

УДК 621.313

ЕНЕРГЕТИЧНІ ПОКАЗНИКИ ТОРЦЕВИХ ДУГОСТАТОРНИХ АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ З БІМЕТАЛЕВИМИ ДИСКОВИМИ РОТОРАМИ

О.М. Карлов, канд. техн. наук, **І.П. Кондратенко**, чл.-кор. НАН України, **Р.С. Крищук**, канд. техн. наук, **А.П. Ращепкін**, докт. техн. наук
Інститут електродинаміки НАН України,
пр. Перемоги, 56, Київ-57, 03057, Україна
e-mail: dep7ied@ukr.net

Представлено метод розрахунку енергетичних показників торцевого дугостаторного асинхронного двигуна (ТДАД) з біметалевим дисковим ротором. Він базується на математичній моделі електромагнітних параметрів двигуна з прийнятими допущеннями. Модель розроблено на основі системи рівнянь Максвелла з урахуванням лінійної швидкості обертання. Використовуючи вектор Умова-Пойнтінга та тривимірне представлення індукції магнітного поля в зазорі між магнітопроводами, виконано аналітичний розрахунок повної комплексної потужності. Виведено вирази для розрахунку головного комплексного опору двигуна, що включає взаємну міжфазну індуктивність. Представлено вирази для розрахунку електромагнітного моменту, корисної потужності, коефіцієнта корисної дії, коефіцієнта потужності. Метод дає змогу розрахувати енергетичні показники як при заданих комплексних амплітудах струму, так і напруги. Бібл. 5, рисунок, таблиця.

Ключові слова: торцевий дугостаторний асинхронний двигун, біметалевий дисковий ротор, енергетичні показники.

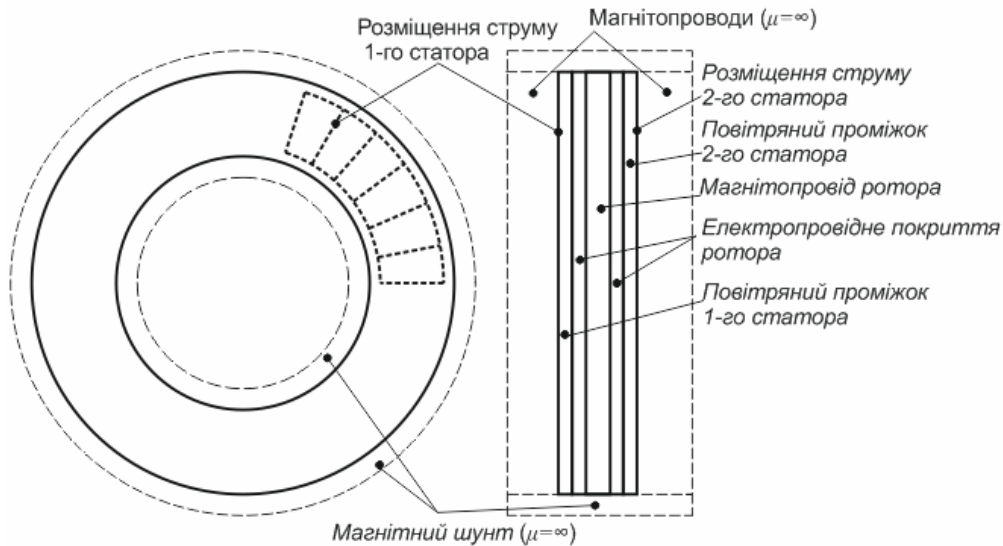
Вступ. Ця стаття є частиною роботи з розробки аналітичного методу розрахунку електромагнітних полів, енергетичних показників та електромагнітних зусиль у торцевих дугостаторних асинхронних двигунах (ТДАД) з біметалевими масивними дисковими роторами. Тут представлено розробку аналітичного методу розрахунку енергетичних показників, тоді як в [5] – аналітичний метод розрахунку електромагнітних полів ТДАД з біметалевим дисковим ротором.

Розроблений і представлений у статті метод планується використовувати при розробці безредукторного електроприводу кульових барабанних млинів теплових електростанцій. Відомо, що необхідна потужність такого електроприводу варіюється від 300 до 2000 кВт. Основними перевагами використання таких двигунів на кульових барабанних млинах є: відсутність редукторів із зубчастими передачами, простота конструкції, легкість в обслуговуванні та охолодженні, можливість розробки двигуна з кількома дисковими роторами та статорами, високий пусковий момент, керованість. Крім барабанних млинів ТДАД і метод його розрахунку можна застосувати в будь-якому іншому устаткуванні, де виникає доцільність встановлення такого двигуна.

