

Цель работы состоит в разработке и исследовании особенностей подхода к определению потерь, обусловленных высшими гармониками поля, по результатам анализа электромагнитного поля асинхронного двигателя. Предложен подход к расчету потерь, обусловленных высшими гармониками электромагнитного поля асинхронного двигателя, исходя из сопоставления результатов полевого анализа квазистационарных и нестационарных процессов электромагнитного поля асинхронного двигателя. Данный подход дает возможность исследовать влияние особенностей электромагнитных процессов, связанных с геометрией, свойствами материалов и режимом работы асинхронного двигателя, на величину потерь от высших гармоник поля. Представленные в работе результаты исследования на примере асинхронного двигателя с массивным гладким ротором продемонстрировали возможность анализа влияния разных факторов на величину потерь от высших гармоник поля асинхронного двигателя, что дает возможность разрабатывать необходимые мероприятия по их уменьшению на стадии проектирования асинхронного двигателя. Библ. 8, рис. 4, таблица.

Ключевые слова: потери, высшие гармоники, квазистационарный, нестационарный.

I.V. Golovan

Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine,
Peremohy, 56, Kyiv-57, 03680, Ukraine

Determination of losses after ultraharmonics electromagnetic field in the induction motor

The purpose of work is to develop and study is particularly suited to the determination of the loss of the higher harmonics of the field for the results of the analysis of the electromagnetic field of the induction motor. The approach of calculating the loss of the higher harmonics of the electromagnetic field of the induction motor, which is in direct determination of the loss of the higher harmonics of the field based on the comparison of the results of field analysis of quasi-stationary and non-stationary processes of the electromagnetic field of the induction motor. This approach makes it possible to investigate the influence of the electromagnetic characteristics of the processes associated with the geometry, material properties and mode of operation of the induction motor, the value of losses for the higher harmonics of the field. Presented in the results of a study on the example of an asynchronous motor with a massive smooth rotor, we demonstrated the ability to analyze the impact of various factors on the value of losses for the higher harmonics of the field of an induction motor, which makes it possible to develop the necessary measures to reduce them to an induction motor design stage. References 8, figures 4, table.

Key words: loss, harmonics, quasi-stationary, non-stationary.

Надійшла 30.06.2016

Received 30.06.2016

УДК 621.313.322-81

ФІЗИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ВІБРОЗБУДЖУЮЧИХ СИЛ ПРИ РОЗПРЕСУВАННІ ШИХТОВАНОГО ОСЕРДЯ СТАТОРА ТУРБОГЕНЕРАТОРА

А.М. Мельник, асп.

Інститут електродинаміки НАН України,

пр. Перемоги, 56, Київ, 03680, Україна

e-mail: ied10@ukr.net

ORCID ID:* <http://orcid.org/0000-0002-7492-3110>

Проведено фізичне моделювання електромагнітних віброзбуджуючих сил при виникненні розпресування шихтованого осердя статора потужного турбогенератора на прикладі масштабних фізичних моделей серійних турбогенераторів потужністю 200 та 500 МВт, розроблених в Інституті електродинаміки НАН України. Показано, що при виникненні локального розпресування крайнього пакета шихтованого осердя статора турбогенератора збільшується амплітуда основної гармоніки вібрацій електромагнітних сил на 25...55 %. Порівняння експериментальних даних з аналітичним розрахунком показало розбіжність результатів майже у 6 %, що є допустимим. Проведено вимірювання розподілу вібрацій на зовнішній поверхні статора фізичної моделі серійного генератора 500 МВт при пошкодженні тяжкої шпильки та виявлено збільшення амплітуди спектра основної гармоніки вібрацій вздовж всієї поверхні. Аналіз зміни розподілу амплітуди другої гармоніки спектра сигналу вібрацій дає змогу чітко діагностувати місце ослаблення тяжкої шпильки. Бібл. 10, рис. 6.

Ключові слова: турбогенератор, фізичне моделювання, електромагнітні віброзбуджуючі сили, експеримент, віброзміщення, віброприскорення.

