

Розрахунок параметрів електричного двигуна з аксіальним магнітним потоком як виконавчого органу автомобільних систем

Нечаус А.О.¹

¹Харківський національний автомобільно-дорожній університет, Україна

Анотація. У статті викладено результати розробки електричного двигуна з аксіальним магнітним потоком з постійними магнітами та друкованими обмотками, призначеного для використання як виконавчого механізму автомобільних систем. Наведено пропонувану конструкцію такого двигуна, результати розрахунків параметрів друкованої статорної обмотки, збірки постійних магнітів, а також його основних параметрів. На підставі порівняння отриманих результатів з параметрами прототипу електричного двигуна традиційної конструкції, визначено доцільність впровадження електричних двигунів з аксіальним магнітним потоком у електромеханічні виконавчі системи автомобільного транспорту.

Ключові слова: електричний двигун з аксіальним магнітним потоком, електричний двигун з постійними магнітами, електричний двигун з друкованими обмотками, збірка Хальбаха, автомобільне обладнання

Вступ

Електричні двигуни з аксіальним магнітним потоком (у іноземній літературі – Axial Flux Motors – AFM), також відомі як електричні двигуни дискового типу, мають деякі переваги порівняно з електричними двигунами традиційного виконання, зокрема малу осьову довжину та більшу густину магнітного потоку зосередженого у основному робочому зазорі.

Подальшого розвитку та вдосконалення такого типу двигуни отримали з розвитком технології потужних постійних магнітів (Permanent Magnet – PM) з рідкоземельних металів, що дозволило конструювати двигуни у, так званому, безщітковому виконанні (BrushLess – BL), коли зникає потреба передачі електричної потужності для створення магнітного потоку ротора. В такому разі підвищується надійність двигуна, оскільки зникає потреба обслуговування ковзаючих контактів.

Ще однією технологією, яка використовується у двигунах цього типу, є виконання обмоток методом друкованого монтажу

(Printed Circuit Board – PCB), коли струмовідні елементи обмотки наносяться на немагнітну основу у вигляді доріжок провідникового матеріалу, при цьому, на теперішній час, використовуються технології як одношарового, так і багатшарового монтажу, що дозволяє створювати безліч варіантів типів обмоток, які традиційно використовуються у електричних машинах, а також розробляти нові типи обмоток.

Наступним кроком розвитку електричних двигунів з аксіальним магнітним потоком стала розробка двигунів без магнітопроводів (осердь) статора та ротора (Coreless – CL). Коли за рахунок використання збірок постійних магнітів та особливих конструкцій обмоток вдається зосередити більшість магнітного потоку безпосередньо у робочому повітряному зазорі. Відмова від магнітопроводів з електротехнічної сталі зумовлює значне зниження маси електричного двигуна.

На теперішній час, наукова періодика має достатньо публікацій щодо розробки та використання електричних двигунів з аксіальним магнітним потоком та друкованими об-

мотками у різних галузях, як приводів жорстких дисків у комп'ютерній техніці, приводів вентиляторів та насосів різної продуктивності, рушіїв вело- та мототехніки, зокрема у складі мотор-колеса [1], приводів маніпуляторів верстатів та промислових роботів, включаючи космічні технології. Дослідження підтверджують високі енергетичні та масо-габаритні показники електричних двигунів з аксіальним магнітним потоком, у яких застосовані сучасні технології.

Однак, відомостей про застосування таких двигунів у складі електромеханічного обладнання автомобільної техніки досі немає [2 – 4]. Особливістю електрообладнання автомобілів є живлення переважно від бортової мережі 12 В, високі вимоги щодо масо-габаритних показників, надійності роботи в умовах підвищених вібрацій, широкому температурному діапазоні. В такому разі, актуальною слід вважати задачу розробки електричного двигуна з аксіальним магнітним потоком для автомобільних застосунків, зокрема як виконавчого механізму допоміжних систем, таких як механізми склопідйомників, склоочисників, вентиляторів системи кондиціонування повітря та охолодження тощо.

Аналіз публікацій

Основні питання, що стосуються розробки та проектування електричних двигунів з аксіальним магнітним потоком наведені у роботі [3]. У цій роботі також узагальнено результати виробництва та практичного використання основних типів цього типу двигунів. Наступною роботою, яка узагальнює основні етапи розвитку електричних двигунів з аксіальним магнітним потоком, є робота [4], у якій також узагальнено питання електромагнітного моделювання, оптимізації та керування електричних двигунів з аксіальним магнітним потоком. Робота спирається на 126 посилань.

