

УДК 621.313.175

ЕЛЕКТРОМАГНІТНИЙ МОМЕНТ ВЕНТИЛЬНОГО ДВИГУНА ПОСТІЙНОГО СТРУМУ З ЯВНОПОЛЮСНИМ СТАТОРОМ І ПОСТІЙНИМИ МАГНІТАМИ НА РОТОРІ

В. Ткачук, Р. Василів

*Національний університет "Львівська політехніка"
вул. Бандери, 12, Львів 79013, Україна*

Розглянуто вентильний двигун постійного струму з явнополюсним статором і постійними на роторі. Сформовано головні припущення для обчислення електромагнітного моменту секції двигуна. На підставі початкових припущень отримано вираз для обчислення електромагнітного моменту секції вентильного двигуна постійного струму з явнополюсним статором і постійними магнітами на роторі.

Ключові слова: вентильний двигун, явнополюсний статор, електромагнітний момент, постійний магніт, крива намагнічення.

Вентильні двигуни з постійними магнітами на роторі – порівняно новий тип електричних машин, які протягом останнього десятиліття почали широко використовувати виробники промислового устаткування та побутової техніки. Такий вибір є цілком логічним з огляду на всі переваги двигунів цієї конструкції, а саме: нема рухомих контактів, а отже, не потрібне постійне обслуговування, як наслідок – дешевизна в обслуговуванні;

висока надійність і тривалий термін служби;

висока (п'ятиразова і більше) перевагтажувальна здатність за моментом;

висока швидкодія;

високий коефіцієнт видатності;

широкий діапазон регулювання за швидкістю (1:10 000);

простіша порівняно з частотно-керованим асинхронним електроприводом схема керування;

високі масогабаритні показники порівняно з двигунами інших типів.

На підставі наведених переваг вентильних двигунів постійного струму можна прогнозувати подальше розширення сфери їхнього використання. Відтак актуальною є задача розрахунку таких двигунів. Ключове питання в разі створення математичної моделі вентильного двигуна постійного струму – обчислення електромагнітного моменту, що його створює одна секція.

Об'єктом дослідження є трифазний вентильний двигун постійного струму з явнополюсним статором і постійними магнітами на роторі. Принципова електрична схема такого двигуна зображена на рис. 1, а конструктивна схема електромагнітної системи – на рис. 2.

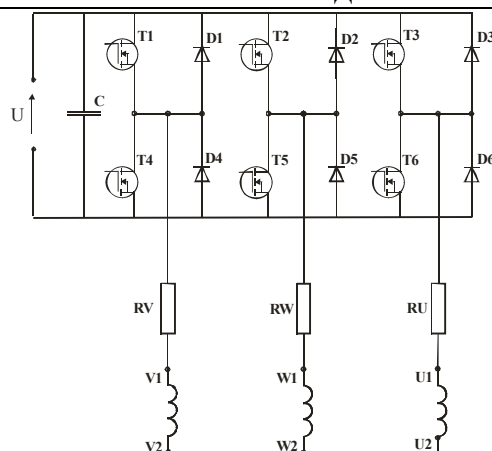


Рис. 1. Принципова електрична схема вентильного двигуна.

Предметом дослідження є процеси, що відбуваються в магнітному колі секції, а також електромагнітний момент, створюваний однією секцією двигуна.

Початкові припущення такі:

- з урахуванням специфіки будови електромеханічного перетворювача вважаємо, що магнітних зв'язків між секціями нема;
- крива розмагнічення постійного магніту є прямолінійною, робоча точка постійного магніту лежить на прямій повернення для всіх режимів роботи двигуна;
- потокозчеплення обмотки секції є функцією кута повороту ротора і змінюється за гармонійним законом;
- потокозчепленням, що спричинене потоками розсіяння, нехтуємо;
- струм обмоток секції приймаємо сталим;
- магнітним опором магнітопровода секції нехтуємо.

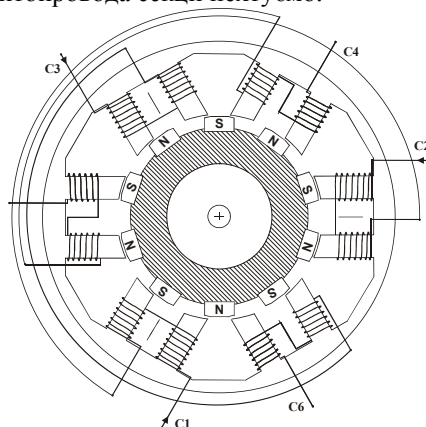


Рис. 2. Конструктивна схема електромеханічного перетворювача з явнopolюсним статором і постійними магнітами на роторі.

