

УДК 621.313

DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2019.54.075>

ФІЗИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ДЕФЕКТІВ ПРЕСУВАННЯ ЗУБЦЕВОЇ ЗОНИ СТАТОРА ТУРБОГЕНЕРАТОРА

В.О. Тітко*, канд. техн. наук, **Л.Б. Остапчук****, канд. техн. наук, **М.С. Гуторова*****, канд. техн. наук, **А.М. Мельник******, канд. техн. наук

Інститут електродинаміки НАН України,

пр. Перемоги, 56, Київ, 03057, Україна

e-mail: votitko@ied.org.ua

Розроблено оптимальні схеми установки сенсорів віброприскорення, пристрій контролю зусиль затягування осердя статора та діагностичні процедури. Для підтвердження теоретичних положень проведено експерименти на фізичній моделі кінцевої зони осердя статора турбогенератора. Встановлено вплив розвитку дефектів пресування зубцевої зони осердя на гармоніки вібрації основної частоти електромагнітних зусиль. Бібл. 12, рис. 5.

Ключові слова: турбогенератор, моделювання, шихтований магнітопровід, осердя статора, зубцева зона, нати-скні пальці, механічні напруження, зусилля, лінійне видовження.

Вступ. У процесі експлуатації генераторів досить часто спостерігається розпресування крайніх пакетів шихтованого магнітопроводу [1]. Це є одним з найбільш небезпечних дефектів статорів потужних електричних машин, що призводить до скорочення міжремонтних періодів, збільшення об'ємів ремонту, аварійних відключень генераторів. Процес розпресування починається зі зменшення щільності пресування в коронках зубців крайніх пакетів осердя статора. Цей процес 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 із подальшим їхнім зламом та викришуванням, що дуже небезпечно.

Нині існує низка способів діагностики контролю стану пресування осердя статора [2–10]. Серед методів, які описано в цих роботах, найбільш перспективним можна вважати ультразвуковий метод, що базується на залежності часу проходження ультразвукового імпульсу через пакет від ступеня його спресованості [9]. Однак такий підхід має багато недоліків, одним з яких є залежність результатів вимірювань від навичок персоналу. Другим розповсюдженим методом є спосіб візуального контролю щільності пресування крайніх пакетів осердя статора за допомогою спеціального ножа або щупа [10]. Ці методи не забезпечують достатньої точності й роздільної здатності вимірювання та є надто часовитратними.

У роботах [11–12] було визначено низку фундаментальних положень щодо діагностування розпресування шихтованого магнітопроводу. Завдяки застосуванню методів математичного моделювання механічних процесів у пакеті заліза стало можливим суттєве зменшення кількості встановлених сенсорів. У результаті проведених досліджень було вдосконалено математичну модель розрахунку вібромеханічних характеристик у кінцевій частині осердя статора турбогенератора (ТГ) за наявності дефектів пресування зубцевої зони. Математичну модель зубцевої зони можна представити такими співвідношеннями:

$$\begin{aligned} \vec{m}_n^* + \sum_{i=1}^{n-1} \vec{m}_i + \sum_{I=1}^N \vec{M}_I &= 0, \\ \vec{f}_n^* + \sum_{i=1}^{n-1} \vec{f}_i + \sum_{I=1}^N \vec{F}_I &= 0, \end{aligned} \quad (1)$$

де f_n^* , m_n^* – сила та момент сили, що діють на частину зубця після розкриття останнього, де $\vec{m}_i = \vec{r}_i \times \vec{f}_i$ – момент сили \vec{f}_i i -го пальця, що діє на натискну плиту; $\vec{M}_F = \vec{R}_F \times \vec{F}_F$ – момент сили F -ї стягуючої призми, що діє на натискну плиту; N – кількість (число) стягуючих призм у статорі ТГ; n – кількість (число) натискних пальців у статорі ТГ; \vec{f}_i – сила, що діє на i -й натискний палець статора синхронного генератора; \vec{F}_F – сила, що діє на i -ту стягуючу призму статора генератора.

