



може застосовуватися для ремонту невеликих пошкоджень ізоляції полюса. На фотографіях представлений полюс ГД-1 Київської ГАЕС до і після ремонту з використанням шпатлівки "NOVOL PROFESSIONAL FIBER"

Ісходя з нашого опыта можно сказать, что данная технология ремонта может быть использована для ремонта поясной изоляции других типов явно полюсных электрических машин.

© Капустинский А.С., 2013



УДК 621.313.322

ТИТКО В.О., мол. наук. співр.,
Інститут електродинаміки НАНУ

МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ СИГНАЛІВ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ДІАГНОСТИКИ ШИХТОВАНОГО МАГНІТОПРОВОДУ СТАТОРА ТУРБО- І ГІДРОГЕНЕРАТОРІВ

Досліджено на фізичній моделі спосіб електромагнітної діагностики стану пресування шихтованого осердя статора турбо- і гідрогенераторів на основі використання дугових датчиків, які встановлюються в крайніх пакетах осердя статора. На основі результатів досліджень запропоновано ряд діагностичних параметрів для визначення зміни пресування в локальних місцях по всій поверхні торцевої зони статора турбо- і гідрогенераторів при незначній кількості встановлених датчиків.

В електротехнічних пристроях й апаратах, зокрема, електричних машинах у процесі експлуатації нерідко спостерігається локальне розпресування шихтованих магнітопроводів. Такі дефекти важко контролювати. До того ж ці явища мало вивчені. В динамічних режимах, при пусках і зупинках через неоднакові температурні розширення елементів кріплення статора періодично відбувається розпресування і перепресування шихтованого магнітопроводу, що призводить до побічних дефектів, які поступово розвиваються; порушення листової ізоляції та ізоляції обмотки, механічних пошкоджень зубців, пластичних деформацій стяжних призм та нажимних пальців та ін. Існує ряд способів діагностування цих явищ, у тому

числі на основі аналізу електромагнітних процесів [1, 2–4]. Головна особливість діагностування локального розпресування полягає в тому, що заздалегідь не можна встановити в місці розпресування датчик, крім того, невідомо, якою мірою змінюється електромагнітне поле в областях, віддалених від зони розпресування.

Вказані способи базуються на зміні аксіальної складової магнітної індукції при наявності розпресування. Магнітна індукція вимірюється за допомогою датчиків у вигляді котушок, які визначають індукцію в невеликій зоні.

Для того, щоб контролювати весь масив магнітопроводу необхідно встановлювати велику кількість таких датчиків. Тому пропонується наступний спосіб ідентифікації локального розпресування. На визначеному радіусі встановлюються витки у вигляді дуг по колу в кількості $n \geq 2p$ (Рис. 1). На рисунку для дво полюсної машини показано чотири витки. Розміри витка та їх кількість визначається місцем встановлення так, щоб наведена у витках електрорушійна сила (ЕРС) без великих похибок могла апаратно контролюватись і складала декілька Вольт. А місце встановлення дугоподібних витків визначає величину магнітного потоку, який пронизує витки.

Такий спосіб контролю стану шихтованого магнітопроводу дозволяє визначити ряд діагностичних параметрів. Найбільш простим – є сигнали електро рушійна сила (ЕРС), наведеної в різних витках. Якщо в одному із витків ЕРС відрізняється від ЕРС, наведеної в інших, то це означає, що в місці установки даного витка спостерігається порушення пресування магнітопроводу.

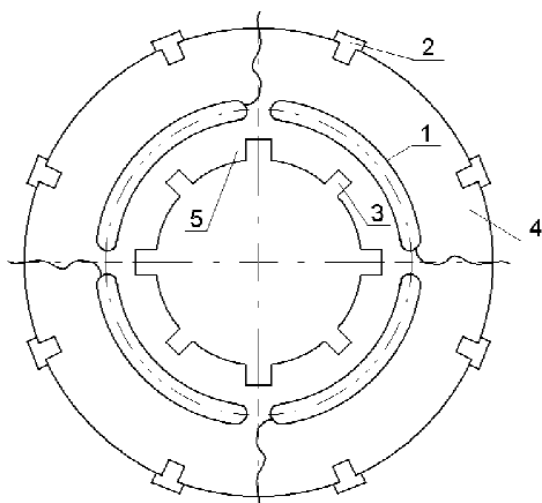


Рис. 1. Приклад встановлення дугоподібних витків ($n=4$) для вимірювання аксіальної складової індукції магнітного поля в шихтованому магнітопроводі статора ТГ (1 – вимірюючі дугоподібні витки; 2 – стяжні призми; 3 – пази; 4 – спинка магнітопроводу статора; 5 – зубцева зона магнітопроводу)



