

ЕЛЕКТРОМАГНІТНІ ВІБРОЗБУДЖУЮЧІ СИЛИ В ТУРБОГЕНЕРАТОРІ З УРАХУВАННЯМ НЕСИМЕТРІЇ СТРУМІВ В ОБМОТЦІ СТАТОРА

Ю.М. Васьковський^{1*}, докт.техн.наук, А.М. Мельник^{2**},

¹ – Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут",
пр. Перемоги, 37, Київ, 03056, Україна, e-mail: vun157@gmail.com,

² – Інститут електродинаміки НАН України,
пр. Перемоги, 56, Київ, 03057, Україна. e-mail: ied10@ukr.net

Удосконалено математичну модель для розрахунку електромагнітних віброзбуджуючих сил турбогенератора при появі ексцентриситету ротора з урахуванням впливу несиметрії струмів обмотки статора. Показано, що при моделюванні ексцентриситету необхідно враховувати несиметрію струмів фаз обмотки статора. З'ясовано, що при появі статичного ексцентриситету на поверхні масиву ротора наводяться вихрові струми. Визначено нові діагностичні ознаки виникнення ексцентриситету на основі аналізу в спектрі віброзбуджуючих сил гармонік частоти обертання та кратних їй. Бібл. 5, табл. 1, рис. 5.

Ключові слова: турбогенератор, коло-польова модель, віброзбуджуючі сили, індукована густина струму, ексцентриситет ротора, діагностичні ознаки.

Вступ. Тема статті належить до проблеми вібраційної діагностики (ВД) ушкоджень електричних машин, зокрема, роторів потужних турбогенераторів (ТГ). ВД відбувається шляхом аналізу змін характеру вібрації статора ТГ, які виникають внаслідок появи ушкоджень конструкції машини. Оскільки причиною вібрації є віброзбуджуючі сили, то ВД зводиться до спектрального аналізу віброзбуджуючих сил шляхом виявлення в них специфічних гармонік, які свідчать про наявність ушкоджень і називаються *діагностичними ознаками* (ДО). Обґрунтування системи ДО є складною задачею, яка вирішується зазвичай методами математичного моделювання. Причому для достовірного обґрунтування ДО необхідні адекватні математичні моделі, які докладно відображують основні фізичні процеси, що відбуваються в ушкодженій електричній машині.

Одним з видів ушкодження потужних ТГ є статичний ексцентриситет (радіальний або кутувий) ротора, який виникає внаслідок тривалої експлуатації ТГ. Поява ексцентриситету ротора призводить до несиметрії величин магнітних потокозчеплень, ЕРС і струмів у фазах обмотки статора, оскільки вісі фаз трифазної обмотки статора розташовані відносно нерівномірного повітряного проміжку ТГ під різними кутами. Внаслідок несиметрії струмів фаз виникає тривалий несиметричний режим роботи ТГ, що призводить до появи у масиві ротора вихрових струмів частотою 100 Гц. Цей процес не враховується в існуючих математичних моделях [1-5], що, як буде показано далі, призводить не тільки до кількісних, але й до якісних похибок при проведенні ВД. У відомих математичних моделях джерелами поля виступають задані однакові за амплітудою сторонні струми трьох фаз обмотки статора, в той час як фактичними джерелами поля є задані напруги живлення фаз.

Метою роботи є удосконалення математичної моделі синхронної машини з урахуванням несиметрії струмів обмотки статора, що викликана наявністю статичного ексцентриситету ротора, та дослідження на основі нової моделі закономірностей розподілу електромагнітних віброзбуджуючих сил ТГ, а також уточнення системи ДО, яка повинна використовуватися в процесі ВД.