Найбільш повний огляд поточного стану наукових та практичних досліджень стосовно електричних двигунів з друкованими обмотками наведено у роботі [5]. У цій публікації наведено 91 посилання на періодичні та інші види видань стосовно теми. Значна увага приділяється дослідженням впливу виду друкованої обмотки на характеристики електричної машини. У роботі [6] наведено результати дослідження різних типів одношарової хвильової обмотки, яка прийнята за

основу проектного двигуна. Інші типи друкованих обмоток також досліджені рядом авторів, наприклад [7 – 9].

Питання щодо будови збірок постійних магнітів роторів електричних машин з аксіальним магнітним потоком також розглядаються досить докладно у роботах [10 – 12]. У роботі [13], а також деяких інших, розглядається вплив форми поверхні постійних магнітів на характеристики електричних машин з аксіальним магнітним потоком. Особлива увага приділяється використанню у складі ротора збірок Хальбаха [14 – 15].

Серед вітчизняних публікацій за темою дослідження можна виділити лише роботу [16], що свідчить про недостатню участь вітчизняного наукового товариства у науковій та практичній діяльності щодо впровадження сучасних надбань світової електротехнічної галузі у вітчизняне виробництво.

Аналіз публікацій дозволяє визначити основні шляхи проектування, розробки, моделювання, дослідження та аналізу електричних двигунів з аксіальним магнітним потоком, з постійними магнітами, друкованими обмотками у беззалізному (CL) виконанні.

Мета та постановка задачі

Метою роботи є визначення можливості використання електричного двигуна з аксіальним магнітним потоком як приводного двигуна автомобільних допоміжних систем на основі порівняння його розрахункових параметрів з параметрами двигунів традиційного виконання, у яких використовуються сучасні технології та матеріали.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

- обрати конструкцію електричного двигуна з аксіальним магнітним потоком, яка дозволяє максимально реалізувати його питомі потужнісні та масо-габаритні характеристики стосовно автомобільного обладнання;
- розрахувати, згідно фізичних основ роботи та методик урахування особливостей конструкції, робочі параметри електричного двигуна з аксіальним магнітним потоком заданої потужності з заданими електричними та масо-габаритними обмеженнями;
- порівняти отримані дані з існуючими пропозиціями від провідних виробників електротехнічного обладнання, в тому числі автомобільного призначення;
- зробити висновки про доцільність по-

дальших досліджень та розробок електричних двигунів з аксіальним магнітним потоком для використання у складі автомобільного електромеханічного обладнання.

Розробка конструкції електричного двигуна

На рис. 1, а наведено креслення розрізу електричного двигуна з аксіальним збудженням від постійних магнітів, яке дозволяє пояснити його будову. Статор двигуна (1 на

рис. 1, а, а також рис. 1, в) являє собою немагнітну основу на якій методом друкованого монтажу нанесено мідні струмоведучі доріжки, по яким протікає струм двигуна. Ротор двигуна (3 на рис. 1, а) являє собою два диски, які розміщені з обох боків статора, на яких змонтовано збірки з постійних магнітів (2 на рис. 1, а, а також рис. 1, б). Ротор передає обертовий момент на вихідний вал двигуна 4, і з'єднаний з корпусом двигуна 6 через підшипники 5.

