

## ДІАГНОСТИКА УШКОДЖЕНЬ ОБМОТКИ ЗБУДЖЕННЯ ПОТУЖНОГО ТУРБОГЕНЕРАТОРА НА ОСНОВІ АНАЛІЗУ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ВІБРОЗБУДЖУЮЧИХ СИЛ

**Ю.М. Васьковський<sup>1</sup>**, докт. техн. наук, **О.І. Титко<sup>2</sup>**, чл.-кор. НАН України, **А.М. Мельник<sup>3</sup>**, магістрант

1, 3 – Національний технічний університет України “КПІ”,

пр. Перемоги, 37, Київ, 03056, Україна

2 – Інститут електродинаміки НАН України,

пр. Перемоги, 56, Київ-57, 03680, Україна

*Розроблено математичну модель для аналізу електромагнітних віброзбуджуючих сил потужних турбогенераторів при uszkodженні обмотки збудження. Проведено порівняльний аналіз спектрів цих сил та сформульовано діагностичні ознаки для виявлення uszkodжень. Бібл. 9, рис. 5.*

**Ключові слова:** турбогенератор, віброзбуджуючі сили, uszkodження обмотки збудження, електромагнітне поле, ротор.

**Вступ.** Високі вимоги до надійності потужних турбогенераторів (ТГ) спонукають до пошуку і впровадження нових способів контролю технічного стану їх у процесі експлуатації. Підвищення рівня надійності експлуатації ТГ може бути досягнуто шляхом розробки ефективних методів діагностики uszkodжень важливих елементів їх конструкції.

Так, у роторах потужних турбогенераторів у процесі експлуатації або при неякісному ремонті можуть виникнути короткі замикання між витками обмотки (найчастіше в лобовій частині обмотки під бандажами) [1]. У деяких випадках внаслідок дії відцентрових сил виткові замикання виникають при номінальній частоті обертання, а при нерухомому роторі не виникають, що ускладнює їх виявлення під час планово-попереджувальних ремонтів. Виткові замикання призводять до низки негативних наслідків, які погіршують робочі характеристики ТГ, зокрема, магнітний потік збудження зменшується, розподіл магнітної індукції в зазорі між ротором і статором стає несиметричним [2]. Окрім того, внаслідок коротких замикань витків ротора виникає нерівномірний розподіл температури уздовж поверхні ротора, оскільки в короткозамкнутих витках тепловиділення практично відсутнє. У результаті неоднорідних термомеханічних напружень виникає прогин ротора у бік, протилежний короткозамкнутих виткам, який, у свою чергу, призводить до збільшення вібрації. З огляду на негативний вплив зазначених явищ, важливу роль набуває діагностика uszkodжень обмотки збудження, яка має базуватися на аналізі певних фізичних величин, що змінюються при uszkodженні обмотки збудження [4]. При великій кількості uszkodжених витків діагностика може бути виконана на основі спостереження величини струму збудження. Більш ефективною та чутливою до появи невеликих за обсягом uszkodжень є вібраційна діагностика, що базується на аналізі змін вібрації осердя статора. Зміни вібрації виникають внаслідок спотворення магнітного поля в зазорі ТГ і відповідно діючих на статор електромагнітних віброзбуджуючих сил [5]. Тому результати аналізу віброзбуджуючих сил дають змогу достовірно визначити не тільки наявність uszkodжених витків обмотки збудження, але й обсяг та місце їх розташування.

