

КОМПЛЕКСНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ ПАРАМЕТРІВ МАГНІТНОЇ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ З ПОСТІЙНИМИ МАГНІТАМИ І ЗОВНІШНІМ РОТОРОМ

В.В. Гребеніков*, докт. техн. наук, Л.І. Мазуренко**, докт. техн. наук,

О.В. Джура***, канд. техн. наук

Інститут електродинаміки НАН України,
пр. Берестейський, 56, Київ, 03057, Україна.

E-mail: elm1153@gmail.com.

Представлено результати моделювання електромагнітних та теплових процесів чотирьох варіантів безколекторних синхронних електродвигунів із постійними магнітами та зовнішнім ротором, призначених для силових установок мультироторних безпілотних літальних апаратів (БПЛА). Як вихідну модель розглянуто електродвигун типу А40, для якого виконано зіставлення розрахункових та експериментальних характеристик, що підтвердило адекватність застосованої чисельної моделі. На основі базової конструкції досліджено три модернізовані варіанти зі збільшеним зовнішнім діаметром ротора і висотою пазів статора. Виконано порівняльний аналіз вихідної потужності, коефіцієнта корисної дії, струмового навантаження, втрат і температурного стану двигунів з урахуванням усередненого польотного циклу БПЛА. Показано, що збільшення геометричних розмірів магнітної системи та площі паза дає змогу підвищити вихідну потужність двигуна в 2,5-3 рази із збереженням високого ККД. Встановлено, що за сукупністю розглянутих критеріїв оптимальним є варіант, який забезпечує максимальний ККД 92,05% за вихідної потужності 8,95 кВт. За результатами аналізу магнітного поля встановлено відсутність насичення магнітної системи статора в даному варіанті, при цьому максимальна індукція зубців статора не перевищує 1,7 Тл. Тепловий розрахунок для заданого польотного циклу показав, що температури обмоток і постійних магнітів не перевищують допустимих значень. Отримані результати можуть бути використані під час проектування високоефективних електродвигунів для безпілотних літальних апаратів мультироторного типу. Характеристики електродвигунів, що розглянуті, розраховувалися в програмних пакетах Simcenter Magnet і Simcenter MotorSolve. Бібл. 11, рис. 6, табл. 4.

Ключові слова: безпілотний літальний апарат, електродвигун із постійними магнітами, зовнішній ротор, чисельне моделювання, тепловий розрахунок.

Вступ. Інтенсивний розвиток мультироторних безпілотних літальних апаратів супроводжується зростанням вимог щодо ефективності їхніх електричних силових установок. Визначальну роль при цьому грають безколекторні синхронні електродвигуни з постійними магнітами, енергетичні та теплові характеристики яких безпосередньо впливають на тривалість польоту, вантажопідйомність та надійність експлуатації безпілотних літальних апаратів (БПЛА). Істотною особливістю роботи таких двигунів є функціонування в умовах змінних навантажень, що включають режими зльоту, зависання та крейсерського польоту. Це зумовлює необхідність комплексного аналізу взаємопов'язаних електромагнітних і теплових процесів, які відбуваються в електричній машині. Врахування реальних експлуатаційних режимів є ключовим фактором під час вибору конструктивних параметрів електродвигуна та оцінки його енергетичної ефективності у складі силової установки БПЛА.

Сучасні дослідження підтверджують високу ефективність зовнішньороторних безщіткових двигунів у системах БПЛА. У роботі [1] на основі скінчено-елементного моделювання виконано комплексний аналіз електромагнітних та теплових процесів двигуна з зовнішнім ротором з урахуванням взаємодії з пропелером, що дало можливість виявити ключові фактори підвищення енергоефективності. Підходи до оптимізації геометрії зовнішньороторних машин, представлені в [2], демонструють

© Гребеніков В.В., Мазуренко Л.І., Джура О.В., 2026

ORCID: * <https://orcid.org/0000-0002-1114-1218>; ** <https://orcid.org/0000-0002-7059-249X>;

*** <https://orcid.org/0000-0002-0224-3351>

© Видавець ВД «Академперіодика» НАН України, 2026



Це стаття відкритого доступу за ліцензією CC BY-NC-ND 4.0

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/legalcode.uk>

можливість збільшення крутного моменту і ККД за низьких швидкостях обертання. У роботі [3] запропоновано алгоритм бездатчикового управління, що забезпечує стійку роботу двигуна, тоді як у [4] розроблено підхід до параметричного синтезу *BLDC*-двигунів з урахуванням вимог профілів польоту та характеристик гвинта. У цілому дані дослідження формують основу підвищення питомої потужності та ефективності зовнішньороторних електроприводів БПЛА.

У сучасних дослідженнях також значна увага приділяється моделюванню енергоспоживання мультироторних БПЛА на основі профілів польоту. У роботі [5] запропоновано методику прогнозування енергоспоживання з поетапним аналізом фаз польоту, що дає змогу враховувати перехідні режими. У [6] розроблено математичні моделі, що враховують аеродинаміку гвинтів, параметри електродвигунів та динаміку руху апарата. У [7] запропоновано аналітичну модель споживаної потужності з урахуванням маси, швидкості та аеродинамічного опору. У роботі [8] показано вплив траєкторії польоту на енергетичні витрати та режими навантаження двигунів. У [9] представлено комплексну модель квадрокоптера, що враховує взаємозв'язок динаміки, аеродинаміки та параметрів силової установки. У [10] розроблено компонентно-орієнтовану модель, що дає можливість оцінювати внесок окремих елементів у загальний енергетичний баланс. Показано, що енергоспоживання БПЛА визначається інтегральним впливом параметрів силової установки та профілю польоту, які спільно формують режими навантаження і, відповідно, рівень споживаної потужності.

