

*М.А. КОВАЛЕНКО, С.С. ЦИВІНСЬКИЙ, Ю.А. ГАЙДЕНКО, О.О. БАЗАРОВ, О.В. ТРУХАНОВ*

## ОЦІНКА ПИТОМИХ ПОКАЗНИКІВ ВИСОКОШВИДКІСНОГО ДВИГУНА З АКсіАЛЬНИМ МАГНІТНИМ ПОТОКОМ

У роботі проведено оцінку питомих показників високошвидкісного двигуна з аксіальним магнітним потоком та збудженням від постійних магнітів, що використовуються як основний привід електромеханічних енергоефективних систем для літальних апаратів. До двигунів для літальних апаратів висуваються високі вимоги до питомих ваго-габаритних характеристик, питомої потужності та коефіцієнта корисної дії. В даному дослідженні проведено аналіз конструктивних особливостей двигуна з аксіальним магнітним потоком класичними методами розрахунку. Основну увагу приділено визначенню взаємозв'язку між геометричними розмірами активної зони, параметрами магнітної системи та електромагнітними навантаженнями, що безпосередньо впливають на питомі показники двигуна. У роботі використано аналітичні співвідношення для визначення основних геометричних розмірів, ваги та питомих показників активних матеріалів та проведено оцінку частки питомої ваги конструктивних елементів такого двигуна. В роботі враховано вплив конструкції та основних технічних показників постійних магнітів, величини повітряного зазору та топології обмотки на енергетичні та масогабаритні показники двигуна з аксіальним потоком. Отримані результати свідчать, що застосування двигуна аксіальної конструкції з аксіальним характером замикання основного магнітного потоку дозволяє досягти підвищених значень питомої потужності та зменшення маси двигуна порівняно з класичними конструкціями, особливо в діапазоні потужності 7,0-9,0 кВт що є критично важливим для високошвидкісних двигунів та літальних апаратів. Разом з тим, визначено обмежувальні фактори, пов'язані з тепловими режимами, механічною міцністю та втратами при високих частотах обертання та перемагнічування. Результати дослідження можуть бути використані при проектуванні компактних високоефективних електромеханічних перетворювачів для транспортних, авіаційних та енергетичних систем.

**Ключові слова:** двигун з аксіальним магнітним потоком, постійні магніти, питомі показники, високошвидкісний двигун.

*М.А. KOVALENKO, S.S. TSYVINSKY, Y.A. GAYDENKO, O.O. BAZAROV, O.V. TRUKHANOV*

## EVALUATION OF SPECIFIC INDICATORS OF A HIGH-SPEED AXIAL FLUX PERMANENT MAGNET MOTOR

The paper evaluates the specific performance of a high-speed axial magnetic flux motor with excitation from permanent magnets, which is used as the main drive of electromechanical energy-efficient systems for aircraft. High requirements are imposed on aircraft engines for specific weight-dimensional characteristics, specific power and efficiency. In this study, the design features of an axial magnetic flux motor are analyzed using classical calculation methods. The main attention is paid to determining the relationship between the geometric dimensions of the active zone, the parameters of the magnetic system and electromagnetic loads that directly affect the specific performance of the motor. The paper uses analytical relationships to determine the main geometric dimensions, weight and specific performance of active materials and evaluates the share of the specific weight of the structural elements of such a motor. The work takes into account the influence of the design and main technical indicators of permanent magnets, the air gap size and winding topology on the energy and mass-dimensional indicators of the axial flux motor. The results obtained show that the use of an axial design motor with an axial nature of the main magnetic flux closure allows achieving increased values of specific power and reducing the mass of the motor compared to classical designs, especially in the power range of 7.0-9.0 kW, which is critically important for high-speed engines and aircraft. At the same time, limiting factors associated with thermal conditions, mechanical strength and losses at high speeds and magnetization reversal have been identified. The results of the study can be used in the design of compact high-efficiency electromechanical converters for transport, aviation and energy systems.

**Keywords:** axial flux motor, permanent magnets, specific performance, high-speed motor.

**Вступ.** Електромеханічні перетворювачі із постійними магнітами використовуються у різних областях та сферах таких як: електротранспорт, портативні пристрої та перетворювачі, автономні джерела живлення, авіаційна техніка і т.ін [1]. Основним типом таких перетворювачів є синхронні двигуни із постійними магнітами із внутрішнім чи зовнішнім статором. Однак сучасні глобальні виклики та зростаючий попит щодо пошуку інноваційних енергоефективних рішень висувають нові вимоги до електричних машин, які відіграють провідну роль у промисловості, транспорті та побутовій сфері.

З точки зору переходу до використання енергоефективних електромеханічних перетворювачів, електричні двигуни з високою питомою потужністю стають ключовими елементами для систем електроприводу нового покоління, особливо в таких галузях, як авіація, безпілотні літальні апарати та легкий електротранспорт.

Традиційні машини з радіальним магнітним потоком займають домінуюче місце на ринку завдяки простоті їх конструкції, прогнозованості та відпрацьованій технології виробництва. Проте сучасні потреби у підвищенні енергоефективності та покращення

питомих вагогабаритних показників змушують проводити оптимізаційний пошук та звертатись до інших принципово варіантів конструктивного виконання таких двигунів.

Двигуни з аксіальним магнітним потоком (АМП) характеризуються тим, що вектор магнітної індукції в робочому повітряному проміжку спрямований паралельно осі обертання валу [2].

Ця конструктивна особливість забезпечує низку суттєвих переваг порівняно з двигунами з радіальним магнітним потоком, зокрема вищий питомий крутний момент, більшу компактність та меншу осьову довжину, що робить їх ідеальними для застосувань з обмеженим простором та безпілотних транспортних засобів.

Аксіальна конструкція ротора та статора забезпечує прямий контакт повітряного потоку з активними частинами, що суттєво покращує умови тепловідведення та дозволяє проектувати такі двигуни з підвищеними електромагнітними навантаженнями та працювати в режимах високого навантаження протягом тривалого часу [3].

Розвиток авіаційної та автомобільної промисловості потребує розробки двигунів, здатних працювати на

високих швидкостях обертання [4]. Це дозволяє значно знизити загальну вагу активних матеріалів та вартість виготовлення одного зразка двигуна.

Проте експлуатація двигунів на високих частотах та швидкостях обертання створює серйозні технічні виклики, пов'язані з різким зростанням втрат в обмотках через підсилювання ефекту витіснення струму, а також збільшенням втрат у магнітному осерді [5].

При високих частотах глибина проникнення струмів в електропровідне середовище стає порівняною з діаметром провідника обмотки статора, що призводить до нерівномірного розподілу густини струму та зниження загального ККД машини [6].

