

Calculation Features of Brushless Direct Current Motor's Geometric Optimal Dimensions

Rostyslav Bilovus¹, Ihor Bilyakovsky²,
Lidiya Kasha³, Bohdan Kopchak⁴

¹ Department of Electrical machines and apparatus, Lviv Polytechnic National University, UKRAINE, Lviv, S. Bandery street 12, E-mail: rosbilovus@gmail.com

² Department of Electrical machines and apparatus, Lviv Polytechnic National University, UKRAINE, Lviv, S. Bandery street 12, E-mail: bilyakovsky@mail.ru

³ Department of Electrical machines and apparatus, Lviv Polytechnic National University, UKRAINE, Lviv, S. Bandery street 12, E-mail: kasha_lidiya@mail.ru

⁴ Department of Electrical machines and apparatus, Lviv Polytechnic National University, UKRAINE, Lviv, S. Bandery street 12, E-mail: kopchak@mail.ru

Electrical drives on a base of brush-less direct current motors with permanent magnets were designed by different known electro technical companies. Such motors applied in modern controlled electrical drives by small and medium power, because its construction has some advantages and its technical-usage characteristics are good. Most well-known designing methods of brush-less DC motors with permanent magnets are based on a electromagnetic-load selections.

Efficiency, motors and active materials mass, active power of brush-less DC motors with permanent magnets can be taken as a optimal criteria and make the optimization task as uncertain. Therefore, in many cases are sufficient partial optimization, including optimization of tuth-slots stator layer, magnetic inductor size, etc.. Favor heating machine often was limits of geometrical size in optimization solutions.

The proposed optimization method is based on determining the optimum motor size for the most common form of extruded sheets of the motor's stator of electromechanical converter (fig. 1). The problem of determining this such size of stator with various restrictions, including, if necessary to obtain a relative resistance windings and given structural coefficients, allows to solve by the equation (2).

The geometry of the inductor, it is primarily caused by physical properties of permanent magnets. For most modern magnet materials, which used as permanent magnets, make the assumptions, that the working point on the demagnetization line, which is straight, also – return line – straight and coincides with the demagnetization line (fig. 3).

The obtained dependence are the basis of design methodology, in particular are the basis of calculation of basic geometric calculation for brush-less direct current motors with permanent magnets.

Особливості розрахунку оптимальних геометричних розмірів вентильних двигунів постійного струму

Ростислав Біловус¹, Ігор Біляковський²,
Лідія Каша³, Богдан Копчак⁴

¹ Кафедра електричних машин та апаратів, Національний університет “Львівська політехніка”, УКРАЇНА, м. Львів, вул. С. Бандери, 12, E-mail: rosbilovus@gmail.com

² Кафедра електричних машин та апаратів, Національний університет “Львівська політехніка”, УКРАЇНА, м. Львів, вул. С. Бандери, 12, E-mail: bilyakovsky@mail.ru

³ Кафедра електричних машин та апаратів, Національний університет “Львівська політехніка”, УКРАЇНА, м. Львів, вул. С. Бандери, 12, E-mail: kasha_lidiya@mail.ru

⁴ Кафедра електричних машин та апаратів, Національний університет “Львівська політехніка”, УКРАЇНА, м. Львів, вул. С. Бандери, 12, E-mail: kopchak@mail.ru

Наведено особливості розрахунку безконтактних двигунів постійного струму з постійними магнітами, які покладені в основу математичної моделі проектного розрахунку основних геометричних розмірів таких двигунів.

Ключові слова – вентильний двигун, проектний розрахунок, постійні магніти.

I. Вступ

Як свідчить аналіз тенденцій розвитку виробництва електротехнічної продукції, на сьогодні мають місце значні успіхи в галузі створення нової генерації регульованих електроприводів із використанням вентильних електродвигунів (ВД). Електроприводи на базі таких двигунів випускають практично усі провідні електротехнічні компанії, оскільки ВД зі збудженням від високоенергетичних постійних магнітів (ПМ), на думку більшості фахівців, є найбільш перспективними з посеред інших типів електродвигунів, які застосовуються у сучасних регульованих електроприводах малої й середньої потужності, завдяки значним конструктивним і техніко-експлуатаційним перевагам.

