

# I. ЕЛЕКТРОТЕХНІКА

УДК 621.313.17: 621.313.8

А. П. Оксанич, В. Р. Петренко, С. Е. Притчин, П. М. Білий

## ОСНОВНІ ДИНАМІЧНІ ПОКАЗНИКИ МАЛОПОТУЖНИХ МАГНІТОЕЛЕКТРИЧНИХ ДВИГУНІВ

*В статті розглянуто основні динамічні показники малопотужних магнітоелектричних двигунів дискового типу. Отримано розрахункові формули для оцінки добротності, електромеханічної та електромагнітної сталих часу на початковій стадії проектування двигунів.*

### Вступ

Дискові магнітоелектричні двигуни (МД) завжди були для інженерів-розробників електричних машин (ЕМ) цікавими об'єктами. Так в інтегрованих електричних приводах дискові МД з аксіальним магнітним полем дозволяють суттєво розширити діапазон робочих частот і одночасно з цим підвищити енергетичні, динамічні, вібраційні та акустичні характеристики привода, а також покращити його масогабаритні показники, забезпечити режим як крокового, так і безперервного (автосинхронного) руху ротора.

Дискова конструкція МД є зручною для вбудовування в конструкцію виконавчих механізмів, завдячуючи своїм невеликим осьовим розмірам. Крім цього при великих зовнішніх діаметрах такі МД можуть розвивати більший момент у зв'язку з кубічною залежністю його від середньої величини діаметра електромагнітного ядра [1, 2].

Відомі роботи з теорії та розрахунку малопотужних МД, наприклад [3, 4], не повною мірою відображають питання розрахунку динамічних показників, а саме добротності, електромеханічної та електромагнітної сталих часу, які характеризують процес електромеханічного перетворення енергії.

**Мета роботи** – отримання рівнянь для оцінювання динамічних показників дискового малопотужного МД на основі аналізу основних електромагнітних співвідношень, які характеризують процеси енергоперетворення.

### Основний матеріал і результати

Розглянемо спрощену конструктивну схему магнітної системи (МС) двигуна (рис. 1), що являє собою два феромагнітних ободи 1 кільцевої форми, які є магнітопроводом, і на яких розташовано сегменти магнітного шару (постійні магніти) 2 системи Nd-Fe-B.

Дисковий ротор (якір) складається з двох струмових шарів, де кожний шар являє собою окремі намотані секції з емалірованого обмоточного проводу, які опресовуються у вигляді диску і заливаються спеціальним компаундом у відповідній прес-формі. Фізична реалізація одного струмового шару показана на рис. 2.

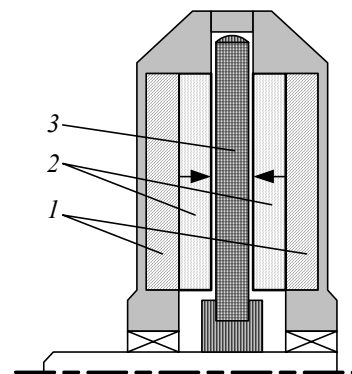


Рис. 1. Конструктивна схема МС двигуна:  
1 – магнітопровід; 2 – постійні магніти; 3 – струмовий шар

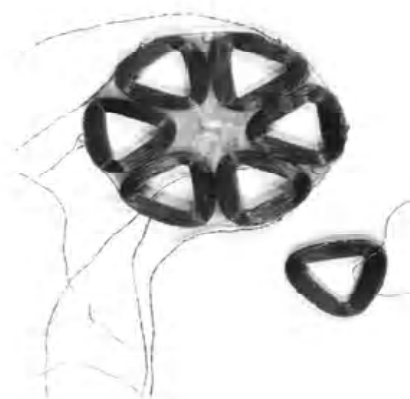


Рис. 2. Струмовий шар ротору

Наведена конструктивна схема МД (рис. 1) у порівнянні з ЕМ звичайної конструкції має такі переваги:

1. Можливість конструювати МД в плоскому виконанні, що в деяких випадках дозволяє спростити кінематичну схему привода та зменшити габаритні розміри пристроїв, де застосовуються вказані двигуни. На рис. 3 показано діючий зразок МД у плоскому виконанні.