Математична модель. При формулюванні математичної моделі вважається, що струм обмотки збудження та швидкість обертання ротора ТГ є незмінними. Електромагнітне поле в активній зоні ТГ розглядається у двовимірній постановці для величин, що змінюються у часі за синусоїдальним законом. Поле описується за допомогою диференційного рівняння в часткових похідних відносно комплексної амплітуди єдиної просторової (осьової) складової векторного магнітного потенціалу \dot{A}_z

$$\Delta \dot{A}_z - j\omega\mu\gamma \dot{A}_z + \mu\gamma\omega_R \left(R \times \text{rot} \dot{A}_z \right) = -\mu \dot{J}_{\text{стор}}, \quad (1)$$

де ω – кутова частота зміни у часі векторного магнітного потенціалу; ω_R – кутова швидкість обертання

ня ротора; μ – магнітна проникність; γ – електропровідність; R – радіус-вектор довільної точки ротора; $\dot{J}_{\text{стор}}$ – густина сторонніх струмів (щільність струмів у пазах статора, яка задається відповідно до схеми обмотки статора).

Густини струмів у фазах обмотки статора виражаються наступним чином:

$$\begin{aligned} \dot{J}_{A\text{стор}} &= I_{mA} \cdot u_{\Pi} / S_{\Pi}, & \dot{J}_{B\text{стор}} &= I_{mB} \cdot u_{\Pi} [\cos(-2\pi/3) - j\sin(-2\pi/3)] / S_{\Pi}, \\ \dot{J}_{C\text{стор}} &= I_{mC} \cdot u_{\Pi} [\cos(-4\pi/3) - j\sin(-4\pi/3)] / S_{\Pi}, \end{aligned} \quad (2)$$

де I_{mA} , I_{mB} , I_{mC} – амплітуди струмів (у загальному випадку різні) у фазах обмотки статора; u_{Π} – число послідовно з'єднаних провідників у пазу статора; S_{Π} – площа перетину паза статора.

Рівняння (1) доповнюється однорідними граничними умовами першого роду на лінії зовнішньої поверхні яра статора, що обмежує розрахункову область G

$$\dot{A}_z \Big|_G = 0. \quad (3)$$

Величина μ у кожній точці розрахункової області, де знаходяться ферромагнітні матеріали, визначається за відповідними кривими намагнічування. Складові вектора магнітної індукції в декартовій системі координат визначаються за співвідношеннями

$$\dot{B}_x = \partial \dot{A}_z / \partial y, \quad \dot{B}_y = \partial \dot{A}_z / \partial x. \quad (4)$$

Густина віброзбуджуючих сил пропорційна тензору магнітного натягу, який має фізичну розмірність тиску (Н/м²). Модуль нормальної складової тензора магнітного натягу розраховується наступним чином:

$$T_n = \left| \frac{1}{2\mu} \left(\dot{B}_n^2 - \dot{B}_\tau^2 \right) \right|, \quad (5)$$

де \dot{B}_n , \dot{B}_τ – відповідно нормальна (направлена вздовж вектора нормалі до поверхні в заданій точці) і тангенціальна (направлена вздовж дотичної до поверхні в заданій точці) проекції вектора магнітної індукції. Нормальна і тангенціальна складові магнітної індукції виражаються через проекції вектора індукції в декартовій системі координат за виразами

$$\dot{B}_n = \dot{B}_y \cos \alpha + \dot{B}_x \sin \alpha = \left(y \dot{B}_y + x \dot{B}_x \right) / R_\delta, \quad \dot{B}_\tau = \dot{B}_x \cos \alpha - \dot{B}_y \sin \alpha = \left(y \dot{B}_x - x \dot{B}_y \right) / R_\delta, \quad (6)$$

де x , y – проекції радіус-вектора на осі системи координат; R_δ – радіус-вектор. Надалі розглядаються радіальні вібрації, які відбуваються за рахунок дії нормальної складової тензора магнітного натягу.

Потокозчеплення кожної фази обмотки статора складається з потокозчеплень q послідовно з'єднаних котушок і знаходиться інтегруванням векторного магнітного потенціалу за сумарною площею поперечного перетину сторін усіх котушок фази S_q , що мають струми одного напрямку

$$\Psi_\Phi = \frac{2u_{\Pi} l_{\Pi}}{S_{\Pi}} \int_{S_q} \dot{A}_z \cdot dS, \quad (7)$$

де l_{Π} – аксіальна довжина статора ТГ.