Метою роботи є порівняльний аналіз характеристик чотирьох варіантів електродвигунів для мультироторних БПЛА на основі мультифізичного моделювання електромагнітних і теплових процесів із використанням усередненого профілю польоту. Задля досягнення поставленої мети виконано формування польотного циклу, моделювання електромагнітних характеристик, тепловий аналіз та зіставлення енергетичних показників різних варіантів конструкції.

Польотний цикл безпілотного літального апарату. Для оцінки енергетичних характеристик мультироторних БПЛА використовується формалізований польотний цикл, що відображає типові режими експлуатації. На відміну від наземних транспортних засобів, універсальні стандартизовані цикли для БПЛА відсутні, що зумовлено варіативністю завдань та умов застосування. У зв'язку з цим застосовується концепція профілів польоту, що становлять послідовність основних етапів польоту: зліт, набір висоти, горизонтальне переміщення, зависання, повернення, зниження і посадка.

Поділ польотної місії на етапи дає змогу враховувати змінні режими роботи електродвигуна, аналізувати розподіл енергоспоживання та виявляти найбільш енергоємні режими. Це забезпечує обґрунтований вибір параметрів силової установки, включаючи електродвигуни, гвинти та системи накопичення енергії. Усереднений польотний цикл, використаний у роботі, наведено у табл. 1 і застосовується для моделювання електромагнітного та теплового процесів [5–10].

Таблиця 1

Етап	Режим	Час	Швидкість, м/с	Дальність, км	Висота польоту	Навантаження	Примітка
1	Зліт	20 с	2,5	0	50 м	100%	Максимальна потужність
2	Набір висоти	40 с	1	0	90 м	74,%	Перехід до крейсерського режиму
3	Горизонтальний політ (вперед)	6 хв	15	5,4	100 м	47%	Оптимум по ККД
4	Зависання (розвантаження)	2 хв	0	0	100 м	58%	Найбільш енергоємний режим
5	Горизонтальний політ (назад)	6 хв	15	5,4	100 м	47%	Оптимум по ККД
6	Зниження	40 с	1	0	50 м	37%	Режим часткового зменшення потужності споживання
7	Посадка	20 с	0,5	0	0	100%	Максимальна потужність

Порівняльний аналіз основних характеристик чотирьох варіантів електродвигунів для БПЛА. Як базовий для БПЛА прийнято електродвигун з постійними магнітами типу A40, що відноситься до класу зовнішньороторних (*outrunner*) машин. Конструктивно двигун виконаний за схемою з зовнішнім ротором і внутрішнім статором. За однакових габаритних розмірів електродвигун із зовні-

шнім ротором забезпечує більший крутний момент порівняно з двигуном внутрішньороторного виконання, що зумовлено більшим радіусом повітряного зазору, на якому реалізується електромагнітна взаємодія.

Ротор двигуна виконано у вигляді циліндричного осердя із закріпленими на внутрішній поверхні високоенергетичними постійними магнітами (Nd-Fe-B). Статор виконаний шихтованим з електротехнічної сталі 2412 товщиною 0.35 мм та розподіленою трифазною обмоткою. Охолодження повітряне за рахунок набігаючого потоку і вентиляційного ефекту ротора.

Двигун призначений для роботи у складі електричної силової установки БПЛА мультироторного типу та забезпечує формування підйомної сили за номінального навантаження до 30 кг за електричній потужності близько 3,5 кВт. Основні параметри електродвигуна типу А40 наведено у табл. 2.

Характерною особливістю двигуна є висока питома потужність (до 1,8-2,2 кВт/кг), що відповідає сучасним вимогам до силових установок безпілотних літальних апаратів середньої вантажопідйомності.

Метою проведених чисельних досліджень є розробка та оптимізація магнітної системи електродвигуна, що забезпечує підвищення його вихідної потужності в 2,5-3 рази порівняно з базовою конфігурацією А40. Досягнення поставленої мети передбачає збільшення зовнішнього діаметра магнітної системи до 170 мм з одночасною оптимізацією геометричних параметрів статора і ротора, включаючи висоту пазів, товщину магнітопроводу та розміри магнітів. Дана модифікація геометрії дає змогу суттєво підвищити магнітний потік і, як наслідок, збільшити електромагнітний момент за збереження теплових характеристик та коефіцієнта корисної дії на прийнятному рівні.

Комплексний підхід під час розрахунку та проектування магнітної системи базується на чисельному моделюванні електромагнітних і теплових процесів методом скінчених елементів, що дає змогу верифікувати прийняті передумови та оптимізувати конструктивні параметри.

На рис. 1 зображено фрагменти поперечного перерізу магнітної системи чотирьох варіантів електродвигуна (Мотор 1 – Мотор 4), що відрізняються геометричними параметрами статора та ротора. Схеми ілюструють конструктивне виконання зовнішньороторної синхронної машини з постійними магнітами.