Метою роботи є розробка аналітичного методу розрахунку для квазістаціонарного режиму енергетичних показників ТДАД з біметалевим дисковим ротором.

Моделльне представлення ТДАД показано на рисунку. Модель побудована на таких припущеннях: внутрішній та зовнішній радіуси ротора та магнітопроводу статора співпадають; за межами повітряного проміжку між статором та ротором знаходиться ідеальний ферромагнітний матеріал; дуговий статор двигуна моделюється шляхом розміщення обмотки лише на певній частині замкнутого по всьому колу магнітопроводу статора; магнітопроводи без пазів, витки кожного пазу розміщені на поверхні магнітопроводу у вигляді нескінченно тонких пучків струму; лобові частини обмотки також представлені у вигляді нескінченно тонких пучків струму на поверхні магнітопроводу; по обидва боки ротора статори вмикаються послідовно в мережу живлення. Між магнітопроводами протилежних статорів з ідентичними обмотками – тришаровий електропровідний масивний ротор, в якому збуджуються вихрові струми, що приводять його до руху.

У роботі [5] одержано вираз для розрахунку аксіальної складової індукції електромагнітного поля B_z у будь-якій точці зазору між магнітопроводами статора (рисунок)



$$B_z(\rho, \varphi, z) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \sum_{\eta=1}^{\infty} \tilde{B}_z K_{\eta} e^{-in\varphi}. \quad (1)$$

Тут $\tilde{B}_z(z)$ – перетворена інтегральними перетвореннями по азимутальній (перетворення Фур'є з періодом 2π) та радіальній (інтегральне перетворення в кінцевих межах [2]) координатах індукція магнітного поля; n – параметр перетворення по азимутальній координаті; φ – азимутальна координата; i – уявна одиниця;

$$K_{\eta} = (Y_n(\lambda_{n\eta} r_4) J_n(\lambda_{n\eta} \rho) - J_n(\lambda_{n\eta} r_4) Y_n(\lambda_{n\eta} \rho)); \quad (2)$$

$J_n(\cdot)$, $Y_n(\cdot)$ – функції Бесселя відповідно першого та другого роду; $\lambda_{n\eta}$ – власне число інтегрального перетворення в кінцевих межах, що знаходиться з рівняння

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

η – порядковий номер власного числа $\lambda_{n\eta}$ для певного параметра n ; r_3 та r_4 – відповідно менший та більший радіуси магнітопроводів (рисунок).

Електромагнітна потужність ТДАД знаходиться вектором Умова-Пойнтінга [1, 3]

$$S = \frac{1}{2} \int_{S_{nl}} \left[\vec{E} \times \vec{H}^* \right] dS, \quad (4)$$

де S_{nl} – площа, по нормалі до якої спрямований потік електромагнітного поля. При розрахунку ТДАД ця площа є поверхнею магнітопроводу статора з боку ротора і обмежується по радіусу лобовими частинами обмотки моделі (рисунок) – від r_1 до r_2 , а по азимутальній

координаті від $-\pi$ до π ; \vec{E} – вектор напруженості електричного поля; \vec{H}^* – спряжене значення вектора напруженості магнітного поля. До виразу (4) застосовуються граничні умови на поверхнях магнітопроводів [5]

$$H_{\rho} = -i_{\varphi}, \quad H_{\varphi} = i_{\rho} \quad (5)$$

– для правого статора (рисунок), для лівого статора

$$H_{\rho} = i_{\varphi}, \quad H_{\varphi} = -i_{\rho}. \quad (6)$$

Оскільки в методі розглядається лише z -складова магнітної індукції, виконаємо векторне

множення для z -складової $\left(\vec{E} \times \vec{H}^* \right)_z$ у виразі (4). З урахуванням (5) та (6) маємо запис, дійсний і для лівого, і для правого статора на поверхні магнітопроводу зі струмом:

$$S = \frac{1}{2} \int_{r_1}^{r_2} \int_{-\pi}^{\pi} \left(E_{\rho} i_{\varphi}^* + E_{\varphi} i_{\rho}^* \right) \rho d\varphi d\rho, \quad (7)$$

де E_{ρ} та E_{φ} – відповідно ρ та φ складова напруженості електричного поля; i_{ρ}^* та i_{φ}^* – комплексно спряжені значення ρ та φ складових струму на поверхні магнітопроводів.

