

## МОДЕЛЮВАННЯ ТОРЦЕВИХ ДУГОСТАТОРНИХ АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ З МАСИВНИМИ ДИСКОВИМИ РОТОРАМИ

Кондратенко І. П., Крищук Р. С.

Інститут електродинаміки НАН України

Описані результати дослідження моментних характеристик торцевих дугостаторних асинхронних двигунів з дисковими масивними роторами та проведено їх порівняння з експериментом.

**Постановка проблеми.** Сучасні засоби виробництва не можуть обходитись без електричної тяги у вигляді електроприводу, який виконується як з редуктором, так і безредукторний. Відомо, що безредукторний електропривод має більшу надійність.

Там, де двигуни класичного виконання неможливо встановити, часто застосовують торцеві двигуни в різноманітних агрегатах й механізмах, зокрема в транспорті, в якості мотор-колес електромобілів, на сільськогосподарському обладнанні, наприклад в корморізках.

Найбільшу цінність мають аналітичні методи моделювання, які разом з використанням обчислювальної техніки дозволяють швидко виконати розрахунок параметрів двигуна, енергетичних характеристик. Проте аналітичні методи торцевих дугостаторних асинхронних двигунів (ТДАД) з дисковими масивними роторами вивчені недостатньо.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** На даний час виконано розробку аналітичних методів розрахунку енергетичних характеристик торцевих дугостаторних асинхронних двигунів з дисковими роторами для двошарової [1] та одношарової обмоток [2], що враховують змінну по радіальній координаті лінійну швидкість обертання дискового ротора та дозволяють виконати розрахунок із заданою напругою трифазного джерела живлення з урахуванням диференційного, пазового та лобового розсіювань.

Є аналітичний метод розрахунку магнітної індукції та моменту торцевих дискових двигунів по заданих радіусах двигуна і виконано порівняння розрахунку з експериментальним дослідженням [3]. Також відомі чисельні розрахунки методом скінченних елементів і виконано порівняння розрахунків з експериментом [4, 5].

**Мета статті.** Пропонується виконати моделювання механічних характеристик та дослідити адекватність аналітичного методу розрахунку торцевих дугостаторних асинхронних двигунів з дисковими роторами.

**Основні матеріали дослідження.** В основі методів розрахунку торцевих дугостаторних асинхронних двигунів з дисковими роторами лежить рівняння електромагнітного поля в немагнітному проміжку двигуна для циліндричної системи координат  $\rho$ ,  $\phi$ ,  $z$  [2]:

$$\Delta B_z = i\mu_0\mu_r\sigma\omega B_z + \frac{\mu_0\mu_r\sigma\omega C_s(1-s)}{\rho} \frac{\partial B_z}{\partial \phi}, \quad (1)$$

де  $\Delta$  – оператор Лапласа,  $B_z$  – нормальна складова індукції в немагнітному проміжку,  $i$  – уявна одиниця,

$\mu_0$  – магнітна проникність повітря,  $\sigma$  – електропровідність дискового ротора,  $\omega$  – кутова швидкість,  $\omega = 2\pi f$ ,  $C_s$  – коефіцієнт заповнення магнітопроводу статора обмоткою,  $s$  – ковзання,  $p$  – кількість пар полюсів.

Схему двигуна, згідно (1), представлено на рисунку 1. Двигун складається з двох магнітопроводів, в яких у пазах розміщується обмотка.

