

МОДЕЛЮВАННЯ І РОЗПОДІЛ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ СИЛ, ЩО ДІЮТЬ НА ЗУБЦІ ТА СТЕРЖНІ ОБМОТКИ СТАТОРА ТУРБОГЕНЕРАТОРА

О.І.Титко, чл.-кор. НАН України, **А.М.Мельник**
 Інститут електродинаміки НАН України,
 пр. Перемоги, 56, Київ-57, 03680, Україна.
 e-mail: ied10@ukr.net

Представлено математичні моделі для визначення зусиль, що діють на стержні обмотки статора потужного турбогенератора. На основі розроблених моделей досліджено електромагнітні сили на коронках зубців та електродинамічні сили, що діють в пазу на провідники однієї та різних фазних обмоток, за допомогою аналітичного та чисельного методів розрахунку. Показано, що амплітуда зусиль, що діють в пазу зі стержнями однієї фазної обмотки більше в 1,33 рази, ніж в пазах зі стержнями різномісних фаз. Наведено результати експериментальних досліджень вібрації осердя статора фізичної моделі. Бібл. 9, рис. 7, табл. 2.

Ключові слова: математична модель, обмотка статора, зубці статора, турбогенератор, фізична модель, електродинамічні і електромагнітні сили, вібрація.

Вступ. У процесі роботи генератора перетворення електричної енергії супроводжується шумом та вібрацією. Особливо це стосується динамічних процесів при появі пошкодження вузлів кріплення конструкції статора [2]. Внаслідок цього виникають віброакустичні коливання під дією змінних сил, вібраційних та ударних навантажень, які викликають деформацію елементів конструкції статора електричної машини [6]. Ці сили можуть мати різну природу: електромагнітну, механічну або аеродинамічну. Електромагнітні сили діють у повітряному проміжку між статором та ротором і мають характер обертових або пульсуючих силових ліній, амплітуда та частота яких залежить від конструкції статора та ротора. Вивченню електродинамічних сил, що діють на стержні обмотки, присвячено ряд наукових праць [3, 4, 9]. У даній роботі розглянуто розподіл по колу статора сил, що діють на стержні обмотки з неповним кроком, у взаємозв'язку з силами, які діють на зубці осердя статора та розподілені по розточці статора.

Як відомо, обертовий момент електричної машини створюється силою, що прикладена до зубців статора [7]. На стержень, що розташований в пазу, діє лише невелика частина цієї сили, яка відповідає радіальному магнітному полю в пазу. Радіальне поле, направлене вздовж паза, на відміну від тангенціального поля, незначне. Окрім дії цієї тангенціальної сили на стержень діє також радіальна сила. Вона викликана поперечним полем, яке створюється в пазу струмом у провідниках. Під дією цієї сили стержень притягується до дна паза. Тому надійну роботу електричних машин, а особливо турбогенераторів можливо забезпечити лише за умови якісної постановки теоретичних та експериментальних досліджень динаміки стану обмотки статора. При розгляді статорних обмоток необхідно враховувати сили, що викликані взаємодією струмів у лобових частинах та на виході з паза; сили, які діють на зубці статора, та сили, що діють на пазову частину обмотки в радіальному напрямі.

Мета роботи. З огляду на вищесказане, та продовжуючи дослідження розподілу електромагнітних зусиль в радіальному напрямі, що описано в роботі [5], в даній статті ставиться мета розробки математичної моделі та визначення радіальних електродинамічних сил, що діють безпосередньо на стержні обмотки статора, та радіальних електромагнітних сил, що виникають на коронках зубців. Реалізація поставленої задачі досягається із застосуванням чисельного та аналітичного методів розрахунку.

Об'єктом дослідження є потужний турбогенератор типу ТГВ-200-2 з наступними номінальними параметрами: активна потужність $P_n = 200$ МВт, номінальний струм $I_{гн} = 8625$ А, номінальна

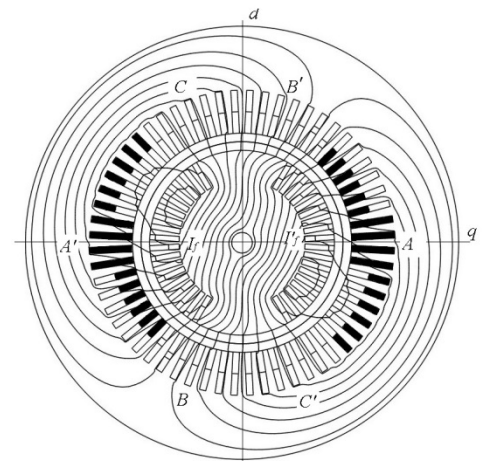


Рис. 1

напруга $U_{I_n} = 15750$ В, номінальний струм збудження $I_{fn} = 1880$ А, коефіцієнт потужності $\cos\varphi = 0,85$, число пар полюсів $p = 1$, число пазів статора $Z_1 = 60$, число пазів ротора $Z_2 = 36$, діаметр ротора $D_2 = 1075$ мм, діаметр розточки статора $D_1 = 1275$ мм, число послідовних витків на фазу $N_1 = 10$, основний повітряний проміжок $\delta = 100$ мм. На рис. 1 показано загальний вигляд об'єкта, що досліджується, разом з фазними зонами обмотки статора $A-A'$, $B-B'$, $C-C'$.

