номінальної потужності. Зокрема, відносна частка ваги міді обмотки статора зростає, тоді як відносна вага магнітного осердя зменшується. Це пов'язано з необхідністю збільшення перерізу провідників для забезпечення розрахункового значення густини струму та покращення тепловідведення, а також з оптимізацією зубцево-пазової зони магнітного осердя.

4. Визначено особливості проектування високошвидкісних машин, де співвідношення між електротехнічною сталлю та міддю зміщується у бік збільшення частки міді. Такий підхід дозволяє знижувати електричні втрати, що має більший вплив на ККД у високошвидкісних режимах, ніж нарощування ваги сталі для зниження магнітних втрат.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Kovalenko, M. A. Mathematical simulation of brushless high-speed permanent magnet motor / M. A. Kovalenko, D. V. Tsyplenkov, I. Ya. Kovalenko, E. O. Titov, O. O. Bazarov // *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. – 2025. – № 4. – P. 108–116. DOI: <https://doi.org/10.33271/nvngu/2025-4/108>.
- [2] Коваленко, М. А. Магнітоелектричний генератор з аксіальним магнітним потоком та подвійним статором для перетворення низькопотенціальної механічної енергії / М. А. Коваленко, І. В. Ткачук, І. Я. Коваленко, С. О. Жук, О. О. Кришньов // *Відновлювана енергетика*. – 2024. – № 2(77). –

- C. 13–20. DOI: [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2024.2\(77\).13-20](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2024.2(77).13-20).
- [3] Kovalenko, M. Determining the influence of structural and electromagnetic parameters on active losses in an electric motor with permanent magnets for unmanned aerial vehicles / M. Kovalenko, V. Chumack, V. Grebenikov, L. Mazurenko, I. Tkachuk, O. Bazarov, Y. Titov // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. – 2025. – Vol. 6, № 5(138). – P. 6–15. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2025.344817>.
- [4] An, G. Q. Review of key technologies of the high-speed permanent magnet motor drive / G. Q. An, Y. Lu, M. Zhao // *Energies*. – 2024. – Vol. 17, № 21. – Article 5252. DOI: <https://doi.org/10.3390/en17215252>.
- [5] Shen, Q. Design and analysis of the high-speed permanent magnet motors: a review on the state of the art / Q. Shen, Z. Zhou, S. Li, X. Liao [et al.] // *Machines*. – 2022. – Vol. 10, № 7. – Article 549. DOI: <https://doi.org/10.3390/machines10070549>.
- [6] Guo, L. Design of high power density double-stator permanent magnet synchronous motor / L. Guo // *IET Electrical Power Applications*. – 2023. DOI: <https://doi.org/10.1049/elp2.12258>.
- [7] Usca-Gomez, H. G. A review and case study of cooling methods for electric machines / H. G. Usca-Gomez // *Energies*. – 2025. – Vol. 16, № 8. – Article 437. DOI: <https://doi.org/10.3390/en16080437>.
- [8] Vlachou, V. I. Overview on permanent magnet motor trends and electromagnetic analysis / V. I. Vlachou // *Energies*. – 2024. – Vol. 17, № 2. – Article 538. DOI: <https://doi.org/10.3390/en17020538>.
- [9] Azom, M. A. Review of electrical and thermal modeling techniques for three-phase PMSM drives / M. A. Azom // *CSOL Journal*. – 2025.
- [10] Wang, Y. Review of high power density and fault-tolerant design of permanent magnet machines / Y. Wang // *Energies*. – 2023. – Vol. 16, № 19. – Article 7015. DOI: <https://doi.org/10.3390/en16197015>.
- [11] Chumak, V. V. Mathematical modeling of a synchronous generator with combined excitation / V. V. Chumak, M. A. Kovalenko, S. S. Tsvinskiy, I. V. Tkachuk, O. I. Ponomarev // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. – 2020. – Vol. 1, № 5(103). – P. 30–36. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.193495>.
- [12] Cheng, M. Design and calculation of multi-physical field of ultra-high-speed permanent magnet motor / M. Cheng, Z. Li, S. Xu, R. Pei // *Energies*. – 2024. – Vol. 17, № 13. – Article 3072. DOI: <https://doi.org/10.3390/en17133072>.
- [13] Zhang, M. The eddy current loss segmentation model of permanent magnet for temperature analysis in high-speed permanent magnet motor / M. Zhang, S. Luo, X. Liu, W. Li // *IET Power Electronics*. – 2021. – Vol. 14, № 4. – P. 751–759. DOI: <https://doi.org/10.1049/pe12.12009>.
- [14] Bi, Q. Loss analysis of high-speed permanent magnet motor for cordless vacuum cleaner / Q. Bi, D. Shao // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2023. – Vol. 2488. – Article 012021. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2488/1/012021>.
- [15] Liu, Z. An investigation into the pole-slot ratio and optimization of a low-speed and high-torque permanent magnet motor / Z. Liu, G. Zhang, G. Du // *Applied Sciences*. – 2024. – Vol. 14, № 10. – Article 3983. DOI: <https://doi.org/10.3390/app14103983>.
- [16] Zeng, Y. Influence of interference fit and temperature on high-speed permanent magnet motor / Y. Zeng, S. Yang, X. Yang, Q. Wang, L. Zhang, J. Hao, W. Hua // *Applied Sciences*. – 2023. – Vol. 13, № 20. – Article 11331. DOI: <https://doi.org/10.3390/app132011331>.
- [17] Wang, Y. Friction loss calculation and thermal analysis of submerged low-temperature high-speed permanent magnet motor / Y. Wang, B. Ge, L. Wang, S. Liu // *IEEE Access*. – 2023. – Vol. 11. – P. 107116–107125. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3320683>.
- [18] Li, Z. Loss calculation and thermal analysis of ultra-high-speed permanent magnet motor / Z. Li, P. Wang, L. Liu, Q. Xu, S. Che, L. Zhang, S. Du, H. Zhang, H. Sun // *Heliyon*. – 2022. – Vol. 8. – Article e11350. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e11350>.