Застосуємо до виразу (7) $\operatorname{div} \vec{i} = 0$ при умові $i_z = 0$:

$$S = \frac{1}{2} \int_{r_1}^{r_2} \int_{-\pi}^{\pi} \left(E_{\rho} i_{\rho}^* - E_{\varphi} \frac{\partial}{\partial \rho} \left(\rho \int_{\varphi} i_{\rho}^* d\varphi \right) \right) \rho d\varphi d\rho. \quad (8)$$

Після застосування інтегрування по частинах в (8) одержуємо

$$S = \frac{1}{2} \int_{r_1}^{r_2} \int_{-\pi}^{\pi} \left(\int_{\varphi} i_{\rho}^* d\varphi (\rho \operatorname{rot}_z \vec{E}) \right) \rho d\varphi d\rho. \quad (9)$$

З рівняння Максвела $\operatorname{rot} \vec{E} = -d\vec{B}/dt$ для z -складової ротора напруженості електричного поля, а також враховуючи, що $\partial B_z / \partial t = i\omega B_z$ для квазістаціонарного режиму, визначення потужності зведемо до такого виразу:

$$S = \frac{i\omega}{2} \int_{r_1}^{r_2} \int_{-\pi}^{\pi} \left(\rho i_{\rho}^* \int_{\varphi} B_z d\varphi \right) \rho d\varphi d\rho, \quad (10)$$

де ω – кутова частота. Застосувавши до інтегралу $\int_{\varphi} B_z d\varphi$ одночасно інтегральне перетворення Фур'є [5] та обернене до його перетворення, маємо

$$S = \frac{i\omega}{2} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \int_{r_1}^{r_2} \frac{\bar{B}_z}{in} \rho^2 \int_{-\pi}^{\pi} i_{\rho}^* e^{-in\varphi} d\varphi d\rho, \quad (11)$$

де \bar{B}_z – перетворена по координаті φ індукція магнітного поля. Інтеграл $\int_{-\pi}^{\pi} i_{\rho}^* e^{-in\varphi} d\varphi$ є спряженим значенням дискретного перетворення Фур'є для струму, тобто

$$\frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} i_{\rho}^* e^{-in\varphi} d\varphi = \bar{i}_{\rho}^* = \bar{i}_{\rho 1}^* \frac{\Theta_{\rho}}{2\pi\rho}, \quad (12)$$

де $\Theta_{\rho} = [\Theta(\rho - r_1) - \Theta(\rho - r_2)]$, $\Theta(\cdot)$ – одинична ступінчаста функція. Вводячи в (11) значення $\bar{i}_{\rho 1}^*$ із (12), вираз для визначення потужності на поверхні магнітопроводу статора ТДАД запишемо таким чином:

$$S = -\frac{i\omega}{2} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \left(\frac{\bar{i}_{\rho 1}^*}{in} \right)^* \int_{r_1}^{r_2} \bar{B}_z \rho d\rho, \quad (13)$$

де

$$\bar{i}_{\rho 1} = I_A w_A K_A + I_B w_B K_B - I_C w_C K_C. \quad (14)$$

Тут вирази для обмоткових коефіцієнтів K_A , K_B , K_C для дво- та одношарової обмоток є в [5]; $I_{A(B,C)}$ – комплексне значення амплітуди струму фази $A(B,C)$; $w_{A(B,C)}$ – число витків у котушках обмотки відповідної фази.

В (13) використано перетворене по азимутальній координаті значення осьової складової магнітної індукції \bar{B}_z , яке представимо як обернене перетворення інтегрального перетворення в скінченних межах по радіальній координаті:

$$\bar{B}_z(\rho, z) = \sum_{\eta=1}^{\infty} \tilde{B}_z(z) K_{\eta}. \quad (15)$$

Тоді

$$S = -\frac{i\omega}{2} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \sum_{\eta=1}^{\infty} \left(\frac{\bar{i}\rho_1}{in} \right)^* \int_{r_1}^{r_2} \rho \tilde{B}_z C_{n\eta} K_{\eta} d\rho, \quad (16)$$