Другим простим діагностичним параметром може бути постійна розкладу в ряд Фур'є. Що це дійсно так, показано на такому прикладі. Беручи до уваги кількість установлених витків (4 витка Рис. 1), сигнал для аксіальної складової магнітної індукції можна представити наступним чином (Рис. 2).

Суцільними кривими позначено індукцію для нормального пресування магнітопроводу, пунктирними – при наявності локального розпресування.

Розкладемо сигнали такого типу в ряд Фур'є.

Відомо [5], що постійна розкладу в ряд Фур'є визначається за формулою

$$b_0 = \frac{1}{2\tau} \int_{-\tau}^{\tau} f(l) dl, \quad (1)$$

де l – лінійна координата вздовж розточки статора.

Для нормального пресування за формулою (1) постійна розкладу в ряд Фур'є функції B_z (Рис. 2) дорівнює нулю. При наявності локального розпресування, наприклад лише в зоні установки I датчика,

$$b_0 = \frac{1}{2\tau} \left[(1+h) \cdot \frac{\tau}{2} + \frac{\tau}{2} - \tau \right] = \frac{h}{4}, \quad (2)$$

Для визначення величини b_0 можна використати дані вимірювання ЕРС, які наводяться в контур датчиків. В цьому випадку

$$b_0 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n-1} y_i, \quad (3)$$

де n – кількість датчиків на двох полюсних рівняннях, y_i – значення ЕРС, які вимірюються датчиками в певний момент часу.

Одним із діагностичних параметрів є зсув фаз ЕРС, наведених в контурних датчиках.

Як відомо, індукцію магнітного поля на поверхні листів осердя статора в електричних машинах змінного струму можна представити в загальному вигляді таким чином

$$B(r, \varphi, t) = A_1(r) \cos(\omega t - p \varphi), \quad (4)$$

де r, φ – координати циліндричної системи, p – число пар полюсів, t – час, $A_1(r)$ – амплітудне значення індукції, яке змінюється в радіальному напрямку.

Таке представлення є справедливим для бездефектної ідеальної машини, коли існує лише пряма електромагнітна хвиля. В дійсності існує також зворотня хвиля, а також локально пульсуюче магнітне поле, яке обумовлено різними чинниками: несиметрією струму, неоднорідністю деталей машини по колу.

Розглянемо, як зміниться вираз (4), коли появляється локальна розпушовка, тобто виникає розпресування в деякій області ($r_1 < r < r_2$) \cap ($\varphi_1 < \varphi <$

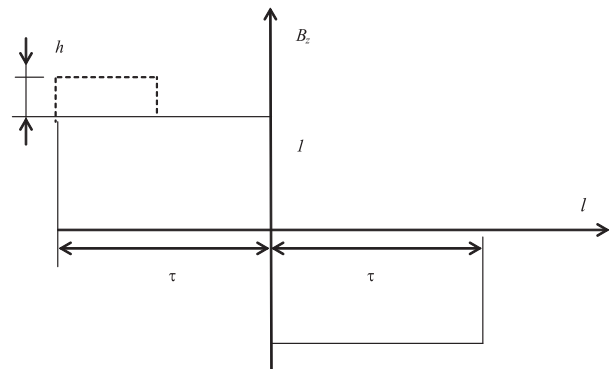


Рис. 2. Сигнали аксіальної складової магнітної індукції при локальному розпресуванні

$<\varphi_2$) у випадку ослаблення деяких болтів стяжних призм або нажимних пальців.

В даній області сигнал для індукції магнітного поля зміниться на величину $A_2(r) \sin \omega t f_1(\varphi)$. Тоді індукція магнітного поля набуде такого виразу

$$B(r, \varphi, t) = A_1(r) \cos(\omega t - p\varphi) + A_2(r) \cos \omega t f_1(\varphi), \quad (5)$$

Розглянемо, як це позначиться на сигнали ЕРС в контурних датчиках.