*Метою цієї статті є розробка математичної моделі, яка дає змогу розрахувати віброзбуджуючі сили в статорі ТГ при наявності uszkodжень котушок та витків обмотки збудження та визначити діагностичні ознаки для їх виявлення.*

**Математична модель.** Математична модель передбачає розв'язання рівняння електромагнітного поля в активній зоні ТГ і визначення віброзбуджуючих сил у виділених точках на поверхні розточки статора, де умовно розміщуються датчики віброприскорення [3]. З

огляду на велику осьову довжину активної зони ТГ у порівнянні з розміром полюсної поділки поле розглядається у двовимірному наближенні у поперечному перетині. Моделюється процес на періоді часу  $T$ , що дорівнює часу одного повного оберту ротора. Для кожного моменту часу  $t$  на інтервалі часу  $[0...T]$  вирішується наступне стаціонарне рівняння Пуассона стосовно векторного магнітного потенціалу  $A$ :

$$\nabla \times \left( \frac{\nabla \times A}{\mu} \right) = J_c, \quad (1)$$

де  $J_c$  – густина струмів у обмотці статора. Використання рівняння (1) обґрунтовано тим, що вихрові струми в роторі й статорі в сталому синхронному режимі роботи не протікають. Функціями часу в рівнянні (1) є:

1) задані густини струмів фаз обмотки статора:

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

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

2) координати  $x, y$  точок ротора. Збільшення  $\Delta x, \Delta y$  координат ротора на кроці в часі  $\Delta t$  задаються такими формулами:

$$\Delta x = \cos[\omega_2(t + \Delta t)] \cdot x - \sin[\omega_2(t + \Delta t)] \cdot y - x; \quad \Delta y = \sin[\omega_2(t + \Delta t)] \cdot x + \cos[\omega_2(t + \Delta t)] \cdot y - y, \quad (3)$$

де  $\omega_2$  – кутова частота обертання ротора. Складові вектора магнітної індукції  $B_x$  і  $B_y$  визначаються за співвідношеннями через знайдені функції векторного магнітного потенціалу:

$$B_x = \partial A / \partial y, \quad B_y = -\partial A / \partial x. \quad (4)$$

На основі значень  $B_x$  і  $B_y$  у точках умовного розміщення датчиків вібрації можна розрахувати нормальну (спрямовану по вектору нормалі) і тангенціальну (спрямовану по вектору дотичної) складові магнітної індукції  $B_n, B_\tau$ :

$$B_n = B_y \cos \alpha + B_x \sin \alpha = (yB_y + xB_x) / R_\delta; \quad B_\tau = B_x \cos \alpha - B_y \sin \alpha = (yB_x - xB_y) / R_\delta, \quad (5)$$

де  $x, y$  – проекції радіус-вектора на осі системи координат;  $R_\delta$  – радіус розточки статора. За допомогою знайдених значень  $B_n, B_\tau$  у зазначених точках знаходяться проекції тензора магнітного натягу  $T_n, T_\tau$ , які характеризують густина електромагнітних сил:

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

Саме нормальна складова тензора  $T_n$ , змінюючись за часом при обертанні ротора, призводить до вібрацій осердя статора в радіальному напрямку, які фіксуються датчиками віброприскорення. Тангенціальна складова тензора призводить до пульсації електромагнітного моменту ТГ. Надалі будуть досліджуватися зміни в нормальній складовій тензора, які виникають внаслідок ушкоджень обмотки збудження ТГ.

Розрахунок поля і складової тензора  $T_n$  виконується на кожному кроці за часом  $\Delta t$ . Об'єднання отриманих рішень на інтервалі  $[0...T]$  дає часові залежності  $T_n(t)$ , які підлягають подальшому аналізу. Аналіз отриманих залежностей проводиться спектральним методом: періодичні функції  $T_n(t)$  розкладаються в ряд Фур'є за допомогою швидкого перетворення Фур'є. Надалі досліджуються окремі гармоніки спектрів і визначаються діагностичні ознаки, які свідчать про наявність ушкоджень обмотки збудження ТГ.