Вступ. В електричних машинах у процесі експлуатації досить часто спостерігається виникнення розпресування в шихтованих магнітопроводах, особливо їх крайніх пакетів [9]. Це один з найбільш небезпечних дефектів статорів потужних машин, що призводить до скорочення міжремонтних періодів, збільшення обсягів ремонту, аварійних відключень генераторів. Необхідною умовою початку процесу розпресування є зменшення щільності пресування в коронках зубців крайніх пакетів осердя статора. Розпресування зубців у торцевій зоні супроводжується вібрацією листів активної сталі під впливом аксіальних знакозмінних електромагнітних сил, що впливають на торцеву зону зубців осердя. У свою чергу вібрація призводить до пошкодження міжлистової ізоляції та замикання шихтованих листів між собою, поломки окремих зубців сегментів та, як наслідок, ослаблення пресування. Виникають втомні тріщини листів з подальшим їхнім зломом та викришуванням, що дуже небезпечно. Такі дефекти досить важко контролювати, оскільки ця проблема недостатньо вивчена.

Проте на даний час існує низка способів діагностики контролю стану пресування осердя статора, наприклад, як температурний [7], електромагнітний [2, 8], тензометричний [5, 6], ємнісний [4], індукційний [10]. Досить перспективним можна вважати ультразвуковий метод, який базується на залежності часу проходження ультразвукового імпульсу через пакет від ступеня його спресованості [3]. Однак такий спосіб має низку недоліків, одним з яких є залежність результатів вимірювань від навичок персоналу. Існує спосіб візуального контролю щільності пресування крайніх пакетів осердя статора за допомогою спеціального ножа або щупа [1]. Мірою виникнення розпресування є величина заглиблення щупа між окремими листами активної сталі, яка має бути не більшою 4 мм. Такий метод вимагає значних витрат часу. Отже, такі способи не забезпечують достатньої точності й роздільної здатності вимірювання або вимагають витрат великого часу.

Головною особливістю діагностики розпресування є те, що неможливо наперед визначити місце дефекту та встановити туди давач для контролю стану осердя. Метою наведених нижче досліджень є створення нових методів діагностики стану пресування осердя статора потужних турбогенераторів (ТГ) на основі вимірювання розподілу вібропараметрів на поверхні статора. Основним методом, який використовувався при дослідженні, є метод вібродіагностики. Для досягнення поставленої мети були проведені експериментальні дослідження вібрацій на двох фізичних моделях кінцевої зони осердя статора ТГ, які є масштабними моделями серійних генераторів типу ТГВ-200 та ТГВ-500. Для розв'язання поставленої задачі використовувалися теоретичні й експериментальні методи в сфері вібровимірювання фізичних величин. Обробка експериментальних даних виконувалась з використанням програмних пакетів *MS Excel* та *Matlab*.

Експериментальні моделі генераторів. На рис. 1 представлена масштабна фізична модель серійного турбогенератора типу ТГВ-200, яка являє собою набір сегментів осердя статора турбогенератора, де позначено: 1 – котушка 1; 2 – котушка 2; 3 – пакет шихтованих листів; 4 – крайній пакет осердя статора ТГ; 5 – система стяжних болтів; 6 – розв'язуючий трансформатор; 7 – міліамперметр; 8 – реостат. На окремих зубцях намотані дві котушки збудження, які моделюють двополосну магнітну систему. На деякій відстані від зубцевої зони розміщено набір шихтованих листів електротехнічної сталі, що моделює крайній пакет осердя статора турбогенератора. Поряд з ним розміщено ще один пакет, який дає

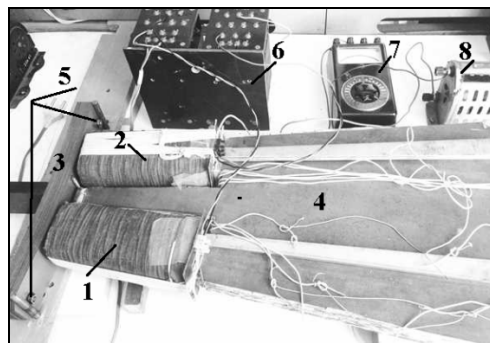


Рис. 1



Рис. 2

змогу підсилити аксіальний магнітний потік за рахунок протилежної орієнтації шихтування. Цей пакет стягнуто системою болтів з можливістю регулювання зусиль затягнення. Така система моделює систему збудження аксіального магнітного потоку в крайніх пакетах осердя статора двополюсних турбогенераторів. Система збудження забезпечує пульсуюче магнітне поле. За допомогою давачів віброприскорення вимірювалась вібрація у шести точках, що спрямована по нормалі до пакета шихтованих листів при різному ступені їх пресування.

