

РОЗПОДІЛ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ВІБРОЗБУДЖУЮЧИХ СИЛ СТАТОРА ПОТУЖНОГО ТУРБОГЕНЕРАТОРА

О.І. Титко, чл.-кор. НАН України, **А.М. Мельник**, асп.

Інститут електродинаміки НАН України,
пр. Перемоги, 56, Київ, 03680, Україна

Наведено основні результати експериментальних досліджень вібрацій корпусу статора турбогенератора ТГВ-300. Проаналізовано характер розподілу електромагнітних сил, що виникають на поверхні розточки та спинки статора. За допомогою математичного моделювання розглянуто сили електромагнітної природи, що виникають при ослабленні пресування пластин осердя статора. Бібл. 2, рис. 12, таблиця.

Ключові слова: статор турбогенератора, електромагнітні сили, вібрація.

Вступ. На сьогодні більшість турбогенераторів (ТГ) відпрацювала свій розрахунковий термін служби, але й досі експлуатується. Тому важливою задачею є їхня діагностика. Поставлена задача може бути вирішена багатьма шляхами. Один з них – проведення профілактичних випробувань.

У процесі роботи вузли генератора при виникненні дефектів конструкції переходять у віброударні системи, тобто створюють вібрації, які розповсюджуються по конструктивних елементах статора. Вібрації, які поширюються до обшивки корпусу, досить легко зафіксувати за допомогою датчиків, розмістивши їх на статорі. При цьому досить важливим є вивчення особливостей розподілу вібрацій як по колу машини, так і по її довжині. Ця проблема є досить актуальною, у зв'язку з чим постає питання встановлення взаємозв'язку дефектів елементів статора з віброхарактеристиками коливань корпусу.

Як відомо, значний внесок у сумарні вібрації вносять віброзбуджуючі сили електромагнітного походження. Основні складові їх такі:

- а) перша складова має частоту 50 Гц і пов'язана з частотою напруги в мережі живлення f_1 ;
- б) друга складова генерує коливання з частотою прояву електромагнітних процесів у міді й сталі електричної машини і має частоту 100 Гц;
- в) третя пов'язана з частотою обертання електромагнітного поля в зазорі електричної машини f_0 ;
- г) четверта пов'язана з частотою обертання ротора і має частоту 50 Гц (обертובה складова):

$$f_2 = f_0 \cdot (1-s), \quad (1)$$

де s – ковзання ротора;

- д) п'ята складова пов'язана з зубцево-пазовою частотою вібрації;
- е) шоста пов'язана з механічними пошкодженнями елементів ТГ, тріщинами, замиканнями витків обмотки.

Останнім часом важливим питанням є також надійність осердя статорів ТГ [2]. Головним чином це пов'язано з низькою якістю технічного обслуговування обладнання та експлуатацією ТГ у неоптимальних режимах, а саме: підвищеній напрузі, більшому коефіцієнті потужності та в режимі споживання реактивної потужності. У результаті чого відбувається поступове послаблення пресування торцевої частини осердя статора та розпресовування зубців, яке супроводжується появою дефектів та підвищенням вібрації.

Метою статті є дослідження розподілу електромагнітних віброзбуджуючих сил, які діють на поверхні розточки та спинки статора. Для досягнення поставленої мети було використано розроблену раніше математичну модель для визначення віброзбуджуючих сил, описану у роботі [1].

Математична модель передбачає розв'язання рівняння електромагнітного поля в

активній зоні турбогенератора і визначення віброзбуджуючих сил у виділених точках поверхні розточки статора, де умовно розміщуються датчики віброприскорення.

Розрахунок електромагнітних віброзбуджуючих сил проводився для номінального режиму роботи ТГ за формулами

$$\begin{cases} T_n = \frac{(B_n^2 - B_\tau^2)}{2 \cdot \mu_0}, \\ T_\tau = \frac{B_n \cdot B_\tau}{\mu_0}, \end{cases} \quad (2)$$

де T_n , T_τ – проекції тензора магнітного натягу; B_n , B_τ – нормальна і тангенціальна складові магнітної індукції; $\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнітна стала.