На базі цієї моделі було розроблено методику розрахунку вібромеханічних характеристик у натискних пальцях і плитах осердя статора. Проведено дослідження цих характеристик у механічно з'єднаній системі «зубець-палець-плита» за умови появи дефектів пресування зубцевої зони осердя, зокрема, відгину різної кількості натискних пальців та зміни геометрії зубця, що дало змогу визначати амплітуди вібрацій у пальцях і плитах на ділянці їх дотику.

Для вирішення поставлених задач використовувалися теоретичні й експериментальні методи в області вібровимірювання фізичних величин. Обробка експериментальних даних виконувалась з використанням програмних пакетів MS Excel та Matlab.

Метою даної роботи є перевірка на фізичній моделі статора ТГ адекватності математичних моделей і розрахунків, що виконувалися в попередніх роботах, для подальшого розроблення методу діагностування стану зубцевих зон магнітопроводу статора ТГ.

Було розроблено оптимальні схеми установки сенсорів, пристрій контролю зусиль затягування осердя статора та діагностичні процедури.

На рис. 1 наведено схематичне представлення моделі, де 1 – залізо осердя статора; 2 –

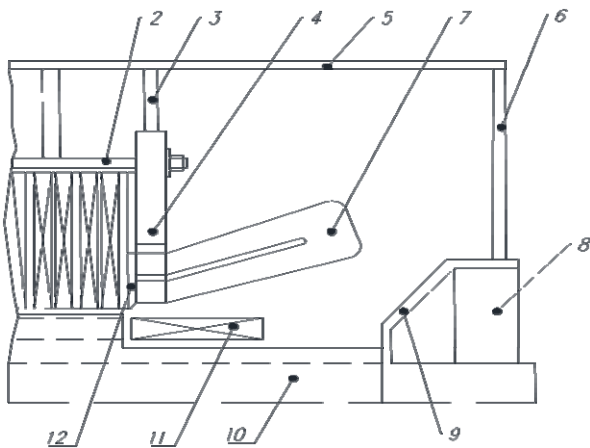


Рис. 1

стяжна шпилька; 3 – ребро короба; 4 – натискна плита; 5 – кожух короба; 6 – підшипниковий щит; 7 – лобова частина обмотки; 8 – модель підшипника; 9 – корпус підшипника; 10 – вал ротора; 11 – лобова частина обмотки ротора; 12 – натискний палець. Основні конструктивні елементи кінцевої зони подібні до таких, які має генератор типу ТГВ-500. Геометричні розміри моделі в цілому та для окремих деталей прийнято відповідно до масштабних коефіцієнтів.

Конструкція фізичної моделі суттєво спрощена порівняно з серійним ТГ типу ТГВ-500. Модель виконана у вигляді статора з трифазною обмоткою, кінцева зона якого містить

натискну плиту та інші деталі, що моделюють елементи кінцевої зони ТГ, та нерухомого ротора. Шихтоване осердя статора (ОС) моделі виконано з електротехнічної сталі марки Е21 товщиною 0,5 мм та стягнуто стяжними шпильками. Усі конструкційні деталі кінцевої зони моделі виконано з матеріалів, що відповідають оригіналу.

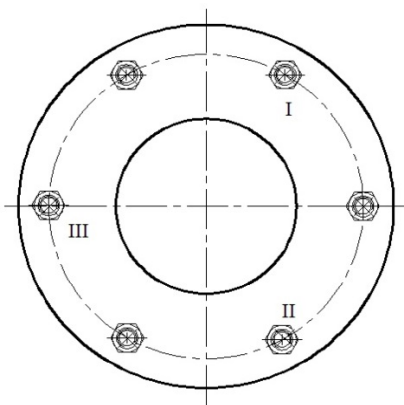


Рис. 2

Живлення ОС фізичної моделі здійснюється від високочастотного генератора. Схема забезпечує можливість плавного регулювання величини струму, що подається до обмотки, а також регулювання та підтримання стабільної частоти.