На рис. 2 представлена масштабна фізична модель серійного турбогенератора типу ТГВ-500, яка має такі основні параметри: діаметр розточки активного заліза $D_a = 540$ мм; зовнішній діаметр активного заліза $D_1 = 774$ мм; число пазів статора $Z_1 = 48$; висота зубців $h_{z1} = 65$ мм; висота спинки активного заліза $h_{сп} = 117$ мм; діаметр стяжних фланців $d_{фл} = 900$ мм; товщина стяжних фланців $b_{фл} = 27$ мм; діаметр стяжних шпильок $d_{шп} = 20$ мм; кількість стяжних шпильок $n_{шп} = 6$. Фізична модель працює в режимі симетричного трифазного живлення обмотки статора від джерела живлення частоти 500 Гц. Конструкція моделі суттєво спрощена у порівнянні з серійним генератором. Шихтоване осердя статора виконано з електротехнічної сталі марки Е21 товщиною 0,5 мм та стягнуто стяжними шпильками. Магнітопровід ротора представляє собою нерухомий циліндр, виконаний з магнітодіелектрика, що дає змогу уникнути спотворення магнітного поля обмотки статора за рахунок зменшення вихрових струмів, наведених у масиві ротора та його конструктивних елементах.

Результати досліджень. Дослідження на моделі генератора ТГВ-200. Перед початком експерименту проведено ретельну перевірку моделі (затягнення стяжними болтами пакета листів, узгоджене ввімкнення котушок збудження та правильне ввімкнення міліамперметра). Моделювалось два варіанти стану шихтованого пакета: 1) пакет повністю стягнуто, що відповідає бездефектному стану; 2) пакет ослаблено за допомогою болтів, що розміщені по краях. Вимірювались значення вібрацій, а саме віброприскорення, які надалі перераховувались у віброзміщення. В результаті фізичного моделювання отримано розподіл віброприскорень вздовж шихтованого пакета, який показує, що у місцях ослаблення шихтованого пакета розмах вібрацій суттєво змінюється. Так, при повністю затисненому пакеті розмах вібрацій по всій довжині знаходиться у межах $1,8 \dots 2,3$ м/с², а при виникненні розпресування крайніх листів розмах вібрацій в цих зонах зростає і становить $3,4 \dots 5,8$ м/с², тобто зростає в $2 \dots 2,5$ рази. Отже, для подальшого аналізу стану шихтованого осердя сигнали віброприскорень проінтегровано та отримано такий параметр вібрацій, як віброзміщення. Окрім цього, експериментально виміряні сигнали розкладено в ряд Фур'є та проведено спектральний аналіз за основною частотою електромагнітних коливань 100 Гц та вищими – 200 та 300 Гц. На рис. 3 показано сигнали давача віброприскорення (а) у крайній правій точці шихтованого пакета (давач № 7) та спектрограми отриманих сигналів давача (б) відповідно при бездефектному стані пакета (крива 1) та ослабленому пакеті (крива 2).

З наведених спектрограм видно, що при виникненні розпресування осердя суттєво (в даній точці майже в 3 рази) збільшується гармоніка вібрацій основної частоти електромагнітних зусиль 100 Гц. Дещо меншою мірою проявляються вібрації на вищих частотах, таких як 200 та 300 Гц. Надалі для коректного співставлення основної гармоніки вібрацій з вищими гармоніками наведемо розподіл віброзміщень (рис. 4) на поверхні шихтованого пакета за частотами 100 Гц (а) та 200 Гц (б) у точках по нормалі до шихтування.