Аналіз літератури показує, що одним із перспективних шляхів вирішення проблеми підвищення втрат у магнітному осерді при високій частоті процесів є використання м'яких магнітних композитів [7] (SMC). Матеріали SMC складаються з ізольованих один від одного магнітопровідних частинок, що забезпечує низькі втрати на вихрові струми при високих частотах та ізотропні магнітні властивості [8], дозволяючи реалізувати складні шляхи для замикання основного магнітного потоку (часто тривимірний характер), характерні для двигунів з аксіальним магнітним потоком.

Хоча SMC мають дещо нижчу магнітну проникність порівняно з традиційною електротехнічною сталлю [9], їхня здатність до роботи на високих частотах та простота виготовлення складних форм методом порошкової металургії та тривимірного друку, відкривають нові можливості для оптимізації та виготовлення різних конструкцій двигуна.

Оцінка питомих показників високошвидкісного двигуна з АМП також пов'язана з вибором конфігурації статора та ротора. У літературних джерелах розглядаються різні топології: односторонні [10], двосторонні з одним статором та двома роторами [11], а також багатодискові структури [12].

Двостороння конструкція з двома роторами є найбільш поширеною, оскільки вона дозволяє збалансувати осьові зусилля притягання між статором та ротором та компенсувати їх, що є однією з головних експлуатаційних недоліків аксіальних машин, що обмежує їх використання [13].

Використання високоенергетичних постійних магнітів (NdFeB), дозволяє досягти високої магнітної індукції в повітряному проміжку, що є важливим для забезпечення високих показників питомої потужності, можливості використання двосторонньої конструкції двигунів з аксіальним потоком та стійкості до переважних аварійних режимів.

Особлива увага в процесі проектування приділяється конфігурації пазів статора. Використання пазів відкритого типу чи взагалі статора з безпазовою конструкцією, значно спрощує та зменшує вартість процесу виготовлення обмотки, зменшує втрати від зубцевих гармонік, дозволяючи заздалегідь виготовляти катушки на каркасах та монтувати їх на зубці статора [14].

Виконання паза статора з відкритого типу призводить до підвищення магнітного потоку розсіювання обмотки статора, збільшення зубцевих гармонік поля,

що викликає додаткові втрати та негативно впливає на момент двигуна [15].

Для зменшення впливу зубцевих гармонік та покращення форми кривої розподілу магнітної індукції в повітряному проміжку використовуються магнітні клини [16] або тонкі листи для магнітного осердя статора [17], що зменшує величину потоків розсіювання та практично нівелює дію зубцевих гармонік. В дослідженнях показано, що такий спосіб дозволяє зменшити додаткові втрати в обмотці до 48% при незначному зниженні вихідного моменту [18].

Для досягнення та підвищення високих питомих показників, таких як питома потужність (кВт/кг) та питомий об'єм (кВт/м<sup>3</sup>), необхідно проводити комплексну багатокритеріальну оптимізацію чи використовувати електродвигуни принципово іншої конструкції чи топології. Цей процес передбачає балансування між електромагнітними завантаженнями (насичення сталі) та електричним завантаженням (обмеження за тепловим).

**Актуальність.** Сучасний розвиток електротехнічних систем характеризується зростаючими вимогами до енергоефективності, компактності та динамічних властивостей електромеханічних перетворювачів. Традиційні електричні машини з радіальним магнітним потоком, у певних застосуваннях досягають меж своїх можливостей щодо подальшого підвищення питомої потужності та зниження ваги. Це обумовлює активні пошуки альтернативних конструктивних рішень, серед яких особливе місце посідають машини з аксіальним магнітним потоком.

Аксіальні електричні машини відрізняються принципово іншою топологією магнітного кола, де характер замикання магнітного потоку є радіально-аксіальним. Таке виконання забезпечує краще використання активних матеріалів, можливість багатодискової компоновки та суттєве зменшення осьового розміру агрегату. Особливо перспективним є використання двигунів з аксіальним потоком у високошвидкісному виконанні, коли зростання швидкості обертання дозволяє зменшити габарити.

Високошвидкісні електроприводи знаходять широке застосування в авіаційній та космічній техніці, електромобілях, мікро- та міні-когенераційних установках, а також у системах зберігання енергії на основі маховиків. Для цих систем важливими є саме питомі показники: вага, об'єм, питома вартість одиниці потужності, що визначають конкурентоспроможність та економічну доцільність таких технічних рішень.

Незважаючи на очевидні переваги аксіальних машин, їхнє проектування та виготовлення ускладнюється нелінійністю магнітного кола, наявністю просторових гармонік. Це обумовлює необхідність детального аналізу питомих характеристик на етапі попереднього проектування.

У зв'язку з цим актуальним є питання комплексного аналізу питомих вагогабаритних показників високошвидкісних двигунів із постійними магнітами з аксіальним магнітним потоком з урахуванням конструктивних, електромагнітних та експлуатаційних особливостей. Реалізація такого підходу сприяє

встановленню кореляційних зв'язків між швидкістю обертання, конфігурацією магнітного осердя та показниками ефективності: питома потужність та питома вага. На підставі виявлених тенденцій формується.

Це дослідження присвячене визначенню та аналізу питомих ваго-габаритних характеристик високошвидкісних синхронних двигунів із постійними магнітами та аксіальним магнітним потоком з метою їх подальшого порівняння під час проектування машин різної потужності за умови постійної частоти обертання.

**Метою роботи** є визначення та комплексна оцінка питомих ваго-габаритних показників високошвидкісних електродвигунів з аксіальним магнітним потоком, а також у встановленні взаємозв'язків між його геометричними параметрами та електромагнітними навантаженнями. Дослідження спрямоване на порівняльний аналіз отриманих показників при різних значеннях розрахункової потужності, а також обґрунтування раціональних конструктивних рішень для забезпечення високої енергоефективності та мінімізації масогабаритних характеристик.

**Об'єкт дослідження.** Об'єктом дослідження є електромеханічні процеси та конструктивні особливості високошвидкісного електродвигуна з аксіальним магнітним потоком із постійними магнітами, що визначають його ваго-габаритні показники.

Оцінка питомих вагогабаритних показників проводиться для високошвидкісного синхронного двигуна із постійними магнітами аксіальними магнітним потоком, який топологічно відноситься до класу торіодальних плоских електромеханічних перетворювачів енергії з аксіальним магнітним потоком. Основний магнітний потік у таких двигунах утворюється висококоерцитивними постійними магнітами. Загальний вигляд прототипу досліджуваного двигуна із постійними магнітами наведено на рис. 1.

Основні геометричні розміри двигунів з аксіальним магнітним потоком представлені діаметром статора  $D$  та його довжиною  $L$ . Враховуючи топологічні особливості таких двигунів двигуни з аксіальним магнітним потоком характеризуються наступними конструктивними розмірами (відповідно до рис. 1):

$D_{out}$  – зовнішній діаметр корпусу (капсули) двигуна;

$D_{in}$  – внутрішній діаметр (активної зони).