Надійшла (Received) 22.01.2026;

Прийнята (Accepted) 06.02.2026;

Опублікована (Published) 30.03.2026;

ANALYSIS OF THE SPECIFIC WEIGHT AND SIZE INDICATORS OF A HIGH-SPEED PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS MOTOR

KOVALENKO M.A. PhD, Associate Professor Department of Electromechanics National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kiev, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5602-2001>, e-mail: kovalenko87ma@gmail.com;

TSYVINSKYI S.S. PhD, Associate Professor Department of Electromechanics National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kiev, Ukraine, ORCID:

<https://orcid.org/0000-0002-2800-6709>, e-mail: ntuukafem@gmail.com;

KOVALENKO I.Y.

Senior Lecturer, PhD, Department of Renewable Energy Sources, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" Kyiv, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1097-2041>, e-mail: 2048141@ukr.net;

HAIDENKO Y.A.

PhD, Associate Professor Department of Electromechanics National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kiev, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5862-2812>, e-mail: gaidenko@ukr.net;

TRUKHANOV O.V.

Postgraduate student of the Department of Electromechanics, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-4040-2204>, e-mail: oleg.trukhanov@gmail.com.

Purpose. Determination of the dependence of specific power and specific volume on the calculated power and design dimensions for the formation of criteria for assessing the efficiency of weight and dimensions of a high-speed synchronous motor with permanent magnets and an external rotor.

Methodology. Classical methods of electromagnetic calculation of the main dimensions of synchronous motors with magnetolectric excitation.

Findings. According to the results of calculations of weight and dimensions of high-speed synchronous motors with permanent magnets, performed by the classical method, the weight and volume of active materials were determined: magnetic core, permanent magnets and stator winding copper. For the calculation, the power range from 250 W to 15 kW at 10,000 rpm was adopted, which corresponds to the most frequently used motors in terms of power in various industries and applications. The nonlinear nature of the change in specific parameters of synchronous motors with permanent magnets was established. It was determined that the maximum specific power (about 80 kW/kg) is achieved in the range of 7–9 kW, after which this indicator decreases due to thermal limitations and an increase in the mass of structural elements. The optimal power range according to the specific volume criterion, with a cylindrical design of the prototype with an external rotor, is 1.5–4.5 kW. The results of the research show that with increasing power, the mass balance changes: the relative proportion of copper in the stator winding increases, while the proportion of the magnetic core decreases. This is due to the need to minimize electrical losses to maintain high efficiency and restrictions on heat dissipation.

Originality. The dependence of the specific characteristics of high-speed indicators of synchronous motors with permanent magnets with an external rotor on their geometric parameters and the level of use of active materials was systematized, which allowed identifying the zones of the highest efficiency of the design at a constant rotation speed.

Practical value. The proposed approach provides engineering criteria for a well-founded choice of topology and basic dimensions of high-speed engines at the early design stages, ensuring the achievement of the best weight-to-size characteristics.

Keywords: specific indicators; synchronous motors; permanent magnets; high-speed motor.