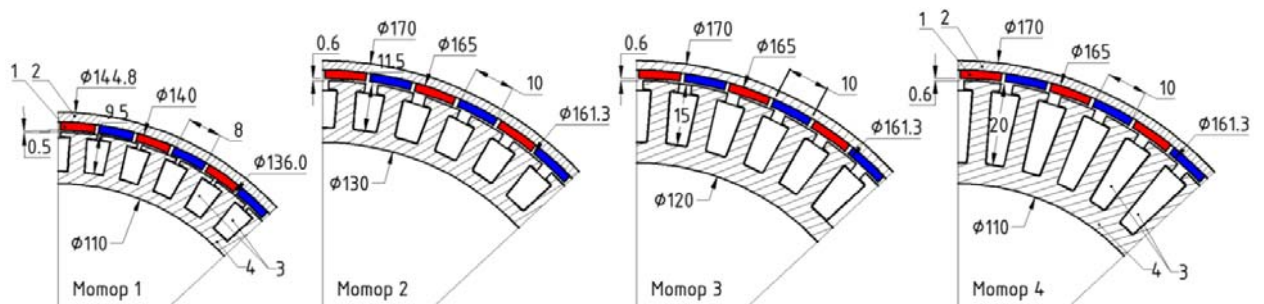


Рис. 1

Мотор 1 (А40) відповідає базовій конфігурації із зовнішнім діаметром ротора 144,8 мм та висотою паза 9,5 мм. Мотори 2 – 4 виконані зі збільшеним до 170 мм зовнішнім діаметром та поетапним збільшенням висоти паза статора, що забезпечує зростання допустимого струму обмотки та, як наслідок, збільшення вихідної потужності. Отже, рис. 1 демонструє еволюцію магнітної системи електродвигуна, спрямовану на підвищення електромагнітного моменту та потужності за рахунок збільшення габаритних розмірів та активного об'єму двигуна.

Експериментальні дані тягових випробувань електродвигуна А40 (платформа ХАГ) з пропелером Р4718 (47×18") наведено у табл. 3. Напруга (U), струм (I), частота обертання ротора (n), вихідна потужність (P_{out}), вхідна потужність (P_{in}), підйомна сила двигуна (G) та ККД наведені в залежності від тяги. Тяга ($Throttle$ (%)) – це безрозмірний параметр керування електронного регулятора частоти

обертання, що характеризує відносну величину потужності, що підводиться до двигуна. Значення 0% відповідає відключенню живлення двигуна, а 100% – режиму максимальної потужності, що підводиться. Експериментальні дані табл. 3 мають довідковий характер і відображають результати випробувань конкретної конфігурації (гвинт/живлення/умови стенду), заявлені постачальником [11].

У табл. 3 наведено також розрахункові електромеханічні характеристики електродвигуна типу А40, отримані за результатами чисельного моделювання в програмному пакеті MotorSolve. Розрахунки виконано у діапазоні зміни тяги від 0 до 100%. Аналіз даних показує, що зі збільшенням тяги спостерігається закономірне зростання вихідної потужності, моменту та частоти обертання. За максимальної тяги (100%) двигун розвиває потужність $P_{out} = 3640$ Вт за частоти обертання $n = 3520$ об/хв і розвиває тягу 42 кг.

Таблиця 3

Експеримент								Розрахунок (Simcenter MotorSolve)			
Тяга Throttle (%)	U, В	I, А	n, об/хв	P_{in} , Вт	P_{out} , Вт	G, кг	КПД (%)	n, об/хв	P_{out} , Вт	M, Н·м	J, (А/мм ²)
20%	52	4.5	980	234	192	2,8	82	978	151	1,49	2,81
40%	52	18.2	1850	946	747	8,5	79	1853	644	3,52	6,19
50%	52	28.5	2240	1482	1141	13,2	77	2239	1030	4,4	7,54
60%	51,5	42	2610	2163	1622	18,5	75	2617	1490	5,45	8,86
80%	50,8	78.4	3180	3982	2700	32	70	3200	2510	7,5	11,5
100%	50	112.0	3520	5600	3640	42	65	3529	3560	9,64	14,3

Слід зазначити нелінійний характер зміни вихідної потужності від струму: в області малих навантажень (до 40 % номінального струму) зростання потужності відбувається прискорено внаслідок збільшення електромагнітного моменту та підвищення частоти обертання. У діапазоні 60-100% струму спостерігається стабілізація темпу приросту вихідної потужності, що свідчить про наближення до оптимальної зони експлуатації двигуна. Щільність струму зростає пропорційно до навантаження, досягаючи максимального значення 14,3 А/мм², що необхідно враховувати у процесі теплового аналізу конструкції.