При обертанні ротора відбувається зміна конфігурації розрахункової області за рахунок зміни координат точок ротора. При обертанні ротора проти годинникової стрілки з постійною швидкістю приріст координат точок ротора в декартових координатах Δx , Δy за крок по часу Δt визначається відповідно до виразів

$$\begin{cases} \Delta x = \cos [\omega_R \cdot (t + \Delta t)] \cdot X - \sin [\omega_R \cdot (t + \Delta t)] \cdot Y - X; \\ \Delta y = \sin [\omega_R \cdot (t + \Delta t)] \cdot X + \cos [\omega_R \cdot (t + \Delta t)] \cdot Y - Y, \end{cases} \quad (8)$$

де X , Y – поточні координати точок ротора.

З огляду на те, що розглядається процес сталого обертання ротора, при якому швидкість ротора, амплітуди струмів в обмотці статора і глибина проникнення струмів ротора в пази ротора не змінюються, загальний розв'язок задачі можна знайти, як сукупність взаємопов'язаних у часі

розв'язків квазістаціонарних задач при різних положеннях ротора. Тому для кожного поточного моменту часу t_k розв'язується рівняння (1) (режим Time-harmonic) при відповідних цьому моменту часу величинах струмів фаз статора і координат ротора, які визначаються за формулами (2), (8). Надалі в межах заданого часового інтервалу з обраним кроком по часу Δt , величина якого обирається згідно з вимогами точності, виконується серія розв'язків рівняння (1) з урахуванням змін кутового положення ротора і величин струмів фаз статора. Інтервал часу T , на якому здійснюється розрахунок, відповідає одному періоду, тобто для двопольного ТГ – одному повному оберту ротора $T = (0 \dots 0.02)$ с. Кількість розрахункових кроків становить 200, тобто один крок по часу дорівнює $\Delta t = 10^{-4}$ с. За один крок ротор повертається відносно статора на третину зубцевої поділки статора, що задовольняє умовам точності.

Для визначення різних за величиною амплітуд струмів у фазах статора розглядається загальна система рівнянь електричної рівноваги фаз обмотки статора

$$\dot{U}_A = (r_s + jx_{лs}) \cdot \dot{I}_A + j\dot{\psi}_A, \quad \dot{U}_B = (r_s + jx_{лs}) \cdot \dot{I}_B + j\dot{\psi}_B, \quad \dot{U}_C = (r_s + jx_{лs}) \cdot \dot{I}_C + j\dot{\psi}_C, \quad (9)$$

де $\dot{U}, \dot{I}, \dot{\psi}$ – напруга, струм та магнітне потокозчеплення (індекси A, B, C позначають відповідно фази A, B, C обмотки статора); r_s – активний опір фази обмотки статора, $x_{лs}$ – індуктивний опір розсіювання лобових частин обмотки статора, який визначається за відомими формулами і приблизно враховує тривимірний характер поля. Потоки пазового та диференційного розсіювання обмотки статора враховуються у виразах (7) після розрахунку реального розподілу магнітного поля ТГ. У системі рівнянь (9) заданими є напруги живлення фаз, а невідомими – струми у фазах.

Алгоритм розв'язання коло-польової математичної моделі (1) – (9) є наступним. У розрахунковій області ТГ, де відображено наявність ексцентриситету ротора, для поточного кроку по часу виконується розрахунок поля за умови симетрії струмів фаз статора $I_{mA} = I_{mB} = I_{mC}$. Оскільки вісі фаз розташовані під різними кутами до зони мінімального повітряного проміжку, який виникає внаслідок ексцентриситету ротора, то розраховані у подальшому за формулою (7) магнітні потокозчеплення фаз будуть мати різні значення. Після підстановки цих значень у систему рівнянь (9) знаходиться нова несиметрична система струмів фаз, яка на наступній розрахунковій ітерації використовується як джерело поля у виразах (2). Ітерації закінчуються, коли знайдені несиметричні струми статора на попередній і наступній ітераціях збігаються в межах заданої похибки. Чисельні розрахунки показали, що для забезпечення відносної похибки 10^{-3} достатньо виконати 2...3 ітерації. Слід зауважити, що на наступному кроці за часом як перше наближення доцільно використовувати несиметричну систему струмів фаз статора, яка була знайдена на попередньому кроці по часу. Після закінчення ітерацій на кожному кроці по часу розраховуються електромагнітні вібробуджуючі сили за допомогою виразів (4) – (6), а після завершення розрахунків на всьому інтервалі по часу T , який відповідає повному оберту ротора ТГ, проводиться спектральний аналіз вібробуджуючих сил.

