

**ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ МАЛОГАБАРИТНИХ ВИСОКОШВИДКІСНИХ
СИНХРОННИХ МАГНІТОЕЛЕКТРИЧНИХ ДВИГУНІВ****Ю.М. Васьковський***, докт. техн. наук, Д.С. Нестеренко

НТУ України «КПІ ім. Ігоря Сікорського»,

пр. Берестейський, 37, Київ, 03056, Україна,

e-mail: vun157@gmail.com, denia1112222@gmail.com.

Методами математичного моделювання досліджено та проведено порівняльний аналіз характеристик трьох варіантів малогабаритних високошвидкісних синхронних магнітоелектричних електродвигунів (СМД) з постійними магнітами на роторі, які призначені для приводу гвинта літальних апаратів типу квадрокоптер. А саме: СМД з зовнішнім пазовим статором та внутрішнім ротором; СМД з внутрішнім пазовим статором та зовнішнім ротором; СМД з внутрішнім явнопольсним статором та зовнішнім ротором. На прикладі літального апарату загальною масою 4 кг проведено порівняльний аналіз величини потужності, яку розвивають зазначені варіанти двигунів за однакових умов функціонування: однакових габаритних розмірах, швидкості обертання ротора, струму в обмотці статора і об'єму постійних магнітів. Надана оцінка величини пульсації електромагнітного моменту. Встановлено, що хоча СМД з внутрішнім явнопольсним статором є найбільш технологічно простим, але за однакових інших умов він за своєю потужністю поступається СМД з внутрішнім пазовим статором і зовнішнім ротором. Бібл. 7, рис. 4.

Ключові слова: синхронний магнітоелектричний двигун, постійні магніти, потужність і електромагнітний момент двигуна.

Вступ. Малогабаритні синхронні магнітоелектричні двигуни часто використовуються для приводу спеціального механічного навантаження, яке потребує високої частоти обертання ротора двигуна. Прикладами такого навантаження є пропелери літальних апаратів, малогабаритні вентиляційні системи (cooler) тощо. Технічні характеристики систем, в яких для приводу використовуються магнітоелектричні двигуни, в значній мірі залежать від характеристик самих двигунів – досяжної потужності і величини крутного електромагнітного моменту, масо-габаритних показників, легкості і діапазону керування швидкості обертання ротора тощо. Тому створення високоефективних, малогабаритних, високошвидкісних та технологічно простих синхронних магнітоелектричних електродвигунів являє актуальну науково-технічну проблему електромеханіки, яка розглядалася в ряді наукових праць [1–5] і потребує подальших наукових досліджень.

Тип, конструкція, характеристики і спосіб використання електродвигунів в значній мірі залежать від конструкції системи навантаження. Наприклад, під час розгляду різних типів літальних апаратів слід відмітити літальні апарати типу квадрокоптер (КвК), у яких на загальній рамі встановлюються чотири електродвигуни, розташовані на діагоналях рами. Така конструкція КвК дає змогу за рахунок роздільного керування швидкістю окремих двигунів забезпечити високу маневреність руху. Джерелом електроживлення для електродвигуна є акумуляторна батарея, розташована на борту квадрокоптера. Для приводу КвК можуть застосовуватися як двигуни постійного струму, так і безконтактні двигуни змінного струму. З огляду на вимоги до надійності функціонування КвК в складних погодних умовах і за наявності інтенсивних динамічних навантажень широке застосування для приводу КвК знайшли малогабаритні синхронні магнітоелектричні двигуни (СМД) зі збудженням від розташованих на роторі постійних магнітів. В цьому випадку на борту КвК знаходиться інвертор, який перетворює постійний струм акумуляторної батареї в регульований змінний струм живлення електродвигуна. При цьому існує ряд альтернативних конкурентоспроможних варіантів конструкції двигунів, що обумовлює актуальність порівняльного аналізу їхніх характеристик і розробки рекомендацій щодо вибору оптимального варіанту.