$D_{av}$  – середній діаметр статора, розмір якого визначається за наведеними нижче виразами:

$\delta$  – повітряний проміжок між статором та ротором із постійними магнітами;

$h_m$  – товщина постійних магнітів (радіальна);

$h_s$  – осьова довжина постійних магнітів;

$L_{ax}$  – повна осьова довжина активної частини двигуна;

$L_r$  – ширина полюсної поділки (ширина магніту);

$b_m$  – середня ширина (радіальний розмір) постійного магніту, що відповідає середньому радіусу ( $D_{av}$ ).

Оцінка питомих вагогабаритних показників виконується для різних діапазонів потужності досліджуваного двигуна з аксіальним магнітним потоком. Для дотримання рівних умов чисельного експерименту при оцінці зміни питомих показників за зміни величини

потужності вихідних параметрів для розрахунку основних розмірів, ваги та об'єму синхронного двигуна та параметрів обмотки залишаються незмінними у процесі проектування. У табл. 1 наведено параметри, що залишаються постійними при оцінці питомих показників та зміни потужності двигунів.

Таблиця 1 – Постійні величини при оцінці питомих показників

Параметр	Величина
Швидкість обертання, об/хв	10000,0
Кількість пар полюсів, $p$	2
Кількість фаз, $m$	3
Індукція в повітряному проміжку, Тл	0,7
Лінійне навантаження, А/м	20000,0
Номінальна напруга живлення, В	25,0
Густина струму в обмотках, А/мм <sup>2</sup>	8,0
Геометричний коефіцієнт $\lambda$	0,65
$\cos\varphi$	0,9
ККД	0,9
Коефіцієнт полюсного перекриття	1
Залишкова магнітна індукція ПМ, Тл	1,2
Коерцитивна сила ПМ, А/м	900000,0
Величина повітряного проміжку, мм	0,2
Коефіцієнт заповнення паза міддю	0,65
Відносна магнітна проникність ПМ	1,12
Марка електротехнічної сталі	M127-23S

Особливість розрахунку основних розмірів двигунів з аксіальним магнітним потоком впливає з основного виразу для електромагнітної потужності, яку можливо виразити через середній радіус статора та електромагнітні навантаження:

$$P_{роз} = \frac{\pi^2}{2 \cdot \sqrt{2}} \cdot \alpha_i \cdot k_{об} \cdot n \cdot A \cdot B_\delta \cdot D_{out}^3 \cdot (1 - \lambda^2) \cdot \frac{1 + \lambda}{2} \quad (1)$$

Якщо вираз (1) представити у формі, що більш підходить для інженерних розрахунків, він буде мати наступний вигляд:

$$P_{роз} = \frac{1}{1 + \varepsilon} \cdot \frac{\pi^2}{120} \cdot k_{об} \cdot A \cdot B_{max} \cdot (D_{out}^2 - D_{in}^2) \cdot D_{av} \cdot n \quad (2)$$

де  $D_{out}$  та  $D_{in}$  – зовнішній та внутрішній діаметри статора;  $D_{av} = D_{out} + D_{in}/2$  – середній діаметр статора;  $\lambda$  – геометричний коефіцієнт, що є відношенням діаметрів  $D_{in}/D_{out}$ ;  $k_{об}$  – обмотковий коефіцієнт статора;  $A$  – лінійне навантаження (А/м);  $B_{max}$  – амплітуда магнітної індукції в повітряному проміжку;  $n$  – швидкість обертання ротора (об/хв);  $\alpha_i$  – розрахунковий коефіцієнт полюсного перекриття;

Проектування високошвидкісних двигунів з аксіальним магнітним потоком має певні особливості обумовлені наступним:

- Для зменшення втрат у сталі такі двигуни виготовляються з мінімально можливою кількістю полюсів;

- Оскільки електромагнітна потужність пропорційна  $D^3$ , аксіальні двигуни дозволяють отримати високу питому потужність при малих осьових розмірах;

- При збільшенні швидкості обертання стає

актуальним питання кріплення магнітів. Вираз для електромагнітної потужності часто обмежується саме механічною міцністю ротора.

Коефіцієнт  $\varepsilon$  враховує відносну зміну магнітного потоку за рахунок наявності полів розсіювання. У високошвидкісних двигунах  $\varepsilon$  часто відображає вплив

реакції якоря, яка суттєво впливає на основний магнітний потік постійних магнітів.

Для розрахунку основних розмірів двигуна з аксіальним магнітним потоком розраховується умовний об'єм активної частини  $D^2l$ , виходячи із розрахунку електромагнітної потужності (1) чи (2):

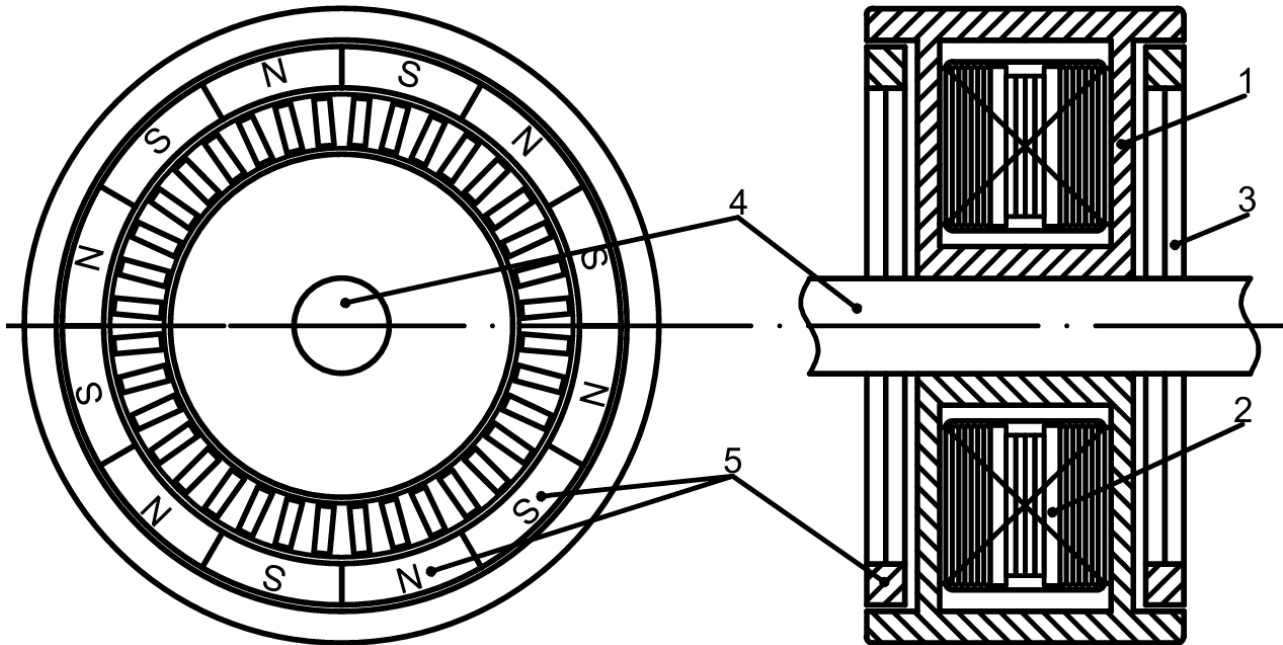


Рис. 1. Ескіз двигуна з аксіальним магнітним потоком

На рис. 1 показано: 1 – магнітне осердя статора; 2 – обмотка статора; 3 – диски ротора; 4 – вал; 5 – постійні магніти.

