

УДК 621.313

## МАГНІТНІ СИЛИ В ЗАЗОРІ ТОРЦЕВОГО ДУГОСТАТОРНОГО АСИНХРОННОГО ДВИГУНА З ДИСКОВИМ РОТОРОМ

**О.М. Карлов**, канд. техн. наук, **Р.С. Кришук**, асп., **А.П. Ращепкін**, докт. техн. наук

Інститут електродинаміки НАН України,  
пр. Перемоги, 56, Київ-57, 03680, Україна  
e-mail: kr@e-mail.ua

*Розроблено аналітичний метод розрахунку осьових магнітних сил, що діють на ротор торцевого дугостаторного асинхронного двигуна (ТДАД), використовуючи тензор натягів Максвелла. Метод включає аналітичний розрахунок усередненого в часі комплексного значення індукції на внутрішніх поверхнях статорів з двошаровою обмоткою. Розрахунок виконано при заданих комплексних значеннях фазних струмів у витках обмоток статорів, фазні обмотки яких вмикаються в електричну мережу послідовно. На прикладі конкретно заданих параметрів ТДАД визначено величину осьових сил, що діють на дисковий ротор. На основі розрахунків дано рекомендації щодо вибору матеріалу дискового ротора. Бібл. 12, рис. 3.*

**Ключові слова:** торцевий дугостаторний асинхронний двигун, магнітні сили, магнітне поле.

**Вступ.** На теплових електростанціях (ТЕС), де в якості палива використовується кам'яне вугілля, застосовуються кульові барабанні млини. Це механізми, що здійснюють подрібнення кам'яного вугілля на дрібні частинки прямо перед камерою згорання шляхом обертання барабана, наповненого сталевими кулями. Для приведення млинів у дію застосовується електропривід з механічною зубчастою передачею обертового моменту від швидкохідного синхронного (рідше асинхронного) двигуна до обертового барабана. Оскільки потужність кульових барабанних млинів на електростанціях сягає 2,5 МВт, то електропривід на зубчастій передачі має значні недоліки. Це, зокрема, зношені зубці шестірней, необхідність у регулюванні їх стикування та змащення, заміна механічних деталей, часті планові ремонти.

Огляд останніх досліджень та публікацій показав, що використання безредукторного електроприводу дає змогу позбутися багатьох недоліків механічної передачі [8]. На цей час широкого застосування набув безредукторний двигун кільцевого типу, коли робоче тіло (обертовий барабан) виконує роль ротора двигуна, навколо якого знаходиться статор, що живиться від перетворювача частоти. Але такий електропривід вимагає значних капіталовкладень й набув поширення лише для барабанних млинів з потужністю більше 12 МВт [10].

Відомий також дугостаторний двигун для барабанних млинів [12], але його виробництво припинилось внаслідок проблеми значного одностороннього силового тяжіння між статором і ротором. Тому кульові барабанні млини ТЕС потужністю в кілька мегават і досі комплектуються електроприводом на механічній передачі й створення нового безредукторного електроприводу, який буде позбавлений головних недоліків існуючих, є актуальною задачею.

Запропоновано торцевий дугостаторний асинхронний двигун (ТДАД) для кульових барабанних млинів з суцільним дисковим електропровідним ротором [8]. У статті [5] розглядається метод розрахунку магнітного поля і енергетичних характеристик такого двигуна з одношаровою компенсованою обмоткою з урахуванням товщинного крайового ефекту. В цій статті представлено аналітичний розрахунок магнітних сил у ТДАД з двошаровою обмоткою і феромагнітним ротором.

**Метою роботи** є розробка аналітичної методики розрахунку осьової магнітної сили, що діє на розміщений у зазорі дисковий ротор торцевого дугостаторного асинхронного двигуна.