Метою роботи є порівняльний аналіз методами математичного моделювання характеристик трьох конкурентоспроможних варіантів виконання СМД, призначених для приводу гвинта в складі КвК з заданими технічними даними.

Об'єктами дослідження є три конкурентоспроможні варіанти виконання привідних СМД для БПЛА типу квадрокоптер. А саме: СМД з зовнішнім пазовим статором та внутрішнім ротором (варіант 1); СМД з внутрішнім пазовим статором та зовнішнім ротором (варіант 2); СМД з внутрішнім явноплюсним статором та зовнішнім ротором (варіант 3). Геометричні структури варіантів СМД в зазначеному порядку зліва на право показано на рис. 1.

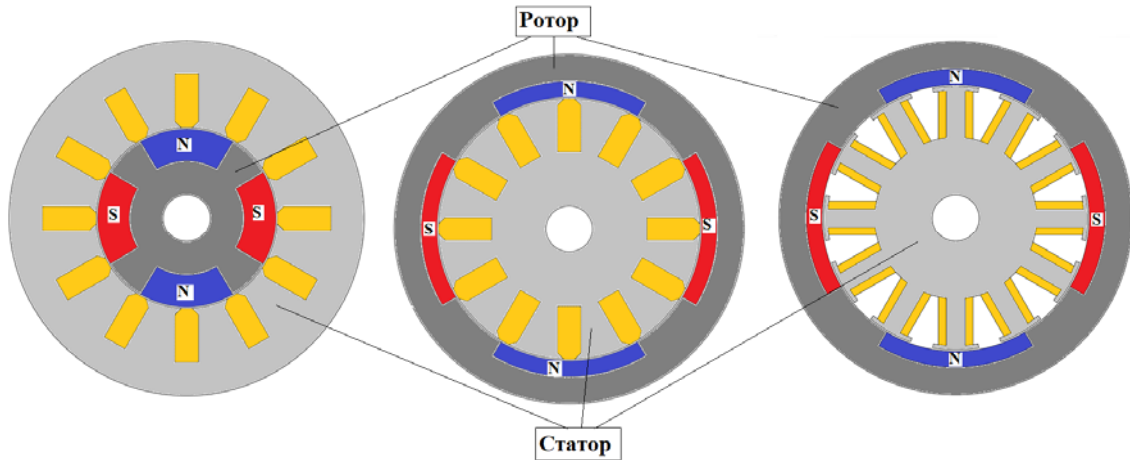


Рис. 1

Вибір зазначених варіантів СМД обумовлений попередніми оцінками їхніх суперечливих технічних та технологічних параметрів. Наприклад, варіант 1 має ротор з найменшим моментом інерції, що забезпечує найкращі динамічні характеристики і маневреність руху КвК. Варіант 3 має найбільш просту технологію виготовлення статора, чим можна пояснити його досить широке використання в існуючих КвК. Але він поступається енергетичними характеристиками СМД з пазовим статором (варіант 2), розподіл електромагнітного поля в яких забезпечує більш тісний магнітний зв'язок між статором і ротором. Варіанти СМД з зовнішнім ротором забезпечують більш надійне кріплення постійних магнітів (ПМ) на роторі від дії відцентрових сил тощо.

Хоча найбільш адекватний порівняльний аналіз привідних двигунів потрібно проводити з урахуванням динамічних і маневрених характеристик КвК, але найбільш суттєвим їхнім показником є питомі енергетичні показники за однакових умов функціонування. Тому в роботі проведено порівняльний аналіз потужності, яку розвивають зазначені варіанти СМД за однакових умов, а саме: однакових габаритах і кількості полюсів, однакової частоти напруги живлення, однакового струму в обмотці статора і однакового об'єму постійних магнітів. Прийняття умови однакового струму обмотки статора забезпечує приблизно однаковий нагрів двигунів, що також є важливою умовою адекватного порівняльного аналізу. Також важливою є оцінка пульсацій електромагнітного моменту, що є характерним для СМД, та їхнього впливу на стабільність швидкості обертання ротора.

