

Ю.М. Васьковський, А.М. Мельник, О.І. Титко

## ЕЛЕКТРОМАГНІТНІ ВІБРОЗБУДЖУЮЧІ СИЛИ ПРИ НАЯВНОСТІ ЕКСЦЕНТРИСИТЕТУ РОТОРА ТУРБОГЕНЕРАТОРА

*В статті досліджено електромагнітні віброзбуджуючі сили турбогенератора при наявності ексцентриситету ротора. Дослідження проведено для турбогенератора типу ТГВ-200-2 методом скінченних елементів у програмному середовищі COMSOL Multiphysics. Описано польову математичну модель статичного та динамічного ексцентриситету, яка дозволяє змодельовувати сигнали датчиків вібрацій як функції часу. Проведено серію розрахунків електромагнітних сил при різних варіантах зміщення ротора з осі розточка статора. Показано, що при появі ексцентриситету спостерігається суттєве збільшення віброзбуджуючих сил і найбільше значення сил спостерігається у точці з мінімальним повітряним проміжком. Введено нові діагностичні параметри та запропоновано методіку діагностування ексцентриситету. На основі проведеного математичного моделювання встановлено, що діагностичною ознакою статичного ексцентриситету є зміна амплітуди тензора магнітного натягу, а ознакою динамічного ексцентриситету є поява у спектрі віброзбуджуючих сил обертової та кратних їй гармонік. Бібл. 8, табл. 3, рис. 6.*

*Ключові слова:* турбогенератор, польова математична модель, електромагнітні віброзбуджуючі сили, тензор магнітного натягу, ексцентриситет, дефект ротора, діагностична ознака.

*В статье исследовано электромагнитные вибровозмущающие силы турбогенератора при наличии дефекта ротора. Исследования выполнены для турбогенератора типа ТГВ-200-2 методом конечных элементов в программном обеспечении COMSOL Multiphysics. Описано полевую математическую модель статического и динамического эксцентриситета, которая позволяет смоделировать сигналы датчика вибраций как функции реального времени. Выполнено серию расчетов электромагнитных сил при различных вариантах смещения ротора с оси расточки статора. Показано, что при возникновении эксцентриситета наблюдается существенное увеличение вибровозмущающих сил и наибольшее значение сил будет в точке с минимальным воздушным промежутком. Введено новые диагностические параметры и предложено методика диагностирования эксцентриситета. На основе проведенного математического моделирования установлено, что диагностическим признаком статического эксцентриситета является изменение амплитуды тензора магнитного тяжения, а признаком динамического эксцентриситета – наличие в спектре вибровозмущающих сил оборотной и кратных ей гармоник. Библ. 8, табл. 3, рис. 6.*

*Ключевые слова:* турбогенератор, полевая математическая модель, электромагнитные вибровозмущающие силы, тензор магнитного тяжения, эксцентриситет, дефект ротора, диагностический признак.

**Вступ.** Останнім часом проблема моніторингу та своєчасного діагностування і усунення ушкоджень потужних електричних машин набуває особливого значення у зв'язку зі старінням парку існуючих машин та збільшенням кількості випадків їх аварійної зупинки з суттєвими економічними втратами. У першу чергу це стосується потужних синхронних турбогенераторів (ТГ), які широко використовуються на теплових та атомних електростанціях. Особлива увага приділяється ротору ТГ, який є складним та відповідальним вузлом конструкції.

В останні роки в Україні та за кордоном проводяться дослідження фізичних процесів, які відбуваються в синхронних генераторах при наявності дефектів їх ротора [1-8]. До дефектів ротора можна також віднести нерівномірність повітряного проміжку (ПП) між статором і ротором (ексцентриситет). Дана несправність може виникати як внаслідок виробничих дефектів, так і в процесі експлуатації ТГ. Під ексцентриситетом ротора розуміється зміщення осі ротора відносно осі розточка статора [4]. Розрізняють: а) статичний ексцентриситет (СЕ), при якому конфігурація ПП протягом оберту ротора залишається незмінною, тобто мінімальне та максимальне значення проміжку не змінюють свого положення; б) динамічний ексцентриситет (ДЕ), при якому мінімальне та максимальне значення ПП обертається разом з обертанням ротора.

Поява ексцентриситету ротора ТГ призводить до спотворення магнітного поля в ПП, виникнення елек-

тромагнітних сил одностороннього магнітного тяжіння, появи додаткових вищих гармонік поля, зростання локальних перегрівів. В масиві ротора турбогенератора протікають вихрові струми, які призводять до суттєвого нагріву та ушкоджень елементів конструкції ротора (пазових клинів, бандажного кільця).

Ексцентриситет ротора може виникнути при монтажі ротора ТГ або в процесі його експлуатації (в результаті зносу підшипників, зміщення опор, прогину валу та ін.) Достовірно виявлення характеру та величини ексцентриситету ротора в синхронному генераторі без його виведення з робочого режиму експлуатації являє собою актуальну і складну інженерну задачу, від ефективності розв'язання якої залежить обсяг виробленої електроенергії, довговічність, економічність і безпека експлуатації ТГ.