Електромагнітний момент, створюваний однією секцією, визначають як похідну магнітної коенергії цієї секції за кутом повороту ротора в разі постійного струму секції [3]:

$$\dot{I} \cdot \bar{N} = \left. \frac{\partial W_{k_c}}{\partial \theta} \right|_{I_c = \text{const}}, \quad (1)$$

де W_{k_c} – магнітна коенергія секції; I_c – струм секції; θ – геометричний кут між осями зубця статора і постійним магнітом ротора.

Магнітну коенергію секції згідно з [1] можна визначити так:

$$W_k = \int_0^{I_c} \Psi_c(i, \theta) di, \quad (2)$$

де θ_e – електричний кут розміщення ротора.

Повне потокозчеплення секції змінюється згідно з прийнятими припущеннями за гармонійним законом і залежить від потокозчеплення, зумовленого головним магнітним потоком секції:

$$\Psi_c(\theta_e) = (\Psi_\delta) \cdot \cos(\theta_e). \quad (3)$$

Оскільки секція є симетричною, то з урахуванням прийнятих припущень можемо розрахувати амплітудне значення її магнітного потоку для одного зубця й одного полюса постійного магніту ротора в стані, коли вісь зубця секції і вісь постійного магніту збігаються.

Тоді амплітуду потокозчеплення секції, зумовленого головним магнітним потоком, обчислюють як його добуток на кількість витків w_c обмотки секції:

$$\Psi_p = w_c \Phi_\delta. \quad (4)$$

Визначимо потік Φ_δ повітряного проміжку з кривої розмагнічення постійного магніту. Крива розмагнічення постійного магніту 1, побудована в координатах F , Φ , зображена на рис. 3. Вона задана двома величинами: $F_m = h_m H_{cf}$ і $\Phi_{\max} = S_m B_r$,

де H_{cf} і B_r – коерцетивна сила за індукцією та залишкова магнітна напруженість постійного магніту, відповідно. Ці дві величини залежать від матеріалу, з якого виготовлений постійний магніт, і зазначені в його паспортних даних; h_m і S_m – висота і площа основи постійного магніту полюса ротора.

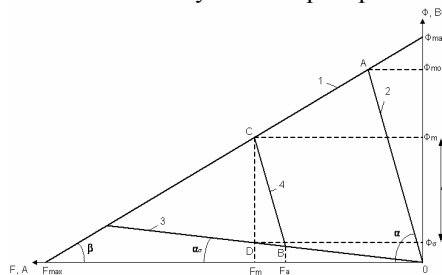


Рис. 3. Крива розмагнічення постійного магніту.

Пряма залежності зовнішньої провідності магнітного кола 2 задана кутом нахилу α до осі F , який визначають зі співвідношення $\alpha = \arctg(\lambda + \lambda_\sigma) \frac{h_m}{S_m}$, де λ_δ і λ_σ – магнітна провідність повітряного проміжку і магнітна провідність розсіяння постійного магніту. Прямі 1 і 2 перетинаються в точці A , абсциса якої Φ_{m0} є магнітним потоком постійного магніту, який проходить через повітряний проміжок, якщо нема реакції якоря.

Для того, щоб визначити корисний магнітний потік повітряного проміжку з урахуванням дії реакції якоря F_a і потоку розсіяння Φ_σ , побудуємо пряму провідності розсіяння 4 постійного магніту. Ця пряма залежить від магнітної провідності розсіяння постійного магніту λ_σ і пов'язана з кутом нахилу α_σ до осі F співвідношенням $\alpha_\sigma = \arctg(\lambda_\sigma) \frac{h_m}{S_m}$. З точки B проведемо пряму 3, паралельну до OA . Вона перетне пряму розмагнічування в точці C . Її ордината Φ_m – це і є потік повітряного проміжку, спричинений постійним магнітом з урахуванням дії реакції якоря (у цьому випадку характер дії реакції якоря – розмагнічувальний). Корисний потік повітряного проміжку Φ_δ визначаємо як різницю повного потоку Φ_M , який проходить через повітряний проміжок, і потоку розсіяння постійного магніту Φ_σ :

$$\Phi_\delta = \Phi_m - \Phi_\sigma. \quad (5)$$

Щоб отримати аналітичний вираз для корисного потоку Φ_δ у повітряному проміжку, запишемо рівняння прямих 1–4 (рис. 3):

$$1: \Phi = -\frac{\Phi_{\max}}{F_{\max}} F + \Phi_m; \quad (6)$$

$$2: \Phi = F(\lambda_\delta + \lambda_\sigma); \quad (7)$$

$$3: \Phi = F\lambda_\sigma; \quad (8)$$

$$4: \Phi = (F - F_a)(\lambda_\delta + \lambda_\sigma) + F_a\lambda_\sigma. \quad (9)$$