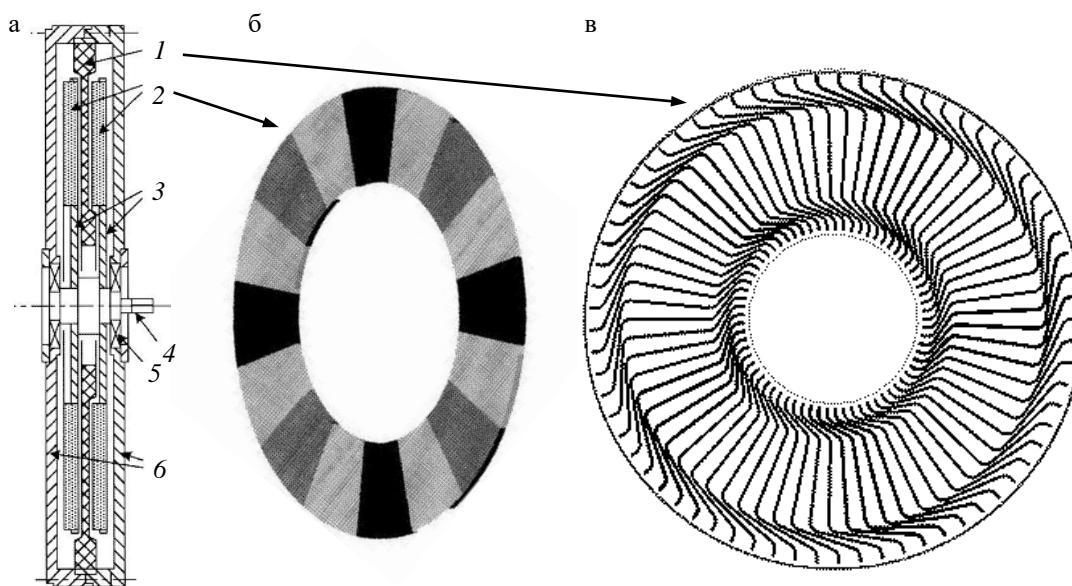


Рис. 1. Конструкція електричного двигуна з аксіальним магнітним потоком

А ні статор, а ні ротор пропонуваної конструкції двигуна не містять феромагнітних елементів, призначених для створення шляху магнітного потоку, тому подібна будова є особливістю, яка визначає класифікаційну ознаку таких двигунів, через що їх розглядають як окремий підвид. Подібна конструкція визначає значне зменшення маси двигуна.

На рис. 2 наведено ілюстрацію, яка пояснює принцип побудови статора. Як було вказано раніше, на дискову поверхню статора методом друкованого монтажу нанесено струмовідні доріжки, які з'єднано таким чином, що вони утворюють хвильову обмотку статора розподілену по окружності диску.

Причому друкований монтаж виконано з обох боків диску, що також визначає окрему класифікаційну ознаку, яка відносить таку друковану обмотку до двостороннього типу. Синім кольором на рис. 2 позначено провідники одного боку, а червоним – протилежного. Провідники різних боків статора з'єднані між собою у технологічних наскрізних отво-

рах, утворюючи зовнішню та внутрішню лобові частини обмотки.

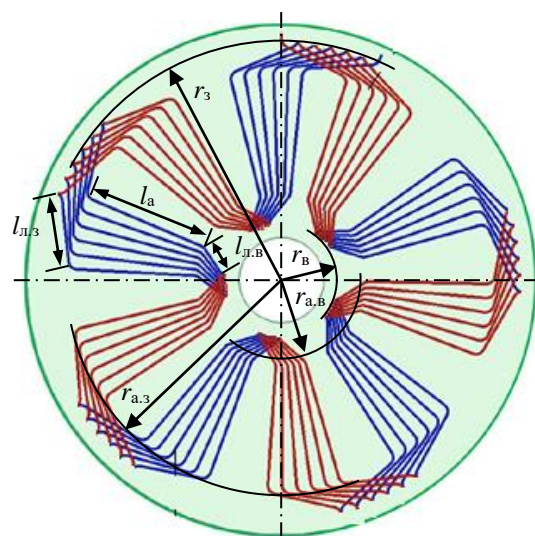


Рис. 2. Конструкція статора двигуна

На рис. 2 показано фазну обмотку, яка утворює $2p = 5$ пар полюсів, на кожний по-

люс доводиться $w_{\text{п}} = 6$ витків. Пропонований двигун отримуватиме живлення від трифазного джерела напруги, тому кількість фаз обмотки статора $m = 3$, тобто поверхня диску буде повністю заповнена провідниками (дивись рис. 1, в). Основні параметри обмотки статора: r_3 – зовнішній радіус обмотки, у ньому вміщаються зовнішні лобові частини обмотки довжиною $l_{\text{л.з}}$, активний провідник одного витка довжиною $l_{\text{а}}$, зовнішні лобові частини обмотки довжиною $l_{\text{л.в}}$; $r_{\text{а.з}}$ та $r_{\text{а.в}}$ – зовнішній та внутрішній радіуси активної зони статора, які визначають положення збірок постійних магнітів ротора; $r_{\text{в}}$ – внутрішній радіус обмотки.