II. Аналіз попередніх досліджень

Як відомо, вентильний електродвигун – це електро-механічна система, яка складається з електромашинної частини – електромеханічного перетворювача (ЕМП), електронного комутатора (ЕК), а також давача положення ротора і системи керування [1]. Достатньо прості конструктивне виконання і технологія виробництва ВД, надійні схеми ЕК, можливість мікропроцесорного керування викликають зацікавлення розробників сучасних електроприводів малої та середньої потужностей і дозволяють сподіватися подальшого розширення сфери їхнього використання. Тому актуальною є задача синтезу та оптимізації таких двигунів.

III. Мета роботи

Оптимізація основних геометричних розмірів двигуна з постійними магнітами на етапі його проектування та отримання відповідних співвідношень для основних показників двигуна є метою даної роботи.

IV. Матеріали і результати дослідження

Більшість методик проектування відомих типів електричних машин ґрунтується на виборі величин електромагнітних навантажень, таких як індукція в повітряному проміжку і окремих частинах магнітопроводу, лінійне навантаження, густина струму в провідниках обмоток, виходячи з досвіду проектування. Оскільки такий досвід для вентильних двигунів обмежений, рекомендації щодо методики синтезу та оптимізації таких двигунів ґрунтуються на теорії електромеханічного перетворення енергії у ВД з ПМ, з урахуванням особливості їх конструкцій.

Критерії оптимальності ВД, якими можуть бути прийняті коефіцієнт видатності, маса двигуна й активних матеріалів, корисна потужність на одиницю маси чи об'єму тощо, роблять задачу оптимізації невизначеною і змушують до компромісу. Тому в багатьох випадках достатніми є часткові оптимізації, зокрема, оптимізація зубцево-пазового шару статора, розмірів магнітопроводу індуктора тощо. При цьому в оптимізаційній задачі розрахунку геометричних розмірів обмеженням найчастіше виступає нагрів машини.

Запропонований метод оптимізації базується на визначенні оптимальних розмірів машини для найбільш розповсюджених форм штампованих листів статора ЕМП ВД.

Як показано в [1], для ЕМП ВД найбільш раціональними з точки зору технології є конструктивні схеми з псевдо-U-подібним статором Рис. 1 та "класичним" Рис. 2, які в кожному конкретному випадку можуть мати свої переваги. Конструкції з псевдо-U-подібним статором забезпечують кращі динамічні показники за менших індуктивності розсіяння та реакції якоря внаслідок практично повної магнітної ізоляції фаз, але кількість зубців ротора повинна бути достатньо великою, що може бути небажаним при використанні їх у ВД з високими швидкостями обертання.

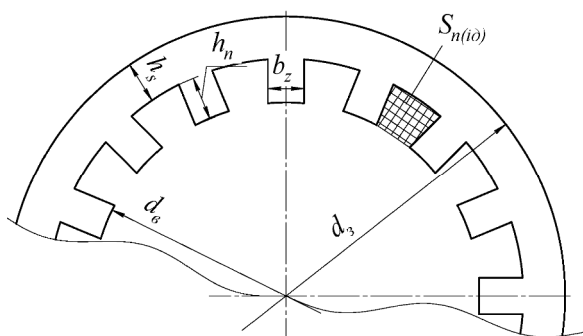


Рис. 2. Лист "класичного" статора

Відмінності конструкцій магнітопроводів, а, отже, й шляхів замикання робочих магнітних потоків зумовили необхідність створення дещо різних методик проектування. Наприклад, для конструкції з псевдо-U-подібним статором співвідношення між кількістю зубців статора і полюсів (постійних магнітів) ротора є таким [1], що при кількості секцій $m=3$ кількість полюсів буде не менше 10, що накладає додаткові обмеження і змушує вибирати дещо більший діаметр ротора під час розрахунку ВД із відносно малим моментом на валу, щоб розмістити магніти.