Складові вектора магнітної індукції B_x і B_y визначаються за співвідношеннями через знайдені функції векторного магнітного потенціалу:

$$\begin{cases} B_x = \frac{\partial A}{\partial y}; \\ B_y = -\frac{\partial A}{\partial x}. \end{cases} \quad (3)$$

На основі значень B_x і B_y розраховується нормальна і тангенціальна складові магнітної індукції B_n , B_τ відповідно:

$$\begin{cases} B_n = B_y \cdot \cos \alpha + B_x \cdot \sin \alpha = \frac{(y \cdot B_y + x \cdot B_x)}{R_\delta}, \\ B_\tau = B_x \cdot \cos \alpha - B_y \cdot \sin \alpha = \frac{(y \cdot B_x - x \cdot B_y)}{R_\delta}, \end{cases} \quad (4)$$

де x , y – проекції радіус-вектора на осі системи координат; R_δ – радіус розточки статора.

Джерелами поля є густина сторонніх струмів трьох фаз обмотки статора:

$$\begin{cases} \bullet J_{A\text{стор}} = \frac{I_m \cdot u_\Pi}{S_\Pi}; \\ \bullet J_{B\text{стор}} = \frac{I_m \cdot u_\Pi \cdot \left[\cos\left(-\frac{2\pi}{3}\right) - j \sin\left(-\frac{2\pi}{3}\right) \right]}{S_\Pi}; \\ \bullet J_{C\text{стор}} = \frac{I_m \cdot u_\Pi \cdot \left[\cos\left(-\frac{4\pi}{3}\right) - j \sin\left(-\frac{4\pi}{3}\right) \right]}{S_\Pi}, \end{cases} \quad (5)$$

де J_m – амплітуда, яка визначається значенням фазного струму статора і площею перетину провідників фази; u_Π – число послідовно з'єднаних провідників в пазу статора; S_Π – площа перетину паза статора.

Результати моделювання. Зміни у розподілі вібрацій обумовлені двома факторами: дефектами, що призводять до зміни віброзбуджуючих сил, та механічним станом елементів статора машини. Роботи в обох напрямках є важливими для побудови системи вібродіагностики за контролем вібрацій. У цій статті розглядаються задачі розрахунку віброзбуджуючих сил магнітної природи як складової загальних електромагнітних віброзбуджуючих сил.

Отримано просторові розподіли тангенціальної та нормальної складових тензора магнітного натягу: 1) вздовж поверхні розточки статора (рис. 1); 2) на поверхні зубців та пазів (рис. 2); 3) на поверхні спинки (ярма) статора (рис. 3).

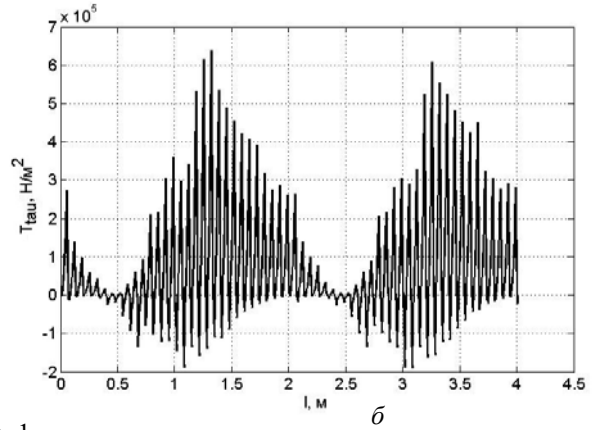
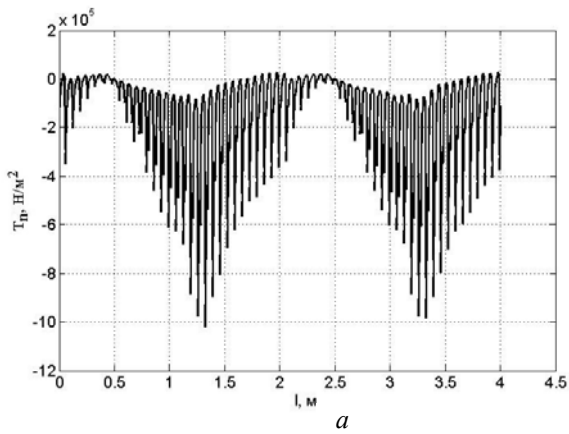