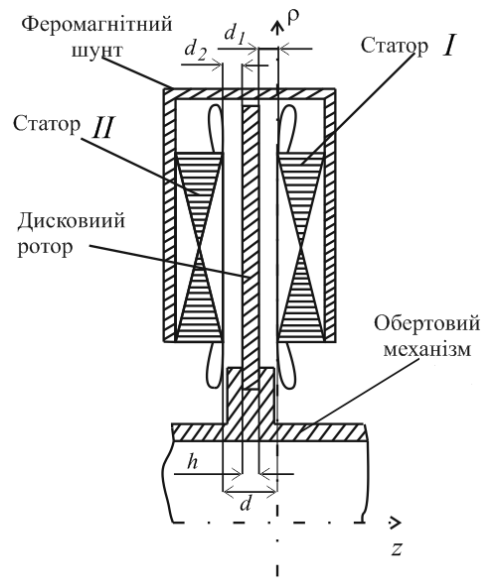


Рисунок 1 – Схема ТДАД з дисковим ротором

Електромагнітний момент для кожного статора розраховується за наступним виразом [2]:

$$M = \frac{1}{2} \operatorname{Re} \left[ \sum_{n=-\infty}^{\infty} \sum_{\eta=1}^{\infty} \int_{r_1}^{r_2} \rho K_{\eta} \tilde{B}_z \tilde{i}_{\rho 1}^* d\rho \right], \quad (2)$$

де  $n$  – параметр інтегрального перетворення рядів Фур'є,  $\eta$  – показує кількість власних чисел  $\lambda_{n\eta}$  інтегрального перетворення по  $\rho$ .

Тобто, для розрахунку треба створити двовимірний масив з ряду параметрів  $n$ , для кожного з яких є масив власних чисел інтегрального перетворення в кінцевих межах по радіальній координаті. Для відшукання власних чисел  $\lambda_{n\eta}$  розв'язується рівняння

$$J_n(\lambda_{n\eta} r_3) Y_n(\lambda_{n\eta} r_4) - Y_n(\lambda_{n\eta} r_3) J_n(\lambda_{n\eta} r_4) = 0. \quad (3)$$

$$K_\eta = (Y_n(\lambda_{nk}r_4)J_n(\lambda_{nk}\rho) - J_n(\lambda_{nk}r_4)Y_n(\lambda_{nk}\rho)), \quad (4)$$

$J_n(\cdot)$  та  $Y_n(\cdot)$  – функції Бесселя відповідно першого та другого роду,  $\tilde{B}_z$  – перетворене значення індукції в немагнітному проміжку після виконання над  $B_z$  інтегрального перетворення в ряди Фур'є та інтегрально-го перетворення в кінцевих межах [1, 2].  $\bar{i}_{\rho 1}^*$  – комплексно спряжене позначення струмового навантаження статора:

$$\bar{i}_{\rho 1}^* = I_A w_A K_A + I_B w_B K_B - I_C w_C K_C, \quad (5)$$

$$I_A = I_m, \quad I_B = I_m e^{-i\frac{2\pi}{m}}, \quad I_C = I_m e^{i\frac{2\pi}{m}}, \quad (6)$$

$I_m$  – амплітудне значення струму,  $m$  – кількість фаз,

$$w_{A,B,C} = s_{A,B,C} \cdot q \cdot p, \quad (7)$$

$s_{A,B,C}$  – кількість витків у пазу,  $q$  – число пазів на полюс і фазу.

Обмотковий коефіцієнт для одношарової обмотки:

$$K_{A,B,C} = e^{-in\phi_\tau + in\phi_{A,B,C}} (1 - e^{in\phi_\tau}) \times \frac{1}{qp} \sum_{k=1}^q e^{i\frac{2k-1}{2mq}\phi_\tau} \sum_{s=1}^p e^{2in(s-1)\phi_\tau}, \quad (8)$$

де  $\phi_\tau$  – кут полюсного ділення,

$$\phi_\tau = \pi C_s / p, \quad (9)$$

$\phi_{A,B,C}$  – кут просторового розміщення фази,

$$\phi_A = 0, \quad \phi_B = \phi_A + \frac{2}{m}\phi_\tau, \quad \phi_C = \phi_A + \frac{1}{m}\phi_\tau. \quad (10)$$

Причому, для компенсованої обмотки двигуна з розімкненим магнітопроводом (ТДАД), щоб компенсувати пульсуюче магнітне поле в немагнітному проміжку, до  $K_C$  додається доданок  $2i \sin(np\phi_\tau)/p$ . Для знаходження електромагнітного моменту, створеного лівим статором (рис. 1), у виразі (2) використовується індукція  $\tilde{B}_z$  повітряного проміжку  $d_2$ , а для правого статора – індукція  $\tilde{B}_z$  повітряного проміжку  $d_1$ .