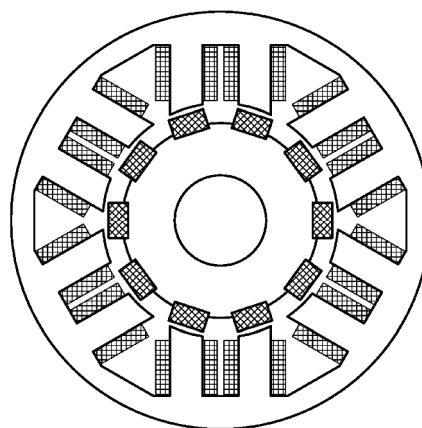


Рис. 1. Конструктивна схема електромеханічного перетворювача з постійними магнітами

Стосовно "класичного" статора, то форма пазів для ВД потужністю понад 20 Вт найчастіше майже трапецеподібна з зубцями однакової ширини за висотою Рис. 2.

Для оптимізації розмірів пазів статора ЕМП ВД прийнято, що лист статора із зовнішнім діаметром d_3 і внутрішнім d_6 має Z_s зубців із паралельними стінками і постійною шириною b_z по висоті $h_z = h_n$, а площа паза, який має вигляд рівнобічної трапеції, рівна $S_{n(i,d)}$.

Для зв'язку між реальною площею S_n і ідеалізованою $S_{n(i,d)}$ використаємо коефіцієнт не ідеальності пазів

$$k_n = S_n / S_{n(i,d)}.$$

Введемо конструкційні коефіцієнти відношення діаметра розточки до зовнішнього діаметра статора $k_i = d_6 / d_3$, та відносної площі пазів статора $k_{mne} = Z_s S_n / [(\pi d_6^2 / 4)(1 / k_{i2} - 1)]$.

Величини, які визначають геометрію штампованого листа статора, можуть бути пов'язані між собою рівнянням, отриманим шляхом запису сумарної площі пазів для статора з зубцями постійної ширини у вигляді

$$Z_s S_n = k_n \left\{ (\pi / 4) [(d_3 - 2h_s)^2 - d_6^2] - (Z_s / 2) b_z \times (d_3 - d_6 - 2h_s) \right\},$$

де h_s – висота спинки статора.

Магнітний потік в зубці запишемо у вигляді

$$\Phi = (2 / \pi) B_8 (\pi b_6 / Z_s) I_s = 2 h_s l_s k_c B_s, \quad (1)$$

де l_s – довжина статора; B_δ , B_s – індукції в повітряному проміжку та спинці статора; k_c – коефіцієнт заповнення сталлю статора.

З формули (1) висота спинки статора $h_s = d_g / (Z_s k_c \chi_s)$, а ширина зубця $b_z = (\pi d_g) / (Z_s k_c \chi_z)$, де $\chi_s = B_s / B_\delta$ – відносне значення індукції в спинці статора; $\chi_z = B_z / B_\delta$ – відносне значення індукції в зубці; B_z – значення індукції в зубці.

Зробивши деякі перетворення та спростивши вираз отримаємо рівняння (2), яке дозволяє розв'язувати задачі визначення розмірів штампованого листа статора

$$k_{mns} = \frac{k_n}{1 - k_i^2} \left\{ \left[\left(1 - \frac{k_i}{2Z_s k_c \chi_s} \right)^2 - k_i^2 \right] - \left[\frac{2k_i}{k_c \chi_z} \left(1 - k_i - \frac{k_i}{2Z_s k_c \chi_s} \right) \right] \right\}, \quad (2)$$

при різних обмеженнях, зокрема, при необхідності отримати певний відносний активний опір обмотки і за заданими конструкційними коефіцієнтами визначити відносні індукції χ_z та χ_s в зубцях і в спинці статора та перевіряти виконання умови $B_z < B_{zdon}$.

Також можливе розв'язання задачі знаходження відносної площі пазів при заданому k_i та відомих значеннях відносних індукцій, чи знаходження k_n і перевірка за χ_z величини індукції в зубцях за наперед вибраними з технологічних чи інших міркувань k_i , висотою спинки статора та шириною зубця. Якщо співвідношення між χ_z і χ_s невідомі, приймають $\chi_z \approx \chi_s$.