Рис. 1

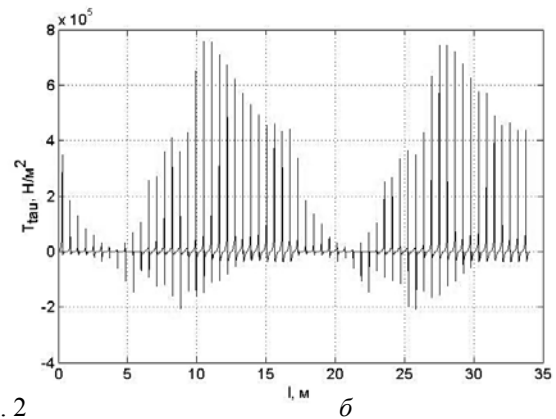
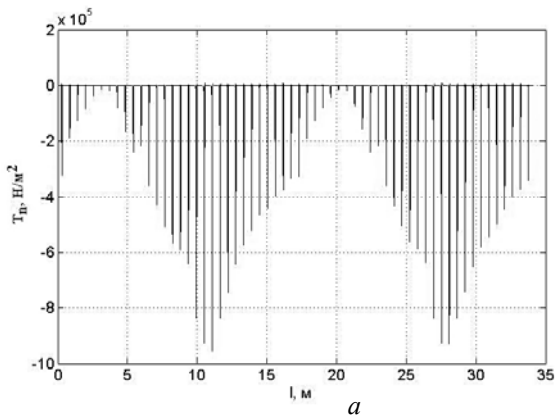


Рис. 2

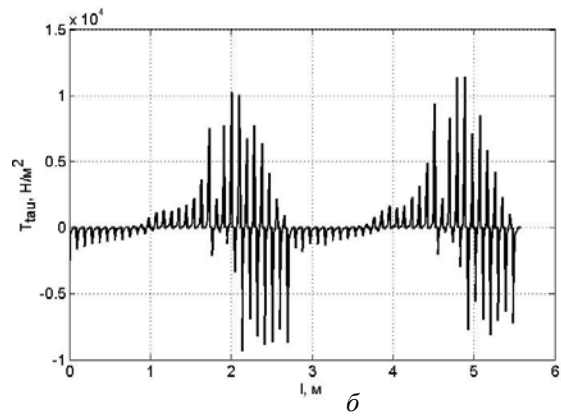
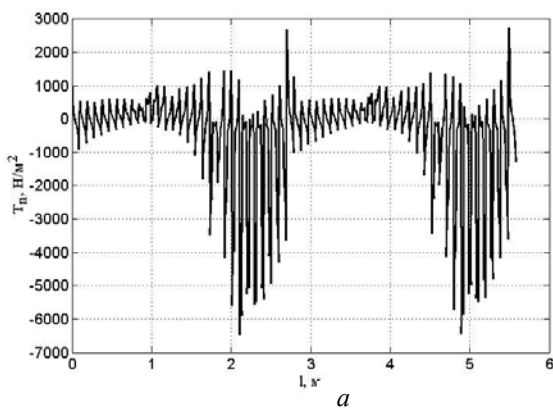


Рис. 3

На рис. 4 показано частини сегмента осердя статора з розрахунковими лініями, де знаходилося просторове значення тензора магнітного натягу: *a* – уздовж розточки статора; *б* – на поверхні зубців та пазів; *в* – уздовж спинки статора.

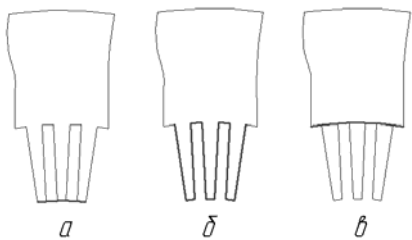


Рис. 4

Для наочності покажемо нормальну (рис. 5–7, *a*) та тангенціальну (рис. 5–7, *б*) складові зміни розподілу тензора магнітного натягу в частині шихтованого сегмента статора у положенні зубець-паз-зубець.