$$D^2l = \frac{6,1 \cdot 10^6 \cdot P_{роз}}{\alpha_i \cdot k_{\phi} \cdot k_{об} \cdot A \cdot B_{\delta} \cdot n} \quad (3)$$

Де електромагнітні навантаження у виразі (3) обираються, виходячи із параметрів обраних постійних магнітів:

$$AB_{\delta} = 0,346 \cdot \frac{l}{1 + \sin \varphi} \left( \frac{B_{M0} \cdot H_{МК}}{\sigma_0} \right) \cdot p \cdot k_r \quad (4)$$

де  $B_{M0}$  – індукція у постійному магніті у режимі неробочого ходу;

$H_{МК}$  – напруженість магнітного поля у постійному магніті у режимі усталеного короткого замикання;

$p$  – число пар полюсів;

$k_r$  – коефіцієнт заповнення постійних магнітів об'єму якоря визначається наступним чином:

$$k_r = 4 \cdot \frac{V_M}{\pi \cdot D^2l} \quad (5)$$

де  $V_M$  – об'єм постійних магнітів визначається наступним чином:

$$V_M = 23,1 \cdot \frac{P_{роз} \cdot \sigma_0 \cdot (1 + \sin \varphi) \cdot k_{уд} \cdot k_{кз}}{\alpha_i \cdot k_{\phi} \cdot k_{об} \cdot f \cdot B_{M0} \cdot H_{МК}} \cdot 10^7 \quad (6)$$

де  $k_{уд}$  – ударний коефіцієнт (1,0 ÷ 1,2);

$k_{кз}$  – кратність струму короткого замикання ( $\geq 2$ );

$\sigma_0$  – коефіцієнт розсіювання (1,05 ÷ 1,1);

$k_{об}$  – обмотковий коефіцієнт (для кільцевих обмоток = 1);

$k_{\phi}$  – коефіцієнт форми поля ( $\approx 1,11$ );

$H_{МК} = (0,5 \div 0,9) H_c$ ;

$B_{M0} = (0,5 \div 0,8) B_r$ .

Відповідно товщина (аксіальна довжина)  $h_m$  постійних магнітів повинна обиратись з точки зору протидії реакції якоря при номінальному навантаженні (розмагнічуванню), утворення номінального магнітного потоку та забезпечення необхідної величини перевантажувальної здатності та потужності:

$$h_m = \frac{\mu_r \cdot B_{\delta} \cdot \delta}{B_r - \frac{B_{\delta}}{\sigma_0}} \quad (7)$$

де  $B_r$  – залишкова індукція магніту;  $\mu_r$  – відносна магнітна проникність матеріалу магніту;  $\sigma_0$  – коефіцієнт розсіювання.

Радіальна величина постійних магнітів  $b_m$  визначається із вихідних даних наступним чином:

$$b_m = \frac{\pi \cdot D_{av} \cdot a_i}{2p} \quad (8)$$

Відповідно розраховувачи необхідний об'єм постійних магнітів за виразом (6), аксіальну довжину за виразом (7) та радіальний розмір, можливо визначити останній невідомий параметр постійних магнітів – це

їх висота у радіальному напрямку. Цей розмір буде визначати габаритні (зовнішні розміри) двигуна та є варіюваною величиною при виготовленні чи оптимізації геометричних розмірів двигунів з аксіальним магнітним потоком.

**Алгоритм розрахунку основних розмірів та питомих показників.** Із рівняння (1) визначається зовнішній діаметр  $D_{out}$  для високошвидкісних двигунів з аксіальним магнітним потоком він обмежується механічною міцністю ротора. Внутрішній діаметр  $D_{in}$  визначається через геометричний коефіцієнт  $\lambda$ :

$$D_{in} = \lambda \cdot D_{out}$$

Аналіз літературних джерел та практики проектування двигунів з аксіальним магнітним потоком показує [19], що для досягнення максимального моменту оптимальне значення коефіцієнта  $\lambda \approx 0,57$ . Проте у високошвидкісних машинах  $\lambda$  часто обирають більшим (0,6 ... 0,7), з метою зменшення ваги ротора та відцентрових сил.

Середній діаметр  $D_{av}$  є розрахунковим для визначення лінійної швидкості та ЕРС. Активна (робоча)  $L_1$  частина провідника обмотки статора в двигуні з аксіальним магнітним потоком дорівнює радіальній довжині постійного магніту:

$$L_1 = \frac{D_{out} - D_{in}}{2} \quad (9)$$

Величина повітряного проміжку  $\delta$  у двигунах з аксіальним магнітним потоком може задаватись на етапі проектування чи визначатись за емпіричним виразом:

$$\delta = \frac{D_{out}}{200 \dots 500} \quad (10)$$

У обох випадках  $\delta$  має забезпечувати жорсткість конструкції, зменшення впливу аксіальних сил притягання та вібрацій.

Особливістю розрахунку основних розмірів двигунів з аксіальним магнітним потоком є отримання аксіальної довжини двигуна. Як було показано вище аксіальна довжина осердя статора ( $h_1$ ) не присутня в явному вигляді у розрахункових рівняннях. Однак даний параметр є необхідним для визначення об'єму постійних магнітів. Класична формула розрахункової потужності (1), (2) базується на електромагнітних навантаженнях, які забезпечуються параметрами постійних магнітів. Проте для проектування реального двигуна аксіальна довжина осердя статора є важливою величиною. У двигунах з аксіальним потоком потужність визначається площею дисків та середнім радіусом. Аксіальна довжина осердя статора  $h_1$  – це наслідок електромагнітного розрахунку, а не причина. Даний параметр розраховується таким чином, щоб магнітне осердя статора не входило в стан магнітного насичення.

Аксіальна довжина осердя статора (або ярма статора при безпазовому виконанні статора двигуна)  $h_1$  розраховується на основі величини основного магнітного потоку, що проходить крізь нього. Вираз виглядає наступним чином:

$$h_1 = \frac{B_\delta \cdot \pi \cdot D_{av} \cdot a_t}{4 \cdot p \cdot B_j \cdot k_c} \quad (11)$$

де  $B_j$  – допустима індукція в ярмі статора (зазвичай 1,2 ... 1,6 Тл для обраної електротехнічної сталі);  $k_c$  – коефіцієнт заповнення осердя сталлю (0,9 ... 0,97).