де з'являється нормуючий множник інтегрального перетворення [4]

$$C_{n\eta} = \frac{2(J_n^2(\lambda_{n\eta}r_3) - J_n^2(\lambda_{n\eta}r_4))}{\pi^2 \lambda_{n\eta}^2 J_n^2(\lambda_{n\eta}r_3)}. \quad (17)$$

Отже, повна потужність для кожного статора (рисунок) визначається виразом (15) на поверхні магнітопроводу статора. Оскільки аналітичний розрахунок виконано для трифазного двигуна, то з іншого боку ця потужність для будь-якого трифазного навантаження визначається за виразом

$$S = \frac{1}{2} \left(U_A I_A^* + U_B I_B^* + U_C I_C^* \right), \quad (18)$$

де U_A, U_B, U_C – комплексні амплітудні значення фазної напруги обмотки. В свою чергу фазна напруга записується через комплексний опір власної та взаємної індуктивності:

$$U_A = I_A z_{AA} + I_B z_{AB} + I_C z_{AC}; \quad (19)$$

$$U_B = I_A z_{BA} + I_B z_{BB} + I_C z_{BC}; \quad (20)$$

$$U_C = I_A z_{CA} + I_B z_{CB} + I_C z_{CC}. \quad (21)$$

Комплексний опір $z_{AA} \dots z_{CC}$ одержуємо з виразу повної потужності (15), розписавши його за рівнянням (18). Таким чином, вираз (15) набуде такого вигляду:

$$S = \frac{1}{2} \left(-i\omega I_A w_A \sum_{n=-\infty}^{\infty} \sum_{\eta=1}^{\infty} \left(\frac{K_A}{in} \right)^* \tilde{B}_z C_{n\eta} \int_{r_1}^{r_2} \rho K_{\eta} d\rho - i\omega I_B w_B \sum_{n=-\infty}^{\infty} \sum_{\eta=1}^{\infty} \left(\frac{K_B}{in} \right)^* \tilde{B}_z C_{n\eta} \int_{r_1}^{r_2} \rho K_{\eta} d\rho + \right. \\ \left. + i\omega I_C w_C \sum_{n=-\infty}^{\infty} \sum_{\eta=1}^{\infty} \left(\frac{K_C}{in} \right)^* \tilde{B}_z C_{n\eta} \int_{r_1}^{r_2} \rho K_{\eta} d\rho \right). \quad (22)$$

Кожний доданок у (22), очевидно, є добутком напруги й струму відповідної фази. Для того щоб із (22) одержати комплексний опір двигуна, необхідно вираз (22) розписати виразами (19)...(21). Тоді комплексний опір $z_{AA} \dots z_{CC}$ запишеться з виразу (22) таким чином:

$$z_{AA} = -i\omega w_A^2 \sum_{n=-\infty}^{\infty} \sum_{\eta=1}^{\infty} \left(\frac{K_A}{in} \right)^* \tilde{b}_z C_{n\eta} K_A; \quad z_{AB} = -i\omega w_A w_B \sum_{n=-\infty}^{\infty} \sum_{\eta=1}^{\infty} \left(\frac{K_A}{in} \right)^* \tilde{b}_z C_{n\eta} K_B; \\ z_{AC} = i\omega w_A w_C \sum_{n=-\infty}^{\infty} \sum_{\eta=1}^{\infty} \left(\frac{K_A}{in} \right)^* \tilde{b}_z C_{n\eta} K_C; \quad (23)$$

$$z_{BA} = -i\omega w_B w_A \sum_{n=-\infty}^{\infty} \sum_{\eta=1}^{\infty} \left(\frac{K_B}{in} \right)^* \tilde{b}_z C_{n\eta} K_A; \quad z_{BB} = -i\omega w_B^2 \sum_{n=-\infty}^{\infty} \sum_{\eta=1}^{\infty} \left(\frac{K_B}{in} \right)^* \tilde{b}_z C_{n\eta} K_B; \\ z_{BC} = i\omega w_B w_C \sum_{n=-\infty}^{\infty} \sum_{\eta=1}^{\infty} \left(\frac{K_B}{in} \right)^* \tilde{b}_z C_{n\eta} K_C; \quad (24)$$

$$z_{CA} = i\omega w_C w_A \sum_{n=-\infty}^{\infty} \sum_{\eta=1}^{\infty} \left(\frac{K_C}{in} \right)^* \tilde{b}_z C_{n\eta} K_A; \quad z_{CB} = i\omega w_C w_B \sum_{n=-\infty}^{\infty} \sum_{\eta=1}^{\infty} \left(\frac{K_C}{in} \right)^* \tilde{b}_z C_{n\eta} K_B; \\ z_{CC} = -i\omega w_C^2 \sum_{n=-\infty}^{\infty} \sum_{\eta=1}^{\infty} \left(\frac{K_C}{in} \right)^* \tilde{b}_z C_{n\eta} K_C, \quad (25)$$