Для двополосної машини ($p = 1$) та встановлених чотирьох датчиків (Рис. 1) ЕРС в першому датчику, умовно встановленому в проміжку $0 < \varphi < \pi/2$ для бездефектної машини має вигляд

$$E_1 = - \int_{r_0}^{r_a} \int_0^{\pi/2} \frac{\partial B}{\partial t} d\varphi r, \quad (6)$$

де $r_0 < r_1 < r_a$ – область розміщення датчиків в радіальному напрямку. При виконанні всіх математичних операцій з врахуванням виразу (5) будемо мати

$$E_1 = \omega \int_{r_0}^{r_a} (A_1(r) \sin(\omega t - \frac{\pi}{4}) \sin \frac{\pi}{4} r dr, \quad (7)$$

Для другого датчика, зміщеного по відношенню до першого на кут $\pi/2$,

$$E_2 = \omega \int_{r_0}^{r_a} (2 A_1(r) \sin(\omega t - \frac{\pi}{4} - \frac{\pi}{2}) \sin \frac{\pi}{4} r dr, \quad (8)$$

Видно, що ЕРС в сусідніх датчиках зсунуті по фазі на $\pi/2$. При наявності локального розпушування, наприклад, в області встановлення першого датчика величина E_1 з врахуванням виразів (5), (6) буде мати вигляд

$$E'_1 = \omega \int_{r_0}^{r_a} (A_3(r) \sin(\omega t - \frac{\pi}{4} + \psi) r dr, \quad (9)$$

$$\text{де } A_3(r) = \sqrt{(A_2(r) D \sin \frac{\pi}{4})^2 + (2A_1(r) \sin \frac{\pi}{4} + A_2(r) D \cos \frac{\pi}{4})^2},$$



Таблиця 1. Діючі E і половина розмаху значення E_m кривої ЕРС в датчиках при різних станах пресовки шихтованого магнітопроводу

№ вар. експерименту	№ датчика	E , мВ	E_m , мВ
I	1	31	47
	2	28	59
	3	27	37
	4	27	37
II	1	32	45
	2	30	42
	3	35	40
	4	29	39
III	1	48	59
	2	50	57
	3	47	54
	4	46	53
IV	1	48	65
	2	48	65
	3	44	59
	4	44	60
V	1	29	39
	2	30	42
	3	43	55
	4	34	46

$$D = \int_0^{\pi/2} f(\varphi) d\varphi,$$

$$\psi = \arctg \frac{A_2(r) D \sin \frac{\pi}{4}}{2A_1(r) \sin \frac{\pi}{4} + A_2(r) D \cos \frac{\pi}{4}}, \quad (10)$$

Порівнюючи вирази (7), (9) видно, що появляється зсув ЕРС E_1 на кут Ψ , який при $A_2 = 0$ також стає рівним нулю (див. вираз (10)). Отже зсув фаз в ЕРС наведеної в датчиках (Рис. 1) є також діагностичним параметром для виявлення розпушування.

В результаті досліджень можна виявити ряд інших діагностичних ознак.

Даний спосіб є простим і технологічним для застосування. Таким чином, можна контролювати наявність нерівномірності затягу стяжних призм 2 або відкручування гайок, якщо дугоподібні витки встановити в область спинки 4 наближено до призм (Рис. 1).

Проведемо наукове обґрунтування запропонованого способу на основі експериментальних досліджень на фізичній моделі [6] торцевої зони потужного турбогенератора, основним вузлом якої є трифазна обмотка статора, шихтований магнітопровід, затягнутий болтами, нерухомий магнітопровід ротора для моделювання повітряного зазору, натискні пальці.

Експерименти проводились співробітниками групи експериментальних досліджень.

Модель живиться від автономного джерела в складі двох електродвигунів змінного і постійного струму, генераторів постійного та змінного струму. Джерело живлення дозволяє змінювати частоту та

струм в обмотці статора. На фізичній моделі, як і натурному генераторі, створюється обертаюче магнітне поле. Експерименти проводились при 100 А в обмотці та постійній частоті 425 Гц.

Було виготовлено первинні інформаційні датчики у вигляді чотирьох витків, встановлених на двох сегментах і зсунутих по колу на 90 градусів.

Кожен виток виклеєно по контуру спинки осердя статора. При цьому використано мідний провід ПЛШО 0,1 мм. Для того, щоб не пошкодити виток при установці сегментів по контуру витка наклеєні вставки із прешпана товщиною 0,5 мм.