Якщо статор має пази, то повна довжина статора  $h_1$  складається з товщини ярма та висоти зубців (з обох боків у випадку двостороннього статора).

Після розрахунку основних розмірів та габаритів постійних магнітів проводиться розрахунок ваги та об'єму активних матеріалів: магнітного осердя, постійних магнітів та обмотки статора двигуна за відомими виразами та алгоритмами [20].

**Результат розрахунку питомих вагогабаритних показників.** Дослідження вагогабаритних параметрів реалізовано для модельного ряду синхронних машин з аксіальним потоком та постійними магнітами в діапазоні потужностей від 250 Вт до 15 кВт. Вибір зазначеного інтервалу базується на аналізі ринку сучасних електроприводів, де машини такої потужності мають найбільший попит у робототехніці, БПЛА та допоміжних системах транспорту.

Процес визначення питомих характеристик базується на циклі ітераційних обчислень. В основу розрахункової моделі покладено фундаментальні рівняння синхронних машин, адаптовані до дискової геометрії аксіального типу. Оскільки при незмінних значеннях швидкості обертання ( $n$ ) та електромагнітних навантажень ( $A$ ,  $B_\delta$ ) варіювання потужності прямо корелює з габаритами активної зони, у даному випадку аналізувався умовний об'єм, що для аксіальних машин пропорційний  $D^3$  (на відміну від класичного  $D^2 \cdot L$  для двигунів радіальних конструкцій).

Основними критеріями ефективності в межах даної роботи обрано такі питомі показники: питома потужність відносно ваги активних матеріалів (відношення потужності (Вт) до сумарної ваги активних матеріалів (кг));

питома потужність відносно об'єму, що є відношенням потужності до об'єму активної частини матеріалів ( $m^3$ ).

У розрахунках ваги та об'єму враховано повний перелік активних матеріалів: мідну обмотку статора, магнітну систему статора, диски ротора, а також безпосередньо постійні магніти. Для зручності інженерного застосування та подальшої оцінки компонувальних рішень високошвидкісних двигунів з аксіальним магнітним потоком, отримані дані були оброблені за допомогою методів нелінійної регресії. Це дозволило вивести математичні апроксимації залежностей, що описують динаміку зміни ваги та об'єму при масштабуванні потужності.

Результат розрахунку питомої активної потужності від номінальної заданої потужності наведено на рис. 2.

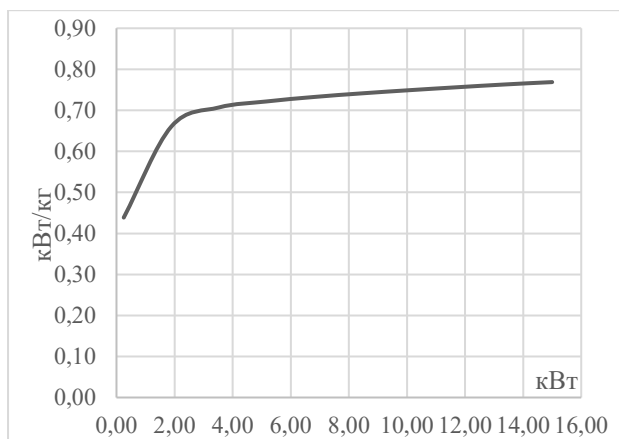


Рис. 2. Залежність питомої потужності від номінальної потужності

У двигунах з аксіальним магнітним потоком потужність  $P$  пропорційна кубу діаметра ( $D^3$ ). В той же час маса активних матеріалів зростає пропорційно квадрату діаметра (площі дисків) та лінійно від аксіальної довжини. Оскільки потужність росте швидше за масу при збільшенні габаритів, показник кВт/кг збільшується зі збільшенням розрахункової потужності.

Математично характер залежності, зображеної на рис. 2, описуються методами нелінійної регресії, а саме функцією Міхаеліса-Ментена або гіперболічною функцією:

$$y = \frac{y_{\max} \cdot x}{k + x} \quad (12)$$

де  $y_{\max}$  – теоретична межа питомої потужності для даної швидкості обертання (на рис. 2 це  $\sim 0,8$  кВт/кг);  $k$  – константа, що відповідає потужності, при якій досягається половина максимального показника. Тому, математично отримані результати по рис. 2 показують, що для обраної конфігурації (10 000 об/хв, 2 полюси) існує межа питомої потужності, при якій збільшення потужності понад 12 кВт без зміни кількості полюсів не дасть суттєвого виграшу у вазі.

Це видно по розподілу ваги активних матеріалів при зміні розрахункової потужності (рис. 3).

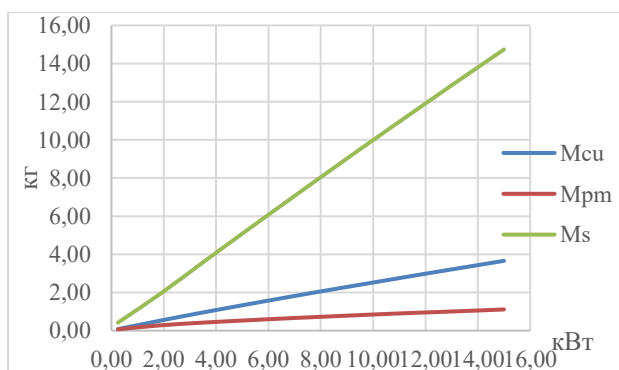


Рис. 3. Залежність ваги активних матеріалів від номінальної потужності

Як видно по рис. 3 вага електротехнічної магнітопоровидної сталі становить близько **75%** загальної маси активних матеріалів. Це вказує на те, що обрана 2-полюсна топологія для аксіального двигуна призводить

до насичення магнітної системи, оскільки сумарний потік замикається у межах 2-х полюсів магнітної системи.

Залежність питомого об'єму активних матеріалів від розрахункової потужності досліджуваного двигуна наведено на рис. 4.

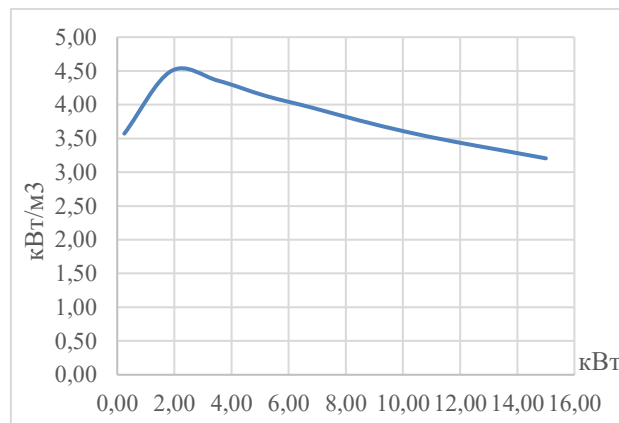


Рис. 4. Залежність питомого об'єму від номінальної потужності

Залежність на рис. 4 показує зміну об'ємної питомої потужності (кВт/м<sup>3</sup>) від номінальної потужності двигуна. На відміну від питомої активної потужності (Рис. 2), на даному графіку явно виражений екстремум з подальшим падінням. Це явище характерне саме для аксіальних машин з малою кількістю полюсів ( $2p \leq 4 \dots 6$ ). На початковому етапі збільшення діаметра диска статора робить використання об'єму більш ефективним. Зона максимуму питомого об'єму характеризує оптимальний баланс для даної швидкості (5000 об/хв) та кількості полюсів ( $2p=2$ ). В даній області досягається найкраще співвідношення між площею торця статора та загальним об'ємом двигуна.