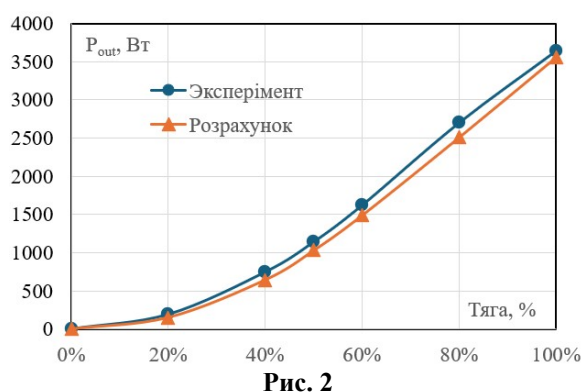


Рис. 2

На рис. 2 наведено порівняння розрахункової та експериментальної залежностей вихідної потужності від створюваної тяги електродвигуна А40. Зіставлення результатів демонструє задовільний збіг розрахункових та експериментальних даних у робочому діапазоні навантажень. Середня відносна похибка не перевищує 10%, що підтверджує адекватність побудованої математичної моделі та коректність прийнятих припущень під час моделювання у програмі Simcenter MotorSolve. Незначні розбіжності можуть бути зумовлені тепловими ефектами, магнітним насиченням та додатковими

механічними втратами, що неповністю враховані в розрахунковій моделі.

Отримані результати підтверджують можливість використання розробленої чисельної моделі для подальшої оптимізації магнітної системи та прогнозування характеристик двигуна у разі зміни геометричних та електричних параметрів.

Основні технічні параметри чотирьох моделей електродвигунів наведено у табл. 4. У цій таблиці представлено чотири варіанти електродвигуна, що відрізняються геометричними параметрами магнітної системи. Базова модель (Мотор 1 – А40) має зовнішній діаметр ротора 144,8 мм та висоту паза 9,5 мм, тоді як модернізовані варіанти (Мотори 2–4) виконані зі збільшеним зовнішнім діаметром ротора до 170 мм та висотою паза 11,5; 15 та 20 мм відповідно.

Зі збільшенням висоти паза зростає переріз провідників обмотки: від ~4,29 мм² для Мотор 1 до ~9,6 мм² для Мотор 4 у разі збереження однакової щільності струму 14,3 А/мм². Це забезпечує пропорційне зростання максимально допустимого струму від 100 А до 232 А. Таким чином, підви-

щення потужності досягається не за рахунок збільшення електромагнітного навантаження за щільністю струму, а за рахунок зростання активного перерізу провідника та об'єму магнітної системи.

У табл. 4 також наведено масогабаритні та конструктивні параметри активних частин чотирьох варіантів електродвигуна, отримані в результаті розрахунків та подальшої оптимізації геометрії магнітної системи. Проведений порівняльний аналіз демонструє закономірне збільшення маси та основних геометричних параметрів під час переходу від базової конфігурації (Мотор 1) до модернізованих виконань (Мотор 2–4), що відображає реалізовану стратегію масштабування конструкції з метою підвищення вихідної потужності за збереження допустимих рівнів електромагнітних та теплових навантажень.

Таблиця 4

Найменування	Мотор 1 (A40)	Мотор 2	Мотор 3	Мотор 4
Висота паза, мм	9,5	11,5	15	20
Зовнішній діаметр ротора, мм	144,8	170	170	170
Внутрішній діаметр ротора, мм	136	161,3	161,3	161,3
Товщина пакета статора, мм	23	25	25	25
Робочий зазор, мм	0,5	0,6	0,6	0,6
З'єднання фаз	Δ	Δ	Δ	Δ
Кількість витків	2	2	2	2
Максимальний струм, А	100	140	186	232
Маса магнітів, кг	0,134	0,174	0,174	0,174
Маса обмоток, кг	0,292	0,417	0,605	0,913
Маса активних матеріалів, кг	1,12	1,6	2,01	2,47
Площа паза, мм ²	44,74	60,91	80,13	104,42
Частота обертання ротора, об/хв	3500	3500	3500	3500
Крутий момент, Н·м	10,32	18,47	24,41	30,42
Вхідна потужність, кВт	4,32	7,36	9,72	12,04
Вихідна потужність, кВт	3,78	6,77	8,95	11,15
ККД, %	87,48	91,61	92,05	91,56
Діюче значення струму фази, А	104,4	138,7	184,4	233,3
Втрати – сумарні, кВт	0,54	0,62	0,77	1,02
Втрати – обмотка, кВт	0,13	0,2	0,29	0,4
Втрати – сталь, кВт	0,41	0,42	0,49	0,61
Щільність струму, А/мм ²	14,4	14,5	14,5	13,8
Питома потужність, Вт/кг	3,4	4,2	4,5	4,5

Найбільш суттєві зміни стосуються маси обмоток, яка зростає з 0,292 до 0,913 кг, що зумовлено збільшенням площі пазів.

Також у табл. 4 наведено основні розрахункові параметри чотирьох моделей електродвигунів за однакової частоти обертання $n = 3500$ об/хв. За постійної частоти обертання збільшення крутного моменту від 10,32 до 30,42 Н·м призводить до пропорційного зростання вихідної потужності від 3,78 до 11,15 кВт. Залежність відповідає виразу $P = M \cdot \omega$, де за $n = 3500$ об/хв кутова частота обертання становить приблизно $\omega = 366$ рад/с, що підтверджує коректність представлених значень потужності.

Зростання вхідної потужності (від 4,32 до 12,04 кВт) супроводжується збільшенням фазного струму (від 104,37 до 233,27 А). Це свідчить про те, що збільшення потужності досягається переважно за рахунок зростання струму, а не напруги, що характерно для низьковольтних БПЛА-двигунів.