Існує чимало методів виявлення та діагностування ушкоджень електричних машин, основними з яких є методи механічної, вібраційної, електромагнітної діагностики, метод аналізу спектру фазного струму та ін. [1-3, 6]. Доцільність вибору одного з зазначених методів для діагностування ексцентриситету ротора ТГ обумовлена їх достовірністю та чутливістю їх діагностичних параметрів, складністю технічної реалізації, вартістю апаратного і методичного забезпечення та іншими чинниками. Порівняльний аналіз цих методів показав, що для виявлення СЕ та ДЕ ТГ доцільно використовувати метод вібраційної діагностики, завдяки простоті реалізації та високої достовірності

© Ю.М. Васьковський, А.М. Мельник, О.І. Титко

ідентифікації дефектів. Для визначення діагностичних ознак необхідним є дослідження електромагнітних сил, які змінюються при появі СЕ або ДЕ.

**Мета роботи** полягає в дослідженні методами математичного моделювання електромагнітних вібро-збуджуючих сил при статичному та динамічному ексцентриситеті ТГ та визначення діагностичних ознак для діагностування зазначених видів дефекту. Моделювання виконується із застосуванням методу скінченних елементів, реалізованого у програмному середовищі *COMSOL Multiphysics*. Діагностування пропонується проводити на основі використання спектрального аналізу функції тензора магнітного натягу за допомогою швидкого перетворення Фур'є (ШПФ).

**Постановка задачі.** Математична модель передбачає розв'язання рівняння електромагнітного поля в активній зоні ТГ і визначення віброзбуджуючих сил у виділеній точці статора, де розміщується умовний датчик вібрації. Враховуючи значну осьову довжину активної зони ТГ порівняно з довжиною полюсної поділки, достатньо розглянути поле у двовимірному наближенні в поперечному перетині. Розглядатимемо квазістатичні процеси, припускаючи, що всі польові функції змінюються у часі за гармонійним законом. В загальному випадку основне рівняння електромагнітного поля відносно комплексної амплітуди векторного магнітного потенціалу, яка має лише одну просторову (осьову) складову  $\vec{A}_z$ , в системі координат статора має наступний вигляд:

$$\vec{A}_z - j\omega\mu\gamma\vec{A}_z + \mu\gamma\omega_R(R \times \text{rot}\vec{A}_z) = -\mu\vec{J}_{ext}, \quad (1)$$

де  $\vec{J}_{ext}$  – густина сторонніх струмів (у даному випадку це щільність струмів в пазах статора, яка задається відповідно до схеми обмотки статора);  $\omega$  – кутова частота зміни у часі векторного магнітного потенціалу;  $\omega_R$  – кутова швидкість обертання ротора;  $\mu$  – магнітна проникність;  $\gamma$  – електропровідність;  $R$  – радіус-вектор довільної точки ротора. Кутова частота зміни у часі магнітного потенціалу і кутова частота обертання ротора залежать від вибору системи координат, в якій виконується розв'язок. Для синхронних машин за відсутності вихрових струмів в осердях статора і ротора рівняння (1) набуває наступного вигляду:

$$\Delta\vec{A}_z = -\mu\vec{J}_{ext}. \quad (2)$$

Джерелами поля є густина сторонніх струмів трьох фаз обмотки статора:

$$\vec{J}_{Aext} = I_m u_n / S_n,$$

$$\vec{J}_{Bext} = I_m u_n [\cos(-2\pi/3) - j\sin(-2\pi/3)] / S_n, \quad (3)$$

$$\vec{J}_{Cext} = I_m u_n [\cos(-4\pi/3) - j\sin(-4\pi/3)] / S_n,$$

де  $I_m$  – амплітуда струму в фазі обмотки статора;  $u_n$  – число послідовно з'єднаних провідників в пазу статора;  $S_n$  – площа перетину паза статора.

Рівняння (2) доповнюється однорідними граничними умовами першого роду на лінії зовнішньої поверхні ярма статора, що обмежує розрахункову область:

$$\vec{A}_z \Big|_G = 0. \quad (4)$$

Величина  $\mu$  в кожній точці розрахункової області, де знаходяться феромагнітні матеріали, визначається за відповідними кривими намагнічування. Скла-

дові вектора магнітної індукції в декартовій системі координат визначаються за співвідношеннями:

$$\vec{B}_x = \partial\vec{A}_z / \partial y, \quad \vec{B}_y = \partial\vec{A}_z / \partial x, \quad (5)$$

Щільність віброзбуджуючих сил пропорційна тензору магнітного натягу, який має фізичну розмірність тиску ( $\text{H}/\text{m}^2$ ). Модулі нормальної та тангенціальної складових тензора магнітного натягу виражаються як:

$$T_n = \left| \frac{1}{2\mu} (\vec{B}_n^2 - \vec{B}_\tau^2) \right|, \quad T_\tau = \left| \frac{1}{\mu} (\vec{B}_n \cdot \vec{B}_\tau) \right|, \quad (6)$$