Після  $\sim 4,0-4,5$  кВт/м<sup>3</sup> для 2-полюсного двигуна товщина ярма статора  $h_1$  суттєво зростає при збільшенні розрахункової потужності (для забезпечення можливості пропускати робочий магнітний потік), що призводить до збільшення аксіального габариту двигуна швидше, ніж зростає корисна площа дисків. Оскільки потужність зростає, зростає і магнітний потік. У 2-полюсному варіанті виконання двигуна сумарний потік має пройти через ярмо статора. Щоб уникнути насичення, ми необхідно суттєво збільшувати довжину ярма статора ( $h_1$ ).

Математично отриману на рис. 4 залежність можливо описати за допомогою моделі з екстремумом, яка враховує, що при дуже великих потужностях показник буде асимптотично наближатися до певного низького значення:

$$y = \frac{ax + b}{cx^2 + dx + 1} \quad (13)$$

де  $y$  – питома об'ємна потужність;  $x$  – номінальна потужність;  $b$  – коефіцієнт масштабування (для нашого випадку він знаходиться в межах 0,08 ... 0,12);  $a$  – фактор енергетичного потенціалу, який визначає, крутизну графіку на самому початку;  $c$  – фактор геометричної деградації для 2-полюсної конструкції двигуна,

відповідає за те, як швидко графік почне падати після піку. Чим менше полюсів, тим більшим буде  $c$  і тим сильнішим буде падіння  $\text{kВт/м}^3$  після 4,0–4,5  $\text{kВт}$ ;  $d$  – коефіцієнт демпфування, визначає наскільки плавною є вершина графіка.

Тому, математична отримана модель, що описує отримані результати, у вигляді раціональної функції дозволяє ідентифікувати точку оптимальної геометрії (~ 4,0–4,5  $\text{kВт}$ ), після якої відбувається поступове зменшення об'ємної щільності потужності.

Умовний об'єм активної частини двигунів з аксіальним магнітним потоком визначається зовнішнім діаметром статора  $D_{\text{out}}$  – головним розміром таких двигунів. Залежність даного параметру двигуна від розрахункової активної потужності показано на рис. 5.

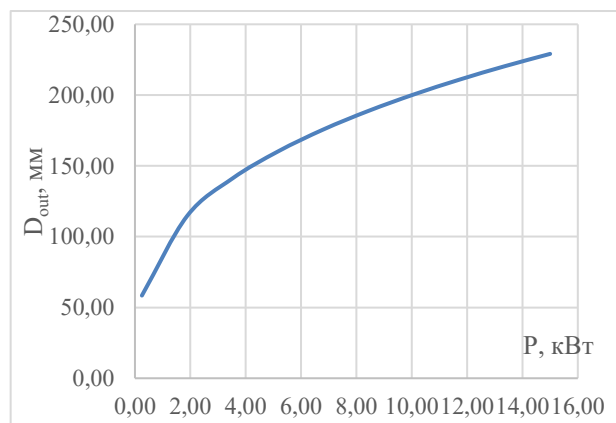


Рис. 5. Залежність діаметру від розрахункової потужності

Зміна величини зовнішнього діаметру при збільшенні потужності в аксіальних двигунах залежить від вигляду основного рівняння потужності. Для двигунів з аксіальним магнітним потоком електромагнітна потужність пропорційна кубу діаметра  $P \sim D^3$ . Для двигунів малої потужності (0,25 – 2,0  $\text{kВт}$ ) незначне збільшення габаритів призводить до суттєвого відносного приросту моменту та потужності. Це пояснюється тим, що при малих значеннях діаметру корисна площа кільця постійних магнітів дуже чутлива до зміни зовнішнього радіуса. При низьких потужностях для забезпечення необхідного моменту доводиться значно збільшувати габарити активної частини (зокрема діаметр), оскільки:

магнітна система не насичена;

значну роль відіграють конструктивні та технологічні обмеження (мінімальні конструктивні розміри, проміжки, ізоляція).

Оскільки залежність потужності від діаметра є степеневою функцією ( $P \sim D^3$ ), для подальшого збільшення потужності (наприклад, з 10 до 15  $\text{kВт}$ ) діаметр змінюється не пропорційно потужності. З іншого боку, потужність електродвигуна визначається як добуток електромагнітного моменту на кутову швидкість. За сталої швидкості обертання збільшення потужності можливе лише за рахунок зростання моменту, який, у свою чергу, пропорційний магнітному потоку та електромагнітному навантаженню. При переході до більших потужностей починають впливати конструктивні

чинники та електромагнітні обмеження:

магнітна система працює ближче до насичення і використання матеріалів стає ефективнішим;

збільшення потужності досягається не лише за рахунок геометрії, а й за рахунок кращого використання активних матеріалів.

Таким чином, отриманий графік (рис.5) відображає типову закономірність масштабування електричних машин: при збільшенні потужності питома потужність зростає, а відносні габарити (на одиницю потужності) зменшуються. Це свідчить про підвищення ефективності використання активних матеріалів у більш потужних машинах.

**Висновки.** У даній роботі проведено комплексне дослідження питомих вагогабаритних показників синхронних двигунів з аксіальним магнітним потоком та постійними магнітами у діапазоні потужностей від 250 Вт до 15  $\text{kВт}$ . На основі проведених розрахунків та аналізу отриманих залежностей можна зробити наступні висновки:

1. Встановлено, що питома потужність на одиницю ваги активних матеріалів ( $\text{kВт/кг}$ ) має тенденцію до поступового зростання із підвищенням номінальної потужності машини. Для досліджуваного ряду при швидкості 10 000 об/хв цей показник зростає з 0,44  $\text{kВт/кг}$  (для 250 Вт) до 0,77  $\text{kВт/кг}$  (для 15  $\text{kВт}$ ). Такий характер залежності підтверджує фізичний закон масштабування, згідно з яким потужність двигунів з аксіальним магнітним потоком зростає пропорційно кубу діаметра, тоді як маса активних матеріалів збільшується повільніше.