Математична модель. Величина електродинамічної сили в пазу статора, що прикладена безпосередньо на стержень обмотки зі струмом, обчислюється за відомою формулою

$$\vec{F} = \oint_S [\vec{J} \times \vec{B}] dS, \quad (1)$$

де J – густина струму в провіднику, B – магнітна індукція.

Густина струмів фаз обмотки статора

$$J_{cA} = J_m \cos \omega_1 t, \quad J_{cB} = J_m \cos \left(\omega_1 t + \frac{2\pi}{3} \right), \quad J_{cC} = J_m \cos \left(\omega_1 t + \frac{4\pi}{3} \right), \quad (2)$$

де J_m – амплітуда, що визначається значенням фазного струму статора і площею перетину провідників фази, $\omega_1 = 2\pi f_1$ – кутова частота струму у часі.

Складові вектора магнітної індукції B_x і B_y у заданій точці з координатами x , y визначаються за співвідношеннями через знайдені функції векторного магнітного потенціалу [1]

$$B_x = \frac{\partial A}{\partial y}, \quad B_y = -\frac{\partial A}{\partial x}. \quad (3)$$

Нормальна і тангенціальна складові магнітної індукції B_n, B_τ відповідно

$$B_n = B_y \cos\alpha + B_x \sin\alpha = (y \cdot B_y + x \cdot B_x) / R_\delta, \quad B_\tau = B_x \cos\alpha + B_y \sin\alpha = (y \cdot B_x - x \cdot B_y) / R_\delta, \quad (4)$$

де R_δ – радіус розточки статора.

Електромагнітну силу можна виразити через натяг T_n деякої поверхні S , що охоплює об'єм V ,

$$F_{em} = \oint_S \vec{T}_n dS. \quad (5)$$

Тому сила, що діє на зубець, визначається проекцією нормальної складової тензора магнітного натягу T_n , що характеризує густину електромагнітних сил

$$T_n = (B_n^2 - B_\tau^2) / 2\mu_0, \quad (6)$$

де μ_0 – магнітна проникність.

Відповідно до (1) розрахунок магнітного поля в пазу та сил, що діють на стержні обмотки статора, проводився за допомогою аналітичного методу розрахунку. Розрахунковим режимом, в якому розглядаються силові взаємодії, обрано номінальний режим. Розглянемо 1-й варіант, коли в пазу розташовано два стержні, що належать до однієї фазної обмотки, а саме $A-A$, $B-B$, $C-C$. Густина струмів у фазах та магнітна індукція у цьому випадку мають вигляд

$$J_A = \frac{2I_{st}}{bh} \cos\omega t, \quad J_B = \frac{2I_{st}}{bh} \cos(\omega t - 120^\circ), \quad J_C = \frac{2I_{st}}{bh} \cos(\omega t - 240^\circ), \quad (7)$$

$$B_A = \mu_0 \frac{2I_{st}}{bh} \cos\omega t, \quad B_B = \mu_0 \frac{2I_{st}}{bh} \cos(\omega t - 120^\circ), \quad B_C = \mu_0 \frac{2I_{st}}{bh} \cos(\omega t - 240^\circ), \quad (8)$$

де b, h – відповідно ширина та висота паза.

Підставивши отримані вирази (7) і (8) у рівняння (1) та проінтегрувавши за площею паза в межах $0 \leq y \leq h$, отримаємо значення повної сили, що діє в пазу на обидва стержні фази A, B і C . Для фаз X, Y і Z сили будуть такі ж самі, але з протилежним знаком

$$F_A = \int_0^h \mu_0 \left(\frac{2I_{st}}{bh} \right)^2 \cos^2 \omega t dx = \mu_0 \frac{I_{st}^2}{b} (1 + \cos 2\omega t), \quad (9)$$

$$F_B = \int_0^h \mu_0 \left[\frac{2I_{st}}{bh} \cos(\omega t - 120^\circ) \right]^2 dx = \mu_0 \frac{I_{st}^2}{b} [1 + \cos 2(\omega t - 120^\circ)], \quad (10)$$

$$F_C = \int_0^h \mu_0 \left[\frac{2I_{st}}{bh} \cos(\omega t - 240^\circ) \right]^2 dx = \mu_0 \frac{I_{st}^2}{b} [1 + \cos 2(\omega t - 240^\circ)], \quad (11)$$

$$F_{\frac{X}{\bar{X}}} = -\mu_0 \frac{I_{st}^2}{b} (1 + \cos 2\omega t), \quad F_{\frac{Y}{\bar{Y}}} = \frac{\mu_0 I_{st}^2}{b} [1 + \cos 2(\omega t - 300^\circ)], \quad F_{\frac{Z}{\bar{Z}}} = \frac{\mu_0 I_{st}^2}{b} [1 + \cos 2(\omega t - 420^\circ)]. \quad (12)$$