де  $\vec{B}_n, \vec{B}_\tau$  – 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 визначаються через проекції вектора індукції в декартовій системі координат за виразами:

$$\begin{aligned} \vec{B}_n &= \vec{B}_y \cos\alpha + \vec{B}_x \sin\alpha = (y\vec{B}_y + x\vec{B}_x) / R_\delta, \\ \vec{B}_\tau &= \vec{B}_x \cos\alpha - \vec{B}_y \sin\alpha = (y\vec{B}_x - x\vec{B}_y) / R_\delta, \end{aligned} \quad (7)$$

де  $x, y$  – проекції радіус-вектора на осі системи координат;  $R_\delta$  – радіус розточки статора. Надалі розглядаються радіальні вібрації, які відбуваються за рахунок дії нормальної складової тензора магнітного натягу.

Для врахування зміни тензора у часі, модель передбачає зміну у часі конфігурації розрахункової області при переміщенні ротора відносно статора. Переміщення ротора моделюється зміною координат  $x, y$  точок ротора. Зміна  $\Delta x, \Delta y$  координат ротора по кроку у часі  $\Delta t$  задаються наступними формулами:

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

Інтервал часу  $T$ , на якому здійснюється аналіз сигналу, відповідає одному періоду, тобто одному повному обороту ротора – для двополюсного ТГ  $T = (0..0.02)$  с. Кількість розрахункових кроків становить 200, тобто один крок по часу дорівнює  $10^{-4}$  с. За один крок ротор повертається відносно статора на третину зубцевої поділки, що задовольняє умовам точності.

**Модель статичного та динамічного ексцентриситету.** Відносне значення ексцентриситету визначається за формулою:

$$\varepsilon = \frac{\delta_{\max} - \delta_{\min}}{\delta_{\max} + \delta_{\min}}, \quad (9)$$

де  $\delta_{\max}, \delta_{\min}$  – максимальне та мінімальне значення ПП відповідно. У даній роботі розглядається статичний та динамічний ексцентриситет ротора при зміщенні його осі відносно осі розточки статора за двома координатами  $X$  (горизонтальний ексцентриситет) та  $Y$  (вертикальний).

Для моделювання ексцентриситету використовується вище приведена польова математична модель, що враховує обертання ротора у часі. На рис. 1 показано зміщення ротора з вісі статора при статичному (а) та динамічному (б) ексцентриситеті. В даній моделі СЕ моделюється зміщенням вісі ротора відносно геометричної вісі статора на величину  $\Delta R$ , яка в загальному випадку розкладається на зміщення координат

ти центра ротора по осі  $Y$  на величину  $\Delta Y = \Delta R \cdot \sin \alpha$  (рис. 1,  $a$ ), а зміщення координати по осі  $X$  дорівнює  $\Delta X = \Delta R \cdot \cos \alpha$ .

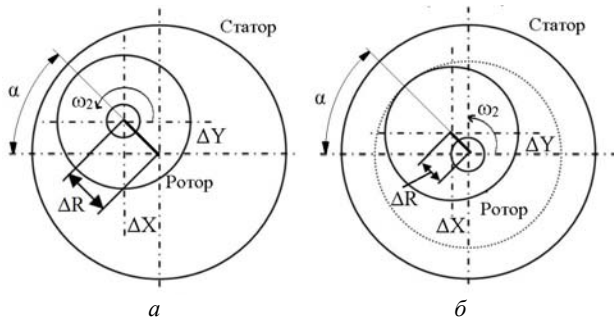


Рис. 1. Моделі статичного ( $a$ ) та динамічного ( $b$ ) ексцентриситету

Розрахункова область включає в себе дві підобласті: нерухому, до якої входить статор, і рухому, що містить ротор. Границя між двома підобластями проходить посередині ПП, при цьому нерівномірний ПП відноситься до підобласті статора. ДЕ моделюється зміщенням геометричної вісі ротора відносно вісі його обертання на величину  $\Delta R$ . При цьому переміщення всіх точок підобласті, що обертається, по координатах  $X$  та  $Y$  залишаються незмінними і рівнянню руху буде відповідати вираз (8). Зауважимо, що при ДЕ, до розрахункової підобласті, що обертається, входить не лише ротор, але і нерівномірний ПП.

Математична модель (1-8) дозволяє змоделювати сигнали умовних датчиків вібрацій (датчиків віброприскорення) як функції часу. Для цього в точках 1, 2, 3 умовного розташування датчиків (рис. 2) за виразом (7) розраховується нормальна складова тензора магнітного натягу (ТМН), оскільки величина віброприскорення пропорційна величині вібробуджуючої сили.