Індукція  $\tilde{B}_z$  для  $d_1$ :

$$\tilde{B}_z \Big|_{d_1} = \frac{\mu_0 \lambda_{n\eta}^2 \bar{i}_{\rho 1}^*}{2in\pi C_{n\eta} (a+b)} \left( 2 + \frac{a-b}{\lambda_{n\eta}} \right) \int_{r_1}^{r_2} K_\eta \rho d\rho, \quad (11)$$

$$a = \frac{\left( (\gamma_{n\eta}/\mu_r) + \lambda_{n\eta} \right)^2}{4\gamma_{n\eta}/\mu_r} e^{-\gamma_{n\eta}h - \lambda_{n\eta}d_2 - \lambda_{n\eta}d_1} +$$

$$+ \frac{\left( \gamma_{n\eta}/\mu_r \right)^2 - \lambda_{n\eta}^2}{4\gamma_{n\eta}/\mu_r} e^{-\gamma_{n\eta}h + \lambda_{n\eta}d_2 - \lambda_{n\eta}d_1} - \frac{\left( \gamma_{n\eta}/\mu_r \right)^2 - \lambda_{n\eta}^2}{4\gamma_{n\eta}/\mu_r} e^{\gamma_{n\eta}h + \lambda_{n\eta}d_2 - \lambda_{n\eta}d_1}, \quad (12)$$

$$b = \frac{\left( (\gamma_{n\eta}/\mu_r) - \lambda_{n\eta} \right)^2}{4\gamma_{n\eta}/\mu_r} e^{-\gamma_{n\eta}h + \lambda_{n\eta}d_2 + \lambda_{n\eta}d_1} - \frac{\left( (\gamma_{n\eta}/\mu_r) + \lambda_{n\eta} \right)^2}{4\gamma_{n\eta}/\mu_r} e^{\gamma_{n\eta}h + \lambda_{n\eta}d_2 + \lambda_{n\eta}d_1} + \frac{\left( \gamma_{n\eta}/\mu_r \right)^2 - \lambda_{n\eta}^2}{4\gamma_{n\eta}/\mu_r} e^{-\gamma_{n\eta}h - \lambda_{n\eta}d_2 + \lambda_{n\eta}d_1} - \frac{\left( \gamma_{n\eta}/\mu_r \right)^2 - \lambda_{n\eta}^2}{4\gamma_{n\eta}/\mu_r} e^{\gamma_{n\eta}h - \lambda_{n\eta}d_2 + \lambda_{n\eta}d_1}, \quad (13)$$

$$\gamma_{n\eta} = \sqrt{\lambda_{n\eta}^2 + i\mu_r \mu_0 \sigma \omega (1 - nC_s (1-s)/p)}, \quad (14)$$

$$C_{n\eta} = \frac{J_n^2(\lambda_{n\eta}r_3) - J_n^2(\lambda_{n\eta}r_4)}{\pi \lambda_{n\eta}^2 J_n^2(\lambda_{n\eta}r_3)}. \quad (15)$$

Якщо дисковий ротор розміщений чітко посередині немагнітного проміжку, то магнітна індукція в обох повітряних проміжках однакова. Тому в даній статті не будемо представляти розрахунок індукції для проміжку  $d_2$ , що є в [1, 2]. Після обернених перетворень індукція розраховується виразом

$$B_z = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \sum_{\eta=1}^{\infty} \tilde{B}_z e^{-in\phi} K_\eta. \quad (16)$$

На інтернет-ресурсі [4] представлено дослідження торцевого асинхронного двигуна з дисковим ротором. Виконано розрахунок механічної характеристики в програмі MagNet методом скінченних елементів та проведено порівняння з експериментальними даними.