Характеристики двигуна визначає будова обмотки статора, зокрема, активна довжина провідників, яка напряму впливає на радіус статора і, як наслідок, на зовнішній розмір самого двигуна. У даній роботі було прийнято обмеження по зовнішньому діаметру двигуна 100 мм.

Як прототип проєктованого двигуна взято двигун постійного струму потужністю 250 Вт та напругою живлення 12 В. Виходячи з цих даних можна приблизно визначити споживаний струм. Враховуючи, що у двигунах з друкованими обмотками величина допустимої густини струму у активних провідниках на рівні 30 – 40 А/мм², можна визначити площу поперечного перерізу провідника. У даному випадку це значення прийняте $s_{\text{пр}} = 0,7 \text{ мм}^2$. Для відомого значення перерізу можливо визначити ширину $h_{\text{пр}}$ та висоту $b_{\text{пр}}$ струмовідної доріжки обмотки. Внутрішній радіус обмотки $r_{\text{в}}$ при цьому має визначальний вплив. На рис. 3 показано ділянку обмотки на цьому радіусі, тут провідники максимально зближуються, і з врахуванням ізоляційних відстаней $a_{\text{із}}$, параметри обмотки повинні задовольняти рівності:

$$r_{\text{в}} = w_{\text{с}}(h_{\text{пр}} + a_{\text{із}}), \quad (1)$$

де $w_{\text{с}}$ – кількість струмовідних доріжок на одному боці статора.

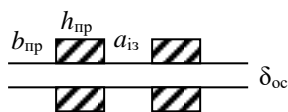


Рис. 3. Лобова частина обмотки статора на внутрішньому радіусі

Ізоляційні відстані $a_{\text{із}}$, прийняті у розрахунках 0,4 мм, потрібні не тільки для забезпечення електричної ізоляції, а і для забезпечення умов охолодження обмотки. Із врахуванням проведених розрахунків, прийнято $h_{\text{пр}} = 0,7 \text{ мм}$, $b_{\text{пр}} = 1 \text{ мм}$. При цьому, кількість полюсів статорної обмотки $2p = 5$, активних провідників на полюс $w_{\text{п}} = 4$.

З врахуванням обмеження по зовнішньому радіусу статора, довжина активного провідника $l_{\text{а}}$ склала 22 мм.

Також, на рис. 3 показано товщину основи статора $\delta_{\text{ос}}$, яка разом з $b_{\text{пр}}$ визначає його загальну товщину.

Оскільки двигун не має магнітопровідних елементів, постійні магніти, які розміщено на роторі сформовані у збірку Хальбаха, що дозволяє сконцентрувати більшість магнітного потоку у робочому повітряному зазорі. На рис. 4 показано варіанти збірок Хальбаха, які знайшли застосування у електричних двигунах, подібних до розроблюваного.

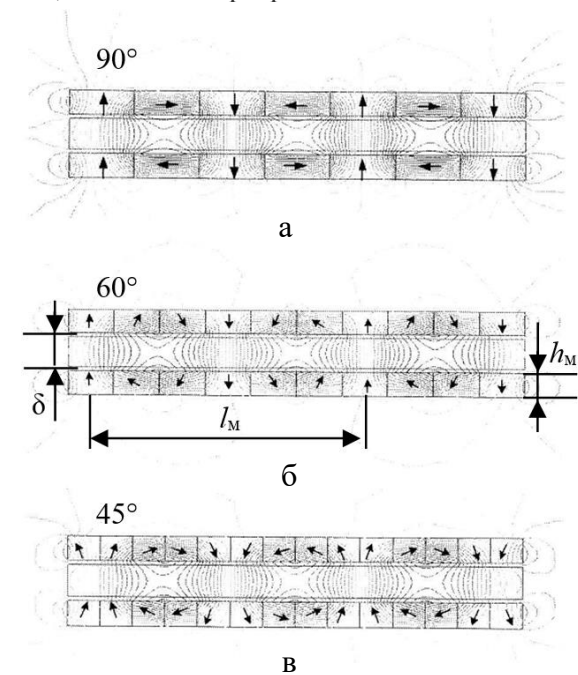


Рис. 4. Збірки Хальбаха для постійних магнітів ротора

Показано варіанти збірок 90°, 60° та 45° (рис. 4, а, б та в відповідно). Чорними стрілками показано вектори намагніченості окремих сегментів постійних магнітів. Як відомо з літератури, перехід від збірки 90° до 60° дозволяє збільшити величину магнітної індукції у зазорі на 8 – 15 %, перехід від збірки 60° до 45° дає набагато менший ефект, однак знижує технологічність, оскільки вимагає

застосування більшої кількості сегментів збірки та потребує більшої точності щодо напрямів їх намагнічення. У даній розробці обрано збірку 60°, яка містить 6 сегментів на довжину магнітної хвилі l_m , загальна кількість магнітних полюсів ротора $2p_p = 4$.