**Результати досліджень.** Дослідження проводились на прикладі ТГ типу ТГВ-200-2. На основі вище описаної математичної моделі надалі досліджуються вібробуджуючі сили, що виникають за рахунок нормальної складової тензора магнітного натягу (при інших рівних умовах технічного стану статора). Як відомо, встановлення одного датчика не достатньо для визначення наявності СЕ, тому вібрації досліджувалися на коронках зубців розточки статора у трьох точках 1, 2, 3. На рис. 2 зображено картину розподілу векторного магнітного потенціалу та магнітної індукції у момент часу  $t = 0,02$  с в активній зоні ТГ.

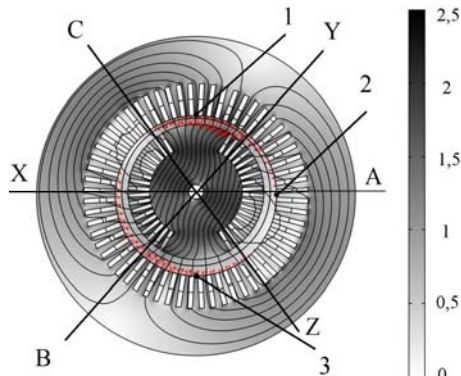


Рис. 2. Розподіл векторного магнітного потенціалу та магнітної індукції з розрахунковими точками

Моделювання виконувалося для номінального режиму роботи генератора при справному стані (відсутність СЕ і ДЕ) та при дефектному (наявності ексцентриситету). СЕ моделювалося за рахунок зміщення ротора вздовж однієї координати  $Y$  при цьому кут  $\alpha = 90^\circ$ . На рис. 3 та рис. 4, відповідно, у трьох зазначених точках на коронках зубців статора зображено розрахункові функції тензора магнітного натягу у часі при наявності СЕ та ДЕ (для  $\varepsilon = 0,25$  при зміщенні ротора вздовж осі симетрії фази А). З рисунків видно, що сигнали 1-го і 2-го датчиків зсувнені між собою у часі по фазі, що відповідає їх просторовому зсуву на  $90^\circ$  уздовж розточки статора. Цифри на графіках відповідають позначенням розрахункових точок.

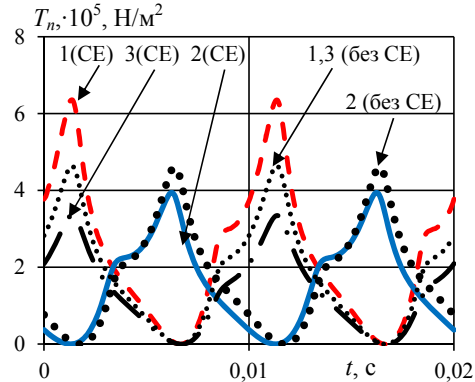


Рис. 3. Функції ТМН у розрахункових точках при наявності СЕ

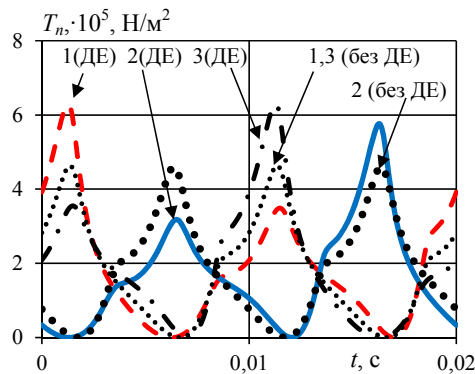


Рис. 4. Функції ТМН у розрахункових точках при наявності ДЕ

За результатами спектрального аналізу при різних значеннях СЕ ( $\varepsilon=0,1$ ,  $\varepsilon=0,2$  та  $\varepsilon=0,25$ ) спостерігаємо збільшення амплітуди гармоніки 100 Гц відповідно на 10, 15 та 30 %. Порівняння функцій ТМН у випадку СЕ показує, що при  $\Delta R = 25$  мм ( $\varepsilon=0,25$ ) у точці 3 з найбільшим ПП амплітуда ТМН зменшилась у 1,4 рази, а в точці 1 – збільшилась у 1,37 рази. Цей ефект чітко видно з графіків при ДЕ, коли при обертанні ротора величина ПП постійно змінюється, а функція ТМН стає несиметричною і, очевидно, що у спектрі з'являється додаткові гармоніки, кратні обертовій частоті.

У зв'язку з вище сказаним, ефективним методом аналізу отриманих часових функцій електромагнітних вібробуджуючих сил є визначення їх спектрального складу за допомогою швидкого перетворення Фур'є. На рис. 5 показано амплітуди ТМН при СЕ в залежності від значення  $\varepsilon$  для різних варіантів зміщення ротора відносно фазних зон обмотки статора. Відмітимо, що різні варіанти зміщення ротора відносно осі обертання проводились при фіксованому положенні осі

фазної зони А, яка при моделюванні співпадала з горизонтальною віссю. Амплітуди ТМН показані в трьох точках розташування датчиків (т.1 – т.3). Результати математичного моделювання показали, що у випадку СЕ при  $\Delta R = 25$  мм ( $\epsilon=0,25$ ) амплітуда основної гармоніки електромагнітних сил збільшилась на 32 %. Також в спектрі вібробуджуючих сил присутні складові, що створюють вібрації на частотах 200, 300, 400 Гц та становлять відповідно 15, 18 та 12 % по відношенню до основної гармоніки.