де

$$\tilde{b}_z = \frac{\tilde{B}_z}{\tilde{i}_{\rho 1}} \int_{r_1}^{r_2} \rho K_{\eta} d\rho. \quad (26)$$

Опір, розрахований за формулами (23)...(25), включає в себе втрати на диференціальне розсіювання та розсіювання лобових частин, але не враховує пазове розсіювання та активний опір провідників статора, які розраховуються відомими методами (Копил) додатково. З урахуванням активного опору провідників фази r_w й індуктивного опору розсіювання пазів фази x_s . r_w та x_s вирази (19)...(21) для напруги через опір та струм переписуться так:

$$U_A = I_A(z_{AA} + r_w + x_s) + I_B z_{AB} + I_C z_{AC}; \quad (27)$$

$$U_B = I_A z_{BA} + I_B(z_{BB} + r_w + x_s) + I_C z_{BC}; \quad (28)$$

$$U_C = I_A z_{CA} + I_B z_{CB} + I_C(z_{CC} + r_w + x_s). \quad (29)$$

Розрахунок опору дає змогу розрахувати енергетичні показники ТДАД як при заданих комплексних амплітудних значеннях струму, так і комплексних амплітудних значеннях напруги.

Момент для одного статора ТДАД знаходиться шляхом інтегрування добутку сили, що визначається як $i_{\rho}^* B_z$ за площиною $\varphi O \rho$, на радіус ρ :

$$M = \operatorname{Re} \left[\frac{1}{2} \int_{-\pi r_3}^{\pi r_4} i_{\rho}^* B_z \rho \rho d\varphi d\rho \right]. \quad (30)$$

Виконуючи інтегральне перетворення у ряди Фур'є одночасно для індукції B_z й для спряженого струму i_{ρ}^* (12) та одночасно обернене до інтегрального перетворення [5] по азимутальній координаті, маємо

$$M = \operatorname{Re} \left[\frac{1}{2} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \bar{B}_z \int_{r_3}^{r_4} \tilde{i}_{\rho 1}^* \Theta_{\rho} \rho d\rho \right], \quad (31)$$

де \bar{B}_z – перетворене по азимутальній координаті значення індукції магнітного поля. Тоді, виконавши інтегральне перетворення у ряди по радіальній координаті одночасно для індукції \bar{B}_z й для спряженого струму \tilde{i}_{ρ}^* [5] та одночасно обернене до інтегрального перетворення [5] по радіальній координаті (15), маємо кінцевий вираз розрахунку моменту для одного статора

$$M = \frac{1}{2} \operatorname{Re} \left[\sum_{n=-\infty}^{\infty} \sum_{\eta=1}^{\infty} \tilde{B}_z \tilde{i}_{\rho 1}^* \int_{r_1}^{r_2} \rho K_{\eta} d\rho \right], \quad (32)$$

в якому індукція \tilde{B}_z визначена на поверхні статора в повітряному проміжку двигуна.

Тоді механічна потужність машини, активна потужність, коефіцієнт корисної дії, коефіцієнт потужності, повна потужність фаз розраховуються відповідно

$$P_2 = 2\omega M(1-s)C_s/2p; \quad P_{A(B,C)} = \operatorname{Re}(S_{A(B,C)}); \quad (33)$$

$$KKД = P_2/P_1; \quad \cos \varphi_{A(B,C)} = \operatorname{Re}[S_{A(B,C)}] / |S_{A(B,C)}|; \quad (34)$$

$$S_A = U_A I_A^*/2; \quad S_B = U_B I_B^*/2; \quad S_C = U_C I_C^*/2, \quad (35)$$

де $2p$ – полюси обмотки статора, кількість яких може бути непарною в двошаровій дугостаторній (розімкненій) обмотці з наполовину заповненими пазами крайніх полюсів.