На рис. 1 у циліндричній системі координат  $(\rho, \varphi, z)$  представлено модель ТДАД, де позначено: 1 – ротор, 2 – статори. Ротор ідеально рівний, електропровідний, кріпиться до корпусу обертового тіла 3 – барабана млина. Обмотки статорів розміщуються в пазах з лобовими частинами. Відповідно до приведеної в [6] обґрунтованої розрахункової квазістационарної моделі двигуна прийнято допущення, що довжина магнітопроводів статорів 2 подовжена

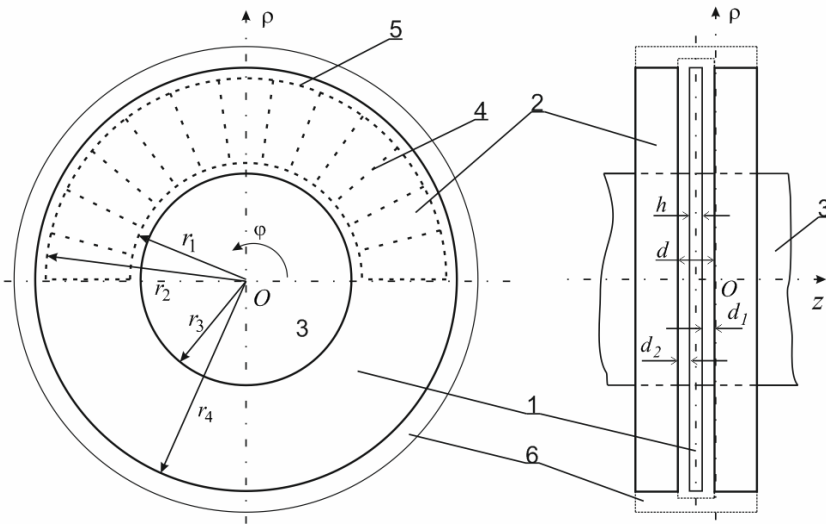


Рис. 1

в азимутальному напрямку до повного кола, а ширина – до радіальних розмірів ротора 1. Магнітопроводи статорів вважаються з'єднаними між собою феромагнітними шунтами 6, які, як і магнітопроводи, прийняті ідеальними з нескінченною питомою магнітною проникністю. Струмове навантаження пазів 4 в математичній моделі представлено у вигляді дельта-функцій Дірака на поверхні магнітопроводів посередині реального розміщення пазів (складова  $i_\rho$  струмового

навантаження), а струмове навантаження лобових частин 5 – на внутрішніх ребрах магнітопроводів (складова  $i_\phi$  струмового навантаження).

При використанні двигуна ТДАД на кульових барабанних млинах, радіус яких сягає від двох метрів, дисковий ротор може мати викривлення, а також може зміщуватися в сторону одного зі статорів у межах зазору. Очевидно, що при несиметричному розміщенні дискового ротора, тобто при  $d_1 \neq d_2$ , рівень магнітного поля в повітряних проміжках буде відрізнятись, й на нього буде діяти сила магнітного поля.

Сила, що діє на замкнену поверхню об'ємного тіла, зовнішня нормаль якої спрямована по  $\vec{k}$ , визначається через тензор натягів Максвелла  $T_k$  [11, с.124]:

$$\vec{F} = \oint_S \vec{T}_k dS. \quad (1)$$

Введено умову, що дисковий ротор ідеально рівний, без викривлень, розміщений у зазорі несиметрично. Тоді з боку повітряного проміжку на поверхню дискового ротора  $\rho O \phi$  з зовнішньою нормаллю  $\vec{k} = z$  діє осьова складова сили магнітного поля

$$F_z = \oint_S T_{zz} dS, \quad (2)$$

де  $T_{zz}$  – осьова складова тензора натягів Максвелла магнітного поля по нормалі  $z$  [11, с.316],

$$T_{zz} = \mu_0 \left( H_z^2 - \frac{H^2}{2} \right) = \frac{1}{2\mu_0} (B_z^2 - B_\phi^2 - B_\rho^2), \quad (3)$$

де  $\mu_0$  – відносна магнітна проникність повітря;  $H$  – напруженість магнітного поля;  $H_z$  – осьова складова напруженості магнітного поля;  $B_z$ ,  $B_\phi$ ,  $B_\rho$  – відповідно осьова, азимутальна та радіальна складові індукції магнітного поля. Також рівняння (2), (3) можна отримати з узагальненої формули [9, с.100]

$$\vec{F} = \mu_0 \oint_S \left( \vec{H}(\vec{k}\vec{H}) - \frac{1}{2} H^2 \vec{k} \right) dS. \quad (4)$$

Введемо умову, що середовище з двигуном знаходиться в механічній та тепловій рівновазі. У такому разі слід проводити інтегрування по будь-якій замкненій поверхні, що охоплює розглянуте тіло (дисковий ротор) [9, с.100]. Тобто сила, що діє на зовнішню поверхню дискового ротора, дорівнює силі, яка діє на поверхню магнітопроводу.