ККД усіх чотирьох варіантів знаходиться у межах 87,5-92,1%. Максимальна ефективність досягається для Мотора 3 (92,05%), після чого у разі подальшого зростання висоти пазів спостерігається незначне зниження ККД, що зумовлено збільшенням сукупних втрат. Слід зазначити практично постійне значення щільності струму (13,8-14,5 А/мм²), що вказує на близькі умови теплового навантаження та порівняний ступінь використання активного матеріалу обмотки у всіх чотирьох варіантах. Це свідчить про масштабування конструкції переважно за рахунок збільшення габаритів активної зони за збереження допустимого електромагнітного навантаження.

В цілому можна зробити висновок, що перехід від Мотора 1 до Мотора 4 супроводжується майже триразовим зростанням вихідної потужності за збереження високого ККД і допустимого рівня щільності струму, що підтверджує коректність обраної концепції масштабування магнітної системи.

На рис. 3 показана залежність вихідної потужності (P_{out}) від частоти обертання ротора (n) для

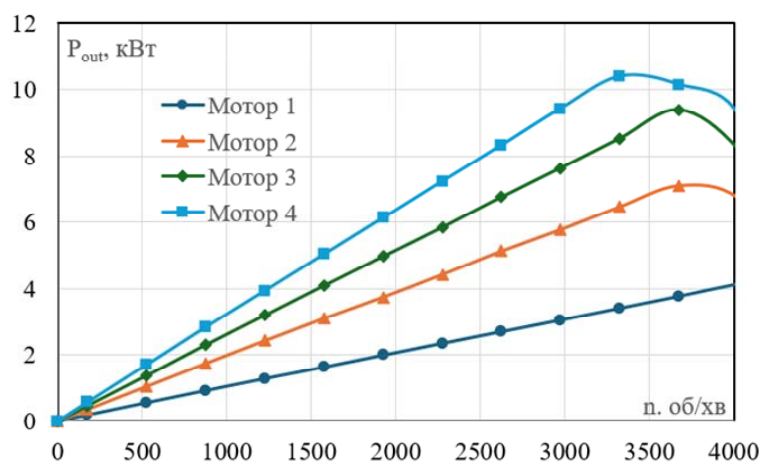


Рис. 3

до моментної області регулювання, де момент залишається близьким до номінального значення.

Мотор 1 має найменшу потужність у всьому діапазоні, Мотор 2 та Мотор 3 характеризуються більш високою інтенсивністю зростання потужності, що відображає збільшення електромагнітного навантаження та покращення використання активного об'єму машини. Найбільші значення потужності досягаються для Мотор 4, що відповідає максимальному крутному моменту серед представлених варіантів.

В області частот обертання 3400-3800 об/хв для Мотор 2-4 спостерігається деяке відхилення від лінійної залежності – формування максимуму з подальшим незначним зниженням потужності. Дане явище обумовлено переходом у зону ослаблення поля, зростанням активних і магнітних втрат і, навіть, обмеженнями по напрузі живлення, оскільки за частоти понад 3500 об/хв проти-ЕРС перевищує напругу живлення. Для Мотор 4 пік потужності досягає близько 10-10,5 кВт за частоти близько 3500 об/хв, після чого фіксується помірне зниження.

Порівняльний аналіз графіків дає змогу зробити висновок про коректність масштабування конструкції: збільшення геометричних параметрів та електромагнітного навантаження призводить до пропорційного зростання вихідної потужності із збереженням загальної форми механічної характеристики. Це підтверджує, що обрана стратегія модернізації забезпечує передбачуване та стійке підвищення енергетичних показників електродвигуна за незмінної принципової структури магнітної системи.

Якщо зіставляти чотири виконання за однакової частоти обертання $n = 3500$ об/хв, Мотор 3 можна обґрунтовано розглядати як оптимальний варіант за критерієм «максимальна енергетична ефективність за помірного теплового та силового навантаження» з наступних причин. Мотор 3 за вихідної потужності 8,95 кВт забезпечує максимальний ККД 92,05 %. У порівнянні з Мотор 2 даний варіант має істотно більш високу потужність за практично однакової ефективності, тоді як перехід до Мотор 4 супроводжується непропорційним зростанням фазного струму, сумарних втрат і втрат сталі за незначного зниження ККД.

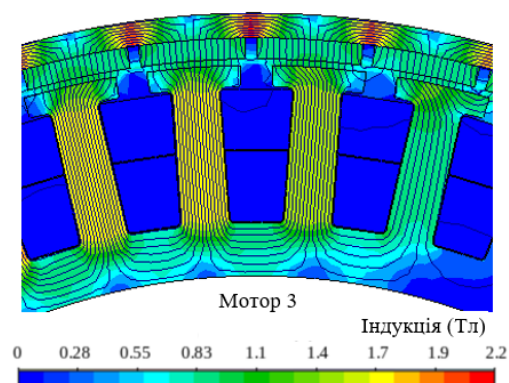


Рис. 4

Додатковим підтвердженням раціональності варіанта Мотор 3 є результати розрахунку магнітного поля, показані на рис. 4, з яких випливає, що ознак вираженого локального насичення не виявлено; максимальна магнітна індукція в статорних зубцях досягає 1,7 Тл, що знаходиться в допустимому діапазоні для обраного матеріалу. Це свідчить про раціональний вибір геометрії магнітної системи та сприятливі умови роботи активної зони двигуна. Таким чином, варіант Мотор 3 є оптимальним за сукупністю показників потужності, ККД, магнітного стану, теплового стану

оскільки він забезпечує максимальний ККД серед розглянутих моделей за високої вихідної потужно-

сті, а подальше збільшення потужності (Мотор 4) призводить до суттєвого зростання струму і втрат за відсутності вирашу ефективності. Отже, Мотор 3, як буде показано далі, є найкращим компромісним рішенням за сукупністю енергетичних показників, теплового стану та вимог до інтеграції в силову установку, включно з інвертором, електричними з'єднаннями та системою охолодження.