На основі розробленого аналітичного методу розрахунку складено програму для чисельного розрахунку енергетичних показників ТДАД з біметалевим дисковим ротором. При розробці програми розрахунку достатньо обмежитися кількістю чисел n перетворення Фур'є в межах ($n = -8p/C_s \dots 8p/C_s$), щоб охопити вищі гармоніки, включаючи сьому, а також субгармоніки, які необхідні для розрахунку ТДАД [5]. Кількість гармонік η радіальної координати достатньо брати 35 для задовільної точності розрахунку. При розрахунку ТДАД, в

якому обмотка замкнена ($C_s = 1$), основна гармоніка розраховується при $n = p$, p 'ята й сьома – відповідно $n = -5p$, $n = 7p$ і т.д., а субгармоніки не несуть впливу.

При порівнянні результатів розрахунку з методом скінченних елементів проявляється вплив умови розширення магнітопроводів за межі лобових частин обмотки до розмірів ротора. Тому при використанні розробленого в статті методу рекомендовано лобові частини струму (рисунок) розміщувати на товщину немагнітного проміжку далі від реального радіуса магнітопроводу статора. У такому разі досягається мінімальне відхилення результату розрахунку.

У таблиці наведено розраховані енергетичні показники ТДАД з біметалевим дисковим ротором для двох статорів, вхідні дані якого є в [5], де було виконано розрахунок магнітного поля такого двигуна, з радіусами магнітопроводу статора $r_1 = 1,9$ м, $r_2 = 2,9$ м. При розрахунку пазового розсіювання розміри прямокутних пазів, закритих клинком товщиною 5 мм, складають $11,4 \times 34,2$ мм. Переріз провідника – $34,1$ мм². При цьому густина струму в провідниках – $5,63$ А/мм².

Параметр	Величина	Параметр	Величина
M , Н м	479255	z_{AA} , Ом	$3,47 + 3,63 i$
U_A , В	$2737,4 + 3359,8 i$	z_{AB} , Ом	$-4,41 + 0,65 i$
U_B , В	$1547,6 - 4106,7 i$	z_{AC} , Ом	$1,24 - 3,82 i$
U_C , В	$-4343,1 + 623,4 i$	z_{BA} , Ом	$1,16 - 3,95 i$
S_A , ВА	$373164 + 458011 i$	z_{BB} , Ом	$3,47 + 3,63 i$
S_B , ВА	$379345 + 462612 i$	z_{BC} , Ом	$-4,53 + 0,60 i$
S_C , ВА	$369621 + 470236 i$	z_{CA} , Ом	$-4,53 + 0,60 i$
ККД, %	79, 5	z_{CB} , Ом	$1,24 - 3,82 i$
P_2 , Вт	892083	z_{CC} , Ом	$3,36 + 3,83 i$
$\cos \varphi_{A(B,C)}$	0,63	$r_w + x_s i$, Ом	$1,113 + 2,205 i$

Висновок. Розроблено метод розрахунку енергетичних показників торцевого дугостаторного асинхронного двигуна з дисковим біметалевим ротором, який на відміну від інших враховує лінійну швидкість обертання ротора, тривимірний розподіл індукції магнітного поля, несиметричне положення ротора в зазорі між магнітопроводами статорів. Метод також враховує власну індуктивність кожної фази та взаємну індуктивність між фазами, диференціальне розсіювання. Лобове розсіювання враховано наявністю азимутальної складової струму статора. Розроблена комп'ютерна програма на основі методу розрахунку дає змогу швидше виконувати багатоваріантний розрахунок конструкції ТДАД порівняно з чисельним методом скінченних елементів.

1. Гольдштейн Л.Д., Зернов Н.В. Электромагнитные поля и волны. – М: Сов. радио, 1971. – 662 с.
2. Кошляков Н.С., Глинер Э.Б., Смирнов М.М. Уравнения в частных производных математической физики. – М.: Высш. шк., 1970. – 712 с.
3. 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)
4. Мартыненко Н.А., Пустыльников Л.М. Конечные интегральные преобразования и их применение к исследованию систем с распределенными параметрами. – М.: Наука, 1986. – 304 с.
5. Ращепкин А.П., Карлов О.М., Крищук Р.С. Структура магнітного поля торцевого дугостаторного асинхронного двигуна з дисковим біметалевим масивним ротором // Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України: Зб. наук. пр. – К.: ІЕД НАНУ, 2017. – Вип. 47. – С. 28–36.