У дисковому роторі є дві співрозмірні поверхні  $\rho O \phi$ : при  $z = -d_1$  та  $z = -(d_1 + h)$  (рис. 1) з протилежно направленими нормальми по координаті  $z$ . Сила, яка діє на дисковий

ротор, знаходиться як сума сил (2), що діють з боку повітряних проміжків на кожен поверхню диска, обмежену  $(-\pi; \pi)$  та  $(r_3; r_4)$ :

$$F_z = F_z|_{d_1} + F_z|_{d_2} = \frac{I}{2\mu_0} \int_{-\pi}^{\pi} \int_{r_3}^{r_4} \left( B_z^2|_0 - B_\varphi^2|_0 - B_\rho^2|_0 - B_z^2|_{-d} + B_\varphi^2|_{-d} + B_\rho^2|_{-d} \right) \rho d\varphi d\rho. \quad (5)$$

Оскільки статори ТДАД виконані однаково, розміщені симетрично й вмикаються в мережу живлення послідовно, тобто струм на статорах однаковий, то складові індукції магнітного поля  $B_\varphi$  та  $B_\rho$  на поверхнях магнітопроводів рівні. Тому осьова складова сили за формулами набуває вигляду

$$F_z = \frac{I}{2\mu_0} \int_{-\pi}^{\pi} \int_{r_3}^{r_4} \left( B_z^2|_0 - B_z^2|_{-d} \right) \rho d\varphi d\rho. \quad (6)$$

Оскільки в (6) осьова складова індукції в зазорі є гармонічною функцією в часі [5], то усереднене в часі значення квадрату індукції розраховується за формулою [9, с. 285]

$$B_z^2 = \frac{I}{2} \operatorname{Re} \left\{ B_z B_z^* \right\} = \frac{I}{2} B_z B_z^*, \quad (7)$$

де (...) \* позначає комплексно спряжену величину. Тоді кінцева формула для розрахунку осьової сили, що діє на ротор, запишеться таким чином:

$$F_z = \frac{I}{4\mu_0} \int_{-\pi}^{\pi} \int_{r_3}^{r_4} \rho \left( B_z|_0 B_z^*|_0 - B_z|_{-d} B_z^*|_{-d} \right) d\varphi d\rho, \quad (8)$$

де  $B_z|_0$  та  $B_z|_{-d}$  – комплексні значення осьової складової індукції магнітного поля відповідно на поверхні правого (при  $z = 0$ ) та лівого (при  $z = -d$ ) статорів.

Для знаходження індукції магнітного поля  $B_z$  скористаємось методом розрахунку, що представлено в статті [5], де розрахунки виконано для одношарової обмотки. У цій статті розрахунок виконується для двошарової обмотки, оскільки переважно застосовуються двошарові обмотки, що дають змогу виконати вкорочений крок на будь-яке число зубцевих ділень. Це дає можливість досягти кращої форми електрорушійної сили (ЕРС) та кривої магнітного поля в зазорі, зменшити вищі просторові гармоніки та пазові розсіювання обмотки, досягти збільшення коефіцієнта потужності [2].

Для розрахунку усередненого в часі комплексного значення осьової складової індукції магнітного поля  $B_z$  застосовується рівняння

$$B_z = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \sum_{\eta=l}^{\infty} \tilde{B}_z e^{-in\varphi} \left( Y_n(\lambda_{n\eta} r_4) J_n(\lambda_{n\eta} \rho) - J_n(\lambda_{n\eta} r_4) Y_n(\lambda_{n\eta} \rho) \right), \quad (9)$$