Виводи кожного із датчиків скручено в біфіляри. Для вимірювання ЕРС в кожному із витків використовувались: для вимірювання діючих значень – універсальний цифровий вольтметр В7-35; миттєвих значень – цифровий осцилограф D-S5102С та інформаційно-вимірювальний комплекс на основі комп'ютера і аналого-цифрового перетворювача (АЦП). Такий склад приладів використовувався для підтвердження достовірності результатів вимірювань.

Розпресування моделювалось повним ослабленням затягу всіх гайок, локальне розпушування – ослабленням гайок, розташованих напроти одного із витків, або вийманням її окремих нажимних пальців. Контроль зусиль затягу гайок здійснювався за допомогою динамометричного ключа. Нормальний стан пресування магнітопроводу вважався при затягу в 50 Н/м.

Після складання моделі для проведення чергового варіанту експерименту перевірявся стан датчиків та інформаційно-вимірювальної схеми.

Приведемо узагальнену інформацію про результати досліджень для п'яти варіантів стану пресування магнітопроводу:

I вар. – умовно нормальний стан пресування;

II вар. – ослаблено зусилля затягу гайок стяжних призм в області III датчика;

III вар. – ослаблено зусилля затягу всіх гайок;

IV вар. – знято декілька нажимних пальців в області напроти III датчика і при відсутності зусиль затягу всіх гайок;

V вар. – IV вар. при однакових вихідних зусиллях затягу всіх гайок.

В Табл. 1 представлено значення кривої ЕРС в датчиках при різних станах пресування шихтованого магнітопроводу.

Зупинимось на аналізі результатів досліджень. Перш за все про діагностику на основі параметра b_0

Розрахунки показують такі результати: для I варіанту $b_0 \approx 3$, для II варіанту $b_0 \approx 4$, для V варіанту $b_0 \approx 9$. Розрахунки виконувались за даними ЕРС в чотирьох контурах в один і той же момент часу. Мала кількість датчиків по колу та не досить мала дис-

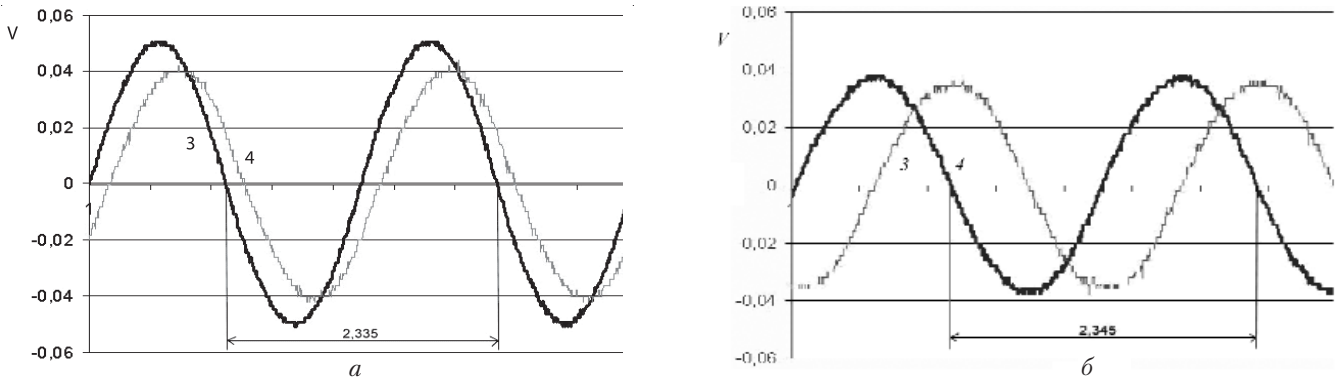


Рис. 3. Криві ЕРС в третьому і четвертому контурах: а – для V варіанту експерименту, б – для I варіанту експерименту

кредність вимірів в часі не дозволяє отримати достить точні значення величин b_0 в різні моменти часу. Тому приведені значення наближені. Вони підтверджують, що b_0 є діагностичним параметром для ідентифікації стану пресування шихтованого магнітопроводу. Величина b_0 максимальна для варіанта, коли була максимальна розпушовка завдяки відсутності нажимних пальців. Величина b_0 в цьому випадку виросла в декілька разів, в порівнянні з випадком, коли пресування умовно рівномірне по колу.