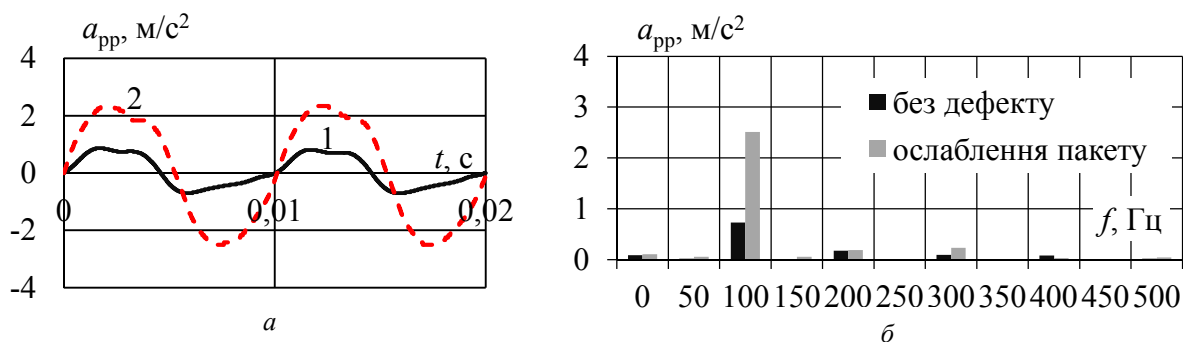


Рис. 3

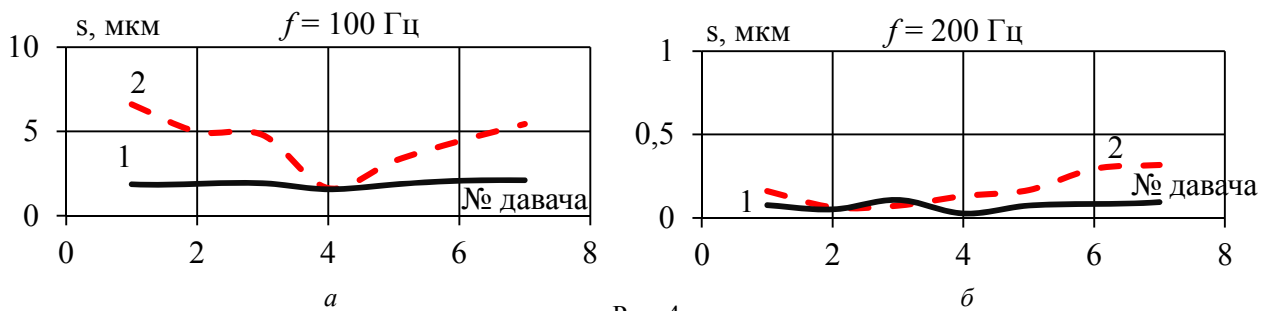


Рис. 4

З наведеного розподілу видно, що при виникненні розпресування листів осердя найбільший вплив на появу вібрацій вносить основна гармоніка електромагнітних зусиль. Як показують побудовані експериментальні залежності, амплітуда вібрацій основної гармоніки збільшується при наближенні до місця локального розпресування. У порівнянні з бездефектним станом шихтованого пакета це збільшення складає 25...55 %. Щодо вищих гармонік, то виникнення розпресування листів осердя не суттєво впливає на вібрації. Так, вібрації у діапазоні 200 Гц певною мірою можуть вказувати на появу розпресування, проте вони є незначними і у порівнянні з основною частотою електромагнітних сил та складають 5...10 %. Зазначимо, що вібрації частоти 300 Гц складають близько 3 %, тому на графіках отриманий розподіл не наведено.

Проведено фізичне моделювання електромагнітних сил у шихтованому магнітопроводі на основі вимірювань магнітної індукції за допомогою давачів магнітного поля, що наклеєні на пакет шихтованих листів (рис. 1, поз. 3). Попередньо було проведено тарування давачів та обчислено коефіцієнти для перерахунку експериментально отриманого сигналу напруги з “mV” у магнітну індукцію в “Тл”. Надалі, використовуючи отриманий розподіл індукції, розраховано електромагнітні сили. Результати фізичного моделювання показано на рис. 5 для трьох режимів живлення котушок: 1 – живлення підключено лише до котушки 1 (рис. 5 а), 2 – живлення підключено до обох котушок, які ввімкнено узгоджено (рис. 5 б), 3 – живлення підключено до обох котушок, які ввімкнено зустрічно (рис. 5 в). На графіках умовні цифрові позначення відповідають наступним варіантам технічного стану шихтованого магнітопроводу: 1 – без дефекту, 2 – розпресування біля 1-го давача (зліва), 3 – розпресування біля 7-го давача (справа), 4 – розпресування біля 4- і 5-го давачів (середина магнітопроводу). З рис. 5 б бачимо, що при ослабленні середньої частини магнітопроводу для випадку узгодженого ввімкнення котушок, коли магнітний потік замикається навпроти 4- та 5-го давачів, спостерігається збільшення електромагнітної сили на 7,8 % (крива 4). Відповідно при ослабленні магнітопроводу по краях навпроти 4- та 5-го давачів бачимо зменшення електромагнітної сили приблизно на 20 %.