Розрахунок КвК. Ключовими вхідними даними КвК є його загальна маса m і прискорення вертикального підйому a . Для розрахунку необхідної потужності привідних двигунів і їхніх габаритних розмірів проводиться попередній розрахунок КвК.

Наведемо методику розрахунку на прикладі КвК з заданою загальною масою $m = 4$ кг. Основним габаритним розміром КвК є діагональ рами, на якій встановлюються двигуни та інші елементи. Для її розрахунку використовується емпірична формула, яка отримана шляхом узагальнення досвіду створення КвК різних типів і пов'язує діагональ рами в метрах з масою КвК в кг

$$D = \sqrt{m / 10} = \sqrt{4 / 10} = 0,632(\text{м}). \quad (1)$$

Площа, що обмітається гвинтами пропелерів,

$$S = \pi D^2 / 4 = 0,314(\text{м}^2). \quad (2)$$

Діаметр гвинта знаходиться, виходячи із можливості конструктивної компоновки КвК. Приймаємо

$$d = 0,37D = 0,234(\text{м}). \quad (3)$$

Іншим важливим параметром, необхідним для розрахунку КвК, є прискорення його вертикального підйому. Якщо для прикладу прийняти $a = 2,5 \text{ м/с}^2$ (на висоту 100 м КвК підніметься за 8,9 с), то загальна вертикальна сила тяги двигунів КвК повинна дорівнювати

$$F = m(g + a) = 4(9,8 + 2,5) = 49,2(\text{н}). \quad (4)$$

Сумарний тиск, який гвинти створюють на повітря, дорівнює [6]

$$p = F / S = 4m(g + a) / \pi D^2 = 156,8(\text{Н/м}^2). \quad (5)$$

Швидкість потоку повітря під гвинтами $V = \sqrt{p/\rho}$, де $\rho = 1,23 \text{ кг/м}^3$ – густина повітря, тобто з урахуванням формули (1) маємо

$$V = \sqrt{40(g + a) / \pi \rho} = 11,28(\text{м/с}). \quad (6)$$

Сумарна потужність привідних двигунів дорівнює $P = FV / \eta$, тобто

$$P = m(g + a)\sqrt{40(g + a) / \pi \rho} / \eta = 794(\text{Вт}), \quad (7)$$

де η – значення ККД (орієнтовно прийнято $\eta = 0,7$ [1]). Потужність одного двигуна дорівнює

$$P_d = P / 4 \approx 200(\text{Вт}). \quad (8)$$

Знайдена в такий спосіб потужність двигуна є лише одним необхідним параметром для його проектування. Іншим важливим параметром є швидкість обертання ротора (гвинта), яку можна визначити за формулою, запропонованою в роботі [6]

$$n_R = 26,6\sqrt[3]{P_d / 0,736d^5} \approx 190(\text{об/с}). \quad (9)$$

Один повний оберт ротор здійснює за 5,2 мс. Приймаючи число полюсів двигуна $2p = 4$ і число фаз обмотки статора $m_d = 3$, за подальшими розрахунками отримано наступні дані варіантів двигунів.

Дані, які є однаковими для усіх варіантів СМД: зовнішній діаметр і довжина двигунів дорівнюють 45 мм і 35 мм; висота повітряного проміжку 0,2 мм; число зубців статора 12 (число пазів на полюс і фазу 1); об'єм постійних магнітів $5,4 \text{ см}^3$, маса ПМ 0,04 кг (магніти – NdFeB з залишковою індукцією 1,1 Тл); номінальна частота напруги живлення 380 Гц; струм обмотки статора 6 А і густина струму в провідниках обмотки 5 А/мм^2 . Ширина ПМ складає близько 0,7 довжини полюсної поділки двигуна, що під час обертання ротора забезпечує наявність під ПМ приблизно двох зубців статора. Це сприяє зменшенню (але не зниканню) пульсацій моменту. Кут навантаження в усіх варіантах прийнятий однаковим 23 ел. град. Величина напруги живлення є похідною величиною, яка визначається через отриману потужність двигуна і задану величину струму I