Аналогічно може бути розв'язана задача оптимізації розмірів зубцево-пазового шару псевдо-U-подібного статора.

Стосовно геометрії індуктора, то вона, в першу чергу, обумовлена фізичними властивостями постійних магнітів. Для більшості сучасних магнітотвердих матеріалів, які використовуються для виготовлення постійних магнітів, приймають допущення, що робоча точка знаходиться на лінії розмагнічування, яку вважають прямою, тобто лінія повернення – пряма і співпадає з лінією розмагнічування.

Потік Φ_δ повітряного проміжку визначають з кривої розмагнічування постійного магніту. Крива розмагнічування постійного магніту 5 (1 – для високо коерцитивного магніту), побудована в координатах F , Φ , зображена на рис. 3. Як бачимо з рисунку, вона визначається геометричними розмірами і матеріалом, з якого виготовлено сам магніт і задається двома величинами: $F_m = h_m H_{cf}$ і $\Phi_{max} = S_m B_r$. Тут h_m і S_m – висота і площа основи постійного магніту полюса ротора, а H_{cf} і B_r – коерцитивна сила по індукції та залишкова магнітна напруженість постійного магніту відповідно. Ці дві величини залежать від матеріалу, з якого виготовлений постійний магніт, і вказані в його паспортних даних.

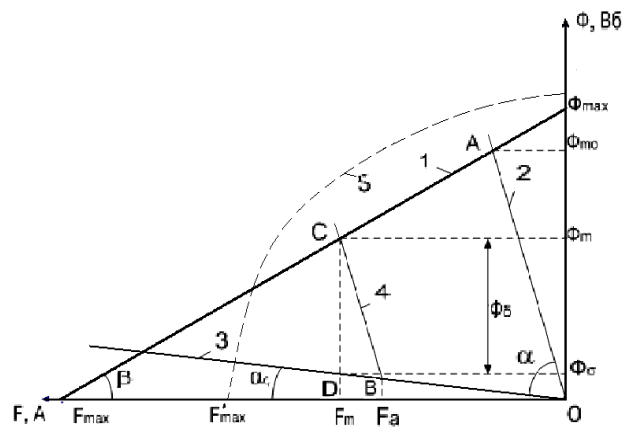


Рис. 3. Крива розмагнічування магніту

Пряма зовнішньої провідності магнітного кола 2 задається кутом нахилу α до осі F , який визначається з співвідношення $\alpha = \arctg(\lambda + \lambda_\sigma)(h_m / S_m)$, де λ_δ і λ_σ – магнітна провідність повітряного проміжку і магнітна провідність розсіяння постійного магніту. Прямі 1 і 2 перетинаються в точці А, абсциса якої Φ_{mo} є магнітним потоком постійного магніту, який проходить через повітряний проміжок при відсутній реакції якоря.

Для того, щоб визначити корисний магнітний потік повітряного проміжку з врахуванням дії реакції якоря F_a і потоку розсіяння Φ_σ , побудуємо пряму провідності розсіяння 4 постійного магніту. Дана пряма залежить від магнітної провідності розсіяння постійного магніту λ_σ , і пов'язана з кутом нахилу α_σ до осі F співвідношенням $\alpha_\sigma = \arctg(\lambda_\sigma)(h_m / S_m)$. З точки В прямої провідності розсіяння постійного магніту проведемо пряму 3, паралельну ОА. Вона перетне пряму розмагнічування в точці С. Її ордината Φ_m – це і є потік повітряного проміжку, спричинений постійним магнітом з врахуванням дії реакції якоря (в даному випадку характер дії реакції якоря – розмагнічуючий). Корисний потік повітряного проміжку Φ_δ визначаємо, як різницю повного потоку Φ_M , який проходить через повітряний проміжок і потоку розсіяння Φ_σ постійного магніту $\Phi_\delta = \Phi_m - \Phi_\sigma$.