**Результати моделювання.** Аналіз проводився на прикладі турбогенератора ТГВ-200-2, який має такі дані:  $P_n = 200$  МВт;  $I_{1n} = 8625$  А;  $U_{1n} = 15750$  В;  $2p = 2$ ;  $w_l = 10$ ;  $k_{wl} = 0,909$ ;  $I_{fn} = 1880$  А;  $h_{n1} = 38$  мм;  $h_{n2} = 171,5$  мм;  $b_{n2} = 30,6$  мм;  $z_1 = 60$ ;  $z_2 = 36$ ;  $D_a = 2520$  мм;  $D_2 = 1075$  мм;  $D_l = 1275$  мм;  $D_0 = 120$  мм;  $\delta = 100$  мм;  $w_{k2} = 10$  (число витків у котушці);  $w_f = 180$ .

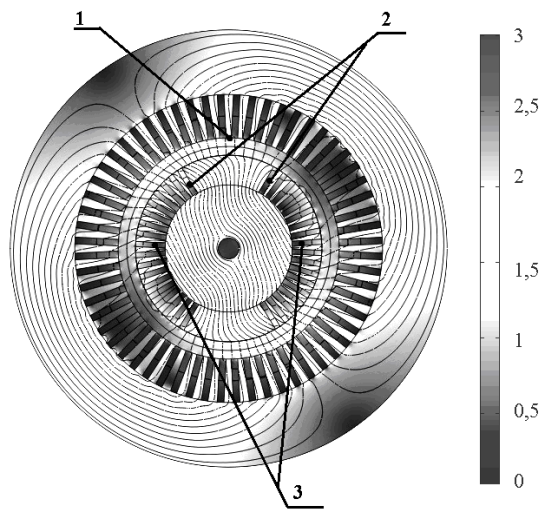


Рис. 1

Розрахунок електромагнітних вібробуджуючих сил проводився для номінального режиму роботи. В результаті математичного моделювання отримано розподіл електромагнітного поля та електромагнітних вібробуджуючих сил в активній зоні ТГ в інтервалі часу  $t = (0 \dots 0,02)$  с з кроком  $\Delta t = 10^{-4}$  с для таких варіантів:

- 1) ТГ без ушкоджень обмотки збудження;
- 2) ТГ при наявності різної кількості короткозамкнених витків у 1-й котушці (рис. 1, поз. 2) поблизу “великого зубця”.

Аналіз проводився почерговим замиканням витків у котушці (починаючи з замикання одного витка і

закінчуючи повним замиканням котушки, яка містить в собі 10 витків);

3) ТГ при наявності в обмотці збудження однієї короткозамкнутої котушки для різних її положень в обмотці (наприклад, котушка може бути розташована поблизу великого зубця ротора (рис. 1, поз. 2) або всередині обмотки (рис. 1, поз. 3)).

На рис. 1 зображено миттєвий розподіл магнітної індукції й векторного магнітного потенціалу в момент часу  $t = 0,02$  с в активній зоні ТГ у номінальному режимі роботи. Вібробуджуючі сили досліджувалися в точці на коронці зубця статора, яка відповідає місцю умовного розміщення датчика вібрації (рис. 1, поз. 1). На рис. 1 також показані короткозамкнені секції в обмотці ротора (рис. 1, поз. 2, 3).