$$U = P_d / \sqrt{3} \cdot I \cdot \cos \varphi. \quad (10)$$

Величина $\cos \varphi$ залежить від параметрів ПМ, які визначають величину магнітного потоку збудження. ПМ підібрані таким чином, щоби в номінальному режимі СМД мав $\cos \varphi = 1$.

Дані, які є різними для зазначених варіантів СМД: діаметр розточки статора у варіанті 1 дорівнює 23 мм, а зовнішній діаметр статора у варіантах 2 і 3 дорівнює 34 мм; в пазах статора у варіантах 1 і 2 укладена трифазна одношарова концентрична обмотка класичної конструкції і фази з'єднані по схемі зірка; у варіанті 3 на кожен зубець статора намотана окрема котушка, причому усі котушки з'єднані по схемі, в результаті якої утворена трифазна чотириполюсна обмотка статора, фази якої з'єднані між собою по схемі зірка. Геометричні пропорції варіантів зазначених СМД представлені на рис. 1. Слід підкреслити, що за підрахунками маса одного двигуна у варіантах 1 і 2 складає приблизно 435 г, а у варіанті 3 – 295 г. Менша маса у варіанті 3 пояснюється значними розмірами повітряних проміжків між окремими зубцями статора і, як наслідок, меншою масою магнітопроводу статора.

Метою подальшого аналізу є визначення потужності, яку за заданій конструкції та інших однакових умов спроможні видати зазначені варіанти СМД. Розрахунок потужності двигунів проводився з використанням польових математичних моделей, оскільки тільки польові моделі можуть адекватно відобразити особливості геометрії активної зони, величину магнітних потоків розсіювання ПМ тощо.

Математична модель. Результатом математичного моделювання є часові залежності електромагнітного моменту і миттєвої потужності за інтервал часу T повного обороту ротора. Припускаючи, що обмотка статора СМД живиться синусоїдною напругою з урахуванням відсутності масивних електропровідних елементів, електромагнітне поле в сталому режимі роботи в межах поперечного перерізу СМД (рис. 1) в декартових координатах відносно комплексної амплітуди векторного магнітного потенціалу описується стаціонарним рівнянням [7]

$$\text{rot} \left(\frac{1}{\mu} (\text{rot} \underline{A}_z - B_r) \right) = -\underline{J}_{zcm}, \quad (11)$$

де μ – магнітна проникність, J_{zcm} – густина сторонніх струмів в пазах статора, B_r – залишкова магніт-

тна індукція ПМ. Рівняння (11) доповнюється однорідними граничними умовами першого роду $A_z|_G = 0$ на лінії G зовнішньої поверхні двигуна.

Для чисельного розв'язання рівняння (11) використовується метод багатопозиційних розрахунків. Для інтервалу часу T обирається крок по часу Δt і виконується серія розв'язків рівняння (11) з урахуванням зміни кутового положення ротора і величин струмів фаз статора, які відбуваються за час Δt . Тобто, при кожному з положень ротора розраховується сталий електромагнітний процес. Згідно зазначеного методу розрахунку для кожного поточного моменту часу $t_k = 0 \dots T$ в межах сформованої геометрії розрахункової області рівняння (11) розв'язується за відповідних цьому моменту часу величинах густини струмів фаз статора, які визначаються за формулами

$$\begin{aligned} \underline{J}_{A_{\text{ст}}} &= J_m \cos \alpha_k, \\ \underline{J}_{B_{\text{ст}}} &= J_m [\cos(\alpha_k + 2\pi/3) + j \sin(\alpha_k + 2\pi/3)], \\ \underline{J}_{C_{\text{ст}}} &= J_m [\cos(\alpha_k + 4\pi/3) + j \sin(\alpha_k + 4\pi/3)], \end{aligned} \quad (12)$$