Магнітний потік Φ_{m0} магніту без реакції якоря визначаємо як розв'язок системи рівнянь

$$\begin{cases} \Phi = -\frac{\Phi_{\max}}{F_{\max}} F + \Phi_m; \\ \Phi = F(\lambda_\delta + \lambda_\sigma) \end{cases} \quad (10)$$

відносно Φ .

Розв'яжемо її й отримаємо

$$\Phi_{m0} = \frac{\Phi_{\max}(\lambda_\delta + \lambda_\sigma)}{\frac{\Phi_{\max}}{F_{\max}} + \lambda_\delta + \lambda_\sigma}. \quad (11)$$

Повний магнітний потік магніту Φ_m з урахуванням дії реакції якоря обчислимо як розв'язок системи рівнянь

$$\begin{cases} \Phi = -\frac{\Phi_{\max}}{F_{\max}} F + \Phi_m ; \\ \Phi = (F - F_a)(\lambda_{\delta} + \lambda_{\sigma}) + F_a \lambda_{\sigma} . \end{cases} \quad (12)$$

Розв'яжемо її й отримаємо

$$\Phi_m = \frac{\Phi_{\max}(\lambda_{\delta} + \lambda_{\sigma}) - \frac{\Phi_{\max}}{F_{\max}} F_a \lambda_{\delta}}{\frac{\Phi_{\max}}{F_{\max}} + \lambda_{\delta} + \lambda_{\sigma}} ; \quad (13)$$

$$F_m = \frac{F_a \lambda_{\delta} + \Phi_m}{\frac{\Phi_{\max}}{F_{\max}} + \lambda_{\delta} + \lambda_{\sigma}} . \quad (14)$$

Потік розсіяння Φ_{σ} визначимо за формулою

$$\Phi_{\sigma} = F_m \lambda_{\sigma} = \lambda_{\sigma} \frac{F_a \lambda_{\delta} + \Phi_m}{\frac{\Phi_{\max}}{F_{\max}} + \lambda_{\delta} + \lambda_{\sigma}} . \quad (15)$$

Корисний магнітний потік у повітряному проміжку для цього положення постійного магніту ротора відносно зубця статора визначатимемо як різницю повного магнітного потоку повітряного проміжку і потоку розсіяння постійного магніту:

$$\Phi_{\delta} = \Phi_m - \Phi_{\sigma} = \frac{\Phi_{\max} \lambda_{\delta} - F_a \lambda_{\delta} (\frac{\Phi_{\max}}{F_{\max}} + \lambda_{\sigma})}{\frac{\Phi_{\max}}{F_{\max}} + \lambda_{\delta} + \lambda_{\sigma}} . \quad (16)$$

Підставимо в (16) вираз для магніторушійної сили реакції якоря $F_a = w_z I_c$, де w_z – кількість витків зубця секції, а також візьмемо до уваги, що відношення $\frac{\Phi_{\max}}{F_{\max}}$ – це магнітна провідність λ_m самого постійного магніту, отримаємо остаточно вираз для обчислення потоку повітряного проміжку

$$\Phi_{\delta} = \frac{\Phi_{\max} \lambda_{\delta} \pm w_z I_c \lambda_{\delta} (\lambda_m + \lambda_{\sigma})}{\lambda_m + \lambda_{\delta} + \lambda_{\sigma}} . \quad (17)$$

Знак другого доданка чисельника виразу (17) залежатиме від характеру дії реакції якоря. У разі підмагнічувальної дії реакції якоря він буде у виразі зі знаком “+”, а в разі розмагнічувальної – зі знаком “-”.