© А. П. Оксанич, В. Р. Петренко, С. Е. Притчин, П. М. Білий 2008 р.

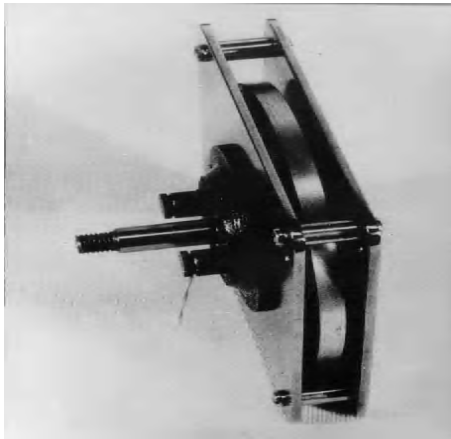


Рис. 3. Діючий зразок МД

2. Індуктивність обмотки немагнітного якоря порівняно невелика, а також практично відсутня реакція якоря [5], внаслідок чого МД має добрі умови комутації, відсутнє розмагнічування ПМ та пульсації магнітного потоку.

3. Маса та момент інерції в порівнянні з такими ЕМ інших видів конструкції якоря є малими.

У порівнянні печатного та дискового обмоткового виконання немагнітного якоря МД останні мають такі переваги:

- можливість виконання МД з малими розмірами диска якоря, а також виконання МД з більш високими значеннями напруги живлення;
- можливе виконання МД з більшими значеннями магнітної індукції в повітряному проміжку;
- дисковий немагнітний ротор з обмоточного проводу є механічно більш жорстким.

До недоліків слід віднести менш сприятливі умови теплопередачі провідників обмотки, що знаходяться у пластмасі, у порівнянні з печатним диском.

Одним з основних параметрів, що визначає динамічну похибку виконавчого МД в безпосередньому сервоприводі, є номінальна добротність. Цей же параметр визначає необхідну потужність МД в системах стабілізації при заданій динамічній точності відтворення деякого спектру випадкових впливань.

Розглянемо насамперед вплив теплових обмежень на допустиму густину струму в режимі короткочасних перевантажень, вважаючи при цьому, що тепловий процес є близьким до адіабатичного.

Обмеження на допустиму щільність струму в тривалому режимі можна оцінити таким чином [6]:

$$Q = \frac{\Delta P}{2\pi R_{cp} l} = \rho j A, \quad (1)$$

де  $Q$  – питомий тепловий потік з бокових поверхонь ротору;  $\Delta P = I^2 R W$  – омичні втрати в активній частині обмотки ротора;  $W$  – число провідників обмотки ротора;  $A$  – лінійне електричне навантаження ротора;  $j$  – густина струму;  $R_{cp}$  – середній радіус активної части-

ни ротора;  $R$  – активний опір;  $\rho$  – питомий опір міді;  $l$  – активна довжина провідника.

Враховуючи що [7]:

$$A = \frac{IW}{2\pi R_{cp}} = h_{cui} k_3 j, \quad (2)$$

де  $h_{cui}$  – товщина струмового шару обмотки ротора;  $k_3$  – коефіцієнт заповнення електропровідним матеріалом, вираз (1) приведемо до вигляду:

$$Q = \rho j^2 h_{cui} k_3. \quad (3)$$

Встановлене перебільшення  $\theta_{ec}$  температури обмотки ротора пов'язано з тепловим потоком

$$\theta_{ec} = \frac{Q}{k_\theta}, \quad \text{де } k_\theta \text{ – коефіцієнт тепловіддачі в на-$$

вколишнє середовище.