Ці вирази стосуються сил, які діють на обидва стержні обмотки, що належать одній фазі. На це вказують наведені позначення індексів для сил у виразах (7)–(12).

Далі приведемо вирази для розрахунку електродинамічних сил за умови, коли в пазу розташовано два стержні, що належать до різних фаз. Для фазних зон X – C густини струмів та магнітні індукції відповідно у нижньому та верхньому стержнях обчислюються

$$J_X = \frac{2I_{st}}{bh} \cos(\omega t - 180^\circ), \quad J_C = \frac{2I_{st}}{bh} \cos(\omega t - 240^\circ), \quad (13)$$

$$B_X = \frac{2\mu_0 I_{st} y}{bh} \cos(\omega t - 180^\circ), \quad B_C = \frac{\mu_0 I_{st}}{b} \cos(\omega t - 180^\circ) + \frac{2\mu_0 I_{st} (y - h/2)}{bh} \cos(\omega t - 240^\circ). \quad (14)$$

Підставивши вирази (13) та (14) у рівняння (1), отримаємо

$$f_X = \frac{2I_{st} \cos(\omega t - 180^\circ)}{bh} \cdot \frac{2\mu_0 I_{st} y}{bh} \cos(\omega t - 180^\circ) = \mu_0 \left[\frac{2I_{st}}{bh} \cos(\omega t - 180^\circ) \right]^2 \cdot y, \quad (15)$$

$$f_C = \frac{2\mu_0}{h} \left(\frac{I_{st}}{b} \right)^2 \cos(\omega t - 240^\circ) \left[\cos(\omega t - 180^\circ) + \cos(\omega t - 240^\circ) \frac{1}{h} (2y - 1) \right]. \quad (16)$$

Проінтегруємо вирази (15) та (16) по висоті паза в межах $0 \leq y \leq h/2$ для визначення сили F_X , що діє на нижній стержень фази X , і $h/2 \leq y \leq h$ – для сили F_C , що діє на верхній стержень фази C ,

$$F_X = \int_S f_X dx dy = \frac{\mu_0 I_{st}^2}{2b} \cos^2(\omega t - 180^\circ) = \frac{\mu_0 I_{st}^2}{4b} (1 + \cos 2\omega t), \quad (17)$$

$$F_C = \int_S f_C dx dy = \frac{\mu_0 I_{st}^2}{4b} \left(2 + \frac{1}{2} \cos 2\omega t + \frac{3\sqrt{3}}{2} \sin 2\omega t \right). \quad (18)$$

Повна сила, що діє в пазу з врахуванням силових взаємодій верхнього та нижнього стержнів, дорівнює

$$F_{\frac{X}{\bar{C}}} = F_X + F_C = \frac{3\mu_0 I_{st}^2}{4b} [1 + \cos(2\omega t - 60^\circ)]. \quad (19)$$

Провівши аналогічні обчислення, впевнимися, що значення сил є однаковими для таких варіантів розташування стержнів у пазу: 1) A – Z , B – X , Y – A , X – C та 2) C – Y , Z – B . Індексми 1 та 2 позначено відповідно нижній та верхній стержні. Остаточні вирази для сил наведено нижче.

Варіант 1:
$$F_{A1} = \frac{\mu_0 I_{st}^2}{4b} (1 + \cos 2\omega t), \quad F_{Z2} = \frac{\mu_0 I_{st}^2}{4b} \left(2 + \frac{1}{2} \cos 2\omega t + \frac{3\sqrt{3}}{2} \sin 2\omega t \right), \quad (20)$$

$$F_{B1} = \frac{\mu_0 I_{st}^2}{4b} \left(1 - \frac{1}{2} \cos 2\omega t - \frac{\sqrt{3}}{2} \sin 2\omega t \right), \quad F_{X2} = \frac{\mu_0 I_{st}^2}{4b} (2 + 2\cos 2\omega t - \sqrt{3} \sin 2\omega t), \quad (21)$$