2. На відміну від показника питомої потужності, питома об'ємна потужність ( $\text{kВт/м}^3$ ) має виражений нелінійний характер з екстремумом у зоні 1,5–4,0  $\text{kВт}$ . Початкове зростання показника обумовлене підвищенням коефіцієнта використання активних матеріалів. Однак подальше зниження об'ємної густини при потужностях понад 4,5  $\text{kВт}$  пояснюється фізичними обмеженнями двополусної конфігурації магнітної системи. Необхідність пропускання значного магнітного потоку через ярмо статора призводить до збільшення його аксіальної довжини ( $h_1$ ), що призводить до збільшення загального об'єму двигуна порівняно з приростом його потужності.

3. Аналіз розподілу мас активних матеріалів показав вплив топології на масові характеристики. В двигунах з аксіальним магнітним потоком та з малою кількістю полюсів ( $2p=2, 4$ ) частка електротехнічної сталі становить до 75% від загальної ваги. Це призводить до погіршення використання активних матеріалів та вказує на значний потенціал для полегшення конструкції шляхом переходу до багатополусних систем (6, 8 і більше полюсів), що дозволить суттєво зменшити товщину ярма статора та ротора та підвищивши питомі показники  $\text{Вт/кг}$ .

4. Отримані залежності були апроксимовані та верифіковані математичними методами нелінійної регресії. Для показників питомої потужності найбільш адекватною визначена степенева модель ( $y = a \cdot x^b$ ), а для об'ємних – раціональна функція, що описує криву з насиченням та подальшим спадом. Математичні моделі підтвердили високу точність розрахунків (коефіцієнт

детермінації  $R^2 > 0,98$ ) і можуть бути використані як інструмент для прогнозування габаритів високошвидкісних аксіальних двигунів на етапі ескізного проектування.

5. Проведене дослідження має практичну цінність, оскільки дозволяє обґрунтовано підходити до вибору головних розмірів двигунів з аксіальним магнітним потоком. Для потужностей до 4,5 кВт доцільно орієнтуватися на максимізацію об'ємної потужності, тоді як для потужних машин (понад 7-8 кВт) пріоритетом стає оптимізація маси через зміну кількості полюсів. Отримані результати створюють підґрунтя для створення високоєфективних приводних установок для БПЛА, робототехніки та швидкісних транспортних систем, де вагогабаритні обмеження є важливими.

#### Список літератури

- Gieras, J. F., Wang, R. J., & Kamper, M. J. (2008). Axial Flux Permanent Magnet Brushless Machines (2nd ed.). Springer Science & Business Media. <https://doi.org/10.1007/978-1-4020-8227-6>.
- Kovalenko, M. A., & Chumak, V. V. (2021). Methodology of iterative calculation of axial flux permanent magnet motors for high-speed applications. Journal of Electrical Engineering & Technology, 16(4), 1895–1904. <https://doi.org/10.1007/s42835-021-00742-w>.
- Zhang, Z., Profumo, F., & Pellegrino, G. (2019). Design optimization of axial flux permanent magnet machines: A review. IEEE Transactions on Energy Conversion, 34(4), 2120–2132. <https://doi.org/10.1109/TEC.2019.2937562>.
- Parviainen, A. (2005). Design of axial flux permanent magnet machines [Doctoral dissertation, Lappeenranta University of Technology]. LUT Academic Repository. <http://urn.fi/URN:ISBN:952-214-041-3>.
- Kahourzade, S., Mahmoudi, A., Roshandel, E., & Ping, H. W. (2018). A review of axial flux permanent magnet machines: Topologies, magnetic materials and design processes. International Review of Electrical Engineering (IREE), 13(3), 180–195. <https://doi.org/10.15866/iree.v13i3.14620>.
- Vansompel, H., Lecluyze, C., & Sergeant, P. (2017). Power density and efficiency optimization of an axial flux permanent magnet machine with Yokeless and Segmented Armature. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 64(12), 9340–9349. <https://doi.org/10.1109/TIE.2017.2711550>.
- Woolmer, T. J., & McCulloch, M. D. (2007). Analysis of the Yokeless and Segmented Armature machine. 2007 IEEE International Electric Machines & Drives Conference, 704–708. <https://doi.org/10.1109/IEMDC.2007.383651>.
- Marignetti, F., Colli, V. D., & Coia, Y. (2008). Design of axial flux permanent-magnet synchronous machines with concentrated windings for wheel-motor applications. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 55(10), 3593–3601. <https://doi.org/10.1109/TIE.2008.924031>.
- Ficheux, R. L., Caricchi, F., Crescimbeni, F., & Honorati, O. (2001). Axial-flux permanent-magnet motor for direct-drive elevator systems. IEEE Transactions on Industry Applications, 37(6), 1693–1701. <https://doi.org/10.1109/28.968180>.
- Aydin, M., Huang, S., & Lipo, T. A. (2006). Axial flux permanent magnet disc machines: A review. Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM), 122–127. <https://doi.org/10.1109/SPEEDAM.2006.1649755>.
- Gulec, M., & Aydin, M. (2018). Sizing and design optimization of an axial flux permanent magnet machine for a high-speed application. 2018 XIII International Conference on Electrical Machines (ICEM), 1145–1150. <https://doi.org/10.1109/ICELMACH.2018.8506864>.
- Di Gerlando, A., Fogliani, G., Iacchetti, R., & Perini, R. (2012). Axial flux permanent magnet machines: Design and analysis issues. 2012 XXth International Conference on Electrical Machines, 1245–1251. <https://doi.org/10.1109/ICELMach.2012.6350036>.
- Bogdanov, A. G., & Gieras, J. F. (2010). Specific power and efficiency of axial flux permanent magnet motors. Electrical Engineering, 92(4), 145–153. <https://doi.org/10.1007/s00202-010-0172-3>.
- Popescu, M., & Goss, J. (2014). High power density axial flux permanent magnet motor for automotive traction. 2014 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC), 1–6. <https://doi.org/10.1109/ITEC.2014.6861833>.
- Luo, C., & Fan, X. (2020). Performance analysis of high-speed axial flux permanent magnet synchronous motor with different rotor structures. IEEE Access, 8, 204561–204570. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3037412>.
- Kovalenko M.A., Tsyplenkov D.V., Kovalenko I.Ya., Titov E.O., Bazarov O.O Mathematical simulation of brushless high-speed permanent magnet motor. Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu, 2025, № 4, 108-116. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2025-4/108>.
- 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>.
- Коваленко, М. А., Ткачук, І. В., Коваленко, І. Я., Жук, С. О., & Кришньов, О. О. (2024). Магнітоелектричний генератор з аксіальним магнітним потоком та подвійним статором для перетворення низькопотенціальної механічної енергії. Відновлювана енергетика, (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).
- Коваленко, М., Цивінський, С., Коваленко, І., Гайденко, О., & Труханов, О. (2026). Аналіз питомих вагогабаритних показників високошвидкісного синхронного двигуна із постійними магнітами. Електротехніка та електроенергетика, (1), 27–37. <https://doi.org/10.15588/1607-6761-2026-1-3>.
- Чумак, В., Коваленко, М., Коваленко, І., Ткачук, І., & Тимошук, О. (2023). Математичне моделювання безконтактного аксіального магнітоелектричного генератора із подвійним статором для електричних комплексів малої потужності. Вісник НТУ «ХП». Серія: Проблеми удосконалювання електричних машин і апаратів. Теорія і практика, (2 (10)), 20–25. <https://doi.org/10.20998/2079-3944.2023.2.04>.