Результати моделювання. Об'єктом дослідження обрано турбогенератор типу ТГВ-200-2 з наступними даними: номінальна потужність $P_n = 200$ МВт, номінальний фазний струм статора $I_{In} = 8625$ А, номінальна лінійна напруга $U_{In} = 15750$ В, кількість полюсів $2p = 2$. Аналіз проводився для номінального режиму роботи ТГ. Інтервал розрахункового часу відповідає одному повному оберту ротора та дорівнює $t = 0,02$ с. Представимо результати моделювання електромагнітного поля та вібробуджуючих сил за наявності ексцентриситету ротора ТГ з відносними значеннями величини ексцентриситету $\varepsilon = (\delta_{max} - \delta_{min}) / (\delta_{max} + \delta_{min}) = 0,1$ і $\varepsilon = 0,25$, де $\delta_{max}, \delta_{min}$ – відповідно максимальна та мінімальна величини нерівномірного повітряного проміжку ТГ. Наведемо результати порівняльного аналізу вібробуджуючих сил для наступних випадків: а) за відсутності ексцентриситету ротора; б) за наявності ексцентриситету, але без врахування несиметрії струмів обмотки статора; в) за наявності ексцентриситету і з врахуванням несиметрії струмів обмотки статора згідно з удосконаленою математичною моделлю. Для кожного із зазначених випадків отримано розподіл електромагнітного поля у поперечному перерізі активної зони ТГ у номінальному режимі роботи.

На рис. 1, а показано картину поля та розподіл густини струмів у пазах статора та ротора. Точками 1, 2, 3 позначено місця розташування умовних вібродатчиків на розточці статора, в яких розраховувалися вібробуджуючі сили: 1 – у зоні δ_{min} , 3 – у зоні δ_{max} і 2 – у зоні середнього за величиною проміжку. Врахування впливу несиметрії струмів статора внаслідок появи ексцентриситету ротора має важливе значення, оскільки магнітне поле в повітряному проміжку спотворюється не тільки внаслідок спотворення форми повітряного проміжку, але й внаслідок появи додаткової несиметрії стру-

мів фаз статора. На шкалі у правій частині рис. 1 представлені значення густини струму.

На рис. 2 показано графіки потокозчеплень фаз обмотки статора у часі при $\varepsilon = 0,25$. Функції потокозчеплень у часі є практично синусоїдальними, але мають різні амплітуди: $\psi_{Amax} = 48,47$ Вб, $\psi_{Bmax} = 46,91$ Вб, $\psi_{Cmax} = 47,74$ Вб. Це призводить до появи несиметричної системи струмів фаз статора з амплітудами, які у даному випадку становлять: у фазі *A* – 11 400 А, у фазі *B* – 11 780 А та у фазі *C* – 11 800 А. Несиметрія струмів фаз статора призводить до появи обертового поля статора зворотнього порядку чергування фаз, яке рухається відносно ротора з подвійною частотою і індукує в масивному роторі вихрові струми частотою 100 Гц. Таким чином, окрім того, що при ексцентриситеті ротора виникають потужні електромагнітні сили одностороннього магнітного тяжіння між статором і ротором, які додатково навантажують підшипники, в масиві ротора ТГ виникають вихрові струми, тривалість протікання яких у часі не обмежена, що може призвести до ушкоджень елементів конструкції ротора. На рис. 1, б показано миттєвий розподіл індукованих струмів у масиві ротора при $\varepsilon = 0,25$ для моменту часу $t = 0,02$ с. На збільшеному фрагменті показано розподіл густини струмів у великому зубці ротора, з якого видно, що струми концентруються на поверхні великого зубця. На рис. 3, а і рис. 3, б показано функції розподілу індукованих струмів вздовж поверхні ротора відповідно для моментів часу 0,02 с і 0,015 с.