Отже, найбільш небезпечним є ексцентриситет у випадку, коли напрям ексцентриситету співпадає з віссю фази статора. Так, з рис.5,а видно, що вже при  $\epsilon = 0,1$  амплітуда вібробуджуючих сил зростає на 13 %.

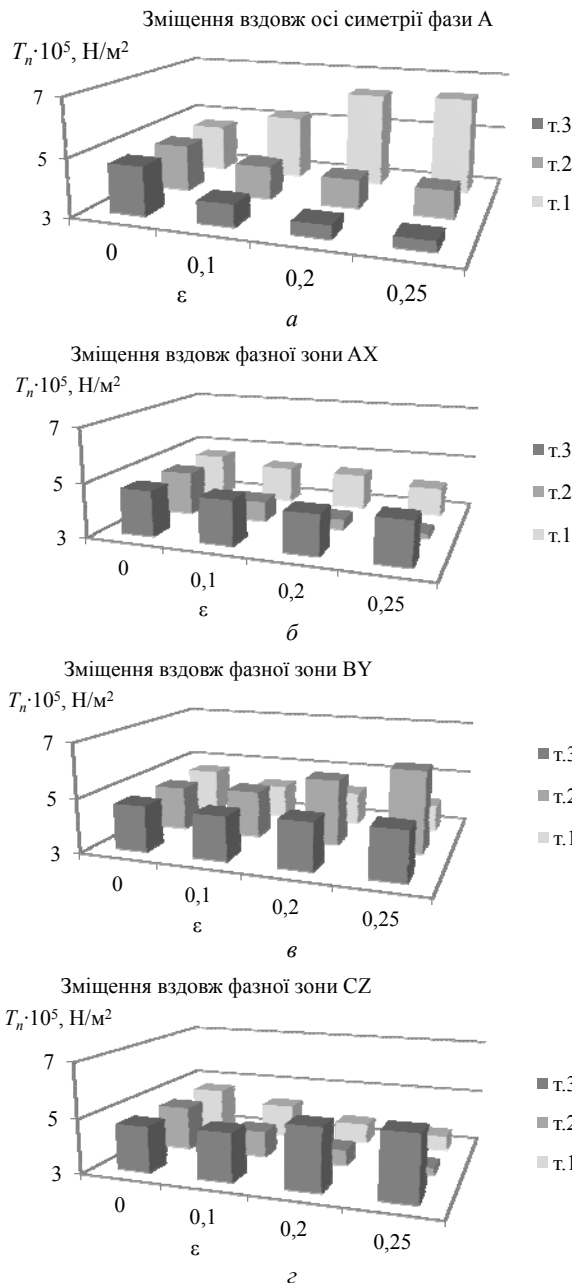


Рис. 5. Амплітуди тензора магнітного натягу в залежності від коефіцієнту ексцентриситету

На рис. 6 для випадку ДЕ приведено амплітуди спектрів ТМН для частот 50 Гц (а), 150 Гц (б) та 250 Гц (в). З рис.6,а,б видно, що амплітуди кожної із гар-

монік частоти обертання 50 Гц та кратної їй 150 Гц складають 12 % (при  $\epsilon=0,1$ ), 25 % (при  $\epsilon=0,2$ ) та 30 % (при  $\epsilon=0,25$ ) від основної гармоніки 100 Гц. Такі результати можуть бути основою для формулювання відповідних діагностичних ознак та визначення наявності дефекту.

Важливу оцінку технічного стану генератора при появі пошкодження надає аналіз зміни сумарної вібрації від усіх гармонік, яка характеризується середньоквадратичним значенням (СКЗ). Коефіцієнт зміни СКЗ спектру ТМН  $k_{rms\_T}$  характеризує відношення СКЗ спектру ТМН ушкодженого ТГ до СКЗ спектру ТМН неушкодженого ТГ і розраховується за формулою:

$$k_{rms\_T} = \sqrt{\sum_{i=1}^N |T_{i\_fault}|^2} / \sqrt{\sum_{i=1}^N |T_{i\_no\_fault}|^2}, \quad (10)$$

де  $N$  – кількість врахованих гармонік в спектрі;  $i$  – номер гармоніки;  $T_{i\_fault}$ ,  $T_{i\_no\_fault}$  – амплітуди  $i$ -ої гармоніки ТМН в спектрах сигналів датчика вібрації відповідно ушкодженого і неушкодженого ТГ.