Отримані результати свідчать про те, що на поверхні зубців виникають тангенціальні (радіальні) сили, максимальне значення яких знаходиться у зоні під великим зубцем і складає $1,14 \cdot 10^6$ Н/м². Тангенціальні та нормальні складові сил на поверхні спинки паза майже відсутні (рис. 6).

На основі сформульованої математичної моделі з ви-

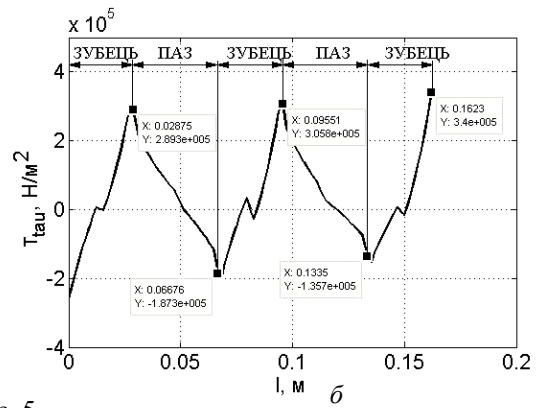
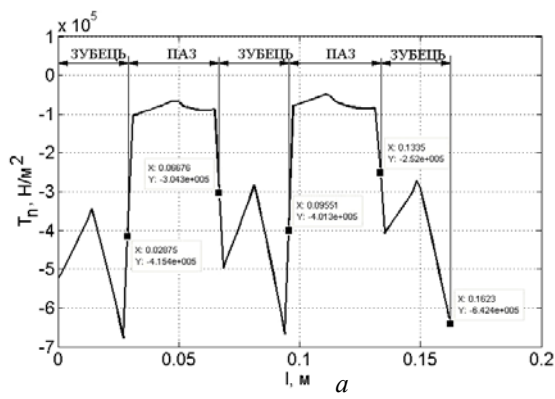


Рис. 5

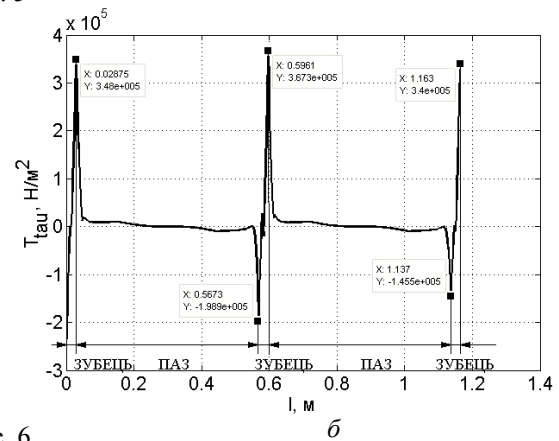
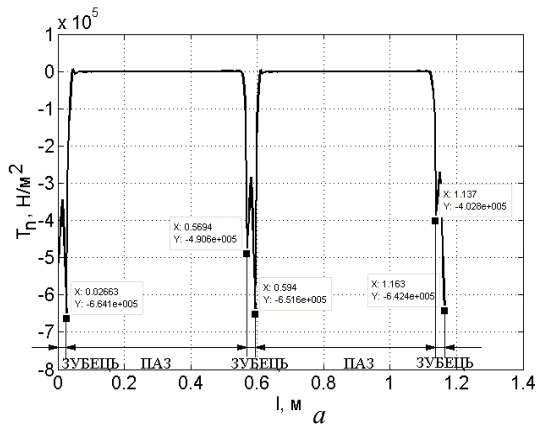