$$F_{\frac{A}{\bar{Z}}} = F_{A1} + F_{Z2} = \frac{3\mu_0 I_{st}^2}{4b} [1 + \cos(2\omega t - 60^\circ)], \quad F_{\frac{B}{\bar{X}}} = F_{B1} + F_{X2} = \frac{3\mu_0 I_{st}^2}{4b} [1 + \cos(2\omega t - 60^\circ)], \quad (22)$$

$$F_{Y1} = \frac{\mu_0 I_{st}^2}{4b} \left(1 - \frac{1}{2} \cos 2\omega t - \frac{\sqrt{3}}{2} \sin 2\omega t \right), \quad F_{A2} = \frac{\mu_0 I_{st}^2}{4b} (2 + 2\cos 2\omega t - \sqrt{3} \sin 2\omega t), \quad (23)$$

$$F_{\frac{Y}{\bar{A}}} = F_{Y1} + F_{A2} = \frac{3\mu_0 I_{st}^2}{4b} [1 + \cos(2\omega t - 60^\circ)]. \quad (24)$$

Варіант 2:

$$F_{C1} = \frac{\mu_0 I_{st}^2}{4b} \left(1 - \frac{1}{2} \cos 2\omega t + \frac{\sqrt{3}}{2} \sin 2\omega t \right), \quad F_{Y2} = \frac{\mu_0 \cdot I_{st}^2}{4 \cdot b} \cdot (2 + 2 \cos 2\omega t + \sqrt{3} \sin 2\omega t), \quad (25)$$

$$F_{Z1} = \frac{\mu_0 I_{st}^2}{4b} \left(1 - \frac{1}{2} \cos 2\omega t + \frac{\sqrt{3}}{2} \sin 2\omega t \right), \quad F_{B2} = \frac{\mu_0 I_{st}^2}{4b} \left(2 - \frac{5}{2} \cos 2\omega t - \frac{\sqrt{3}}{2} \sin 2\omega t \right), \quad (26)$$

$$F_{\frac{C}{Y}} = F_{C1} + F_{Y2} = \frac{3\mu_0 I_{st}^2}{4b} (1 + \cos 2\omega t), \quad F_{\frac{Z}{B}} = F_{Z1} + F_{B2} = \frac{3\mu_0 I_{st}^2}{4b} (1 - \cos 2\omega t). \quad (27)$$

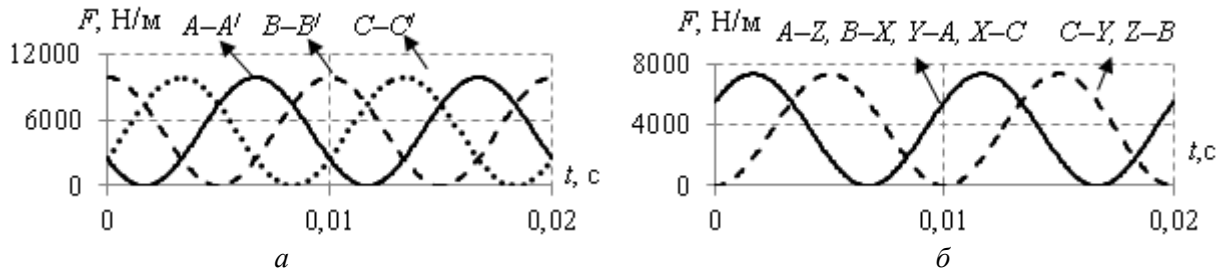


Рис. 2

На основі розрахунків, проведених у відповідності з виразами (19–27), побудовано часові залежності сил. На рис. 2 показано розподіл електродинамічних сил у часі при розташуванні в пазу двох стержнів, що належать: *a* – до

Таблиця 1

Кут $\omega t, \circ$	$F_m, \text{Н/м}$				
	<i>A–Y, Z–B</i>	<i>A–Z, B–X, Y–A, X–C</i>	<i>A–A, X–X</i>	<i>B–B, Y–Y</i>	<i>C–C, Z–Z</i>
0	0	5535,119	9840,212	2460,053	2460,053
30	1845,04	7380,159	7380,159	0	7380,159
60	5535,119	5535,119	2460,053	2460,053	9840,212
90	7380,159	1845,04	0	7380,159	7380,159
120	5535,119	0	2460,053	9840,212	2460,053
150	1845,04	1845,04	7380,159	7380,159	0
180	0	5535,119	9840,212	2460,053	2460,053

однієї фази, *b* – до різнойменних фаз. Порівняння цих графіків показує, що амплітуда максимальних зусиль, які діють в пазу з провідниками однієї фазної обмотки в 1,33 разів більша за амплітуду сил, що діють на провідники різних фаз. Так, максимальні амплітуди сил у першому випадку складають $F_{max} = 9840,21 \text{ Н/м}$, у другому – $F_{max} = 7380,16 \text{ Н/м}$. У табл. 1 наведено амплітудні значення електродинамічних сил F_m , що діють у пазу на провідники обмотки статора при різних кутах зсуву ωt .