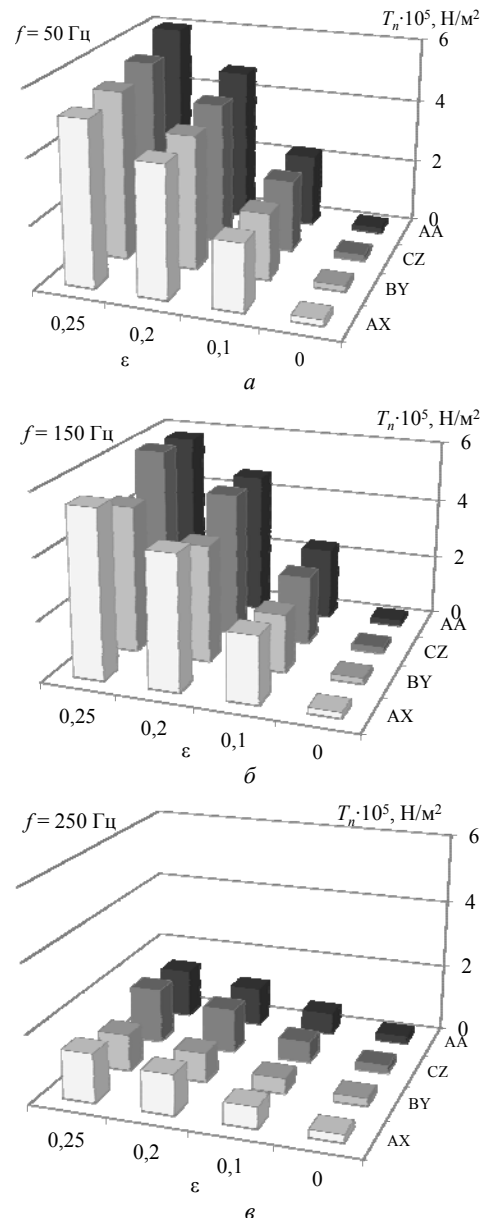


Рис. 6. Амплітуди частот спектру тензора магнітного натягу в залежності від величини ексцентриситету

У табл. 1 приведено СКЗ спектру ТМН, розрахованого у т.1. Позначення АХ, ВУ та СZ відповідають зміщенню ротора вздовж осі відповідної фазної зони, позначення АА відповідає точці розташування датчика у зоні мінімального ПП при зміщенні ротора вздовж осі симетрії фази А обмотки статора. З табл. 1 видно, що сумарний рівень вібрації електромагнітного походження при СЕ є найбільшим, коли напрям ексцентриситету співпадає з віссю фази обмотки статора (в даному випадку з вертикальною віссю). Електромагнітні вібрації під іншими фазами при СЕ (АХ, ВУ, СZ) зменшуються.

Таблиця 1

	$\epsilon$	АА	АХ	ВУ	СZ
СЕ	0,1	1,111	0,912	0,904	0,93
	0,2	1,326	0,954	0,899	0,838
	0,25	1,329	0,967	0,851	0,8
ДЕ	0,1	1,015	1,012	1,01	1,01
	0,2	1,079	1,038	1,02	1,074
	0,25	1,123	1,065	1,035	1,112

Тому для визначення максимальних вібрацій необхідно встановлювати датчик навпроти вісі фази обмотки статора. При хибному встановленні датчика результати вимірювання будуть вказувати на зменшення рівня вібрацій, що не дозволить виявити наявність СЕ. При ДЕ сумарний рівень вібрації не залежить від напрямку ексцентриситету. Однак, незважаючи на те, що вібрації електромагнітного походження є меншими, ніж при СЕ, потрібно брати до уваги, той факт, що існують вібрації механічного походження, які пов'язані з коливанням центра мас ротора. Тому сумарні вібрації при ДЕ можуть бути більшими у порівнянні з вібраціями при СЕ.

Узагальнено отримані результати математичного моделювання, шляхом введення діагностичних параметрів при різних величинах ПП та напрямку зміщення ротора відносно фазних зон обмотки статора. У табл. 2 приведено діагностичний параметр  $k_{\delta}$ , який дає змогу діагностувати появу СЕ на основі вимірювань амплітуд сигналів датчиків.

$$k_{\delta} = T_{fault} / T_{no\_fault} \quad (11)$$

У табл. 3 приведено значення діагностичного параметру  $k_{\epsilon}$ , які характеризують відношення різниці амплітуд ТМН у першій і другій точках ( $k_{\epsilon 12}$ ) та у першій і третій ( $k_{\epsilon 13}$ ) відповідно до амплітуди ТМН у першій точці при різних значеннях коефіцієнту ексцентриситету.

$$k_{\epsilon 12} = \frac{T_{T1} - T_{T12}}{T_{T1}}; \quad k_{\epsilon 13} = \frac{T_{T1} - T_{T13}}{T_{T1}} \quad (12)$$

Отримані діагностичні параметри приведено у табл. 2 та 3. Наведені результати дають змогу сформулювати доцільну методику діагностування ексцентриситету. Для визначення СЕ необхідно встановлення, як мінімум, двох датчиків, наприклад, зверху та знизу на вертикальній осі, оскільки найбільш ймовірним напрямом зміщення ротора вздовж вертикальної вісі. А порівняння сигналів двох датчиків дасть змогу діагностувати появу ексцентриситету. Для діагностування ДЕ достатньо встановлення одного датчика вібрації, оскільки при такому виді дефекту ПП в одній точці не є постійним. Після проведення вимірювання сигнал датчика розкладається в ряд Фур'є і якщо у спектрі сигналу присутні гармоніки кратні обертовій частоті, то можна стверджувати про наявність ДЕ.