Довжину магнітної хвилі визначає активна поверхня статора, яка обмежена $r_{a.3}$ та $r_{a.в}$:

$$l_m = \pi(r_{a.3} + r_{a.в})/2p_p. \quad (2)$$

З довжини магнітної хвилі визначається стала збірки Хальбаха:

$$\beta = 2\pi/l_m. \quad (3)$$

В нашому випадку: $l_m = 0,045$ м, $\beta = 0,138$ 1/м.

Визначення параметрів електричного двигуна

Амплітуда магнітної індукції у робочому повітряному зазорі δ :

$$B_{m\delta} \approx B_r [1 - \exp(-\beta h_m)] \frac{\sin(\pi/n_m)}{\pi/n_m}, \quad (4)$$

де $B_r = 1,2$ – залишкова магнітна індукція постійного магніту (NdFeB); $h_m = 8$ мм – товщина збірки; $n_m = 6$ – кількість сегментів збірки Хальбаха.

Отримане значення $B_{m\delta} = 0,798$ Тл.

Магнітний потік у робочому повітряному зазорі:

$$\Phi_\delta = \alpha_i B_{m\delta} \frac{\pi}{2p_p} (r_{a.3}^2 - r_{a.в}^2) = 51 \text{ мкВб}, \quad (5)$$

де α_i – відношення діючого до максимального значення магнітної індукції у робочому повітряному зазорі.

Коефіцієнт розподілу обмотки статора:

$$k_{p1} = \frac{\sin(\pi/2m)}{q_1 \sin[\pi/(2mq_1)]} = 1,277, \quad (6)$$

де $q_1 = 2$ – кількість фазних сторін обмотки на полюс.

Коефіцієнт скосу обмотки статора:

$$k_{c1} = \sin\left(\beta \frac{\pi}{2}\right) = 0,999. \quad (7)$$

Коефіцієнт обмотки статора:

$$k_{w1} = k_{p1} k_{c1} = 1,277. \quad (8)$$

Стала ЕРС статорної обмотки:

$$k_E = \pi\sqrt{2} p w_1 k_{w1} \Phi_\delta = 0,087, \quad (9)$$

де w_1 – кількість активних провідників обмотки на фазу:

Стала крутного моменту:

$$k_M = \frac{m}{\sqrt{2}} p w_1 k_{w1} \Phi_\delta = 0,041. \quad (10)$$

ЕРС обмотки при частоті обертання n :

$$E = k_E n = 1,44 \text{ В}. \quad (11)$$

Електромагнітний момент двигуна при максимальному діючому струмі I :

$$M_e = k_M I = 0,086 \text{ Н}\cdot\text{м}. \quad (12)$$

Електромагнітна енергія двигуна:

$$P_e = 2\pi n M_e = 252,5 \text{ Вт}. \quad (13)$$

Втрати двигуна

Втрати у обмотці, рахуючи, що при живленні від трифазного інвертора кожний момент часу струм протікає по двом фазним обмоткам статора, і беручи до уваги, що обмотка, крім активної ділянки, включає лобові частини ($l_1 = l_a + l_{л.з} + l_{л.в}$):

$$\Delta P_e = 2I^2 R_1 = 21,57 \text{ Вт}, \quad (14)$$

де $R_1 = \rho l_1 / s_{пр} = 0,025$ Ом – опір фазної обмотки статора; ρ – питомий опір міді.

Втрати на вихрові струми у прямокутних провідниках статора, визначені за формулою:

$$\Delta P_v = \frac{\pi^2}{3} \frac{1}{\rho d} f^2 b_{пр}^2 m_{пр} [B_{mx1}^2 + B_{mz1}^2] \eta_v^2, \quad (15)$$

склали 0,73 Вт. Їх величина залежать від квадрату робочої частоти струму f , квадратів нормальної та тангенціальної складових магнітного потоку B_{mx} та B_{mz} , коефіцієнту викривлення η_v , який враховує вищі гармонійні

складові магнітного потоку, а також питомої маси провідникового матеріалу d та загальної маси проводу $m_{пр}$.