Зусилля затягування гайок на шпильках задається величиною крутильного моменту ($m_{кр}$) за допомогою динамометричного ключа.

Вимірювання значень вібрацій здійснюється на кромці натискної плити осердя статора у точці II за допомогою п'єзоелектричного сенсора віброприскорення типу 1ПА-9, схема розташування якого зображена на рис. 2.

На рис. 3 показано розташування сенсора на фізичній моделі. Сенсор віброприскорення кріпиться до плити за до-



Рис. 3

помогою спеціально виготовленого неметалевого пристрою, який фіксується у вифрезерованому отворі натискної плити.

Моделювання проводилось при зусиллі затягнення шпильки $F_{ст} = 49,03 \text{ Н}\cdot\text{м}$ для декількох варіантів технічного стану кінцевої зони турбогенератора:

- 1) магнітопровід статора повністю стягнуто, що відповідає умовно бездефектному стану;
- 2) пакет ослаблено шляхом вилучення одного натискного пальця;
- 3) пакет ослаблено шляхом вилучення трьох натискних пальців;
- 4) пакет ослаблено шляхом вилучення п'яти натискних пальців.

Пальці вилучались у зоні вимірювання.

На нижній кромці натискної плити осердя статора за допомогою цифрового осцилографа фіксувались сигнали сенсора (у мВ), які надалі перераховувались за його паспортними даними у віброприскорення ($\text{м}/\text{с}^2$). Сигнали сенсора віброприскорення для чотирьох варіантів моделювання пресування зубцевої зони статора ТГ зображено на рис. 4.

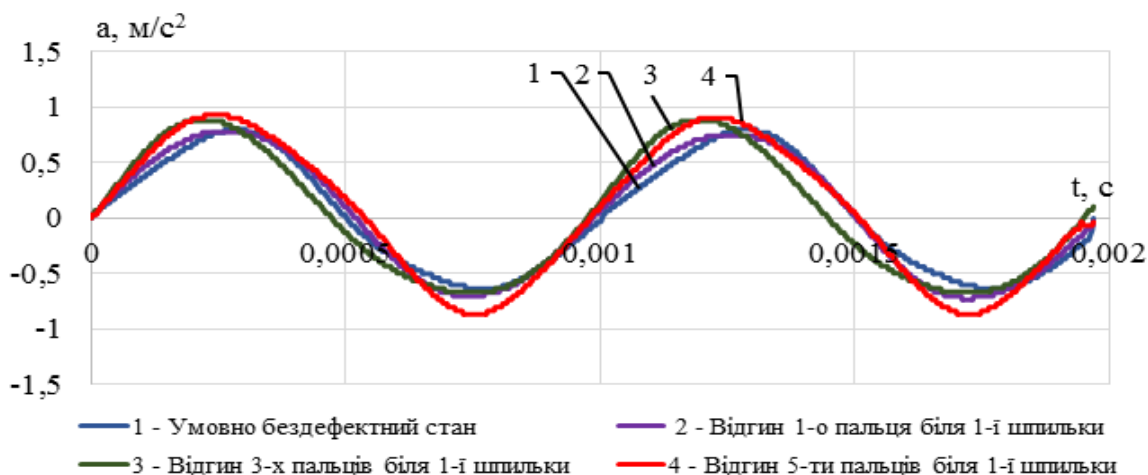


Рис. 4

Відомо, що основним фактором появи вібрації у статорі фізичної моделі є електромагнітні сили в залізі статора та електродинамічні – у стержнях обмотки. Основна частота таких сил і вібрацій становить 1000 Гц.

Після проведення спектрального аналізу отриманих сигналів сенсора спостерігаємо, що у спектрі вібрацій присутня основна гармоніка електромагнітних сил на частоті 1000 Гц. Вона є найбільшою і характеризує, як зазначалось, основне постійно діюче електромагнітне поле. Окрім цього, присутні кратні їй 2-а, 3-я та інші гармоніки. Спектрограми отриманих сигналів сенсора для різного стану пресування зображено на рис. 5.