#### References (transliterated)

- Gieras, J.F., Wang, R.J., & Kamper, M.J. (2008). Axial Flux Permanent Magnet Brushless Machines (2nd ed.). Springer Science & Business Media. <https://doi.org/10.1007/978-1-4020-8227-6>.
- Kovalenko, M.A., & Chumak, V.V. (2021). Methodology of iterative calculation of axial flux permanent magnet motors for high-speed applications. Journal of Electrical Engineering & Technology, 16(4), 1895–1904. <https://doi.org/10.1007/s42835-021-00742-w>.
- Zhang, Z., Profumo, F., & Pellegrino, G. (2019). Design optimization of axial flux permanent magnet machines: A review. IEEE Transactions on Energy Conversion, 34(4), 2120–2132. <https://doi.org/10.1109/TEC.2019.2937562>.
- Parviainen, A. (2005). Design of axial flux permanent magnet machines [Doctoral dissertation, Lappeenranta University of Technology]. LUT Academic Repository. <http://urn.fi/URN:ISBN:952-214-041-3>.
- Kahourzade, S., Mahmoudi, A., Roshandel, E., & Ping, H. W. (2018). A review of axial flux permanent magnet machines: Topologies, magnetic materials and design processes. International Review of Electrical Engineering (IREE), 13(3), 180–195. <https://doi.org/10.15866/iree.v13i3.14620>.
- Vansompel, H., Lecluyze, C., & Sergeant, P. (2017). Power density and efficiency optimization of an axial flux permanent magnet machine with Yokeless and Segmented Armature. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 64(12), 9340–9349. <https://doi.org/10.1109/TIE.2017.2711550>.
- Woolmer, T.J., & McCulloch, M.D. (2007). Analysis of the Yokeless and Segmented Armature machine. 2007 IEEE International Electric Machines & Drives Conference, 704–708. <https://doi.org/10.1109/IEMDC.2007.383651>.
- Marignetti, F., Colli, V.D., & Coia, Y. (2008). Design of axial flux permanent-magnet synchronous machines with concentrated windings for wheel-motor applications. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 55(10), 3593–3601. <https://doi.org/10.1109/TIE.2008.924031>.

9. Ficheux, R.L., Caricchi, F., Crescimbeni, F., & Honorati, O. (2001). Axial-flux permanent-magnet motor for direct-drive elevator systems. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 37(6), 1693–1701. <https://doi.org/10.1109/28.968180>.
10. Aydin, M., Huang, S., & Lipo, T.A. (2006). Axial flux permanent magnet disc machines: A review. *Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM)*, 122–127. <https://doi.org/10.1109/SPEEDAM.2006.1649755>.
11. Gulec, M., & Aydin, M. (2018). Sizing and design optimization of an axial flux permanent magnet machine for a high-speed application. *2018 XIII International Conference on Electrical Machines (ICEM)*, 1145–1150. <https://doi.org/10.1109/ICELMACH.2018.8506864>.
12. Di Gerlando, A., Fogliani, G., Iacchetti, R., & Perini, R. (2012). Axial flux permanent magnet machines: Design and analysis issues. *2012 XXth International Conference on Electrical Machines*, 1245–1251. <https://doi.org/10.1109/ICEIMach.2012.6350036>.
13. Bogdanov, A.G., & Gieras, J.F. (2010). Specific power and efficiency of axial flux permanent magnet motors. *Electrical Engineering*, 92(4), 145–153. <https://doi.org/10.1007/s00202-010-0172-3>.
14. Popescu, M., & Goss, J. (2014). High power density axial flux permanent magnet motor for automotive traction. *2014 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC)*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/ITEC.2014.6861833>.
15. Luo, C., & Fan, X. (2020). Performance analysis of high-speed axial flux permanent magnet synchronous motor with different rotor structures. *IEEE Access*, 8, 204561–204570. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3037412>.
16. Kovalenko M.A., Tsyplenkov D.V., Kovalenko I.Ya., Titov E.O., Bazarov O.O. Mathematical simulation of brushless high-speed permanent magnet motor. *Naukovi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 2025, № 4, 108-116. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2025-4/108>.
17. 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>.
18. Kovalenko, M.A., Tkachuk, I.V., Kovalenko, I.Ya., Zhuk, S.O., & Kryshnov, O.O. (2024). Mahnitoelektrychny 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).
19. Kovalenko, M., Tsyvinskyi, S., Kovalenko, I., Haidenko, O., & Trukhanov, O. (2026). Analiz pytomykh vahohabarynykh pokaznykiv vysokoshvydkisnoho synkhrornoho dvyhuna iz postiinymy mahnitamy. *Elektrotehnika ta elektroenerhetyka*, (1), 27–37. <https://doi.org/10.15588/1607-6761-2026-1-3>.
20. Chumak, V., Kovalenko, M., Kovalenko, I., Tkachuk, I., & Tymoshchuk, O. (2023). Matematychno modeliuвання bezkontaktного aksialnoho mahnitoelektrychnoho heneratora iz podviinym statorom dlia elektrychnykh kompleksiv maloi potuzhnosti. *Visnyk NTU «KhPI». Seria: Problemy udoskonaluвання elektrychnykh mashyn I aparativ. Teoriia I praktyka*, (2 (10)), 20–25. <https://doi.org/10.20998/2079-3944.2023.2.04>

*Надійшла (Received) 26.12.2025*  
*Прийнята (Accepted) 10.01.2026*  
*Опублікована (Published) 30.04.2026*

*Відомості про авторів / About the authors*

**Коваленко Михайло Анатолійович (Mykhaylo Kovalenko)** – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", доцент кафедри електромеханіки; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5602-2001>; e-mail: [kovalenko87ma@gmail.com](mailto:kovalenko87ma@gmail.com).

**Цивінський Сергій Станіславович (Tsyvinsky Serhiy)** – кандидат технічних 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](mailto:ntuukafem@gmail.com).

**Гайдєнко Юрій Антонович (Haydenko Yuriy)** – кандидат технічних 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](mailto:gaidenko@ukr.net).

**Базаров Олег Олександрович (Oleh Bazarov)** – аспірант, Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", аспірант кафедри електромеханіки, <https://orcid.org/0009-0008-8491-2678>; e-mail: [bazarov.oleh@gmail.com](mailto:bazarov.oleh@gmail.com).

**Труханов Олег Валерійович (Trukhanov Oleg)** – 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](mailto:oleg.trukhanov@gmail.com).