яке використовується у формулі (8), де  $\tilde{B}_z$  – перетворене значення індукції внаслідок виконання методу інтегральних перетворень [7]. Перетворене значення магнітної індукції на поверхні магнітопроводу правого статора (рис. 1) (при  $z = 0$ ) обчислюється за методом [5]:

$$\tilde{B}_z|_0 = -\frac{\tilde{f}}{a+b} \left( 2 + \frac{a-b}{\lambda_{n\eta}} \right); \quad (10)$$

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

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

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

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

де число  $\lambda_{n\eta}$  є коренем рівняння

$$J_n(\lambda_{n\eta}r_3)Y_n(\lambda_{n\eta}r_4) - Y_n(\lambda_{n\eta}r_3)J_n(\lambda_{n\eta}r_4) = 0, \quad (11)$$

$\mu_r$  – відносна магнітна проникність ротора,  $J_n(\cdot)$ ;  $Y_n(\cdot)$  – функції Бесселя відповідно першого та другого роду;

$$\gamma_{n\eta} = \sqrt{\lambda_{n\eta}^2 + i\omega\mu_r\mu_0\sigma_r \left(1 - \frac{nv_\varphi(\rho)}{\omega\rho}\right)}, \quad (12)$$

$$v_\varphi(\rho) = v_s(1-s); \quad v_s = 2f\tau(\rho); \quad \tau(\rho) = \frac{2\pi\rho C_s}{p_1 + \beta}, \quad (13)$$

де  $\sigma_r$  – питома електрична провідність ротора;  $\omega = 2\pi f$  – обертова частота;  $f$  – частота струму в мережі;  $v_\varphi(\rho)$  – азимутальна складова лінійної швидкості обертання ротора, яка залежить від радіуса;  $s$  – ковзання;  $v_s$  – швидкість обертання магнітного поля;  $\tau(\rho)$  – полюсний крок,

$$\tilde{f} = -\frac{\lambda_{n\eta}^2\mu_0}{in}\tilde{f}_\rho; \quad \tilde{f}_\rho = C_{n\eta}^{-1} \int_{r_3}^{r_4} \bar{f}_\rho (Y_n(\lambda_{n\eta}r_4)J_n(\lambda_{n\eta}\rho) - J_n(\lambda_{n\eta}r_4)Y_n(\lambda_{n\eta}\rho))\rho d\rho; \quad (14)$$

$$C_{n\eta} = \frac{J_n^2(\lambda_{n\eta}r_3) - J_n^2(\lambda_{n\eta}r_4)}{\pi\lambda_{n\eta}^2 J_n^2(\lambda_{n\eta}r_3)}; \quad \bar{f}_\rho = \rho \bar{i}_\rho, \quad (15)$$

де  $\bar{i}_\rho$  – перетворене значення струмового навантаження для двошарової обмотки з напівзаповненими крайніми пазами (рис. 2), яке отримано із застосуванням інтегрального перетворення Фур'є [5] до формули, яка описує струм двошарової обмотки (рис. 2):

$$i_\rho = i_{\rho A} + i_{\rho B} - i_{\rho C}; \quad (16)$$

$$i_{\rho j} = I_j s_j \sum_{k=1}^q \sum_{s=1}^{p_1} (-1)^{s-1} (\delta(\rho\chi) - \delta(\rho(\chi - \gamma\varphi_\tau))) (\Theta(\rho - r_2) - \Theta(\rho - r_1));$$

$$\chi = \varphi + C_s\pi - \varphi_j - \frac{2k-1}{2mq}\varphi_\tau - (s-1)\varphi_\tau; \quad \varphi_\tau = \frac{2C_s\pi}{p_1 + \beta}.$$

Тут  $j$  пробігає значення  $A, B, C$  для фаз  $A, B, C$  відповідно;  $I_j$  – комплексне значення амплітудної величини фазного струму;  $s_j$  – кількість витків у пазу для одного шару двошарової обмотки (рис. 2);  $q$  – число пазів на полюс і фазу;  $\delta(\dots)$  – дельта-функція Дірака;  $\Theta(\dots)$  – одинична узагальнена функція [3];  $\varphi_j$  – кутовий просторовий зсув фаз обмотки (приймається  $\varphi_A = 0$ ;  $\varphi_B = 2\varphi_\tau/m$ ;  $\varphi_C = \varphi_\tau/m$ );  $m$  – кількість фаз;  $\varphi_\tau$  – кутова величина полюсного ділення;  $C_s$  – відносний коефіцієнт реального розміру дуги статора до повного кола;  $p_1$  – кількість полюсів у верхньому шарі двошарової обмотки;  $\beta$  – відносний крок обмотки. Тоді перетворене значення струму в (16) записується наступним чином з використанням інтегрального перетворення Фур'є [1, 7]:

$$\bar{i}_\rho = \Theta_\rho (I_A K_A w_A + I_B K_B w_B - I_C K_C w_C) / 2\pi\rho,$$