Магнітну провідність повітряного проміжку між зубцем статора і постійним магнітом ротора визначають з виразу

$$\lambda_{\delta} = \mu_0 \frac{ab}{\delta} + \mu_0 a g_{pa} + \mu_0 b g_{pb} + \mu_0 (a g_a + b g_b) , \quad (18)$$

де a , b – ширина і довжина повітряного проміжку; δ – його висота; $g_{\delta a}$, $g_{\delta b}$ – питомі магнітні провідності між ребрами зубця статора і постійним магнітом

ротора; g_a , g_b – питомі бокові провідності між гранями зубця статора і постійним магнітом ротора.

Внутрішня провідність постійного магніту

$$\lambda_m = \frac{B_r S_m}{H_{cf} h_m}. \quad (19)$$

З урахуванням (1)–(19) загальний вираз для моменту секції вентильного двигуна постійного струму з явнополюсним статором і постійними магнітами на роторі матиме вигляд

$$M_c = 4 \cdot p \left(\frac{w_z \Phi_{\max} \lambda_\delta}{\lambda_m + \lambda_\delta + \lambda_\sigma} I_c \pm \frac{w_z^2 \lambda_\delta (\lambda_m + \lambda_\sigma)}{\lambda_m + \lambda_\delta + \lambda_\sigma} I_c^2 \right) \sin(\theta_e). \quad (20)$$

Для підтвердження отриманої формули виконаємо розрахунок, вихідні дані для якого є такими: матеріал постійних магнітів – NdFeB, для якого $H_{cf} = 900$ кА/м і $B_r = 1,2$ Т, розміри постійного полюса ротора $0,04 \times 0,013 \times 0,007$ м (довжина \times ширина \times висота), кількість витків зубця статора $w_z = 90$, ширина повітряного проміжку між ротором і статором $\delta = 0,001$ м.

За результатами розрахунку, в разі живлення секції струмом 10 А магнітний потік через один зубець секції $\Phi_\delta = 0,71974 \cdot 10^{-3}$ Вб, потокозчеплення обмотки одного зубця секції $\psi_z = 0,12007$ Вб. Криву моменту створюваного однією секцією двигуна, показано на рис. 4.

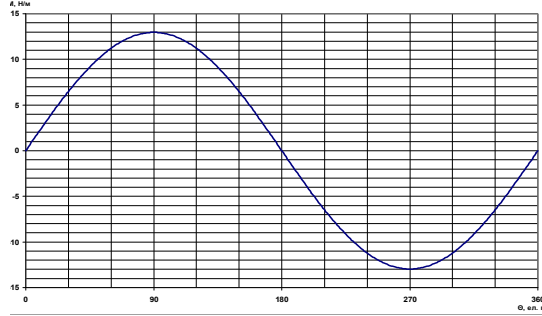


Рис. 4. Залежність моменту секції вентильного двигуна від кута повороту ротора ($I_c = 10$ А).

Отже, отримано вираз для обчислення електромагнітного моменту вентильного двигуна постійного струму з явнополюсним статором і постійними магнітами на роторі. Результати розрахунків відповідають експериментальним даним, що свідчить про адекватність одержаної математичної моделі. Отримані результати можуть бути використані для побудови математичної моделі вентильного двигуна постійного струму з явнополюсним статором і постійними магнітами на роторі.

1. Кенио Т. Шаговые двигатели и их микропроцессорные системы управления / Пер. с англ. М.: Энергоатомиздат, 1987. 200 с.: ил.

2. *Макарчук О.В., Ткачук В.І., Василів Р.К.* Магніто-механічна характеристика явноплюсного вентильного двигуна з постійними магнітами // Вісн. Кременчуцьк. політехн. ун-ту. 2006. № 3/2006 (38) Ч. 2. С. 29–33.
3. *Ткачук В.І.* Електромеханотроніка: Навч. посібн. – Львів: Вид-во НУ “Львів. політехніка”, 2001. – 404 с.
4. *Хитерер М.Я., Овчинников І.Е.* Синхронные электрические машины возвратно-поступательного движения. – СПб.: КОРОНА принт, 2004. – 368 с.

ELECTROMAGNETIC TORQUE OF BRUSHLESS PERMANENT MAGNET DC MOTOR

V. Tkachuk, R. Vasyliv

*Lviv Polytechnic National University
Bandera Str., 12, Lviv 79013, Ukraine*

In this paper, a brushless trapezoidal permanent magnet DC motor is observed. Calculation of electromagnetic torque brushless trapezoidal permanent magnet DC motor is presented in this paper.

Key words: brushless permanent magnet DC motor, electromagnetic torque, permanent magnet, magnetization curve.

Стаття надійшла до редколегії 10.12.2006

Прийнята до друку 30.12.2006