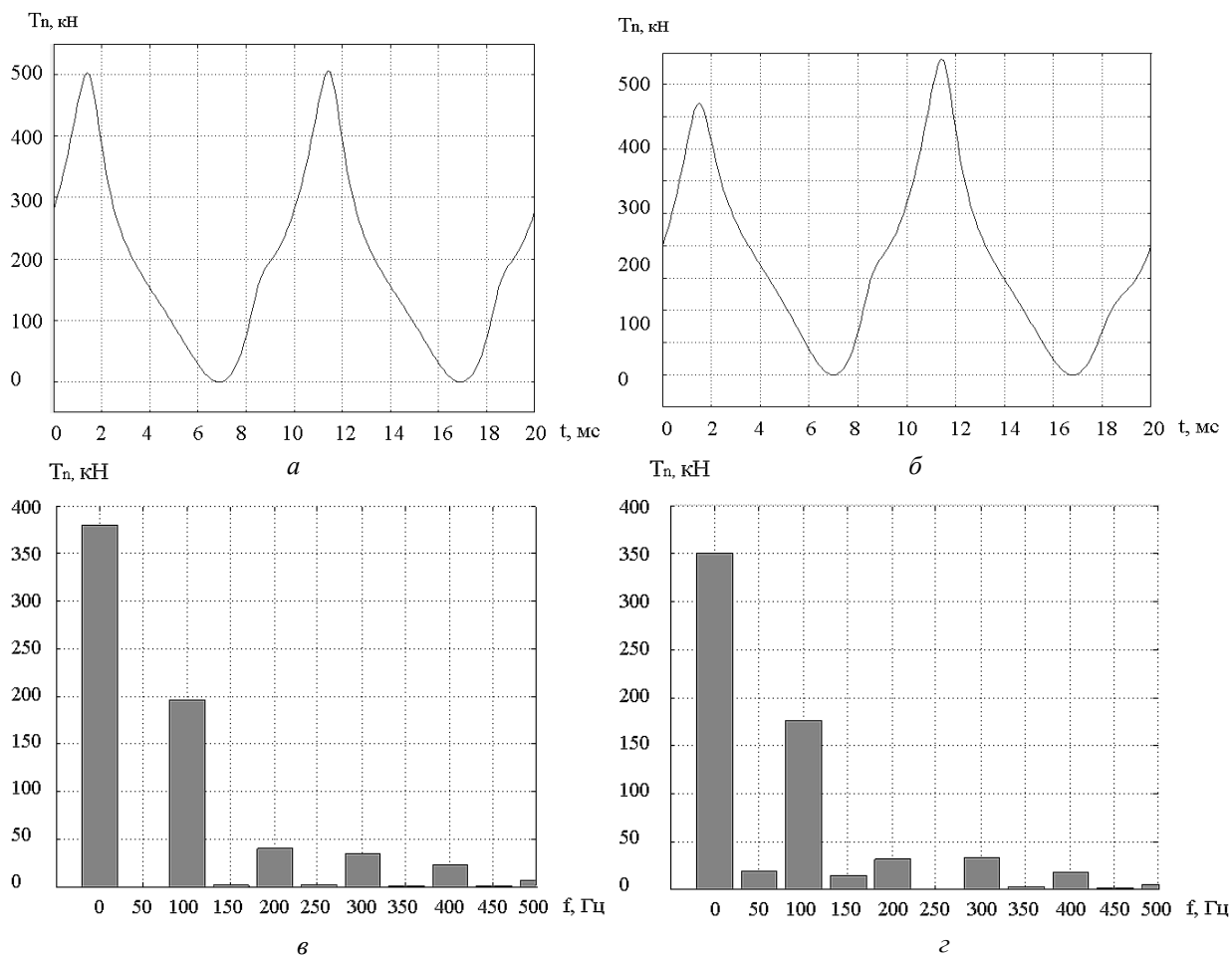


Рис. 2

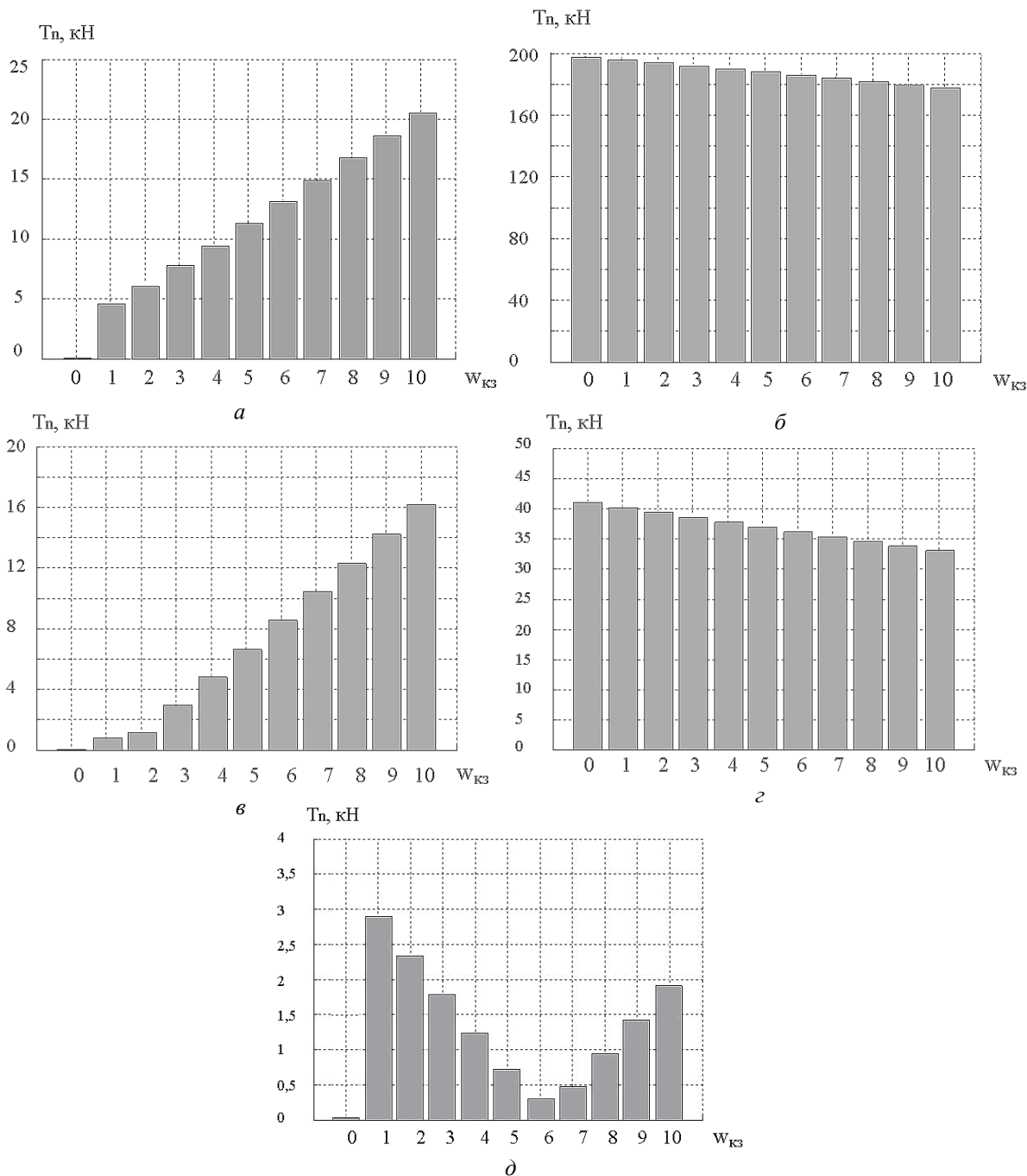


Рис. 3

На рис. 2 зображено часові функції тензора магнітного натягу та їхні спектри при неушкодженій (*a*, *б*) і ушкодженій (*в*, *г*) обмотках (замкнена котушка №1 біля великого зубця).

З рис. 2 *в* видно, що при замиканні котушки функція тензора стає несиметричною, а в її спектрі з'являються додаткові гармоніки віброзбуджуючих сил. Якщо в неушкодженому ТГ в спектрі присутні гармоніка 100 Гц і кратні їй 200, 300, 400 Гц, то при ушкодженні обмотки збудження в спектрі з'являються гармоніка обертової частоти 50 Гц та кратні їй гармоніки 150, 250 та 350 Гц (рис. 2 *г*). Цей факт може використовуватися як діагностична ознака при виявленні ушкоджень обмотки збудження.