де  $K_A, K_B, K_C$  – обмоткові коефіцієнти фаз, що для двошарової обмотки,

$$K_j = -2e^{in\left(\varphi_j - \frac{\varphi_\tau}{2} + \frac{\varphi_\tau}{2m}\right) + \frac{ip_1\pi}{2}} \sin\left(\frac{n\beta\varphi_\tau}{2}\right) \frac{\sin(n\varphi_\tau/2m)}{q \sin(n\varphi_\tau/2mq)} \frac{\sin(p_1(n\varphi_\tau + \pi)/2)}{p_1 \cos(n\varphi_\tau/2)}, \quad (17)$$

де  $j$  пробігає значення  $A, B, C$ ;  $w_{A(B,C)}$  – число витків у котушках обмотки відповідної фази одного статора,

$$w_{A(B,C)} = s_j \cdot q \cdot p_1 \quad (18)$$

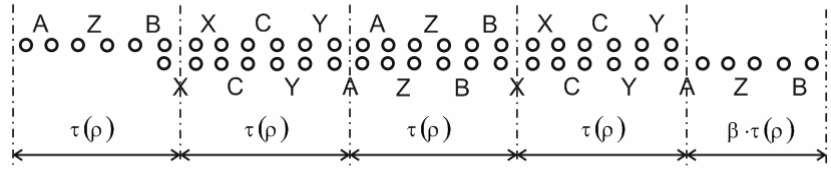


Рис. 2

Магнітна індукція на поверхні лівого статора обчислюється відповідно за такою формулою:

$$\tilde{B}_z|_{-d} = -\frac{\tilde{f}(b_1 + e^{d\lambda_{n\eta}}(a_1 e^{d\lambda_{n\eta}} - 2\lambda_{n\eta}))}{\lambda_{n\eta}(a_1 e^{2d\lambda_{n\eta}} + b_1)}, \quad (19)$$

$$a_1 = \frac{((\gamma_{n\eta}/\mu_r) + \lambda_{n\eta})^2}{4\gamma_{n\eta}/\mu_r} e^{\gamma_{n\eta}h - \lambda_{n\eta}h} - \frac{((\gamma_{n\eta}/\mu_r) - \lambda_{n\eta})^2}{4\gamma_{n\eta}/\mu_r} e^{-\gamma_{n\eta}h - \lambda_{n\eta}h} +$$

$$+ \frac{(\gamma_{n\eta}/\mu_r)^2 - \lambda_{n\eta}^2}{4\gamma_{n\eta}/\mu_r} e^{\gamma_{n\eta}h - \lambda_{n\eta}h - 2\lambda_{n\eta}d_1} - \frac{(\gamma_{n\eta}/\mu_r)^2 - \lambda_{n\eta}^2}{4\gamma_{n\eta}/\mu_r} e^{-\gamma_{n\eta}h - \lambda_{n\eta}h - 2\lambda_{n\eta}d_1};$$

$$b_1 = \frac{((\gamma_{n\eta}/\mu_r) - \lambda_{n\eta})^2}{4\gamma_{n\eta}/\mu_r} e^{\gamma_{n\eta}h + \lambda_{n\eta}h} - \frac{((\gamma_{n\eta}/\mu_r) + \lambda_{n\eta})^2}{4\gamma_{n\eta}/\mu_r} e^{-\gamma_{n\eta}h + \lambda_{n\eta}h} +$$

$$+ \frac{(\gamma_{n\eta}/\mu_r)^2 - \lambda_{n\eta}^2}{4\gamma_{n\eta}/\mu_r} e^{\gamma_{n\eta}h + \lambda_{n\eta}h + 2\lambda_{n\eta}d_1} - \frac{(\gamma_{n\eta}/\mu_r)^2 - \lambda_{n\eta}^2}{4\gamma_{n\eta}/\mu_r} e^{-\gamma_{n\eta}h + \lambda_{n\eta}h + 2\lambda_{n\eta}d_1}.$$

Тоді для розрахунку осьової сили (8), що діє на дисковий ротор, використовуються знайдені за формулами (10), (19) величини індукції магнітного поля  $B_z|_0$  та  $B_z|_{-d}$ .