де $J_m = I_{m1} u_{\text{П1}} / S_{\text{П1}}$ – амплітуда густини струму у фазах обмотки статора, $u_{\text{П1}}$ – число послідовно з'єднаних провідників у пазу статора; $S_{\text{П1}}$ – площа перерізу паза статора; $\alpha_k = \omega_R t_k$, ω_R – кутова швидкість обертання ротора, $t_k = t_{k-1} + \Delta t$, $k = 1, \dots, N$; N – кількість кроків по часу.

Переміщення ротора моделюється зміною координат x , y точок ротора. Зміна Δx , Δy координат ротора по кроку у часі Δt задаються наступними формулами:

$$\begin{cases} \Delta x = \cos[\omega_R \cdot (t_{k-1} + \Delta t)] \cdot x - \sin[\omega_R \cdot (t_{k-1} + \Delta t)] \cdot y - x; \\ \Delta y = \sin[\omega_R \cdot (t_{k-1} + \Delta t)] \cdot x + \cos[\omega_R \cdot (t_{k-1} + \Delta t)] \cdot y - y. \end{cases} \quad (13)$$

Формули (12), (13) забезпечують виконання вимоги щодо синхронності обертання магнітного поля статора і ротора. Після розрахунків окремих задач при різних положеннях ротора і значеннях струму статора та їх об'єднання отримують шукані залежності як функції часу.

Електропровідність в пазах статора приймається рівною нулю. Величина μ в кожній точці розрахункової області, де знаходяться феромагнітні матеріали, визначається в процесі чисельного розв'язання рівняння (11) ітераційним методом за заданими кривими намагнічування. В зонах розташування ПМ задається незмінна величина магнітної проникності, яка відповідає марці обраного ПМ і по величині близька до магнітної проникності повітря.

Електромагнітний момент СМД знаходиться з використанням тензора магнітного натягу [3]

$$M_{EM}(t) = l_{\text{П}} \int_0^{L_{\delta}} [y T_x(t) - x T_y(t)] dl, \quad (14)$$

де $T_x(t), T_y(t)$ – проекції тензора магнітного натягнення на осі декартової системи координат; $l_{\text{П}}$ – довжина двигуна; L_{δ} – довжина кола ротора, оберненого до повітряного проміжку. Миттєва потужність двигуна знаходиться за виразом

$$P(t) = 2\pi n_R M_{EM}(t). \quad (15)$$

Результати моделювання. На рис. 2 – 4 представлено розрахункові залежності миттєвої потужності варіантів СМД, а також позначено величини середньої потужності, а саме: рис. 2 – СМД з зовнішнім пазовим статором і внутрішнім ротором (варіант 1) 192 Вт; рис. 3 – СМД з внутрішнім пазовим статором і зовнішнім ротором (варіант 2) 275 Вт; рис. 4 – СМД з внутрішнім явнополюсним статором і зовнішнім ротором (варіант 3) 202 Вт. Найбільшу потужність розвиває варіант 2 – у 1,43 рази більшу, ніж варіант 1 і у 1,36 разів більше, ніж варіант 3. Суттєво більшу потужність варіанту 2 у порівнянні з варіантом 1 можна пояснити більшим радіусом ротора, що утворює більше плече сили і відповідно більший електромагнітний момент. Окрім того за однакового об'єму постійні магніти у варіанті 1 створюють більші магнітні потоки розсіювання, ніж менш високі витягнуті уздовж кола повітряного проміжку ПМ у варіанті 2. Варіант 3 хоча і має такий же радіус ротора, як і варіант 2, але намотані на зубці статора обмотки мають більші магнітні потоки розсіювання і, відповідно, менший потік взаєміндукції обмотки статора з ПМ. Задля забезпечення в обмотці статора заданого струму 6 А згідно з формулою (10) потрібна напруга живлення трьох розглянутих варіантів відповідно: 18,5 В, 26,5 В і 19,5 В.