Втрати на тертя у підшипниках визначені за формулою:

$$\Delta P_{\pi} = 0,06k_{т.п} (m_p + m_o) n, \quad (16)$$

де $k_{т.п}$ – коефіцієнт втрат у підшипниках, m_p – загальна маса ротора, m_o – маса осі (вихідного вала двигуна). Склали 0,61 Вт.

Вентиляційні втрати обертання ротора:

$$\Delta P_{вент} = \frac{1}{2} c_f d_{пов} (2\pi n)^3 (r_3^5 + r_o^5), \quad (17)$$

де $c_f = \frac{3,87}{\sqrt{Re}}$ – коефіцієнт опору турбулент-

ному потоку; $Re = \frac{2\pi n d_{пов} r_3^2}{\mu}$ – число Рейно-

льдса для обертового диску; $d_{пов}$ та $\mu_{пов}$ – питома густина та в'язкість оточуючого середовища (повітря); r_o – радіус осі (вихідного вала двигуна). Склали 0,04 Вт.

Використовуючи визначені раніше параметри можна визначити вихідну потужність двигуна:

$$P_{вих} = P_e - \Delta P_{\pi} - \Delta P_{вент} = 251,88 \text{ Вт}. \quad (18)$$

Вихідний крутний момент на валу двигуна, який забезпечується на робочій частоті обертання:

$$M_{вих} = \frac{P_{вих}}{2\pi n/60} = 0,86 \text{ Н·м}. \quad (19)$$

Вхідна споживана потужність, яка враховує електричну складову втрат:

$$P_{вх} = P_e + \Delta P_e + \Delta P_v = 274,8 \text{ Вт}. \quad (20)$$

Коефіцієнт корисної дії двигуна:

$$\eta = \frac{P_{вих}}{P_{вх}} = 0,91. \quad (21)$$

Аналіз отриманих результатів

У табл. 1 наведено отримані значення основних параметрів пропонованої конструкції електричного двигуна з параметрами прототипу традиційного виконання, наприклад

[17]. З аналізу табл. 1 видно, що при тій самій потужності та при практично однаковому крутному моменті, розрахований двигун має вищі масо-габаритні показники.

Таблиця 1. Порівняння характеристик

Двигун	P , Вт	$M_{вих}$, Н·м	$D_{зов}$, мм	$L_{ос}$, мм	M , кг
Розрахований	250	0,86	100	36	0,9
Прототип	250	0,80	65	130	1,95

Маса розрахованого двигуна складає 46 % маси прототипу. При зовнішньому діаметрі на 54 % більшому від прототипу, осьова довжина розрахованого двигуна менша на 73 %. Об'єм розрахованого двигуна у 2,34 рази менший об'єму прототипу.

Висновки

За результатами дослідження можна дійти до висновку, що використання електричних двигунів з аксіальним магнітним потоком в якості виконавчих механізмів автомобільних електромеханічних систем, зокрема систем приводу склопідійомників, склоочисників, вентиляції, кондиціонування повітря та охолодження, є доцільним та обґрунтованим. Маючи кращі масо-габаритні показники, такі двигуни, при використанні сучасних досягнень науки та технологій, забезпечують такі самі енергетичні характеристики як і електричні двигуни традиційної конструкції.

У роботі наведено опис конструкції пропонованого електричного двигуна з аксіальним магнітним потоком, визначено особливості його будови на основі досягнень сучасних технологій та наукових досліджень щодо подібного типу двигунів.

З використанням методів та алгоритмів розрахунку електричних машин, які враховують особливості характеристик та фізичних процесів у аксіальних машинах, друкованих обмотках, збірках постійних магнітів, проведено розрахунки основних характеристик електричного двигуна пропонованої конструкції.

Проведено порівняння отриманих характеристик проектного двигуна з характеристиками сучасного прототипу традиційної будови. На підставі порівняння визначено, що проектований двигун має кращі масо-габаритні показники при збереженні енергетичних характеристик. На підставі чого зроблено висновок про доцільність використання електричних двигунів з аксіальним ма-

гнітним потоком як виконавчих органів автотранспортних засобів.