Для перевірки адекватності отриманих результатів експерименту аналітично розрахуємо електромагнітну силу в повітряному проміжку, що виникає між магнітопроводом та котушками. За умови незмінності магнітного потоку та нехтуючи розсіянням силових ліній електромагнітна сила обчислюється як добуток густини енергії на об’єм повітряного проміжку S_x , що зайнятий магнітним полем:

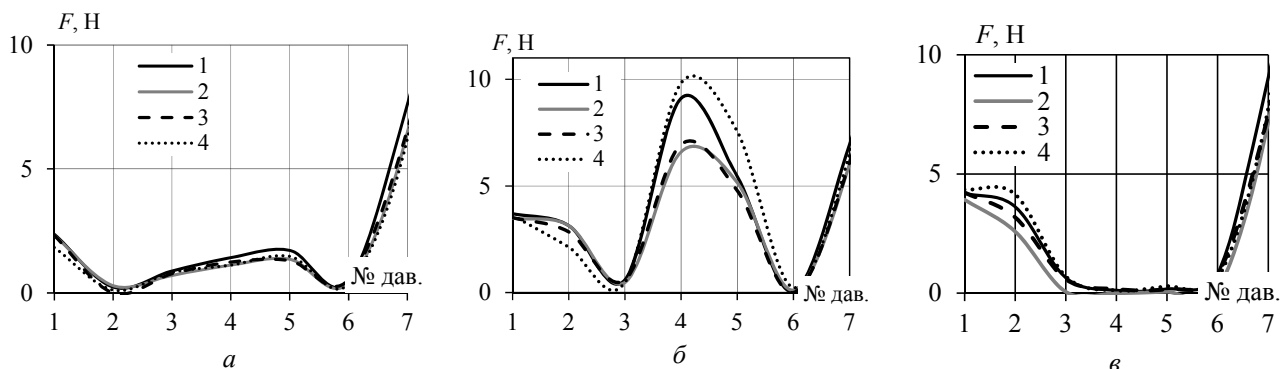


Рис. 5

$$F_{\text{ем_розр}} = \frac{B^2}{2 \cdot \mu_0} \cdot S_x = \frac{0,14338^2 \text{ Тл}}{2 \cdot 1,256 \cdot 10^{-6} \text{ ГН/м}} \cdot 1,05 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2 = 8,589 \text{ Н}.$$

Відповідно до експерименту магнітна сила складає $F_{\text{ем_експ}} = 9,107 \text{ Н}$. Розбіжність у результатах дорівнює 5,7 %, що є прийнятним результатом.

Дослідження на моделі генератора ТГВ-500. Перед початком експерименту (так само як і з моделлю ТГВ-200) проведено ретельне налагодження моделі, за допомогою динамометра перевірено щільність затягнення стяжними шпильками осердя статора фізичної моделі. Моделювалось три варіанти стану кінцевої зони: 1) магнітопровід статора повністю стягнуто (зусилля стягнення $F_{\text{ст}} = 49,03 \text{ Н}\cdot\text{м}$), що відповідає бездефектному стану; 2) середню шпильку ослаблено (зусилля стягнення $F_{\text{ст}} = 19,61 \text{ Н}\cdot\text{м}$); 3) середню шпильку повністю ослаблено, що відповідає дефектному стану (зусилля стягнення $F_{\text{ст}} = 0 \text{ Н}\cdot\text{м}$). На зовнішній поверхні осердя статора вимірювались значення віброприскорення, які надалі перераховувались у віброзміщення (аналогічно, як і у досліді з моделлю ТГВ-200). При цьому частота живлення мережі $f_1 = 500 \text{ Гц}$, струм статора $I_1 = 100 \text{ А}$ та напруга $U_1 = 380 \text{ В}$ були незмінними. На рис. 6 показано отриманий розподіл по колу віброзміщень основної частоти віброзбуджуючих сил 1000 Гц (а) та відповідно частоти 2000 Гц (б): при 1 – бездефектному стані осердя статора (всі шпильки затягнуто, $F_{\text{ст}} = 49,03 \text{ Н}\cdot\text{м}$); 2 – середню шпильку затягнуто ($F_{\text{ст}} = 19,61 \text{ Н}\cdot\text{м}$); 3 – середню шпильку повністю ослаблено ($F_{\text{ст}} = 0 \text{ Н}\cdot\text{м}$).