Відповідно до (1)–(6) з використанням чисельних методів, реалізованих у програмному середовищі Comsol Multiphysics [8], обчислювалися електромагнітні сили, що діють на коронках зубців вздовж розточки статора. Розрахунки проведено для номінального режиму генератора в заданому інтервалі часу $t = (0 \dots 0,02) \text{ с}$ з кроком $\Delta t = 10^{-4}$. На рис. 3 показана функція тензора магнітного натягу (ТМН), розрахована на коронці зубця з врахуванням повного оберту ротора ТГ через 0,02 с. У подальшому були знайдені функції ТМН на всіх коронках зубців розточки статора. Оскільки розмірність ТМН визначається в Н/м^2 , для адекватної побудови розподілу по колу електромагнітних та електродинамічних сил (у послідовності зубець–паз) величину функції тензора було приведено до ширини зубця статора – $b_z = 0,038 \text{ м}$. На рис. 4 показано просторовий розподіл сил (електромагнітних сил на зубцях $F_{em,z}$ та електродинамічних $F_{ед,п}$ – у пазах) для моменту часу $\omega t = 0$. З кривої видно, що магнітні сили, які діють на коронки зубців статора в зоні *A/A*, на 23,6% менші, в зоні *B/B* – на 40,8% більші за електродинамічні сили, що діють на стержні обмотки в пазу. Відзначимо, що для моментів часу $\pi/6, \pi/3, \pi/2$ розподіл сил залишається майже незмінним та має однакову амплітуду. У табл. 2 наведено порівняння співвідношень електромагнітних та електродинамічних зусиль для всіх фазних зон у початковий момент часу $\omega t = 0$. Слід зазначити, що в різні моменти часу та в різних режимах навантаження генератора вказані в табл. 2 співвідношення будуть змінюватися. Ці результати можна використати для розробки нових способів діагностики за розподілом віброхарактеристик на поверхні статора, в тому числі на його зовнішній поверхні. Отримані нові дані що-

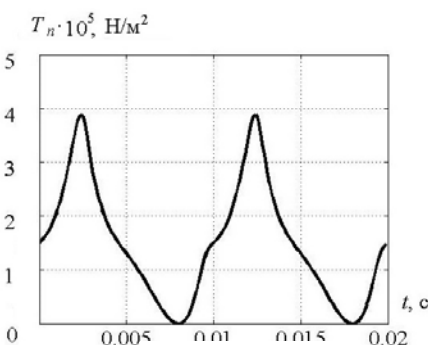


Рис. 3

до розподілу сил по колу розточки статора показують, що вібрації, які обумовлені даними силами, мають суттєво нерівномірний розподіл по колу.

Таблиця 2

Співвідношення між $F_{ем,z}$ та $F_{ед,п}$	Фазна зона	Різниця, %
$F_{ем,z} < F_{ед,п}$	A/A	23,6
	C/C	66,3
	X/X	25,6
	A/Z	59,4
$F_{ед,п} < F_{ем,z}$	B/B	40,8
	Y/Y	39,7
	Z/Z	66
	Z/B	64,8
	B/X	97,6
	X/C	71,3
	C/Y	49,9
	Y/A	97,5

Експериментальні дослідження. В лабораторії відділу моделювання машин змінного струму Інституту електродинаміки НАН України проведено дослідження вібрацій осердя фізичної моделі статора турбогенератора. Основні параметри моделі: номінальна напруга $U_n = 50$ В, номінальний струм $I_n = 100$ А, номінальна частота $f_s = 500$ Гц, кількість пазів статора $Z_1 = 48$, висота зубця $h_z = 65$ мм, висота спинки активного заліза $h_{сп} = 117$ мм, зовнішній діаметр активного заліза $D_{1зовн} = 540$ мм, кількість стяжних шпильок $n_{шп} = 6$, кількість фаз $m = 3$, кількість пазів на полюс і фазу $q = 4$, крок котушки по пазах $y_z = 12$ (1–13), число пар полюсів $p = 2$. Випробування моделі передбачало визначення оцінки вібраційного стану на зовнішньому діаметрі осердя статора навпроти зубців та пазів. Вимірювання вібрацій осердя статора проводилося за допомогою датчика типу 1ПА–9 у 96 точках (навпроти 48 зубців та 48 пазів) по зовнішньому діаметру моделі. Сигнал з датчика фіксувався за допомогою цифрового осцилографа типу RIGOL – DS5000 з подальшою обробкою отриманих даних на ПК.

сувався за допомогою цифрового осцилографа типу RIGOL – DS5000 з подальшою обробкою отриманих даних на ПК.