Досліджено спектри віброзбуджуючих сил при замиканні різної кількості витків котушки № 1 (рис. 1, поз. 2), що розташована поряд з великим зубцем ротора. На рис. 3 зображені складові спектра тензора магнітного натягу на частотах: *a* – 50 Гц, *б* – 100 Гц, *в* – 150 Гц, *г* – 200 Гц і *д* – 250 Гц при різній кількості замкнених витків котушки (варіюються від 0 до 10, кількість ушкоджених витків позначена на осі абсцис).

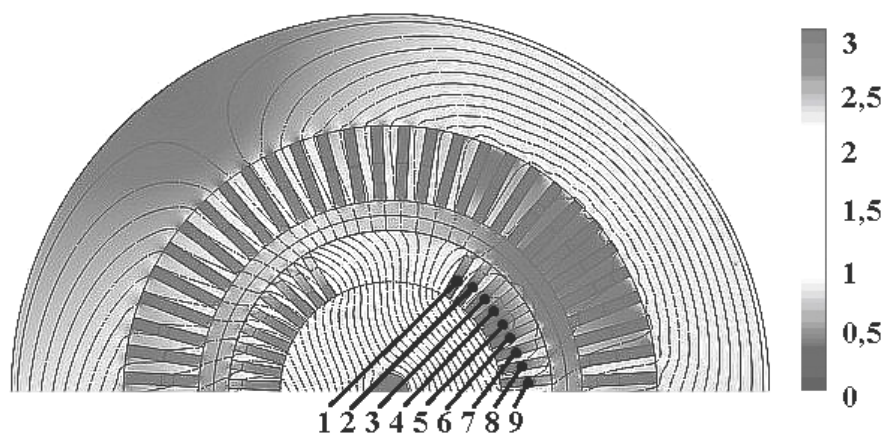


Рис. 4

Отримані залежності свідчать, що при ушкодженні витків котушки № 1: а) основна обертова гармоніка 50 Гц складає 5...10 % від величини головної гармоніки електромагнітних вібрацій на частоті 100 Гц; б) зі збільшенням кількості ушкоджених витків у котушці від 0 до 10 амплітуди гармонік 100 і 200 Гц

зменшуються приблизно на 10 %; в) при повністю замкненій котушці №1 (10 витків) кратна обертовій гармоніка 150 Гц по амплітуді наближується до основної обертової гармоніки 50 Гц. Такі результати аналізу спектра є основою для формулювання відповідних діагностичних ознак.

Досліджено спектри віброзбуджуючих сил при різному положенні повністю замкненої котушки обмотки збудження. Ушкоджена котушка може знаходитися біля великого зубця, в центрі обмотки ротора тощо. На рис. 4 показано розподіл індукції і векторного магнітного потенціалу та позначено номери котушок, замикання яких моделюється. Результат моделювання представлено на рис. 5 у вигляді складових спектра на частотах 50, 100, 150, 200, 250, 300, 350 Гц для нормальної складової тензора магнітного натягу.

На основі проведеного аналізу видно, що амплітуди складових спектра, зокрема, амплітуда обертової 50 Гц і кратних їй гармонік 150, 250 і 350 Гц, суттєво залежать від положення ушкодженої котушки. Найбільші амплітуди гармоніки 50 і 150 Гц мають у разі розташування ушкодженої котушки біля великого зубця ротора. Навпаки, при розміщенні ушкодженої котушки всередині обмотки (великі котушки) ці гармоніки майже зникають. Це пояснюється тим, що спотворення магнітного поля є найбільшим саме при ушкодженні котушки біля великого зубця.

Таким чином, вібродіагностика котушок, розташованих усередині обмотки збудження, є більш складною і менш достовірною, ніж інших котушок. Діагностику ушкоджень таких котушок необхідно проводити на основі аналізу вищих обертових гармонік 250 і 350 Гц, які збільшуються зі збільшенням номера котушки, а також на основі спостереження зменшення вібрацій на частоті 100 Гц.