REFERENCES

- [1] Kovalenko, M. A., Tsyplov, D. V., Kovalenko, I. Ya., Titov, E. O., & Bazarov, O. O. (2025). Mathematical simulation of brushless high-speed permanent magnet motor. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, (4), 108–116. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2025-4/108>.
- [2] Kovalenko, M. A., Tkachuk, I. V., Kovalenko, I. Ya., Zhuk, S. O., & Kryshnov, O. O. (2024). Mahnitoelektrychnyi henerator z aksialnym mahnitnym potokom ta podviinym statorom dlia peretvorennia nyzkopotentsialnoi mekhanichnoi enerhii. *Vidnovliuvana enerhetyka*, (2(77)), 13-20 DOI: [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2024.2\(77\).13-20](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2024.2(77).13-20).
- [3] Kovalenko, M., Chumack, V., Grebenikov, V., Mazurenko, L., Tkachuk, I., Bazarov, O., & Titov, Y. (2025). Determining the influence of structural and electromagnetic parameters on active losses in an electric motor with permanent magnets for unmanned aerial vehicles. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6(5 (138)), 6–15. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2025.344817>.
- [4] [G. An, Q., Lu, Y., & Zhao, M. (2024). Review of Key Technologies of the High-Speed Permanent Magnet Motor Drive. *Energies*. <https://doi.org/10.3390/1996-1073/17/21/5252>.
- [5] Q. Shen, Z. Zhou, S. Li, X. Liao, et al. (2022). Design and Analysis of the High-Speed Permanent Magnet Motors: A Review on the State of the Art. *Machines*, 10(7), 549.
- [6] Guo, L. (2023). Design of High Power Density Double-Stator Permanent Magnet Synchronous Motor. *IET Electrical Power Applications*.
- [7] Usca-Gomez, H. G. (2025). A Review and Case of Study of Cooling Methods. *Energies*, 16(8), 437.
- [8] Vlachou, V. I. (2024). Overview on Permanent Magnet Motor Trends and Electromagnetic Analysis. *Energies*, 17(2), 538.
- [9] Azom, M. A. (2025). Review of Electrical and Thermal Modeling Techniques for Three-Phase

PMSM Drives. CSOL Journal.

- [10] Wang, Y. (2023). Review of High Power Density and Fault-Tolerant Design. *Energies*, 16(19), 7015.
- [11] Chumak, V. V., Kovalenko, M. A., Tsivinskiy, S. S., Tkachuk, I. V., & Ponomarev, O. I. (2020). Mathematical modeling of a synchronous generator with combined excitation. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1(5 (103)), 30–36. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.193495>.
- [12] Cheng, M., Li, Z., Xu, S., & Pei, R. (2024). Design and calculation of multi-physical field of ultra-high-speed permanent magnet motor. *Energies*, 17(13), Article 3072. <https://doi.org/10.3390/en17133072>.
- [13] Zhang, M., Luo, S., Liu, X., & Li, W. (2021). The eddy current loss segmentation model of permanent magnet for temperature analysis in high-speed permanent magnet motor. *IET Power Electronics*, 14(4), 751–759. <https://doi.org/10.1049/pel2.12009>.
- [14] Bi, Qing & Shao, Dingguo. (2023). Loss Analysis of High-Speed Permanent Magnet Motor for Cordless Vacuum Cleaner. *Journal of Physics: Conference Series*. 2488. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2488/1/012021>.
- [15] Liu, Z., Zhang, G., & Du, G. (2024). An investigation into the pole-slot ratio and optimization of a low-speed and high-torque permanent magnet motor. *Applied Sciences*, 14(10), Article 3983. <https://doi.org/10.3390/app14103983>
- [16] Zeng, Y., Yang, S., Yang, X., Wang, Q., Zhang, L., Hao, J., & Hua, W. (2023). Influence of interference fit and temperature on high-speed permanent magnet motor. *Applied Sciences*, 13(20), Article 11331. <https://doi.org/10.3390/app132011331>
- [17] Wang, Y., Ge, B., Wang, L., & Liu, S. (2023). Friction loss calculation and thermal analysis of submerged low temperature high speed permanent magnet motor. *IEEE Access*, 11, 107116–107125. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3320683>.
- [18] Li, Zheng & Wang, Pengju & Liu, Libo & Xu, Qianqian & Che, Shuai & Zhang, Lucheng & Du, Shenhui & Zhang, Hongjie & Sun, Hexu. (2022). Loss calculation and thermal analysis of ultra-high speed permanent magnet motor. *Heliyon*. 8. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e11350>.