Рис. 6

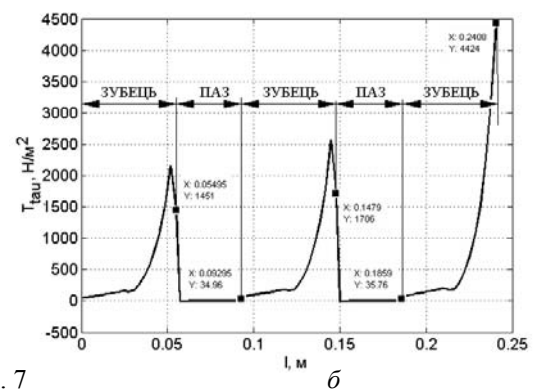
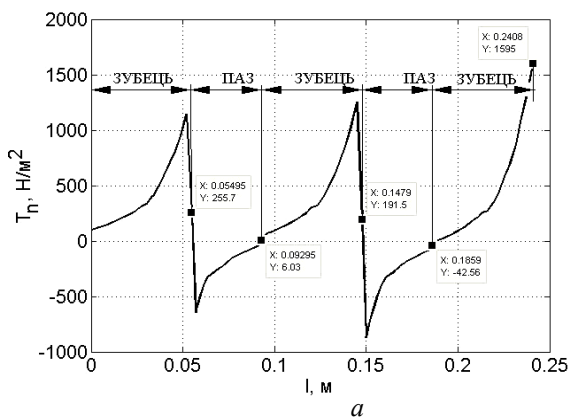


Рис. 7

користанням проведеного розрахунку вібробуджуючих сил розглянемо характер зміни магнітної проникності в зубцях та ярмі при появі розпресовування пластин осердя статора. У загальному випадку процес розпресовування осердя статора описується формулою

$$\mu_{ш} = \frac{\mu_{пл} \cdot h_z + \mu_0 \cdot h_0}{h_z + h_0}, \quad (6)$$

де $\mu_{ш}$ – магнітна проникність шихтованого магнітопроводу; $\mu_{пл}$ – магнітна проникність i -ї пластини осердя статора; h_z – товщина пластини осердя статора; h_0 – товщина міжлистової ізоляції.

У таблиці наведено максимальні значення нормальної й тангенціальної складових тензора магнітного натягу на поверхні розтки статора при різній товщині міжлистової ізоляції.

Складові сили тензора магнітного натягу, Н/м ²	h_0 , мм			
	0,5	1	1,5	2
T_n	$1,14 \cdot 10^6$	$1,107 \cdot 10^6$	$1,107 \cdot 10^6$	$1,041 \cdot 10^6$
T_τ	$6,66 \cdot 10^5$	$6,465 \cdot 10^5$	$6,293 \cdot 10^5$	$6,122 \cdot 10^5$

Зі збільшенням відстані між пластинами сили тензора магнітного тяжіння на поверхні розточки статора дещо зменшуються. Нормальна сила зменшується на 8,6 %, а тангенціальна – на 8 %. Тому це необхідно враховувати при визначенні вібрацій.

На рис. 8 та 9 побудовано залежності величин індукцій та магнітних проникностей, які показують, що при виникненні розпресовування магнітна проникність в ярмі та зубцях зменшується майже у 9,5 разу і поступово падає індукція в зубцях та ярмі на 11 та 7 % відповідно.

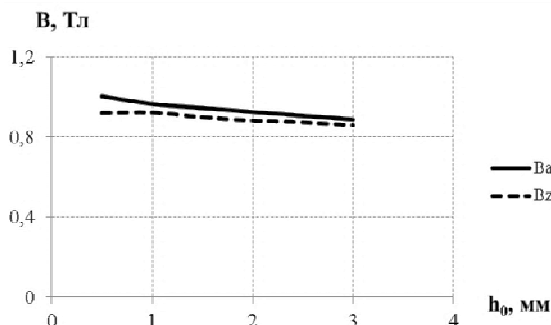


Рис. 8

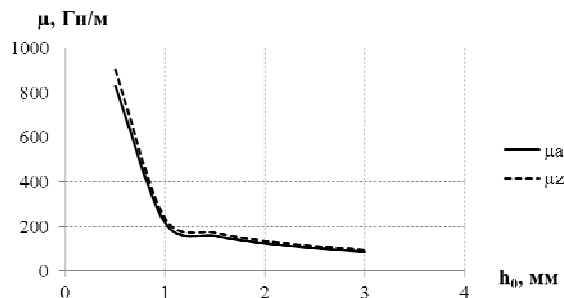


Рис. 9

Співставимо розрахункові дані електромагнітних сил з експериментально отриманими результатами дослідження вібрацій корпусу статора ТГ, що є важливим аспектом для побудови системи діагностичного стану турбогенераторів та створення бази діагностичних ознак.