Слід зазначити, що в результуючому спектрі вібрацій ТГ у номінальному режимі може міститися обертова гармоніка механічного походження (дефекти підшипників тощо). Для її відокремлення виконується додатковий дослід при обертанні ротора з номінальною швидкістю і без збудження обмотки ротора. Знайдений з такого дослідження спектр вібрацій віднімається від результуючого спектра вібрацій при збудженні ротора, що уможливило виділення обертових гармонік електромагнітного походження.

Отримані результати досліджень узгоджуються з експериментальними, що проводились на ТГ Бурштинської ТЕС. Це показує достовірність та точність проведених розрахунків (розходження склало 1 мкм).

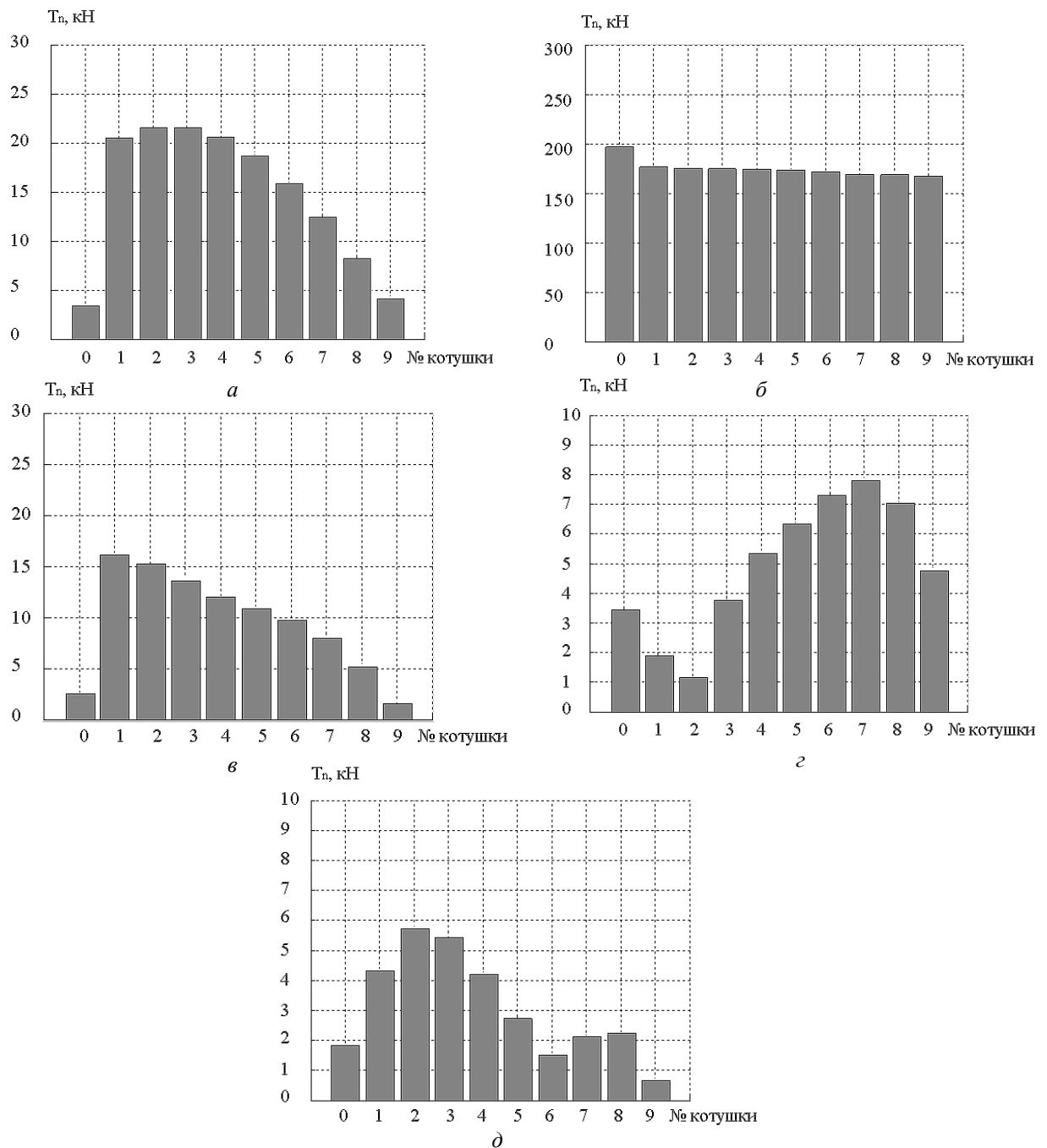


Рис. 5

**Висновки.** 1. Розроблена математична модель, яка враховує обертання ротора у часі, дала змогу проаналізувати віброзбуджуючі сили та їх спектри при різних варіантах ушкоджень обмотки збудження турбогенератора.

2. Короткі замикання витків обмотки збудження призводять до появи в спектрах обертової і кратній їй гармонік, що є діагностичною ознакою в процесі вібраційної діагностики ушкоджень обмотки збудження.

1. *Брановский М.А.* Основные проблемы вибрации современных турбогенераторов // Ремонт оборудования турбинных цехов электростанций. – М.: Энергия, 1966.
2. *Брановский М.А., Лисицин И.С., Сивков А.П.* Исследование и устранение вибрации турбогенераторов. – М.: Энергия, 1969. – 232 с.
3. *Васьковський Ю.М.* Польовий аналіз електричних машин: Навч. посіб. – К.: НТУУ “КПІ”, 2007. – 192.
4. *Глебов И.А., Данилевич Я.Б.* Диагностика турбогенераторов. – Л.: Наука, 1989. – 119 с.

5. Титко А.И., Васьковський Ю.Н. Синхронно-асинхронные турбогенераторы. – К.: Наук. думка, 2010. – 240 с.

УДК 621.314