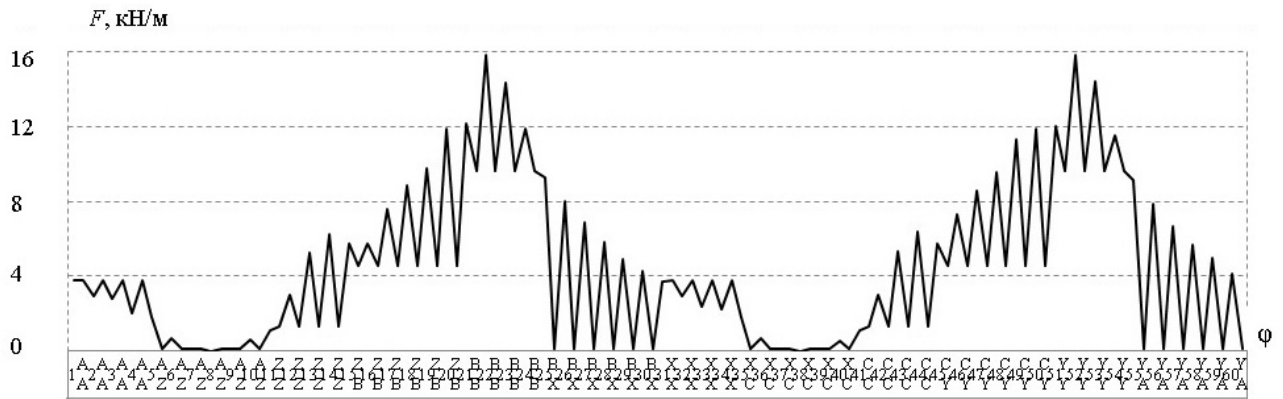


Рис. 4

Отримані дані дозволили визначити розподіл вібрацій осердя статора по колу та проаналізувати їхній характер на поверхні навпроти зубця та паза. На рис. 5 показано розподіл амплітуди вібрацій осердя статора по діаметру навпроти зубців та пазів. На рис. 6, а та рис. 7, а показано сигнал датчика, який фіксувався осцилографом навпроти 7-го зубця та 7-го паза відповідно, та його спектр (рис. 6,7, б). Основним фактором появи вібрації у статорі фізичної моделі є електромагнітні сили в залізі статора та електродинамічні – в стержнях обмотки. Основна частота таких сил і вібрацій становить 1000 Гц. Провівши спектральний аналіз та розклавши функцію сигналу в ряд Фур’є, в спектрі сигналу маємо присутність основної гармоніки частоти 500 Гц, подвійної частоти 1000 Гц та кратної їй – 2000 Гц. При цьому амплітуда вібрацій навпроти зубця більша у 5 разів на частоті 500 Гц порівняно з вібраціями навпроти паза. Щодо розподілу вібрацій подвійної частоти 1000 Гц, видно, що амплітуда вібрацій навпроти паза на 16% більша, ніж навпроти зубця. Це якісно відповідає розрахованому розподілу сил у турбогенераторі.

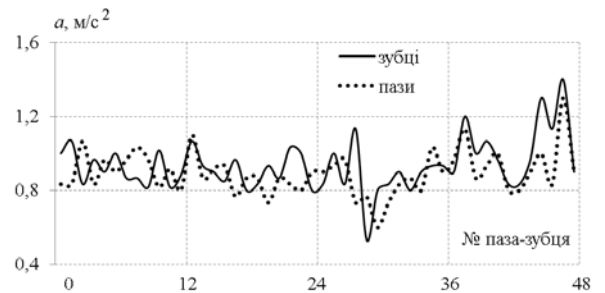


Рис. 5

Так як основна частота віброзбуджуючих сил дорівнює 1000 Гц, вібрації на інших частотах вказують на наявність відхилень від нормального технічного стану елементів статора. Особливо це стосується вібрацій основної частоти поля 500 Гц, враховуючи відсутність рухомих частин у фізичній моделі. Це підтверджують дані, які вказують на певні проблеми пресування зубців у моделі.