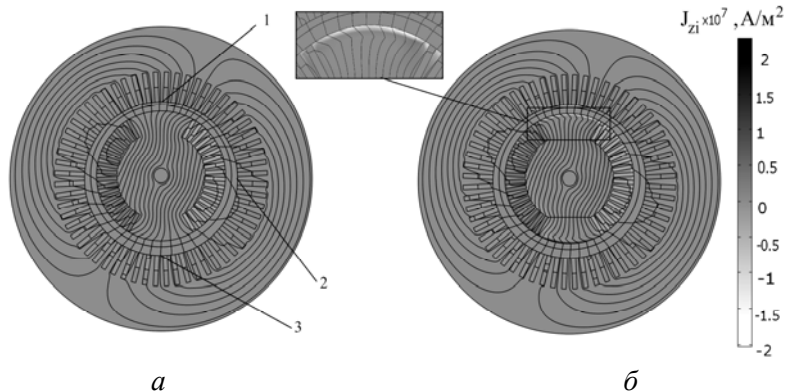


Рис. 1

У момент часу 0,02 с, який відповідає повному оберту ротора, великі зубці ротора орієнтовані уздовж вертикальної осі, як показано на рис. 1, а в момент часу 0,015 с великі зубці повернуті на 90° . З рис. 3 видно несиметрію розподілу струмів, яка обумовлена нерівномірним повітряним проміжком. Наприклад, у момент часу 0,02 с максимальні значення індукованих струмів у великих зубцях становлять: у верхньому зубці, що знаходиться у зоні δ_{min} , – $1,2 \cdot 10^7$ А/м², а у нижньому зубці, що знаходиться у зоні δ_{max} , – $1 \cdot 10^7$ А/м² (за модулем), тобто амплітуди відрізняються на 9,1%.

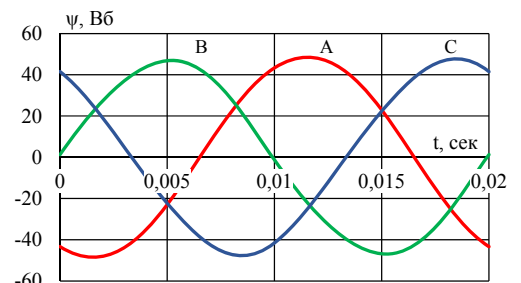


Рис. 2

Наприклад, у момент часу 0,02 с максимальні значення індукованих струмів у великих зубцях становлять: у верхньому зубці, що знаходиться у зоні δ_{min} , – $1,2 \cdot 10^7$ А/м², а у нижньому зубці, що знаходиться у зоні δ_{max} , – $1 \cdot 10^7$ А/м² (за модулем), тобто амплітуди відрізняються на 9,1%.