З отриманого розподілу віброзміщень (рис. 6 а) бачимо, що при ослабленні шпильки амплітуда основної гармоніки віброзбуджуючих сил збільшується по всій поверхні, де проводились вимірювання. При цьому характерне місце ушкодження шпильки з впевненістю вказати досить важко (лише приблизно), оскільки амплітуда вібрацій далі від місця дефекту змінюється нерівномірно. Інші висновки можна зробити, аналізуючи розподіл віброзміщень на частоті 2000 Гц, за яким досить чітко виявляється місце пошкодженої шпильки.

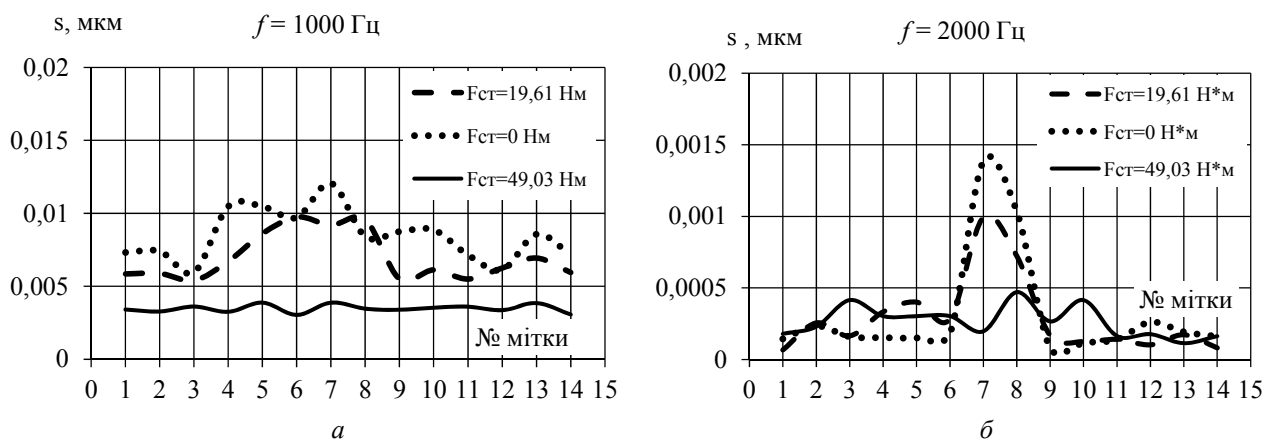


Рис. 6

Висновки: 1. На основі досліджень вібрації, спрямованої по нормалі до пакета шихтованих листів фізичної моделі ТГВ-200, виявлено, що при виникненні локального розпресування досить суттєво (на 25...55 %) збільшується гармоніка вібрацій основної частоти електромагнітних зусиль 100 Гц і максимальне збільшення стає у зоні розпресування. Вібрації другої гармоніки порівняно з основною частотою електромагнітних сил складають 5...10 %. Зміна вібросил і вібропереміщень показує ефективність способу діагностування за розподілом двох вказаних величин, одна з яких контролюється, в т.ч. у реперній точці, у процесі експлуатації, а інші знаходяться при математичному моделюванні.

2. На основі досліджень радіальної вібрації фізичної моделі ТГВ-500 при ослабленні шихтованого осердя статора також спостерігається підвищення вібрацій основної частоти електромагнітних зусиль 100 Гц. Аналіз розподілу віброзміщень другої гармоніки дає змогу стверджувати не тільки про появу ослаблення осердя, але й ідентифікувати місце пошкодження.