На рис. 3 представлено залежність осьової сили  $F_z$  від зміщення дискового ротора по осьовій координаті, тобто від зростання повітряного проміжку  $d_2$  (при зменшенні повітряного проміжку  $d_1$ ). Розрахунок виконано для сталого конструкційного виконання статорів:  $r_1 = 2,2$ ,  $r_2 = 2,6$ ,  $r_3 = 2,0$ ,  $r_4 = 2,8$ ,  $p_1 = 12$ ,  $\beta = 1$ ,  $h = 0,01$  м,  $d = 0,02$  м  $s_j = 3$ ,  $q = 5$ ,  $f = 50$  Гц,  $C_s = 1/2$ ,  $\sigma_r = 4 \cdot 10^6$  См/м,  $s = 0,2$ ,  $I_A = 160$  А,  $I_B = I_A e^{-i2\pi/3}$ ,  $I_C = I_A e^{i2\pi/3}$ . З рис. 3 видно, що при використанні немагнітного матеріалу ротора при його зміщенні діє незначна стабілізуюча сила (до 25 Н) в бік симетричного розміщення статора в зазорі. При використанні магнітного матеріалу з незначною відносною магнітною проникністю ( $\mu_r = 300$ ) діє дестабілізуюча осьова сила в напрямку меншого повітряного проміжку, яка при симетричному розміщенні ротора рівна нулю і зростає до 300 кН (це приблизно 30 т) при відхиленні ротора до значень ( $d_1 = 1$  мм,  $d_2 = 9$  мм).

Отже, у зв'язку з тим, що дисковий ротор з магнітного матеріалу може мати викривлення та несиметрично розміщуватись у зазорі, на нього (а отже, і на статори) будуть діяти значні односторонні магнітні сили. Тому для запобігання пошкодженню двигуна внаслідок дії магнітних сил рекомендовано використовувати ротор із немагнітного матеріалу.

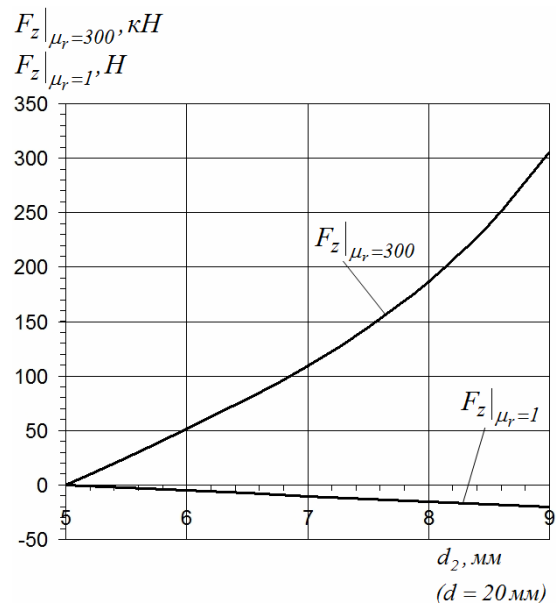


Рис. 3

**Висновок.** Розроблено аналітичний метод розрахунку осьових магнітних сил, що діють на дисковий ротор ТДАД. Розрахунок за розробленим методом показав, що на магнітний матеріал дискового ротора діють осьові сили, які можуть призвести до пошкодження двигуна, й рекомендовано застосовувати для виготовлення дискового ротора немагнітний матеріал.