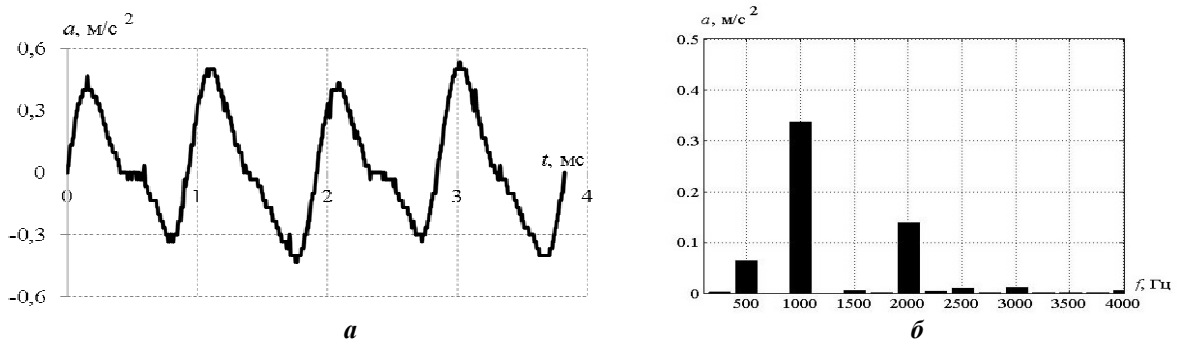


Рис. 6

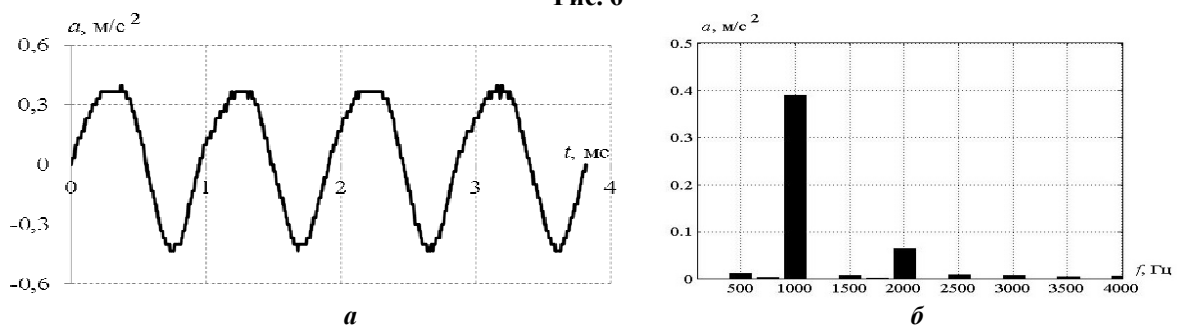


Рис. 7

Висновки. Розроблено математичні моделі для визначення розподілу по колу статора електродинамічних сил, що діють на провідники обмотки статора ТГ, та електромагнітних сил на зубцях розточки статора. На основі моделей чисельними та аналітичними методами визначено силові взаємодії обмотки статора та сили на коронках зубців. За результатами розрахунків показано, що амплітуда максимальних зусиль, які діють в пазу на провідники однієї фазної обмотки, в 1,33 разів більша порівняно з силами у провідниках з різнойменними фазами, а розподіл віброзбуджуючих сил по колу осердя статора є суттєво нерівномірним. Проведений порівняльний аналіз експериментально отриманих сигналів вібрацій на фізичній моделі статора показав, що в спектрі сигналу амплітуда вібрацій основної гармоніки магнітного поля навпроти зубця більша, ніж навпроти паза, що вказує на наявність проблем щільності зубцевої зони моделі статора. Амплітуди вібрацій подвійної частоти 1000 Гц навпроти паза і навпроти зубця різні.

1. Васьковський Ю.М. Польовий аналіз електричних машин. – К.: НТУУ “КПІ”, 2007. – 192 с.
2. Гижко Ю.І., Мислович М.В. Деякі питання практичної реалізації та застосування інформаційно-вимірювальних систем діагностики обертових частин роторних енергетичних машин // Технічна електродинаміка. Тем. випуск "Проблеми сучасної електротехніки". – 2008. – Ч. 4. – С. 53–58.
3. Мильх В.И., Полякова Н.В. Динамика силовых действий в турбогенераторах с разными зубцово-пазовыми структурами в номинальном режиме работы // Технічна електродинаміка. – 2014. – №3. – С. 56–63.
4. Мильх В.И., Полякова Н.В. Силовые взаимодействия в турбогенераторе в различных стационарных режимах работы // Технічна електродинаміка. – 2013. – №5. – С. 47–54.
5. Станиславский Л.Я. Вибрационная надежность мощных турбогенераторов. – М.: Энергия, 1975.
6. Тутко О.І., Мельник А.М. Розподіл електромагнітних віброзбуджуючих сил статора потужного турбогенератора // Праці Інституту електродинаміки НАН України. – 2013. – Вип. 37. – С. 39–44.
7. Шуйський В.П. Расчет электрических машин. – М.: Энергия, 1968.
8. Comsol Multiphysics, version 3.5 a – www.comsol.com
9. Shiohat K., Kusama R., Ohtsu S., Iwatsubo T. The Study on Electromagnetic Force Induced Vibration and Noise from a Normal and an Eccentric Universal Motors // Progress In Electromagnetics Research Symposium Proceedings. – March 20-23, 2011. – Pp.1654–1660.