В усіх зазначених варіантах СМД спостерігаються значні пульсації електромагнітного моменту і миттєвої потужності, що спричиняє небажаний шум і вібрації. Це пояснюється вимушеною внаслідок малих розмірів двигунів недосконалістю структури їхньої активної зони. Зокрема у варіантах 1

і 2 під час переміщення ПМ відносно статора відбуваються суттєві пульсації магнітного потоку і відповідно пульсації моменту внаслідок значного відкриття пазів статора (1,2 мм), яке значно перевищує висоту повітряного проміжку (0,2 мм).

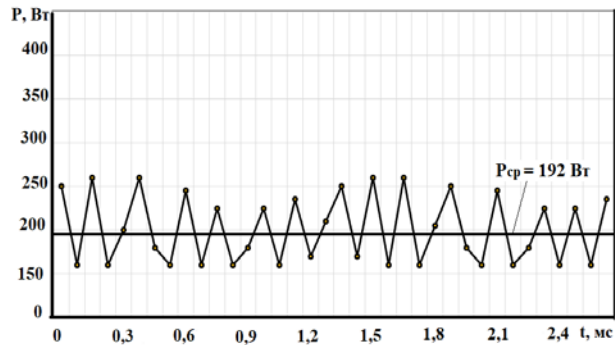


Рис. 2

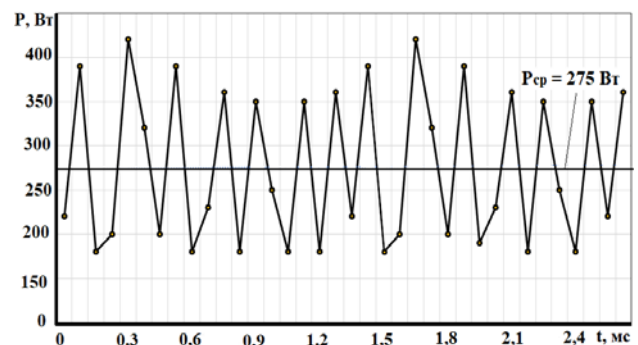


Рис. 3

По-друге, трифазна обмотка статора є зосередженою з діаметральним кроком і має лише 1 паз на полюс і фазу, що призводить до появи значних вищих гармонік в кривій МРС обмотки.

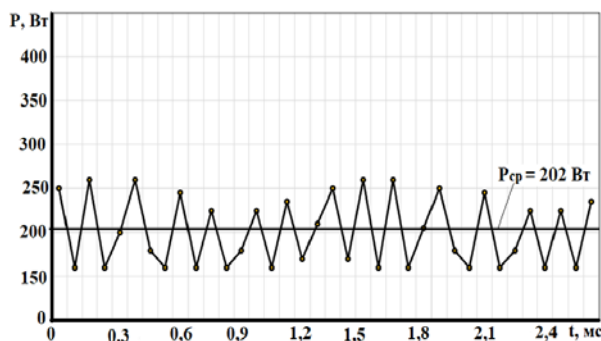


Рис. 4

При цьому амплітуда МРС поля статора під час обертання періодично змінюється в 1,16 разів, що викликає відповідні коливання електромагнітного моменту і потужності. Аналогічні особливості має і третій варіант СМД. Слід відмітити, що в роботі розглядалися СМД, в яких повздовжні осі ПМ паралельні повздовжній осі двигуна. Пульсації можна зменшити шляхом виконання “скосу пазів” ротора, тобто укладанням ПМ з певним кутовим нахилом до повздовжньої осі двигуна.