**Ю.Н. Васьковський**<sup>1</sup>, докт. техн. наук, **А.И. Титко**<sup>2</sup>, чл.-корр. НАН Украины, **А.Н. Мельник**<sup>3</sup>, магистрант  
1, 3 – Национальный технический университет Украины “КПИ”,

пр. Победы, 37, Киев, 03056, Украина

2 – Институт электродинамики НАН Украины,

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

**Диагностика повреждений обмотки возбуждения мощного турбогенератора на основе анализа электромагнитных вибровозбуждающих сил**

*Разработана математическая модель для анализа электромагнитных вибровозбуждающих сил турбогенераторов большой мощности при повреждении обмотки возбуждения. Проведен сравнительный анализ спектров этих сил и сформулированы диагностические признаки для выявления повреждений.* Библ. 9, рис. 5.

**Ключевые слова:** турбогенератор, вибровозбуждающие силы, повреждение обмотки возбуждения, электромагнитное поле, ротор.

**Y.M. Vaskovskyi**<sup>1</sup>, **O.I. Tytko**<sup>2</sup>, **A.M. Melnyk**<sup>3</sup>

1, 3 – National Technical University of Ukraine “Kiev Polytechnic Institute”,

Peremogy, 37, Kyiv, 03056, Ukraine

2 – Institute of Electrodynamics National Academy of Science of Ukraine,

Peremogy, 56, Kyiv-57, 03680, Ukraine

**Diagnosis of damage to the excitation winding powerful turbogenerator based on the analysis of electromagnetic forces**

*The mathematical model for the analysis of vibrating electromagnetic forces high-power turbogenerators if damage to the excitation winding is developed. The comparative analysis range of these forces is carried and formulated diagnostic features for detection damage.* References 9, figures 5.

**Key words:** turbogenerator, vibrating electromagnetic forces, damage to the excitation winding, electromagnetic field, rotor.

Надійшла 21.05.2013

Received 21.05.2013