Експериментальні дослідження. Розглянемо результати вимірювань вібрацій на корпусі осердя статора, які здійснено при випробуваннях на Трипільській ТЕС на турбогенераторі ТГВ-300. Аналіз проведено в контексті з'ясування розподілу вібрацій в об'ємі статора генератора. Досліджено рівні вібрацій, які мають електромагнітну природу у п'яти точках

уздовж корпусу генератора з обох сторін. На рис. 10 показано точки встановлення датчиків на корпусі ТГ (вид зверху).



Рис. 10

Дані за віброприскореннями перераховано у віброзміщення та побудовано розподіл цих вібропараметрів по колу (рис. 11) та довжині (рис. 12) залежно від частот. Далі наведемо результати.

Отримані залежності показують різний характер розподілу обертових вібрацій по колу на різних

частотах. Це пов'язано з відмінностями механічного стану статора у поперечному перерізі.

З рис. 11 б видно, що найменші вібрації знаходяться у зоні з'єднання підшипникових щитів та корпусу на частоті 100 Гц (точки 1 та 5), найбільші віброзміщення корпусу ТГ присутні на подвійній частоті 100 Гц у середній частині шихтованого осердя (точка 3) генератора та прилеглих до них зон натискної плити осердя статора (точки 2 і 4). В основному це пов'язано з магнітними силами, які діють на елементи статора, створюючи коливання та в результаті деформують його осердя. Як показали вимірювання, розподіл цих коливань є досить суттєвим та визначається особливостями розподілу магнітних сил і станом механічно з'єднаних між собою елементів осердя і корпусу статора. Отже, зростання віброзміщень у середній частині ТГ відбувається у зв'язку з мінімальним пресуванням осердя статора. Решта вібрацій на частотах 1200 та 2400 Гц незначна та пов'язана з механічними пошкодженнями елементів статора (тріщини зубців тощо).