1. Бутов А.В., Мамиконянц Л.Г., Пикульский В.А., Поляков Ф.А., Шандыбин М.И., Шейко П.А. Повреждаемость и контроль зубцовых зон запеченных крайних пакетов стали сердечников статоров турбогенераторов // Электрические станции. – 2001. – № 5.
2. Бутов А.В., Пикульский В.А., Поляков Ф.А., Шандыбин М.И. Электромагнитный метод выявления замыканий листов активной стали статора // Электрические станции. – 1998. – № 11.
3. Грень Я.В., Роман В.І. Дослідження розповсюдження ультразвукового імпульсу в пакеті листів електротехнічної сталі // Вісн. Нац. ун-ту «Львівська політехніка». – 2011. – № 707: Електроенергетичні та електромеханічні системи. – С. 36–41.
4. Левицький А.С., Новік А.І., Федоренко Г.М. Контроль ступеня розпушення крайніх пакетів зубцевої зони осердя статора турбогенератора з застосуванням ємнісного сенсора // Техн. електродинаміка. – 2013. – № 6. – С. 88–93.
5. Остерник Э.С. Моделирование и анализ погрешностей схем при исследовании напряжений в мощных электромашинах // Вісн. НТУ ХПІ: Динаміка та міцність машин. – 2009. – № 42. – С. 116–122.
6. Остерник Э.С. О механических параметрах для оценки надежности турбогенераторов разъемной конструкции // Вісн. НТУ ХПІ: Динаміка та міцність машин. – 2011. – № 52. – С. 135–141.
7. Счастливый Г.Г., Федоренко Г.М., Выговский В.И. Контроль состояния прессовки сердечника статора турбогенератора методом температурной диагностики // Техн. електродинаміка. – 1983. – № 4. – С. 47–51.
8. Тітко В.О. Моделі і методики розрахунку характеристик та засоби підвищення надійності турбогенераторів: Автореф. дис. ... канд. техн. наук: Спец. 05.09.01 “Електричні машини і апарати”. – Харків, 2013. – 20 с.
9. Тітко О.І., Мельник А.М. Моделювання і розподіл електромагнітних сил, що діють на зубці та стержні обмотки статора турбогенератора // Техн. електродинаміка. – 2015. – № 3. – С. 40 – 46.
10. Ясинский Ю.А., Ходин Н.Е., Шапкин И.А. Диагностика технического состояния сердечника статора электродвигателя // Світлотехніка та електроенергетика. – 2007. – № 3-4. – С. 64–67.

УДК 621.313.322-81

А.Н. Мельник, асп.

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

Физическое моделирование электромагнитных вибровозмущающих сил при распрессовке шихтованного магнитопровода

Проведено фізичне моделювання електромагнітних вибровозмущаючих сил при появленні распрессовки шихтованного сердечника статора потужного турбогенератора на прикладі масштабних моделей серійних турбогенераторів потужністю 200 і 500 МВт, розроблених в Інституті електродинаміки НАН України. Показано, що при появленні локальної распрессовки крайнього пакета шихтованного сердечника статора турбогенератора збільшується гармоніка вібрацій основної частоти електромагнітних сил на 25 ... 55 %. Співставлення експериментальних даних з аналітичним розрахунком показало розходження результатів майже в 6 %, що є допустимим. Проведено вимірювання розподілу вібрацій на зовнішній поверхності статора фізичної моделі серійного генератора 500 МВт при пошкодженні тягарної шпильки, що показало збільшення амплітуди спектра основної гармоніки вібрацій вздовж всієї поверхності. Аналіз змін розподілу амплітуди другої гармоніки в спектрі сигналу вібрацій дозволяє чітко діагностувати місце ослаблення тягарної шпильки. Бібл. 10, рис. 6.

Ключевые слова: турбогенератор, фізичне моделювання, електромагнітні вибровозмущаючі сили, експеримент, вібропереміщення, віброускорення.

A.M. Melnyk

Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine,
Peremohy, 56, Kyiv-57, 03680, Ukraine

Physical simulation of vibration disturbing forces of laminated core at the local pressing out

A physical simulation of electromagnetic vibration disturbing forces by a pressing laminated stator core of a powerful turbo-generator as an example of the scale models of serial turbo-generators with capacity of 200 and 500 MW, developed at the Institute of Electrodynamics of NAS of Ukraine are carried out. By the local pressing out of laminated core end-zone of stator turbogenerator increasing the first harmonic of electromagnetic forces on 25...55% is shown. Discrepancy between analytical and experimental values are no more than 6%. A measurement of vibration distribution on the outer surface of the stator physical model series 500 MW generator are carried out. The amplitude spectrum of the first harmonic vibration by damage of tie rods along of the surface are shown increase. Analysis of changes in the second-harmonic of amplitude distribution in the spectrum of the vibration signal, allows fault place the tie rods. References 10, figures 6.

Key words: turbogenerator, physical simulation, electromagnetic vibration disturbing forces, experiment, vibration displacement, vibration acceleration.

Надійшла 21.04.2016

Received 21.04.2016