1. *Бронштейн И.Н., Семендяев К.А.* Справочник по математике для инженеров и учащихся вузов. – М.: Наука, 1986.
2. *Вольдек А.И.* Индукционные гидродинамические машины с жидкометаллическим рабочим телом. – Л.: Энергия, 1970. – 272 с.
3. *Гахов Ф.Д., Черский Ю.И.* Уравнения типа свёртки. – М.: Наука. – 1978. – 296 с.
4. *Камке Э.* Справочник по обыкновенным дифференциальным уравнениям. – 6-е изд. – М.: Наука, 1971. – 703 с.
5. *Карлов О.М., Кондратенко І.П., Крищук Р.С., Ращепкін А.П.* Метод розрахунку торцевого дугостаторного асинхронного двигуна з урахуванням товщинного крайового ефекту // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. – 2015. – № 2.
6. *Карлов О.М., Кондратенко І.П., Крищук Р.С., Ращепкін А.П.* Метод розрахунку усередненого магнітного поля по висоті повітряного проміжку торцевого дугостаторного асинхронного двигуна // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. – 2014. – № 3. – С. 68–76.
7. *Кошляков Н.С., Глинер Э.Б., Смирнов М.М.* Уравнения в частных производных математической физики. – М.: Высш. шк., 1970. – 712 с.
8. *Крищук Р.С., Ращепкін А.П.* Огляд електроприводів кульових барабаних млинів // Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України: Зб. наук. пр. – К.: ІЕД НАНУ, 2014. – Вип. 39. – С. 29–38.
9. *Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М.* Теоретическая физика. Электродинамика сплошных сред: 2-е изд., испр. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1982. – 621 с. (т. VIII)
10. *Півняк Г.Г.* Сучасний стан і перспективи подальшого розвитку електроприводів потужних барабаних млинів // Проблеми автоматизованого електропривода. Теория и практика: Вестник Харьковского гос. политех. ун-та. – 1998. – С. 24–27.
11. *Тамм И.Е.* Основы теории электричества: Учеб. пособие для вузов. – 10-е изд., испр. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1989. – 504 с.
12. *Фридкин П.А.* Безредукторный дугостаторный электропривод. – М.: Энергия, 1970. – 138 с.

УДК 621.313

**А.Н. Карлов**, канд. техн. наук, **Р.С. Крищук**, асп., **А.П. Ращепкин**, докт. техн. наук  
Институт электродинамики НАН Украины,  
пр. Победы, 56, Киев-57, 03680, Украина

#### **Магнитные силы в зазоре торцевого дугостаторного асинхронного двигателя с дисковым ротором**

*Разработан аналитический метод расчета осевых магнитных сил, действующих на ротор торцевого дугостаторного асинхронного двигателя (ТДАД), используя тензор напряжений Максвелла. Метод включает аналитический расчет усредненного во времени комплексного значения индукции на поверхностях магнитопроводов статоров с двухслойной обмоткой и с учетом толщинного краевого эффекта. Расчет выполняется при заданных комплексных значениях фазных токов в витках обмотки статоров, которые включаются в электрическую сеть последовательно. На примере конкретно заданных параметров ТДАД определена величина сил, действующих на дисковый ротор. На основе расчетов даны рекомендации по выбору материала дискового ротора. Библ. 12, рис. 3.*

**Ключевые слова:** торцевой дугостаторный асинхронный двигатель, магнитные силы, магнитное поле.

#### **O. Karlov, R. Kryshchuk, A. Raschepkin**

Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine,  
Peremohy, 56, Kyiv-57, 03680, Ukraine

#### **The magnetic forces in the air-gap of the axial arc-stator induction motor with disc rotor**

*As the title implies the article describes investigations of the magnetic forces generated in the axial arc-stator induction motor (AAIM) with a ferromagnetic electrically conductive rotor disk. It should be noted that an analytical method for calculating the axial magnetic forces uses the Maxwell stress tensor. The method also includes the analytical calculation of the time-averaged integrated value of magnetic induction in the air-gap. The method takes into account the edge effect in the thickness air-gap. The calculation method operates with complex currents in the serially connected stators winding. For the particular design of the engine and the current in winding calculates magnetic forces. Conclusion gives the recommendations for the selection of the material of the rotor disk. References 12, figures 3.*

**Key words:** axial arc-stator motor, magnetic forces, magnetic induction.

Надійшла 15.07.2015

Received 15.07.2015