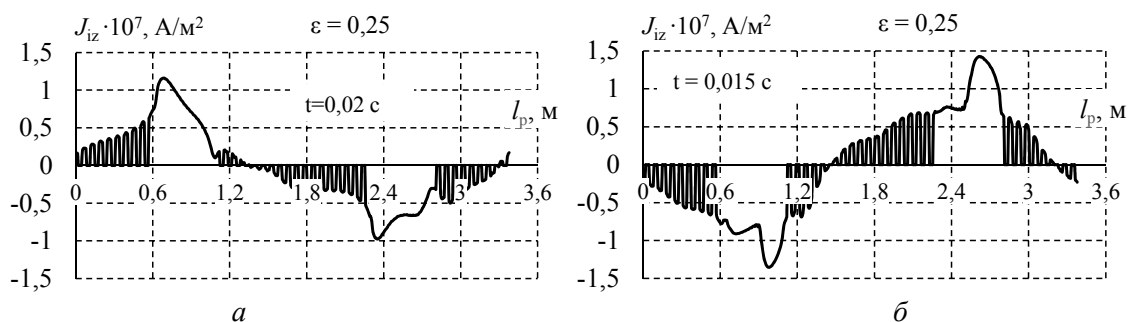


Рис. 3

Далі наведено результати моделювання віброзбуджуючих сил. На рис. 4 при $\varepsilon = 0,25$ показано функції тензора магнітного натягу у часі у двох різних точках статора: у точці мінімального проміжку 1 (рис. 4, а) та точці максимального проміжку 3 (рис. 4, б). (Зазначені точки показано на рис. 1). Показано три криві – за відсутності ексцентриситету ротора ТГ (крива а), за наявності ексцентриситету без врахування несиметрії струмів обмотки статора (крива б) та з урахуванням несиметрії (крива с). Як видно з представлених рисунків, за час проходження двох полюсів під розрахунковою точкою в усіх отриманих функціях тензора спостерігається два максимуми, які викликають електромагнітні пульсації з основною частотою 100 Гц. Амплітуди двох зазначених максимумів у кривих а і б є одна-

ковими, причому за наявності ексцентриситету амплітуди в зоні мінімального повітряного проміжку δ_{min} є більшими у порівнянні з випадком відсутності ексцентриситету (рис. 4, а), а в зоні максимального проміжку δ_{max} навпаки – менші у порівнянні з відсутністю ексцентриситету (рис. 4, б).

Принциповою відмінною кривою є те, що максимуми двох зазначених пульсацій є різними, тобто при урахуванні несиметрії струмів фаз статора у вібробуджуючих силах з'являється складова, яка змінюється з частотою обертання ротора і породжує вібрації частоти 50 Гц і кратні їй. Отриманий результат можна пояснити впливом нерівномірного розподілу вихрових струмів на поверхні ротора, спричиненого спотвореним повітряним проміжком ТГ. Цей результат має принципове значення і формує відповідну діагностичну ознаку.

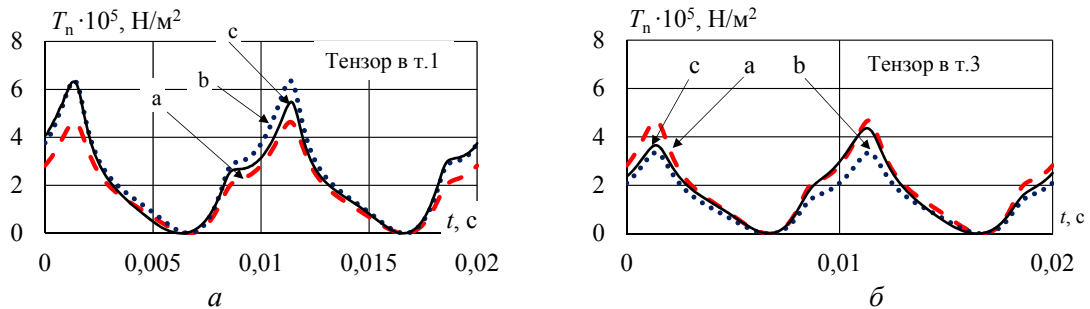


Рис. 4

Результати спектрального аналізу отриманих функцій для $\epsilon = 0,1$ і $\epsilon = 0,25$ зведено у таблиці. Для порівняння отриманих результатів з вібробуджуючими силами *неушкодженого* ТГ відзначимо, що амплітуда сили на частоті 100 Гц складає $18,6 \cdot 10^4$ Н/м², а на частоті 200 Гц – $2,9 \cdot 10^4$ Н/м².