УДК 621.313

МОДЕЛИРОВАНИЕ И РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ СИЛ, КОТОРЫЕ ДЕЙСТВУЮТ НА ЗУБЦЫ И СТЕРЖНИ ОБМОТКИ СТАТОРА ТУРБОГЕНЕРАТОРА

А.И.Титко, чл.-корр. НАН Украины, А.Н.Мельник

Институт электродинамики НАН Украины,

пр. Победы, 56, Киев-57, 03680, Украина.

e-mail: ied10@ukr.net

Представлены математические модели для определения усилий, которые действуют на стержни обмотки статора мощного турбогенератора. На основании разработанных моделей исследованы электромагнитные силы на коронках зубцов и электродинамические усилия, которые действуют в пазу на проводники одной и разных фазных обмоток при помощи аналитического и численного методов расчета. Показано, что амплитуда усилий, действующих в пазу со стержнями одной фазной обмотки, больше в 1,33 раза, чем в пазах со стержнями разноименных фаз. Приведены результаты экспериментальных исследований вибраций сердечника статора физической модели. Библи. 9, рис. 7, табл. 2.

Ключевые слова: математическая модель, обмотка статора, зубцы статора, турбогенератор, физическая модель, электродинамические и электромагнитные усилия, вибрация.

MODELLING AND DISTRIBUTION OF ELECTROMAGNETIC FORCES OPERATED ON THE TEETH AND THE CORES OF STATOR WINDING OF THE TURBOGENERATOR

A.I.Tytko, A.M.Melnyk

Institute of Electrodynamics National Academy of Science of Ukraine,

pr. Peremohy, 56, Kyiv-57, 03680, Ukraine.

e-mail: ied10@ukr.net

The mathematical models for definition of the forces operated on the stator winding cores a powerful turbogenerator is presented. On the basis of the developed models are investigated electromagnetic forces on crowns of a teeth and electrodynamic forces which operate in a slot on the conductors of one and different phase windings by means of analytical and numerical calculation methods. The amplitude of the forces operating in a slot with cores of one phase winding more in 1,33 times, than in slots with cores of dissimilar phases are shown. The results of experimental researches of vibrations of the stator core of physical model are presented. In a spectrum of a signal amplitude of the basic harmonic of a magnetic field opposite to a tooth more than opposite to a groove is shown. Since the basic frequency electromagnetic forces is equal 1000 Hz, vibrations on other frequencies are indicate in presence of deflections from a normal technical condition of stator elements. References 9, figures 7, tables 2.

Keywords: mathematical model, a stator winding, a stator teeth, turbogenerator, physical model, electrodynamic and electromagnetic forces, vibration.

1. Vaskovskiy Yu.M. The field analysis of electric machine. – Kyiv: Natsionalnyi Tekhnichniy Universytet Ukrainy “KPP”, 2007. – 192. (Ukr)

2. Gyzhko Yu.I., Myslovykh M.V. Some questions of practical implementation and application of information-measuring systems for diagnosis of rotating parts of the rotary power machines // Tekhnichna Elektrodynamika. Tematychnyi vypusk “Problemy Suchasnoi Elektrotekhniki”. – 2008. – Chastyna 4. – Pp. 53–58. (Ukr)

3. Milykh V.I., Polyakova N.V. Dynamics of force action in turbogenerators with different tooth-slot structures in nominal mode // Tekhnichna Elektrodynamika. – 2014. – № 3. – Pp. 56–63. (Rus)

4. Milykh V.I., Polyakova N.V. The force interactions in turbogenerator in different steady state working conditions // Tekhnichna Elektrodynamika. – 2013. – № 5. – Pp. 47–54. (Rus)

5. Stanislavskii L.Ya. Vibrating reliability of powerful turbogenerators. – Moskva: Energiia, 1975. (Rus)

6. Tytko O.I., Melnyk A.M. Distribution of electromagnetic vibroexcitation forces of the stator of the powerful turbogenerator // Pratsi Instytutu Elektrodynamiky Natsionalnoi Akademii Nauk Ukrainy. – 2013. – № 37. – Pp. 39–44. (Ukr)

7. Shuiskii V.P. Calculation of electric machines. – Moskva: Energiia, 1968. (Rus)

8. Comsol Multiphysics, version 3.5 a – Available at: <http://www.comsol.com>

9. Shioha K.t, Kusama R., Ohtsu S., Iwatsubo T. The Study on Electromagnetic Force Induced Vibration and Noise from a Normal and an Eccentric Universal Motors // Progress In Electromagnetics Research Symposium Proceedings. – March 20–23, 2011. – Pp. 1654–1660.

Надійшла 22.09.2014