Вираз для перебільшення щільності струму в струмовому шарі ротора в тривалому режимі буде мати вигляд:

$$j_{mp} \leq \sqrt{k_\theta \theta_{ec} j k_3 \rho h_{cui}}. \quad (4)$$

Вираз для обертаючого момента будь-якої ЕМ дискового типу має вигляд [7]:

$$M = F \cdot R_{cp} = I B_\delta l_a W R_{cp} = j h_{cui} k_3 2\pi B_\delta l_a R_{cp}^2. \quad (5)$$

де  $F$  – сумарна сила, що діє на всі провідники струмового шару обмотки ротора;  $B_\delta$  – індукція в немагнітному проміжку.

У зв'язку з тим, що принциповою особливістю дискового МД є те, що в обертаючому русі беруть участь усі провідники ротора, який складається з двох струмових шарів, розташованих на тонкій ізолюючій прокладці, тоді добротність дискової ЕМ дорівнює [8]:

$$\varepsilon = \frac{M}{J_p} = \frac{M}{J_g + J_{cui}}, \quad (6)$$

де  $J_p$  – момент інерції ротора, який складається з моментів інерції вала  $J_g$  та струмового шару  $J_{cui}$ .

Момент інерції вала розраховується за формулою [7]:

$$J_g = \rho_{Fe,kc} R_g^4 l_g,$$

де  $\rho_{Fe,kc} = 7,8 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$  – густина конструкційної сталі;  $R_g$  – радіус вала ротора;  $l_g$  – довжина вала.

Момент інерції струмового шару визначається у вигляді [7]:

$$J_{cui} = m_{cui} \cdot R_{cp}^2 = \rho_{Cu} l_a h_{cui} R_{cp}^3, \quad (7)$$

де  $\rho_{Cu} = 8,9 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$  – густина міді струмового шару.

Тоді добротність згідно з (6) буде дорівнювати:

$$\varepsilon = \frac{j h_{cu} k_3 2\pi B_{\delta} l_a R_{cp}^2}{\rho_{Fe,ke} R_{\theta}^4 l_{\theta} + \rho_{Cu} l_a h_{cu} R_{cp}^3}. \quad (8)$$

**Оцінювання електромеханічної сталої часу МД.**

Електромеханічна стала МД визначається відомим виразом:

$$T_M = \frac{J R_p}{c^2}, \quad (9)$$

де  $R_p$  – опір струмового шару ротора;  $J$  – момент обертаючих частин ротора;  $C$  – конструктивна стала ЕМ, яку можна представити як [8]:

$$c = \frac{E}{\omega} = \frac{M}{I} = B_{\delta} l_a R_{cp} \alpha_p W, \quad (10)$$

де  $\alpha_p$  – коефіцієнт полюсного перекриття.

Тоді електромеханічна стала дорівнює:

$$T_M = \frac{(\rho_{Fe} R_{\theta}^4 l_{\theta} + \rho_{Cu} l_a h_{cu} R_{cp}^3)}{B_{\delta}^2 l_a^2 R_{cp}^2 \alpha_p^2 W^2}. \quad (11)$$

Розрахунок показав, що  $T_M = 0,2$  мс.

**Оцінювання електромагнітної сталої часу МД.**

Одним з важливих параметрів, що визначають динамічні характеристики ЕП, є електромагнітна стала часу [8]:

$$T_{el} = \frac{L}{R} = \frac{L I^2}{R I^2} = \frac{2W_M}{P}, \quad (12)$$

де  $I$  – струм ротора;  $W_M$  – енергія магнітного поля реакції якоря;  $P$  – потужність втрат в обмотці якоря.

Якщо магнітна система (МС) поділена на декілька однорідних  $k$  – ділянок (рис. 3), то подвійна магнітна енергія може бути розрахована за формулою [9]:

$$2W_M = \sum_k \mu_a \int_{V_k} H_{\delta}^2 dV_k, \quad (13)$$

де  $\mu_a$  – абсолютна магнітна проникність середовища;  $V_k$  – об’єм;  $H_{\delta}$  – напруженість магнітного поля в робочому проміжку.