Тепловий розрахунок та аналіз нагрівання елементів конструкції електродвигунів. Розрахунок температурного стану елементів конструкції досліджуваних електродвигунів (обмоток статора, постійних магнітів, магнітопроводів статора та ротора, валу, корпусу та підшипникових щитів) виконувався з використанням програмного комплексу Simcenter MotorSolve, який дає змогу проводити пов'язаний електромагнітно-тепловий аналіз електричних машин.

Під час моделювання враховувалися теплові потоки, що виникають внаслідок втрат в обмотках, магнітопроводі та інших елементах конструкції, а також умови теплообміну між компонентами двигуна та навколишнім середовищем з урахуванням прийнятої системи охолодження. Тепловий розрахунок виконувався для характерного польотного циклу БПЛА, наведеного в табл. 1, що дало можливість оцінити зміну температурних режимів двигуна в умовах реальної експлуатації за змінних навантажень та режимах роботи.

На рис. 5 наведено результати теплового розрахунку у вигляді часових залежностей температури постійних магнітів і обмоток статора для чотирьох варіантів електродвигуна (Мотор 1–Мотор 4) за однакової тривалості режиму навантаження ($t = 16$ хв).

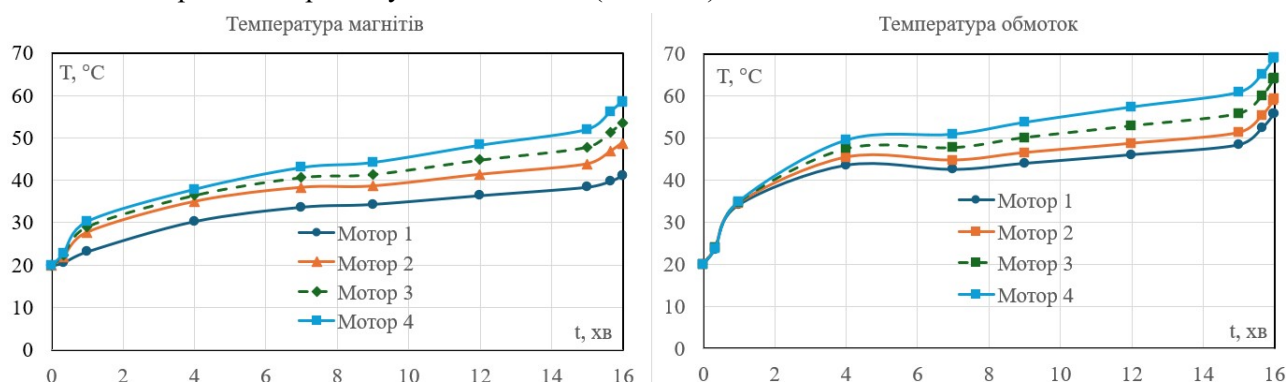


Рис. 5

Для температури магнітів для всіх варіантів характерний однаковий якісний вид кривих: на початковій ділянці (перші $\sim 0-1$ хв, зліт і набір висоти) спостерігається прискорене зростання температури, зумовлене формуванням теплових потоків від нагрітих активних частин до ротора та встановлення граничних умов тепловіддачі. Далі, в інтервалі приблизно $1-14$ хв (горизонтальний політ і висіння) зростання температури стає більш плавним і близьким до квазілінійного, що відповідає режиму, коли сумарна потужність тепловиділення та теплопередача досягають квазістаціонарного балансу. Поблизу кінця розрахункового інтервалу ($15-16$ хв, зниження та посадка) помітно додаткове збільшення нахилу кривих, що вказує на накопичення тепла та зростання температури елементів конструкції за обмеженої тепловіддачі. Максимальні температури магнітів послідовно зростають від Мотора 1 до Мотору 4, що свідчить про збільшення теплового навантаження та погіршення умов відведення тепла під час переходу до більш потужних виконань. Однак магніти не нагріваються вище 60 С, що менше допустимої температури нагріву, яка для магнітів марки N42 становить 90 С.

Нагрів обмоток характеризується вищим абсолютним рівнем температур порівняно з магнітами та більш вираженою динамікою на початковій ділянці. Вже в перші хвилини спостерігається інтенсивне зростання температури, що пояснюється домінуючим вкладом втрат, локалізованих безпосередньо у провідниках обмотки, а також порівняно малим тепловим опором обмотка-паз-статор. У середньому часовому інтервалі ($4-8$ хв) для всіх варіантів простежується ділянка зі зменшенням темпу зростання (квазіплато), що відповідає частковому вирівнюванню температурних градієнтів та перерозподілу теплових потоків у магнітопровід та корпус. На завершальному етапі (перед 16 -ю хвилиною, зниження і посадка) температурні криві знову прискорюють ріст, що є ознакою наближення до більш високого температурного рівня за стабільної потужності втрат і обмеженої тепловіддачі.