З використанням рівняння руху проведені оцінки коливань швидкості обертання ротора за розрахованих коливаннях електромагнітного моменту. Розрахунки показали, що навіть у варіанті 1 з найбільш легким ротором внаслідок його інерційних властивостей за великої середньої швидкості обертання (190 об/с) амплітуда коливань швидкості ротора не перевищує 0,14 об/с, що складає усього 0,073% від номінальної швидкості і практично не впливає на маневрові властивості КвК.

Важливим показником є відношення потужності двигуна до його загальної маси. У варіанті 1 цей показник дорівнює 427 Вт/кг, у варіанті 2 – 632 Вт/кг і у варіанті 3 – 721 Вт/кг. Тобто найкращий зазначений показник має варіант 3 внаслідок меншої маси магнітопроводу статора. Але з огляду на обмежений загальний простір КвК, необхідний для розміщення інших складових системи літального апарату, доцільно також розглядати інший питомий показник – відношення потужності двигуна до його об’єму. Тоді маємо: варіант 1 – 3,44 Вт/см³, варіант 2 – 4,93 Вт/см³, варіант 3 – 3,63 Вт/см³. Тобто найкращий зазначений показник має варіант 2. Хоча варіант 1 за більшістю показників поступається двом іншим варіантам, але за рахунок більш легкого ротора може забезпечити найбільш швидке регулювання швидкості ротора і тому найкращу маневреність руху КвК. Варіанти 2 і 3 є конкуруючими і мають окремі суперечливі показники: варіант 2 є більш потужним, ніж варіант 3, але є більш важким. З точки зору технологічності варіант 3 виглядає найбільш простим. Остаточний вибір варіанту СМД треба проводити з урахуванням призначення КвК і загальних вимог до його функціонування. Хоча приведені результати стосуються конкретного КвК, але подальші оцінки засвідчили, що отримані результати справедливі для привідних СМД широкого кола КвК з різними тактико-технічними даними. При цьому шляхом вибору струму статора і частоти напруги живлення можна суттєво змінювати характеристики двигунів і у цілому КвК.

Висновки. 1. Розглянуто три варіанти виконання конкурентоспроможних синхронних магнітоелектричних двигунів, призначених для приводу гвинта літального апарату, а саме: СМД з зовнішнім пазовим статором та внутрішнім ротором (варіант 1); СМД з внутрішнім пазовим статором та зовнішнім ротором (варіант 2); СМД з внутрішнім явноплюсним статором та зовнішнім ротором (варіант 3). Проведено порівняльний аналіз їх енергетичних показників за однакових умов порівняння:

однакових габаритах, швидкості обертання ротора, струму обмотки статора і об'єму використаних постійних магнітів. Аналіз показав певну суперечливість показників цих двигунів.

2. Результати аналізу показали, що за зазначених рівних умов варіант 2 має найбільшу потужність, що пояснюється кращою структурою активної зони двигуна. У порівнянні з конструкцією варіанта 3 за однакових розмірів варіант 2 розвиває в 1,36 разів більшу потужність і має в 1,36 разів кращі питомі об'ємні показники. Але за рахунок більшої маси осердя він у 1,47 разів важчий.

3. Отримані результати характеризують енергетичні показники варіантів СМД. Остаточний вибір СМД і його проектування для КвК з конкретними даними повинен виконуватися з урахуванням системи додаткових чинників – маси корисного вантажа КвК, вимог до величини загальної сили тяги КвК і динаміки його руху, конструкції та характеристик гвинтів, параметрів системи живлення (допустимих величин напруги і струму), технологічності виготовлення тощо.