В Табл. 1 приведено узагальнені результати досліджень ефективності запропонованого способу діагностики. Приведено половину розмаху ЕРС, так як ЕРС не являється строгосинусоїдальною функцією. Тобто приведені значення величин умовно відповідають амплітудному значенню ЕРС в датчиках.

Діючі значення ЕРС, які строго вимірювались мілівольтметром, корелюють з розрахунковими на основі вимірювань миттєвих значень. Розходження складало декілька відсотків. Повторні експерименти давали розходження такого ж порядку. Це дозволяє говорити щодо надійності і достовірності отриманих результатів. Вони підтверджують, що при наявності як локального розпушування (вар.: II, IV, V), так і повного розпресування (вар.: III, IV) діючі і амплітудні значення ЕРС змінюються при зміні стану пресування шихтованого магнітопроводу.

На Рис. 3. приведено криві ЕРС в третьому і четвертому контурах для I і V варіантів. Видно, що несиметрія поля, яка виникає через локальне розпушування в зоні установки третього контура, призводить також до зсуву фаз ЕРС в сусідніх контурах – в третьому і четвертому. Ці вимірювання проводились цифровим осцилографом, який визначає зсув фаз в мікросекундах при вибраній частоті ≈ 425 Гц для переднього і заднього фронтів. Якщо брати до уваги, що в ідеальній машині зсув фаз для цих контурів складає близько 0,580 мс, то приведені значення зсуву фаз для двох варіантів експерименту підтверджують правомірність вибору зсуву фаз ЕРС в різних контурах в якості діагностичного параметру.

Отже, приведені результати досліджень підтверджують ефективність запропонованого способу

діагностування стану пресування осердя статора потужних турбогенераторів.

Цей спосіб є технологічним при застосуванні на практиці, економічний для впровадження, а його використання не лише запобігає появі ряду дефектів статора, які призводять до відмов генератора, а і буде давати можливість визначати, які режими найбільш небезпечні з точки зору суттєвих відхилень від оптимальних зусиль пресування осердя статора, в т.ч. рівномірних по колу.

Висновок. Досліджено спосіб електромагнітної діагностики стану пресування шихтованого осердя статора турбо- і гідрогенераторів на основі використання дугових датчиків, які встановлюються в крайніх пакетах осердя статора, на фізичній моделі. Побудовано адекватні математичні моделі електромагнітних сигналів, які знімаються з датчиків та знайдено ряд діагностичних параметрів для визначення зміни пресування в локальних місцях по всій поверхні торцевої зони статора турбо- і гідрогенераторів. Результати досліджень підтвердили високу чутливість діагностичних параметрів та достовірність способу діагностики як при розпресуванні, так і при локальному розпушуванні.

ЛІТЕРАТУРА

1. Пат. 41119А Україна, МПК Н 02 К15/02. Спосіб діагностики пресування шихтованого осердя магнітопроводу / Титко О.І., Томашов Г.В. – № 2001021154; заявл.19.02.2001; опубл. 15.08.2001, Бюл. № 7.
2. А.с. 974509 СССР, МПК5 Н 02 К 15/02. Способ диагностики пресовки шихтованого сердечника магнітопровода /Г.Г. Счастливый, Г.М. Федоренко, В.И. Смородин, А.С. Карацуба, И.А. Євтушенко (СРСР). – № 3246602; заявл. 12.02.81; опубл. 15.11.82, Бюл. № 42.
3. Титко О.І., Шаломигін М.В., Томашов Г.В. Методичні засоби контролю і діагностики стану пресування шихтованого осердя електричних машин // Энергетика и электрификация. – К., 1999. – №7. – С. 1–3.
4. Титко А.И., Томашов Г.В. Методика расчета электромагнитного поля в крайних пакетах сердечника статора при наличии локальной распрессовки // Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України. – К., 2003. – № 2. – С. 73–76.
5. Анго А. Математика для электро- и радиоинженеров / [пер. с франц. К.С. Шифрина]. – М.: Наука, 1967. – 780 с.
6. Постников И.М, Станиславский Л.Я., Счастливый Г.Г. и др. Электромагнитные и тепловые процессы в концевых частях мощных турбогенераторов. – К.: Наук. думка, 1971. – 360 с.