Таблиця 2

Фазна зона обмотки статора, відносно якої моделювалось зміщення ротора	ПП між статором та ротором, $\delta$ , мм						
	75	80	90	100	110	120	125
АА	1,371	1,356	1,126	1	0,802	0,74	0,716
АХ	0,873	0,933	0,94	1	0,992	0,958	0,982
ВУ	0,857	0,906	0,911	1	0,984	1,01	1,021
СZ	0,764	0,806	0,91	1	1,016	1,125	1,145

Таблиця 3

Фазна зона обмотки статора, відносно якої моделювалось зміщення ротора	$k_{\epsilon 12}$		$k_{\epsilon 13}$		$k_{\epsilon 12}$		$k_{\epsilon 13}$	
	$\epsilon = 0,1$		$\epsilon = 0,2$		$\epsilon = 0,25$		$\epsilon = 0,25$	
	$k_{\epsilon 12}$	$k_{\epsilon 13}$	$k_{\epsilon 12}$	$k_{\epsilon 13}$	$k_{\epsilon 12}$	$k_{\epsilon 13}$	$k_{\epsilon 12}$	$k_{\epsilon 13}$
АА	0,207	0,281	0,365	0,452	0,379	0,473	0,379	0,473
АХ	0,140	-0,065	0,219	-0,037	0,215	-0,136	0,215	-0,136
ВУ	-0,119	-0,091	-0,291	-0,125	-0,516	-0,202	-0,516	-0,202
СZ	0,063	-0,128	0,045	-0,410	0,084	-0,514	0,084	-0,514

### Висновки.

1. При виникненні статичного ексцентриситету у зоні мінімального повітряного проміжку спостерігається суттєве збільшення віброзбуджуючих сил, аналіз яких дозволяє діагностувати uszkodження ротора. Показано, що при співпаданні напрямку статичного ексцентриситету з геометричною віссю однієї з фаз обмотки статора, збільшення вібрацій буде максимальним. Цей факт доцільно враховувати при розташуванні фаз обмотки статора відносно горизонтальної осі в процесі виготовлення турбогенераторів з урахуванням найбільш вірогідного напрямку виникнення

статичного ексцентриситету, викликаного, наприклад, дією сили тяжіння, тощо.

2. При виникненні динамічного ексцентриситету вібрації електромагнітного походження є меншими ніж при статичному ексцентриситеті, проте механічна складова вібрацій, яка пов'язана з коливанням центра мас ротора, вносить суттєвий вклад у сумарний рівень вібрацій. Введено діагностичні параметри  $k_{\delta}$ ,  $k_{\epsilon 12}$ ,  $k_{\epsilon 13}$ , на основі яких може бути побудована система та методика діагностування ексцентриситету.

3. Діагностичною ознакою статичного ексцентриситету є зміна амплітуди віброзбуджуючих сил в зоні

мінімального повітряного проміжку. Спектр гармоніки 100 Гц при статичному ексцентриситеті в межах  $\varepsilon=0,1; 0,2$  та  $0,25$  в зоні мінімального повітряного проміжку збільшується відповідно на 10, 15 та 30 %. Діагностичною ознакою динамічного ексцентриситету є поява у спектрі вібробуджуючих сил обертової та кратних їй гармонік.

#### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Васьковський Ю.М., Титко О.І., Мельник А.М. Діагностика uszkodzeń обмотки збудження потужного турбогенератора на основі аналізу електромагнітних вібробуджуючих сил // Праці Інституту електродинаміки НАН України. – 2013. – №36. – С. 40-46.
2. Васьковський Ю.М., Цивінський С.С., Титко О.І. Електромагнітні процеси у демпферній системі роторів гідроенергетик при нерівномірності повітряного проміжку // Технічна електродинаміка. – 2015. – №1. – С. 65-71.
3. Гайденок Ю.А., Вишневіський Т.С. Метод електромагнітної діагностики статического ексцентриситета ротора в синхронном генераторе // Гідроенергетика України. – 2011. – №2. – С. 52-57.
4. Левицький А.С., Федоренко Г.М. Визначення параметрів дефектів повітряного зазору в гідроенергетиках за даними датчиків, розміщених на статорі // Гідроенергетика України. – 2008. – №1. – С. 30-33.
5. Кучинський К.А. Аналіз температурного поля ротора турбогенератора потужністю 300 МВт при асиметрії охолодження пазової зони // Технічна електродинаміка. – 2013. – №4. – С. 59-66.
6. Мильх В.И., Полякова Н.В. Сравнительный анализ переменного магнитного поля на поверхности ротора турбогенераторов с разным числом зубцов статора в режиме нагрузки // Технічна електродинаміка. – 2014. – №2. – С. 29-36.
7. Sedky M.M. Diagnosis of static, dynamic and mixed eccentricity in line start permanent magnet synchronous motor by using FEM // International journal of electrical, robotics, electronics and communications engineering. – 2014. – vol.8. – no.1. – pp. 29-34.
8. Yonggang Li, Guowei Zhou, Shuting Wan, Heming Li. Analysis of unbalanced magnetic pull on turbo-generator rotor under air-gap eccentric fault and rotor short circuit fault // International journal of advancements in computing technology. – 2013. – vol.5. – no.4. – pp. 523-530. doi: 10.4156/ijact.vol5.issue4.62.