УДК 621.313

А.Н. Карлов, канд. техн. наук, **И.П. Кондратенко**, чл.-корр. НАН Украины, **Р.С. Крищук**, канд. техн. наук, **А.П. Ращепкин**, докт. техн. наук
Институт электродинамики НАН Украины,
пр. Победы, 56, Киев, 03057, Украина

Энергетические показатели торцевых дугостаторных асинхронных двигателей с биметаллическими дисковыми роторами

Представлен метод расчета энергетических показателей торцевого дугостаторного асинхронного двигателя (ТДАД) с биметаллическим дисковым ротором. Метод расчета базируется на математической модели электромагнитных параметров двигателя с принятыми допущениями. Модель разработана на основе системы уравнений Максвелла с учетом линейной скорости вращения. Выполнен аналитический расчет полной комплексной мощности путем использования вектора Умова-Пойнтинга и трехмерного представления индукции магнитного поля в зазоре между статором и ротором. Разработаны выражения для расчета главного комплексного сопротивления электрической схемы двигателя, которые включают взаимную межфазную индуктивность. Представлены выражения для расчета электромагнитного момента, полезной мощности, коэффициента полезного действия, коэффициента мощности. Метод позволяет рассчитать энергетические показатели при заданных комплексных амплитудах и тока, и напряжения. Библиография: 5, рисунок, таблица.

Ключевые слова: торцевой дугостаторный асинхронный двигатель, биметаллический дисковый ротор, энергетические показатели.

O. Karlov, I. Kondratenko, R. Kryshchuk, A. Rashchepkin

Institute of Electrodynamics The National Academy of Sciences of Ukraine,
Peremohy, 56, Kyiv, 03057, Ukraine

Energy parameters of axial arc-stator motors with bimetallic disk rotors

The method of calculating the energy indicators of an axial arc-stator induction motor (AAIM) with a bimetal disk rotor is presented. The mathematical model of the motor with accepted assumptions is presented. The model is developed on the basis of Maxwell's equations, takes into account linear speed of rotation. Using the Poynting theorem and three-dimensional representation of the magnetic field induction in the gap of motor, the analytical calculation of complete integrated power was performed. Expressions for calculating the main complex resistance of the engine, which includes the mutual interphase inductance, are done. Expressions for calculating the electromagnetic moment, the useful power, the efficiency factor, the power factor are presented. The method allows calculating energy indices both at given complex amplitudes of a current, and a voltage. References 5, figure, table.

Key words: axial arc-stator motor, bimetallic disk rotor, power parameters.

Надійшла 23.10.2017

Received 23.10.2017

УДК 621.313

МЕХАНІЧНІ ТА ВІБРОМЕХАНІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ НАТИСКНИХ ПАЛЬЦІВ І ПЛИТ ОСЕРДЯ СТАТОРА ТУРБОГЕНЕРАТОРА

К.А. Кучинський, докт. техн. наук, **В.О. Тітко**, канд. техн. наук, **М.С. Гуторова**, канд. техн. наук, **В.А. Мистецький**, інж.

Інститут електродинаміки НАН України,
пр. Перемоги, 56, Київ-57, 03057, Україна
e-mail: misteckiyviktory@ukr.net

Розроблено модель для розрахунку механічних характеристик у натискних пальцях і плитах при дефектах пресування осердя статора турбогенератора в зубцевій зоні, в тому числі при відгині пальців. Модель дає змогу визначити частоту коливань системи у початковий момент раптового виникнення дефектів, а також характеристики при сталому режимі роботи. Проведено тестові розрахунки механічних характеристик у пальцях і плитах на ділянці їх дотику при відгині пальця. Бібліографія: 10, рис. 6, таблиця.

Ключові слова: турбогенератор, моделювання, шихтований магнітопровід, осердя статора, зубцева зона, натискні пальці, механічні напруження, зусилля, лінійне видовження.

Постановка задачі. Відомо, що майже все генеруюче обладнання ТЕС морально і фізично застаріле. Надійність такого обладнання зменшується. Найбільш проблемним вузлом є шихтоване осердя статора генератора, яке має складну систему кріплення і в процесі експлуатації внаслідок дії термомеханічних сил ця система змінює свій механічний стан, ослаблюючи чи, навпаки, посилюючи зусилля пресування листів заліза осердя статора.