1. Антонов А.Е. Электрические машины магнитоэлектрического типа. Основы теории и синтез. Київ: ИЭД НАНУ, 2011. 216 с.
2. Васюковський Ю.М., Павлюк В.В. Порівняльний аналіз енергетичних характеристик різних типів синхронних тягових електродвигунів. *Технічна електродинаміка*. № 4. 2023. С. 43–51. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2023.04.043>.
3. Grebenikov V.V., Pavlov V.B., Gamaliia R.V., Popkov V.S. Comparative analysis of electric machines characteristics with permanent magnets for electric vehicles and wind turbines. *Технічна електродинаміка*. № 4. 2022. С. 21–27. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2022.04.021>.
4. Как выбрать моторы для квадрокоптера или гоночного дрона? URL: <https://rcdetails.info/kak-vybrat-motory-dlya-kvadrokoptera-ili-gonochnogo-drona/> (дата звернення 15.01.2024)
5. Двигатели для квадрокоптера. URL: <https://radioland.com.ua/categories/rc-propulsion/motors/multicopter> (дата звернення 15.01.2024)
6. Воздушный винт: как его рассчитать? URL: <https://modelist-konstruktor.com/razrabotki/vozdushnyj-vint-kak-ego-rasschitat> (дата звернення 15.01.2024)
7. Васюковський Ю.М. Польовий аналіз електричних машин. Київ: НТУ України КПІ, 2007. 191 с.

COMPARATIVE ANALYSIS OF SMALL SIZE HIGH-SPEED SYNCHRONOUS MAGNETOELECTRIC MOTORS

Yu.M. Vaskovsky, D.S. Nesterenko

National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»,

Beresteyskiy Ave., 37, Kyiv, 03056, Ukraine, e-mail: vun157@gmail.com; denia112222@gmail.com.

Using the methods of mathematical modeling, a comparative analysis of the characteristics of three variants of small-sized high-speed synchronous magneto-electric motors (SMD) with permanent magnets on the rotor, which are intended for driving the propeller of quadcopter-type aircraft, was investigated and carried out. Namely: SMD with external grooved stator and internal rotor; SMD with internal grooved stator and external rotor; SMD with internal clear-pole stator and external rotor. On the example of an aircraft with a total mass of 4 kg, a comparative analysis of the amount of power developed by the specified engine variants under the same operating conditions: the same overall dimensions, rotor speed, current in the stator winding and volume of permanent magnets was carried out. An assessment of the magnitude of electromagnetic moment pulsations is given. It was established that although an SMD with an internal clear-pole stator is the most technologically simple, but under the same other conditions, it is inferior in power to an SMD with an internal slotted stator and an external rotor. References 7, Figures 4.

Keywords: synchronous magnetolectric motor, permanent magnets, motor power and electromagnetic torque.

1. Antonov A.E. Electrical machines of magnetolectric type. Fundamentals of theory and synthesis. Kyiv: IED NAS of Ukraine, 2011. 216 p. (Rus)
2. Vaskovsky Yu.M., Pavlyuk V.V. Comparative analysis of energy characteristics of different types of synchronous traction electric motors. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2023. No 4. Pp. 43-51. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2023.04.043>. (Ukr)
3. Grebenikov V.V., Pavlov V.B., Gamaliia R.V., Popkov V.S. Comparative analysis of electric machines characteristics with permanent magnets for electric vehicles and wind turbines. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2022. No 4. Pp. 21-27. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2022.04.021>.
4. How to choose motors for a quadcopter or racing drone? URL: <https://rcdetails.info/kak-vybrat-motory-dlya-kvadrokoptera-ili-gonochnogo-drona/> (accessed at 15.01.2024). (Rus)
5. Motors for quadcopter. URL: <https://radioland.com.ua/categories/rc-propulsion/motors/multicopter> (accessed at 15.01.2024). (Rus)
6. Propeller: how to calculate it? URL: <https://modelist-konstruktor.com/razrabotki/vozdushnyj-vint-kak-ego-rasschitat> (accessed at 15.01.2024). (Rus)
7. Vaskovsky Yu.M. Field analysis of electric machines. Kyiv: NTU of Ukraine KPI, 2007. 191 p. (Ukr)

Надійшла 06.02.2024

Остаточний варіант 04.04.2024