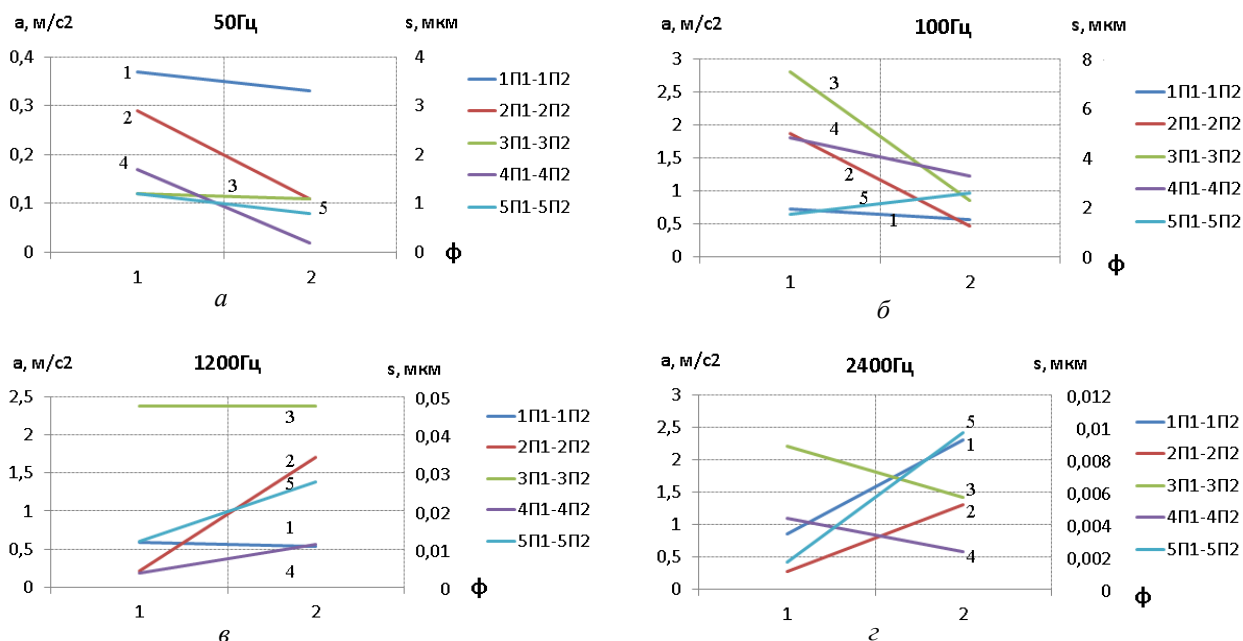


Рис. 11

Отже, цей короткий аналіз показує, що особливості розподілу вібрацій на корпусі статора при різних частотах можна використати для діагностики технічного стану елементів конструкції турбогенераторів.

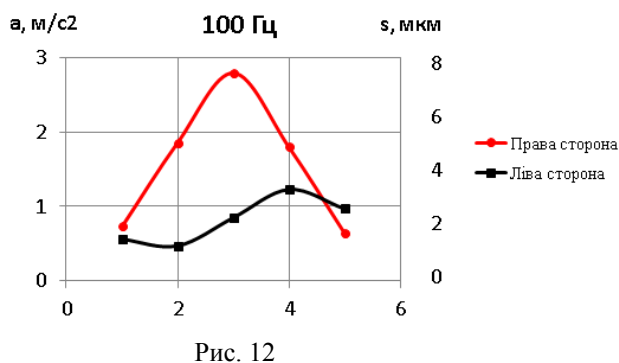


Рис. 12

При розпресовуванні крайніх пакетів статора мають місце два явища, які неоднозначно впливають на рівні вібрацій у статорі. Радіальні магнітні сили при розпресовуванні зменшуються, проте зі зменшенням щільності пресування вібрації збільшуються.

Експериментально доведено, що вібрації подвійної частоти 100 Гц на корпусі статора суттєво змінюються по колу і уздовж машини. Вони визначаються як нерівномірним розподілом віброзбуджуючих сил, на що вказують розрахунки, так і механічним станом елементів системи кріплення статора, що дає змогу використати такий розподіл для діагностики статора ТГ.

1. Васьковський Ю.М., Титко О.І., Мельник А.М. Діагностика ушкоджень обмотки збудження потужного турбогенератора на основі аналізу електромагнітних віброзбуджуючих сил // Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України: Зб. наук. пр. – К.: ІЕД НАН України, 2013. – Вип. 36. – С. 40–46.
2. Голоднова О.С., Ростик Г.В. Анализ и мероприятия по предупреждению повреждений сердечников статоров турбогенераторов // Электросила. – 2004. – № 43. – С. 56–64.

УДК 621.313

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

Институт электродинамики НАН Украины,
пр. Победы, 56, Киев, 03680, Украина

Распределение электромагнитных виброзбуджающих сил статора мощного турбогенератора

Приведены основные результаты экспериментальных исследований вибраций корпуса статора турбогенератора ТГВ-300. Проанализирован характер распределения электромагнитных сил, которые возникают на поверхности рашотки и спинки статора. С помощью математического моделирования рассмотрены силы электромагнитной природы, которые возникают при ослаблении пресовки пластин сердечника статора. Библ. 2, рис. 12, таблица.

Ключевые слова: статор турбогенератора, электромагнитные силы, вибрация.

O.I. Tytko, A.M. Melnyk

Institute of Electrodynamics of the National Academy of Science of Ukraine,
Peremohy, 56, 03680, Kyiv, Ukraine

A distribution electromagnetic vibroexcitation forces of the stator of the powerful turbogenerator

The basic results experimental researches of vibrations on the stator case of turbogenerator TGV-300 are resulted. A distributing behavior of electromagnetic forces which arise on a surface boring and back of stator is analysed. A forces of electromagnetic origin, which arise at droop pressing sheets of the stator core, are considered by a mathematical modelling. References 2, figures 12, table.

Key words: stator of turbogenerator, electromagnetic forces, vibration.

Надійшла 14.01.2014

Received 14.01.2014