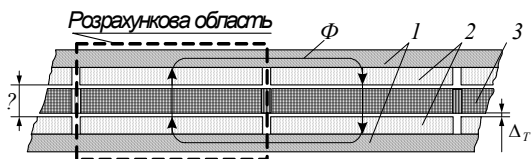


Рис. 4. Фрагмент МС двигуна

Подвійну енергію для розрахункової ділянки можна виразити як:

$$2W_M = \mu_a H_{\delta}^2 \delta \frac{\pi R_{cp}}{p} l_a, \quad (14)$$

де  $H_{\delta} = \frac{IW}{\delta}$ .

Підставляючи (14) в (12), отримаємо:

$$T_{el} = \frac{\mu_a W^2 \delta \pi R_{cp} l_a}{4 p \delta^2 R}. \quad (15)$$

Наприкінці наведемо чисельну оцінку добротності ЕМ в довготривалому режимі при таких параметрах:

$$j_{mp} = 15 \cdot 10^6 \frac{A}{m}; \quad h_{cu} = 5 \cdot 10^{-3} m; \quad l_{\theta} = 5 \cdot 10^{-2} m;$$

$$k_3 = 0,5; \quad l_a = 3,5 \cdot 10^{-2} m; \quad R_{cp} = 4,5 \cdot 10^{-2} m;$$

$$R_{\theta} = 3 \cdot 10^{-3} m.$$

Для розрахунку індукції  $B_{\delta}$  застосуємо закон повного струму для магнітного кола (рис. 4) і, враховуючи напрямки векторів магнітного поля, рівняння магнітного кола запишемо у вигляді:

$$2H_{\delta} \cdot \delta - 4H_M \cdot h_M = 0. \quad (16)$$

Враховуючи відомі рівняння кривої розмагнічування ПМ, зв'язку між  $B_{\delta}$  і  $H_{\delta}$  в повітрі [7] та приблизну рівність потоків ( $\Phi_{\delta} \approx \Phi_M$ ):

– визначаємо індукцію  $B_{\delta}$  у вигляді:

$$\left. \begin{aligned} B_M &= B_R - \mu_0 \mu_M H_M \\ B_{\delta} &= \mu_0 \mu_{\delta} H_{\delta} \\ B_{\delta} \cdot S_{\delta} &= B_M \cdot S_M \end{aligned} \right\}, \quad (17)$$

$$B_{\delta} = \frac{B_R}{1 + \frac{\mu_M \delta}{2 \mu_{\delta} h_M}}, \quad (18)$$

де  $B_R$  – залишкова індукція,  $B_M$  – магнітна індукція ПМ.

Розрахуємо за отриманою формулою (18) індукцію  $B_{\delta}$  в залежності від величини робочого проміжку  $\delta$  в даному випадку при  $\delta = 6 \cdot 10^{-3} m$ ,  $B_{\delta} = 0,56 Tл$ . Отримане значення індукції  $B_{\delta}$  в залежності від величини робочого проміжку  $\delta$  (для МС с двобічним збудженням) за формулою (17) незначно відрізняється від зна-

чення магнітної індукції  $B_{\delta}$ , отриманої експериментально [10]. Відносна похибка складає  $6 \div 10$  %.

За отриманими формулами (8), (11) та (15) для даної конструктивної схеми розрахунок показав:

– добротність складала  $\varepsilon = 16,02 \cdot 10^4 \frac{1}{c^2}$ ;

– електромеханічна стала  $T_M = 0,2 \cdot 10^{-3} c$ ;

– електромагнітна стала  $T_{el} = 0,8 \cdot 10^{-4} c$ , що добре узгоджується з даними, отриманими експериментально

(а саме:  $\varepsilon = 10^4 \div 10^5 \frac{1}{c^2}$ ;  $T_M = (0,1 \div 0,5) \cdot 10^{-3} c$ ;

$T_{el} = (0,5 \div 1) \cdot 10^{-4} c$  згідно з [6]).