Частота, Гц	Амплітуда гармоніки тензора, $T_n \cdot 10^4$ Н/м ²											
	При врахуванні несиметрії струмів обмотки статора						Без врахування несиметрії струмів обмотки статора					
	$\epsilon = 0,1$			$\epsilon = 0,25$			$\epsilon = 0,1$			$\epsilon = 0,25$		
	т.1	т.2	т.3	т.1	т.2	т.3	т.1	т.2	т.3	т.1	т.2	т.3
50	0,906	0,608	0,846	2,35	1,65	1,35	0					
100	20,1	16,9	16,5	23,2	17,9	17,1	20,6	16,7	15,2	24,5	16,4	13,9
150	1,06	0,572	0,46	2,27	1,4	1,1	0					
200	3,24	2,27	2,6	3,69	1,54	2,35	3,43	2,14	2,26	4,51	1,55	1,88
250	0,381	0,129	0,147	0,463	0,211	0,1	0					

Врахування несиметрії струмів обмотки статора в математичній моделі дозволило отримати якісно нові результати, які удосконалюють існуючу систему ДО. У спектрах вібробуджуючих сил виявлено додаткові гармоніки, частоти яких кратні частоті обертання ротора 50 Гц. Причому амплітуди гармонік 50 і 150 Гц мають близькі значення (наприклад, при $\epsilon = 0,1$ у точці 1 вони дорівнюють $0,906 \cdot 10^4$ та $1,06 \cdot 10^4$ Н/м², а при $\epsilon = 0,25$ відповідно $2,35 \cdot 10^4$ та $2,27 \cdot 10^4$ Н/м²). Таким чином, поява цих гармонік у спектрах вібробуджуючих сил та близькість значень їхніх амплітуд формує додаткову ДО для проведення діагностики ТГ, яка засвідчує наявність ексцентриситету ротора. Спільний аналіз нової ДО разом з іншими ознаками ексцентриситету дозволяє відкинути інші можливі дефекти, діагностичною ознакою яких є поява у спектрі тільки обертової гармоніки 50 Гц.

Висновки. 1. Розроблено та чисельно реалізовано нову коло-польову математичну модель вібробуджуючих сил у ТГ за наявності статичного ексцентриситету ротора. На відміну від існуючих, модель враховує несиметрію струмів фаз обмотки статора. За результатами досліджень показано, що спотворення повітряного проміжку ТГ при ексцентриситеті ротора призводить до несиметрії магнітних потікочеплень фаз статора, несиметрії струмів у фазах та індукуванню в масиві ротора струмів частоти 100 Гц, які нерівномірно розподілені уздовж поверхні ротора.

2. У спектрах вібробуджуючих сил при ексцентриситеті ротора додатково виникають обертові гармоніки на частотах 50 і 150 Гц, які разом із закономірностями її розподілення у повітряному проміжку можуть бути використані як ДО при діагностуванні статичного ексцентриситету ротора ТГ. Запропоновані нові ДО разом з іншими ознаками, обґрунтованими в попередніх дослідженнях, уточнюють існуючу систему ДО та підвищують достовірність вібродіагностики ексцентриситету ротора.

1. Васьковський Ю.М., Мельник А.М. Електромагнітні вібробуджуючі сили турбогенератора в маневрених режимах роботи // Технічна електродинаміка. – 2016. – № 2. – С. 35 – 41.

2. Васьковський Ю.М., Мельник А.М., Тутко О.І. Електромагнітні вібробуджуючі сили при наявності

ексцентриситету ротора // Електротехніка і електромеханіка. – 2016. – № 4. – С. 16 – 21.

3. Гайденко Ю.А., Вишневикий Т.С. Метод електромагнітної діагностики статического ексцентриситета ротора в синхронному генераторі // Гідроенергетика України. – 2011. – № 2. – С. 52–57.

4. B. Ge, W. Guo, J. Guo, D. Zhang. Negative-sequence eddy current field calculation for the world's first AP1000 nuclear half-speed generator // International Journal of Control and Automation. – 2015. – Vol. 8. – No 6. – Pp. 177 – 186.

5. M. Biet, A. Bijeire. Rotor faults diagnosis in synchronous generators using feature selection and nearest neighbors rule // Proc. IEEE Symposium on Diagnostics for Electrical Machines, Power Electronics and Drivers Conf. – 2011. – Pp. 300 – 306.