На підставі вищевикладеного, не складно отримати аналітичний вираз для корисного потоку Φ_δ в повітряному проміжку [1]

$$\Phi_d = \frac{\Phi_{max} I_d \pm w_z I_c I_d (I_m + I_s)}{I_m + I_d + I_s}. \quad (3)$$

Інколи, для уточнення значень провідностей розсіяння ПМ, враховують реальний розподіл магніторушійної сили (МРС) по висоті ПМ. Розподіл МРС ПМ і його потоків розсіяння можна знайти для конкретної конструкції з розв'язку диференціальних рівнянь магнітного поля числовими методами з допомогою комп'ютера. Часто в інженерній практиці умовно вважають, що МРС магніту змінюється лінійно.

Для призматичного магніту, МРС якого змінюється по висоті від нейтрального перерізу S_M за лінійним законом, провідність розсіяння з бокової поверхні визначається

$$\Lambda_{\sigma 2} = \frac{\Phi_{\sigma 2}}{F_M} = \mu_0 \frac{l_M}{h_M} \int_0^{h_M} \frac{y dy}{l_{y2}}, \quad (4)$$

де l_M , h_M , l_{y2} , y – довжина і висота магніту, усереднена довжина умовної силової лінії розсіяння магніту і змінна координата за висотою магніту відповідно.

Так само визначається приведена провідність розсіяння з торцевої поверхні магніту $\Lambda_{\sigma 1}$.

Провідність розсіяння між двома робочими поверхнями полюсів визначається як провідність між двома еквіпотенціальними поверхнями, оберненими в протилежні боки.

Сумарна приведена провідність розсіяння магніту у вільному стані

$$\Lambda_{\sigma M} = \Lambda_{\sigma 0} = 2\Lambda_{\sigma 1} + 2\Lambda_{\sigma 2} + \Lambda_{\sigma 3}. \quad (5)$$

Міркування, які наведені вище, дозволяють з достатньою для інженерних розрахунків точністю визначити необхідний потік постійного магніту.

Згідно з [1] струм секції можна виразити в залежності від номінального моменту, а забезпечити необхідний момент двигуна можна за різних комбінацій значень максимального потоку Φ_{\max} магніту, повного струму секції $w_z I_c$ та коефіцієнта c_M , який залежить від геометрії зубцево-полюсної зони ВД і параметрів обраного постійного магніту.

Під час проектування, як правило, необхідно, в залежності від завдання, прийняти попередні значення згаданих вище величин. Як показують теоретичні та експериментальні дослідження [1], співвідношення між геометричними розмірами елементів зубцево-

полюсної зони ВД з сучасними магнітами знаходяться в досить вузьких межах і їх можна визначити за методикою [1].

Фактично, визначення діаметру індуктора можна розпочати з вибору індукції B_δ , (а, отже, типу магніту та площі полюса S_m) в повітряному проміжку для випадку, коли вісь полюса співпадає з серединою зубця. Попередньо оцінку початкового значення індукції B_δ здійснюють з використанням діаграми вибраного типу магніту [1], керуючись обраними критеріями оптимальності.

Як вказано в [1], після визначення необхідного максимального потоку $\Phi_{\max} = S_m B_r$, ширини a_m та довжини b_m вибраного постійного магніту, діаметр індуктора знаходять за формулою $D = 2pb_m / \pi\alpha_m$.

Після попереднього вибору діаметру ротора, за методикою [1] уточнюють отриманий момент та у випадку істотного розходження із заданим, повторюють розрахунки за уточненими даними.

Висновок

Отримані залежності покладені в основу методики проектного розрахунку основних геометричних розмірів ВД з ПМ. Результати розрахунків з використанням запропонованої методики свідчать про достатній рівень адекватності.

Література

- [1] Ткачук В.І., Біляковський І.Є., Біловус Р.О. Методика проектування вентильних двигунів з високоенергетичними постійними магнітами. – Вісник КДУ ім. Михайла Остроградського. Випуск 3/2010 (62) Ч. 2. -С. 79 -82.