Конфлікт інтересів

Автор заявляє, що немає конфлікту інтересів щодо публікації цієї статті.

Література

1. Versèle, C., Grève, Z.D., Vallée, F., Hanuise, R., Deblecker, O., Delhay, M., & Lobry, J. (2009). Analytical design of an axial flux permanent magnet in-wheel synchronous motor for electric vehicle. 2009 13th European Conference on Power Electronics and Applications, 1-9.
2. Гнатів, А. В. Будова гібридних автомобілів і електромобілів: конспект лекцій [Електронний ресурс] / А. В. Гнатів ; М-во освіти і науки України, Харків. нац. автомоб.-дор. ун-т., Харків, 2021. 72 с. URL: <https://dspace.khadi.kharkov.ua/handle/123456789/4797>. Hnatov, A. V. Budova hibrydnykh avtomobiliv i elektromobiliv: konspekt lekttsii. [Structure of hybrid cars and electric cars: lecture notes] [Elektronnyi resurs] / A. V. Hnatov ; M-vo osvity i nauky Ukrainy, Kharkiv. nats. avtomob.-dor. un-t., Kharkiv, 2021. 72 s.
3. Gieras, J.F., Wang, R.J., Kamper, M.J.: 'Axial flux permanent magnet brushless machines' (Springer Netherlands, Netherlands, 2004, 2nd edn. 2008), doi:10.1007/978-1-4020-8227-6.
4. Hao Z, Ma Y, Wang P, Luo G, Chen Y. A Review of Axial-Flux Permanent-Magnet Motors: Topological Structures, Design, Optimization and Control Techniques. Machines. 2022; 10(12):1178. <https://doi.org/10.3390/machines10121178>.
5. Omolbanin T., Seyed M.M. 'Design aspects, winding arrangements and applications of printed circuit board motors: a comprehensive review', IET Electr. Power Appl., 2020, Vol. 14 Iss. 9, pp. 1505-1518, doi: 10.1049/iet-epa.2020.0141/
6. Paul, S., Farshadnia, M., Pouramin, A., Fletcher, J.E., & Chang, J. (2019). Comparative analysis of wave winding topologies and performance characteristics in ultra thin printed circuit board axial flux permanent magnet machine. IET Electric Power Applications, doi: 10.1049/iet-epa.2018.5417.
7. M. D. Noh, J. Kim and Y. -W. Park, "Comparisons of Concentrated Printed-Circuit Stator Windings for Axial Flux Permanent Magnet Machines," 2019 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM), Hong Kong, China, 2019, pp. 229-234, doi: 10.1109/AIM.2019.8868912.
8. Wang, X., Lou, F., Li, C.: 'Optimization design of PCB winding for axial flux permanent magnet synchronous motor', Zhongguo Dianji Gongcheng Xuebao/Proc. Chin. Soc. Electr. Eng., 2017, 37, pp. 6092–6100, doi: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.161105.
9. Xia, B., Shen, J., Luk, P.C., et al.: 'Comparative study of air-cored axial-flux permanent-magnet machines with different stator winding configurations', IEEE Trans. Ind. Electron., 2015, 62, (2), pp. 846–856, doi: 10.1109/TIE.2014.2353012.
10. Aydin, M., Huang, S., Lipo, T.A.: 'Axial flux permanent magnet disc machines: a review'. Proc. of the SPEEDAM, Italy, 2004, pp. 61–71.
11. Verbeek, N., Dehez, B.: 'Comparison of inner and outer rotor configurations in slotless PM machines with PCB windings'. 2019 IEEE Int. Electric Machines & Drives Conf. (IEMDC), San Diego, CA, USA, 2019, pp. 1–7, doi 10.1109/IEMDC.2019.8785408.
12. Radwan-Pragłowska, N.: 'Impact of permanent magnets shape and arrangement for selected parameters in coreless axial flux generator'. 2018. Int. Symp. on Electrical Machines (SME), Andrychów, Poland, 2018, pp. 1–6, doi:10.1109/ISEM.2018.8442975.
13. S. Ali, G. Rubino, L. Ciprini, R. Ali and F. Marignetti, "Comparative Study Among Different Rotor Topologies of Axial Flux Permanent Magnet Machines," 2022 Second International Conference on Sustainable Mobility Applications, Renewables and Technology (SMART), Cassino, Italy, 2022, pp. 1-6, doi: 10.1109/SMART55236.2022.9990232.
14. Wang, X., Li, X., Li, C., et al.: 'Design of a PCB stator coreless axial flux permanent magnet synchronous motor based on a novel topology Halbach array', Front. Inf. Technol. Electron. Eng., 2019, 20, (3), pp. 414–424, doi: 10.1631/FITEE.1700345.
15. Huang R, Liu C, Song Z, Zhao H. Design and Analysis of a Novel Axial-Radial Flux Permanent Magnet Machine with Halbach-Array Permanent Magnets. Energies. 2021; 14(12):3639. <https://doi.org/10.3390/en14123639>.
16. Grebenikov, V., Gamaleya, R.V., & Sokolovsky, A.N. Electric machine with axial magnetic flux, permanent magnets and multilayered printing windings. Tekhnichna Elektrodynamika. Institute of Electrodynamics National Academy of Science of Ukraine. No 2, 2020, pp. 28 – 35, <https://doi.org/10.15407/teched2020.02.028>.
17. Neodymium Rare Earth Magnet Motor ND Catalog. https://www.transtecno.com/wordpress/wp-content/uploads/2023/04/B_ND-Neodymium-DC-electric-motors_230214_0223.pdf.