#### REFERENCES

1. Vaskovskyi Yu.M., Tytko O.I., Melnyk A.M. Diagnosis of damage to the excitation winding powerful turbogenerator based on the analysis of electromagnetic forces. *Works of the Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine*, 2013, no.36, pp. 40-46. (Ukr).
2. Vaskovskyi Yu.M., Tsyvinskyi S.S., Tytko O.I. Electromagnetic processes in the damper winding of hydro generator with eccentricity of air gap. *Tekhnichna elektrodynamika*, 2015, no.1, pp. 65-71. (Ukr).
3. Haidenko Yu.A., Vishnevskiy T.S. Electromagnetic method of diagnostic of static eccentricity of synchronous generator. *Hydropower Ukraine*, 2011, no.2, pp. 52-57. (Rus).
4. Levytskyi A.S., Fedorenko H.M. Characterization of air gap fault in hydrogenerators to data by sensors located on stator. *Hydropower Ukraine*, 2008, no.1, pp. 30-33. (Ukr).

5. Kuchynskiy K.A. Analysis of temperature field of rotor of turbogenerator capacity 300 mW at asymmetry of cooling of grooving zone. *Tekhnichna elektrodynamika*, 2013, no.4, pp. 59-66. (Rus).
6. Milykh V.I., Polyakova N.V. Comparative analysis of the variable magnetic field on the surface of the rotor of turbogenerators with different numbers of stator teeth in the load condition. *Tekhnichna elektrodynamika*, 2014, no.2, pp. 29-36. (Rus).
7. Sedky M.M. Diagnosis of static, dynamic and mixed eccentricity in line start permanent magnet synchronous motor by using FEM. *International journal of electrical, robotics, electronics and communications engineering*, 2014, vol.8, no.1, pp. 29-34.
8. Yonggang Li, Guowei Zhou, Shuting Wan, Heming Li. Analysis of unbalanced magnetic pull on turbo-generator rotor under air-gap eccentric fault and rotor short circuit fault. *International journal of advancements in computing technology*, 2013, vol.5, no.4, pp. 523-530. doi: 10.4156/ijact.vol5.issue4.62.

Надійшла (received) 16.03.2016

Васьковський Юрій Миколайович<sup>1</sup>, д.т.н., проф.,  
Мельник Андрій Миколайович<sup>2</sup>, аспірант,  
Титко Олексій Іванович<sup>2</sup>, чл.-кор., д.т.н.,  
<sup>1</sup> Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут»,  
03056, Київ-56, пр. Перемоги, 37, корп. 20,  
e-mail: vun157@gmail.com  
<sup>2</sup> Інститут електродинаміки НАН України,  
03680, Київ-57, пр. Перемоги, 56,  
e-mail: ied10@ukr.net

Yu.M. Vaskovskyi<sup>1</sup>, A.M. Melnyk<sup>2</sup>, O.I. Tytko<sup>2</sup>  
<sup>1</sup> National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute»,  
37, Prospect Peremohy, Kyiv-56, 03056, Ukraine.  
<sup>2</sup> The Institute of Electrodynamics of NAS of Ukraine,  
56, Prospekt Peremogy, Kiev-57, 03680, Ukraine.

#### Electromagnetic vibration disturbing forces at the eccentricity of rotor of turbogenerator.

Electromagnetic vibration disturbing forces in different variants of the rotor displacement from an axis of the stator bore is carried out. Investigation for TG type TGV-200-2 by finite element method in COMSOL Multiphysics is carried out. The field mathematical model of static and dynamic eccentricity is described. The amplitude vibration disturbing forces are greatest, when a static eccentricity direction coincides with an axis of the stator winding phase is shown. The diagnostic features static and dynamic eccentricities are formulated. The most value of forces in the point with minimal air gap is shown. The diagnostic features static and dynamic eccentricities and the method of diagnostic eccentricity are formulated. Diagnostic feature of static eccentricity is to change the amplitude Maxwell stress tensor is established. The dynamic eccentricity diagnostic features are appearance in the spectrum of vibration disturbing forces rotating and multiple harmonics. References 8, tables 3, figures 6,

Key words: turbogenerator, field mathematical model, electromagnetic vibration disturbing forces, Maxwell stress tensor, eccentricity, damage of rotor, diagnostic feature.