### Висновок

Отримані в статті формули для розрахунку добротності, електромеханічної та електромагнітних сталих часу дають можливість здійснювати оцінювання основних динамічних показників малопотужних МД на першій стадії проектної моделі двигуна, що є особливо важливим в інженерній практиці при проектуванні ЕМ.

### Перелік посилань

1. Zhang Z., Profumo F., Tenconi A. Axial-flux versus radial-flux permanent-magnet // Electromotion. – 1996. – № 3. – P. 134–140.

2. Адволоткин Н. П., Вдовиков А. Г., Выплавин Ю. И. и др. Унифицированная серия вентиляльных двигателей с постоянными магнитами ДВУ для станкостроения и робототехники // Электротехника. – 1988. – № 2. – С. 37–40.

3. Овчинников И. Е., Лебедев Н. И. Бесконтактные двигатели постоянного тока. – Л.: Наука. Ленингр. отделение, 1979.

4. Управляемые бесконтактные двигатели постоянного тока / Н. П. Адволоткин, В. Т. Гращенков, Н. И. Лебедев и др. Л.: Энергоатомиздат, 1984.

5. Афонин А. А., Белый П. Н., Фурсенко С. Л. Исследование влияния реакции якоря в линейных магнитоэлектрических двигателях с управляемым токовым слоем // Техническая электродинамика. – 1993. – № 1. – С. 39–41.

6. Васильев Ю. К., Карпенко Б. К., Кравцов О. К., Мурашко В. А., Иванова И. Г. Двигатели постоянного тока с печатной обмоткой якоря // Электропромышленность и приборостроение. – 1964. – № 1.

7. Постников И. М. Проектирование электрических машин. – К.: Гостехиздат, 1960. – 910 с.

8. Чиликин М. Г., Сандлер А. С. Общий курс электропривода. – М.: Энергоиздат, 1981. – 576 с.

9. Столов Л. И., Афанасьев А. Ю. Моментные двигатели постоянного тока. – М.: Энергоиздат, 1989.

10. Афонин А. А., Белый П. Н., Фурсенко С. Л. Магнитное поле в системах с высококоэрцитивными постоянными магнитами // Техническая электродинамика. – 1992. – № 4. – С. 48–53.

Поступила в редакцию 12.05.08 г.

*В статье рассмотрены основные динамические показатели маломощных магнитоэлектрических двигателей дискового типа. Получены расчётные формулы для оценки добротности, электромеханической и электромагнитной постоянных времени на начальной стадии проектирования двигателей.*

*In clause the basic dynamic parameters low-power magnetoelectric of engines of a disk type are considered. The settlement formulas for an estimation of good quality, electromechanical and electromagnetic constant time at an initial stage of designing of engines are received.*

УДК 621.313

И. А. Орловский, А. А. Синявский

## Расчет моделей тиристорного электропривода постоянного тока на полиномиальных рекуррентных нейронных сетях

*Разработаны методики расчета моделей нелинейных объектов на полиномиальных рекуррентных нейронных сетях по известной математической модели и по экспериментальным данным работы объекта. По этой методике составлена программа и выполнен расчет моделей для тиристорного электропривода постоянного тока с двигателем последовательного возбуждения.*

### Введение

Качественное управление электромеханическими объектами (которые, как правило, являются нелинейными и имеют изменяющиеся в процессе работы параметры)

является сложной и актуальной задачей. Исследование и первоначальную отладку новых систем управления (СУ), а также корректировку настройки СУ в процессе работы электромеханических объектов (для обеспечения заданного качества управления) целесо-

© И. А. Орловский, А. А. Синявский 2008 г.