Нечаус Андрій Олександрович¹, к.т.н., доцент, доцент кафедри автомобільної електроніки, e-mail: a.nechaus@gmail.com, тел. +38 067-777-02-24, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8833-0802>

¹Харківський національний автомобільно-дорожній університет, 61002, Україна, м. Харків, вул. Ярослава Мудрого, 25.

Calculation of the parameters of an axial flux motor as an actuator of automotive systems

Abstract. Problem. Axial flux electric motors offer several significant advantages compared to electric motors of traditional design. Currently, scientific periodicals contain numerous publications regarding the development and use of axial flux electric motors with printed windings across various fields. These include applications such as HDD-drives in computer technology, fans and pumps of various capacities, propulsion systems for bicycles and motorcycles, including in-wheel motors, manipulator drives for machine tools and industrial robots, and even within space technologies. Research confirms the high efficiency and size-to-weight ratios of axial flux motors when modern technologies are employed. However, there is little information available regarding the application of such motors in automotive electromechanical equipment. A distinctive feature of automotive electrical systems is their predominantly 12 V onboard power supply, along with high demands on size-to-weight ratios and reliability in conditions of elevated vibrations and wide temperature ranges. In this context, the development of an axial flux motor for automotive applications becomes relevant, particularly as an actuating mechanism for auxiliary systems such as window lifters, windshield wipers, air conditioning, and cooling fans, etc. **Goal.** The goal of the article is to determine the feasibility of using an axial flux electric motor as an actuator for automotive auxiliary systems by comparing its calculated parameters with the parameters of motors of traditional design using modern technologies and materials. **Methodology.** The methods and algorithms used for the calculation of electric machines take into account the characteristics and

physical processes specific to axial flux machines with printed windings and permanent magnet arrays. **Results.** A comparison of the obtained characteristics of the designed motor with the characteristics of a modern prototype of traditional design was conducted. Based on the comparison, it was determined that the designed motor has better size-to-weight ratios while maintaining energy performance. Consequently, a conclusion was drawn about the feasibility of using electric motors with axial flux as actuators for automotive auxiliary systems. **Originality.** The prototype of the designed motor is considered to be a 250 W DC motor with a supply voltage of 12 V. The imposed constraint on the external diameter of the designed motor is set to 100 mm. **Practical value.** At the same output power and nearly identical torque, the calculated motor exhibits higher size-to-weight ratios. The weight of the calculated motor is 46% of the weight of the prototype. With an external diameter 54% larger than the prototype, the axial length of the calculated motor is 73% smaller. The mass of the calculated motor is 2.34 times smaller than the mass of the prototype.

Key words: axial flux motor, permanent magnet motor, printed circuit board motor, Halbach-array, automotive equipment

Andrii Nechaus¹, Ph.D., Assoc. Prof., Vehicle Electronics Department,
tel. +38 067-777-0224, a.nechaus@gmail.com,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8833-0802>

¹Kharkov National Automobile and Highway University, 25, Yaroslava Mudrogo str., Kharkiv, 61002, Ukraine.