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ВИБРОВОЗМУЩАЮЩИЕ СИЛЫ В ТУРБОГЕНЕРАТОРЕ С УЧЕТОМ НЕСИМЕТРИИ ТОКОВ В ОБМОТКЕ СТАТОРА

Ю.Н. Васьковский¹, докт. техн. наук, А.Н. Мельник²,

¹ – Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт»,
пр. Победы, 37, Киев, 03056, Украина, e-mail: vun157@gmail.com

² – Институт электродинамики НАН Украины,
пр. Победы, 56, Киев, 03057, Украина, e-mail: ied10@ukr.net

Усовершенствовано математическую модель для расчета электромагнитных вибровозмущающих сил турбогенератора при эксцентриситете ротора с учетом влияния дефекта ротора на токи обмотки статора. Показано, что при моделировании эксцентриситета необходимо учитывать несимметрию токов фаз обмотки статора. Определено, что при возникновении статического эксцентриситета на поверхности массива ротора наводятся вихревые токи. Обозначено новые диагностические признаки возникновения эксцентриситета на основе анализа в спектре вибровозмущающих сил гармоник частоты вращения и кратные ей. Библиограф. 5, табл. 1, рис. 5.

Ключевые слова: турбогенератор, цепе-полевая модель, вибровозмущающие силы, эксцентриситет ротора, диагностические признаки.

THE ELECTROMAGNETIC VIBRATION DISTURBING FORCES IN TURBOGENERATOR WITH A GLANCE OF CURRENT ASYMMETRY OF STATOR WINDING

Yu.M. Vaskovskyi¹, A.M. Melnyk²

¹ – National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute»,
pr. Peremohy, 37, Kyiv, 03056, Ukraine, e-mail: vun157@gmail.com

² – Institute of Electrodynamics National Academy of Science of Ukraine,
pr. Peremohy, 56, Kyiv, 03057, Ukraine, e-mail: ied10@ukr.net

Updated a mathematical model for calculating of electromagnetic vibration-disturbing forces of turbo-generator by the rotor eccentricity with the influence of the defect on the rotor currents of the stator winding. It is shown that in the simulation should take into account the eccentricity of the phase winding of current asymmetry hundred-torus. Determined that when a static array of eccentricity of the rotor surface induced eddy currents. Identify new diagnostic features eccentricity occurrence by analyzing the spectrum of vibration-disturbing forces harmonics of rotating frequency and multiples thereof. References 5, table 1, figures 5.

Keywords: turbogenerator, circuit-field mathematical model, vibration-disturbing forces, eccentricity of rotor, diagnostic features.

1. Vaskovskyi Yu.M., Melnyk A.M. The electromagnetic vibration disturbing forces of turbogenerator in maneuverable operating conditions // Tekhnichna Elektrodynamika. – 2016. – No 2. – Pp. 35 – 41. (Ukr)

2. Vaskovskyi Yu.M., Melnyk A.M., Tytko O.I. Electromagnetic vibration disturbing forces at the eccentricity of rotor of turbogenerator // Elektrotehnika i Elektromekhanika. – 2016. – No 4. – Pp. 16 – 21. (Ukr)

3. Haidenko Yu.A., Vishnevskiy T.S. Electromagnetic method of diagnostic of static eccentricity of synchronous generator // Hidroenerhetyka Ukrainy. – 2011. – No 2. – Pp. 52–57. (Rus)

4. B. Ge, W. Guo, J. Guo, D. Zhang Negative-sequence eddy current field calculation for the world's first AP1000 nuclear half-speed generator // International Journal of Control and Automation. – 2015. – Vol. 8. – No 6. – Pp. 177 – 186.

5. M. Biet, A. Bijeire. Rotor faults diagnosis in synchronous generators using feature selection and nearest neighbors rule // Proc. IEEE Symposium on Diagnostics for Electrical Machines, Power Electronics and Drivers Conf. – 2011. – Pp. 300 – 306.

Надійшла 29.09.2016
Остаточний варіант 15.12.2016