В статті [3] виконано розрахунок ідентичного двигуна аналітичним методом по середньому радіусі ротора, а також по сукупності радіусів, кількість яких для більшої точності було вибрано 21, з урахуванням вищих гармонік. Також представлено порівняння розрахованої механічної характеристики з експериментально дослідженою.

За даними [3, 4] розрахунки виконано з наступними параметрами:  $r_1 = 0.0285 \text{ м}$ ,  $r_2 = 0.071 \text{ м}$  (враховано виступ лобових частин на  $0.007 \text{ м}$ ),  $r_3 = 0.0075 \text{ м}$ ,  $r_4 = 0.092 \text{ м}$ ,  $h = 0.00635 \text{ м}$ ,  $d_1 = 0.001 \text{ м}$ ,  $d_2 = 0 \text{ м}$ ,  $q = 1$ ,  $\sigma = 32 \cdot 10^6 \text{ См/м}$  (алюмінієвий диск),  $\mu_r = 1$ ,  $p = 2$ ,  $I_m = 2\sqrt{2}$ ,  $s_{A,B,C} = 145$  (витків у пазах задано вдвічі менше, оскільки метод розрахунку на 2 статори),  $f = 50 \text{ Гц}$ ,  $n = \{2, -10, 14\}$  (головна, п'ята й сьома гармоніки),  $\eta = 150$ ,  $m = 3$ . Розрахунок моменту виконується по виразу (2). Отримане таким чином значення моменту подвоїмо і матимемо момент для дво-

стороннього двигуна, який еквівалентний односторонньому з [3, 4]. Порівняємо тепер розрахований момент при ковзанні  $s = 0..1$ .

На рисунку 2 представлено механічну характеристику торцевого асинхронного двигуна з дисковим ротором у вигляді чотирьох кривих: Measured – результат експерименту [3, 4], Analytical method TDAD – розрахунок за виразом (2), MagNet 3D-FEM – розрахунок методом скінченних елементів [4], ANSYS Maxwell 3D-FEM – розрахунок методом скінченних елементів. Видно з рисунку, що механічна характеристика, розрахована різними способами, співпадає з певною похибкою. Графік починається з моменту зі знаком мінус, що показує вплив п'ятої та сьомої гармонік. З використанням більшої кількості пазів на полюс і фазу вплив вищих гармонік буде менший.