В цілому отримані залежності дають можливість зробити висновок, що збільшення енергетичних показників двигунів (від Мотора 1 до Мотору 4) супроводжується зростанням теплової напруженості, причому найбільш важкими температурними режимами характеризується обмотка статора,

що вимагає першочергового врахування під час вибору допустимих режимів роботи та розробки системи.

На зображених теплових картах (рис. 6) показано розподіл температури у варіантах Мотор 1 і Мотор 3 через 16 хвилин роботи. В обох варіантах найбільші температури локалізуються в області верхньої частини активної зони – в області магнітів та прилеглих елементів ротора. Підвищені температури в області магнітів та прилеглих елементів ротора обумовлені не тільки локальними втратами, а й перенесенням тепла від активних частин машини за обмеженого тепловідведення.

Мінімальні температури спостерігаються в центральній частині магнітопроводу (синя зона), де тепловий потік розподіляється рівномірніше.

Для Мотора 3 характерний більш високий загальний температурний рівень порівняно з

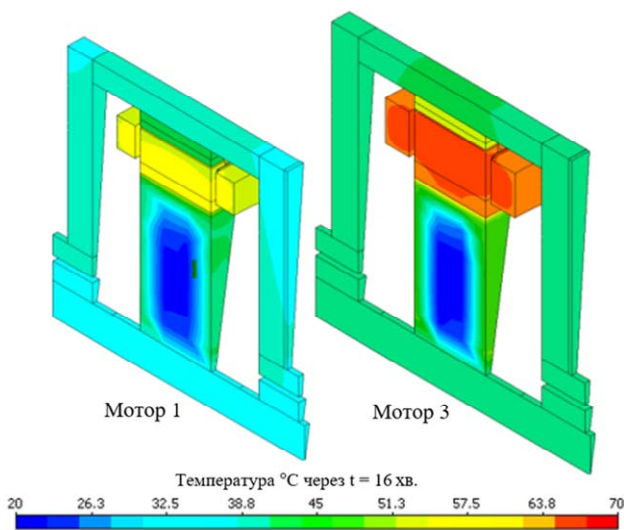


Рис. 6

Мотор 1, що обумовлено збільшеним електромагнітним навантаженням і великими втратами.

Під час проведення теплового аналізу електродвигуна першочергова увага повинна приділятися контролю температурного стану постійних магнітів, оскільки саме даний елемент конструкції є критичним з погляду термічної стійкості. Неодимові магніти марки N42 характеризуються порівняно низькою допустимою робочою температурою (90 °C), перевищення якої може призвести до часткового або повного розмагнічування, і, як наслідок, зниження електромагнітного моменту і вихідної потужності машини.

Згідно з результатами розрахунків заданого польотного циклу (табл. 1), максимальна температура магнітів не перевищує 60 °C, що знаходиться в межах допустимого діапазону матеріалу N42. Проте слід враховувати, що в реальних умовах експлуатації БПЛА можливі більш важкі режими роботи, що супроводжуються підвищеним електричним та тепловим навантаженням, включаючи тривалі ділянки з максимальною тягою, роботу за високої температури навколишнього середовища та обмеженому охолодженні.

У зв'язку з цим під час проектування доцільно передбачати щонайменше двократний температурний запас стосовно розрахункового рівня нагріву. З практичної точки зору це обґрунтовує застосування магнітів з підвищеною термостійкістю, наприклад, марки N42SH, для яких гранично допустима робоча температура досягає 150 °C. Використання таких магнітів забезпечує підвищення надійності та стійкості магнітної системи до перегріву під час експлуатації в розширеному діапазоні навантажень.

Висновки.

1. Виконаними дослідженнями підтверджено, що оцінка характеристик ЕД для БПЛА має базуватися на профілях польоту, які враховують усі фази польоту. Зіставлення розрахункових та експериментальних характеристик базового двигуна A40 підтвердило адекватність моделі, реалізованої у програмному комплексі Simcenter MotorSolve, що дає змогу використовувати цю модель для подальшої оптимізації.

2. Збільшення зовнішнього діаметра ротора до 170 мм та висоти пазів статора дало можливість підвищити вихідну потужність електродвигуна в 2,5-3 рази порівняно з базовим варіантом із збереженням високого ККД. Найбільш раціональним варіантом є Мотор 3, який забезпечує максимальний ККД 92,05% за вихідної потужності 8,95 кВт.

3. Тепловий розрахунок польотного циклу (16 хв) показав, що температура магнітів не перевищує 60 °C. Задля розширення допустимого діапазону робочих температур доцільно розглянути застосування магнітів підвищеної термостійкості, наприклад, класу N42SH з граничною температурою до 150 °C.

Роботу виконано за держбюджетною темою № 2025.06/0044 «Електромеханічні системи підвищеної енергоефективності для літальних апаратів», що фінансується Національним фондом досліджень України, 2025-2026 рр.