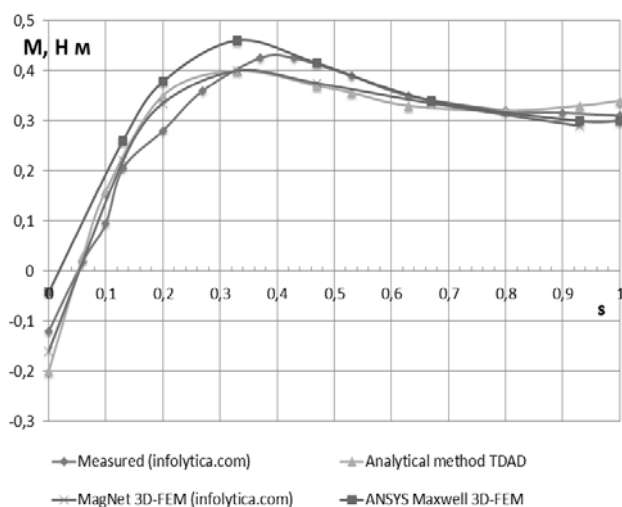


Рисунок 2 – Механічна характеристика

Метод розрахунку, що представлений в даній статті розроблений також для розрахунку торцевих дугостаторних асинхронних двигунів з масивними дисковими роторами. У працях [1, 2] основним призначенням таких двигунів виступають кульові барабанні млини теплових електростанцій. Виконано обчислення моменту дугостаторного двигуна аналітичним методом та у програмі Maxwell. Розрахунки здійснено з наступними даними:  $r_1 = 2,7 м$ ,  $r_2 = 3,5 м$ ,  $r_3 = 2,5 м$ ,  $r_4 = 3,7 м$ ,  $s = 0,3$ ,  $h = 0,012 м$ ,  $d_1 = 0,003 м$ ,  $d_2 = 0,003 м$ ,  $q = 1$ ,  $\sigma = 20 \cdot 10^6 С м / м$ ,  $\mu_r = 1$ ,  $p = 6$ ,  $I_m = 300\sqrt{2} А$ ,  $s_{A,B,C} = 32$ ,  $f = 4,8 Гц$ ,  $n = \{-8p / C_s .. 8p / C_s\}$ ,  $\eta = 150$ ,  $t = 3$ .

Як виявилось у процесі розрахунку розробленим аналітичним методом, задавання кількості пазів на полюс і фазу рівній одиниці викликає значний вплив вищих гармонік так, що отримуються недейсні результати. Пояснити це можна тим, що струмове навантаження задається тонкими лініями дельта функцій Дірака, що сприяє підвищеному впливі вищих гармонік.

Результатом перерахунку при  $q = 2$ ,  $s_{A,B,C} = 16$  є момент в дугостаторній машині  $M = 281454 Н$ . Моделювання в Maxwell виконано для перехідного процесу, при заданій сталій швидкості ротора  $15,12 об/хв$

( $s=0,3$ ) й отримано залежність моменту від часу. Розрахунки для усталеного режиму співпадають з мінімальним відхиленням – близько  $280 кН \cdot м$  в Maxwell 3D і  $281 кН \cdot м$  аналітичним методом.

**Висновок.** Моделювання торцевих дугостаторних асинхронних двигунів з масивними дисковими роторами аналітичним методом розрахунку співпадає з моделюванням методом скінченних елементів та з експериментальним дослідженням, що вказує на адекватність аналітичного методу, який дозволяє набагато швидше виконувати розрахунки.

#### Список використаних джерел

1. Ращепкін А. П. Параметри торцевого дугостаторного асинхронного двигуна з дисковим ротором при паралельному включенні протилежних від ротора статорів з двошаровою обмоткою / Ращепкін А. П., Кришук Р. С. // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. – 2016. – Вип. 2/2016(34).
2. Ращепкін А. П. Енергетичні показники торцевого дугостаторного асинхронного двигуна з дисковим феромагнітним ротором та компенсованою обмоткою / А. П. Ращепкін, Р. С. Кришук // Вісник НТУ "ХПІ". Тематичний випуск "Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії". – Харків: НТУ "ХПІ", 2015. – №5(1114).– С. 76–84.
3. M. Mirzaei "Analytical modeling of axial air gap solid rotor induction machines using a quasi-three-dimensional method" / M. Mirzaei, M. Mirsalim, and S. E. Abdollahi // IEEE Transactions on Magnetics. – July 2007. – Vol. 43. – No. 7. – P. 3237–3242.
4. <http://www.infolytica.com/en/applications/ex0113>.
5. D. N. Dyck, B. Forghani, C. S. Brett, J. P. Webb, D. A. Lowther, "A T-Omega Finite Element Method for Arbitrary Motion in 3D," Proceedings of the 15th Conference on the Computation of Electromagnetic Fields (COMPUMAG 2005), Shenyang, China, 2005.– P. 26-30.

#### Аннотация

### МОДЕЛИРОВАНИЕ ТОРЦЕВЫХ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ С МАССИВНЫМИ ДИСКОВЫМИ РОТОРАМИ

Кондратенко И. П., Кришук Р. С.

Описаны результаты исследования моментных характеристик торцевых дугостаторных асинхронных двигателей с дисковыми массивными роторами и проведено их сравнение с экспериментом.

#### Abstract

### MODELING AXIAL ARC-STATOR INDUCTION MOTORS WITH SOLID DISC ROTORS

I. Kondratenko, R. Kryshchuk

It is shown studies of the characteristics of torque compared with the experimental data for axial arc stator induction motors with massive disc rotors.