COMPLEX RESEARCH AND OPTIMIZATION OF THE PARAMETERS OF THE MAGNETIC SYSTEM OF ELECTRIC MOTORS WITH PERMANENT MAGNETS AND AN EXTERNAL ROTOR

V.V. Grebenikov, L.I. Mazurenko, O.V. Dzhura

Institute of Electrodynamics National Academy of Sciences of Ukraine,

56, Beresteyskyi Ave., Kyiv, 03057, Ukraine.

E-mail: elm1153@gmail.com.

This article presents the results of modeling the electromagnetic and thermal processes of four variants of brushless synchronous motors with permanent magnets and an external rotor, designed for the power systems of multi-rotor unmanned aerial vehicles (UAVs). An A40-type electric motor was considered as the baseline model, for which a comparison of calculated and experimental characteristics was performed, confirming the adequacy of the numerical model used. Based on the basic design, three upgraded variants with increased outer rotor diameter and stator slot depth were investigated. A comparative analysis of the output power, efficiency, current load, losses, and thermal state of the motors was performed, taking into account the average flight cycle of the UAV. It is shown that increasing the geometric dimensions of the magnetic system and the slot area allows the motor's output power to be increased by 2.5–3 times while maintaining high efficiency. It has been established that, based on the set of criteria considered, the best option is Motor 3, which provides a maximum efficiency of 92.05% at an output power of 8.95 kW. Based on the results of the magnetic field analysis, it was established that there is no saturation of the stator magnetic system in this variant, while the maximum induction of the stator teeth does not exceed 1.7 T. Thermal calculations for the specified flight cycle showed that the temperatures of the windings and permanent magnets do not exceed the permissible values. The results obtained can be used in the design of high-efficiency electric motors for multi-rotor unmanned aerial vehicles. The characteristics of the electric motors under study are calculated using the Simcenter Magnet and Simcenter MotorSolve software packages. References 11, figures 6, tables 5.

Keywords: unmanned aerial vehicle, permanent magnet electric motor, external rotor, numerical simulation, thermal calculation.

1. De la Cruz Soto J., Gascon-Avalos J.J., Rumbo-Morales J.Y., Ortiz-Torres G., Zurita-Gil M.A., Sorcia-Vázquez F.D.J., Pérez-Ramírez J., Valle-López O.A., Garcia-Castro S.E., Buenabad-Arias H.M. Analysis and Assessment of a Brushless DC Outrunner Motor for Agriculture Drones Using JMAG. *Appl. Syst. Innov.* 2025. Vol. 8. No 3. Article no: 81. DOI: <https://doi.org/10.3390/asi8030081>.
2. Yuan Y., Meng W., Sun X., Zhang L. Design Optimization and Analysis of an Outer-Rotor Direct-Drive Permanent-Magnet Motor for Medium-Speed Electric Vehicle. *World Electr. Veh. J.* 2019. Vol. 10. No 2. Article no: 16. DOI: <https://doi.org/10.3390/wevj10020016>.
3. Çabuk A. S. Sensorless Control of Outer Rotor Brushless DC Motor With Back-EMF Observer for Drone. *Balkan Journal of Electrical and Computer Engineering*. 2021. Vol. 9. No 4. Pp. 379–385. DOI: <https://doi.org/10.17694/bajece.958760>.
4. Saemi F., Benedict M. Brushless DC Motor Sizing Algorithm for Small UAS Conceptual Designers. *Aerospace*. 2024. Vol. 11. No 8. Article no: 649. DOI: <https://doi.org/10.3390/aerospace11080649>.
5. Prasetia A.S., Wai R.-J., Wen Y.-L., Wang Y.-K. Mission-based energy consumption prediction of multirotor UAV. *IEEE Access*. 2019. Vol. 7. Pp. 33055–33063. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2903644>.
6. Gong H., Huang B., Jia B., Dai H. Modelling power consumptions for multi-rotor UAVs. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*. 2023. Vol. 59. No 6. Pp. 7409–7422. DOI: <https://doi.org/10.1109/TAES.2023.3288846>.
7. Liu Z., Sengupta R., Kurzhanskiy A. A power consumption model for multi-rotor small unmanned aircraft systems. Proceedings of the International Conference on *Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)*, Miami, Florida, USA, 13-16 June 2017. Pp. 310–315. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICUAS.2017.7991310>.
8. Morbidi F., Cano R., Lara D. Minimum-energy path generation for a quadrotor UAV. Proceedings of the IEEE International Conference on *Robotics and Automation (ICRA)*, Stockholm, Sweden, 16-21 May 2016. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICRA.2016.7487285>.
9. Jacewicz M. Quadrotor model for energy consumption analysis. *Energies*. 2022. Vol. 15. No 19. Article no: 7136. DOI: <https://doi.org/10.3390/en15197136>.
10. Steup C., Parlow S., Mai S., Mostaghim S. Generic component-based mission-centric energy model for micro-scale UAVs. *Drones*. 2020. Vol. 4. No 4. Article no: 63. DOI: <https://doi.org/10.3390/drones4040063>.
11. A40 Brushless Outrunner Motor Drone Strong Power Supply UAV 75KV High Speed Airplane Large Thrust Aircraft. URL: <https://thedroneflight.com/products/a40-brushless-outrunner-motor-drone-strong-power-supply-uav-75kv-high-speed-airplane-large-thrust-aircraft> (accessed at 15.02.2026).

Надійшла 02.04.2026

Прийнята 19.04.2026