У спектрі сигналу спостерігаємо незначне збільшення амплітуди гармоніки (1000 Гц) основної частоти електромагнітних сил залежно від ступеня розвитку дефектів пресування зубцевої зони, а саме відгину різної кількості натискних пальців. Проте помічаємо суттєве

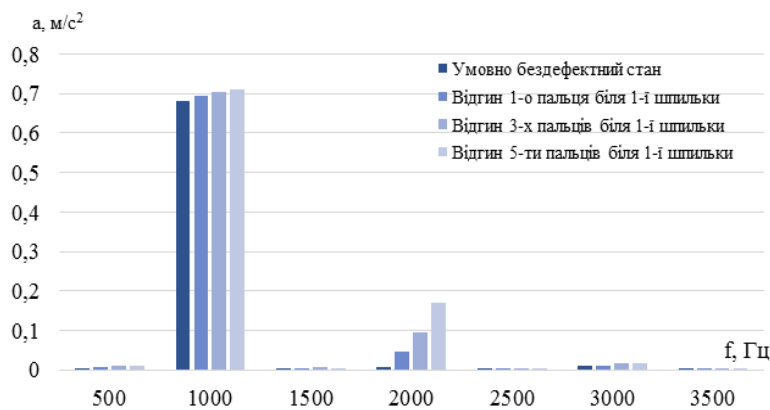


Рис. 5

вказують на певні проблеми пресування зубців у моделі.

На цьому явищі в подальшому буде розроблено і досліджено інтегральний спосіб діагностування стану зубцевих зон магнітопроводу статора ТГ. Для цього буде виявлено розподіл вібрацій по колу плити для визначення оптимальної кількості сенсорів контролю механічних характеристик.

Результати фізичного моделювання, а саме виникнення частот вібрацій у натискних плитах, які в умовно бездефектній машині відсутні, корелюють з висновками, зробленими за допомогою математичної моделі (1) для розрахунку механічних та вібромеханічних характеристик у натискних плитах, обумовлених коливанням розпресування зубцевої зони.

Висновки: 1. Було розроблено оптимальні схеми установки сенсорів віброприскорення, пристрій контролю зусиль затягування осердя статора та діагностичні процедури.

2. Встановлено, що в разі розвитку дефектів пресування зубцевої зони осердя незначно збільшується гармоніка вібрацій основної частоти електромагнітних зусиль, але суттєво збільшується амплітуда другої гармоніки (у кілька разів залежно від ступеня розвитку дефектів).

Фінансується за бюджетною програмою КПКВК 6541230 «Підтримка розвитку пріоритетних напрямів наукових досліджень» у рамках наукової роботи «Інтехен», що виконується за Постановою Бюро ВФТПЕ 10.07.2018 р., протокол № 18. Державний реєстраційний номер роботи 0118U005367.

1. Титко О.І., Мельник А.М. Моделювання і розподіл електромагнітних сил, що діють на зубці та стержні обмотки статора турбогенератора. *Технічна електродинаміка*. 2015. № 3. С. 40–46.
2. Счастливый Г.Г., Федоренко Г.М., Выговский В.И. Контроль состояния прессовки сердечника статора турбогенератора методом температурной диагностики. *Техническая электродинамика*. 1983. № 4. С. 47–51.
3. Бутов А.В., Пикульский В.А., Поляков Ф.А., Шандыбин М. Электромагнитный метод выявления замыканий листов активной стали статора. *Электрические станции*. 1998. № 11.
4. Тітко В.О. Моделі і методики розрахунку характеристик та засоби підвищення надійності турбогенераторів: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: спец. 05.09.01. Харків, 2013. 20 с.
5. Остерник Э.С. Моделирование и анализ погрешностей схем при исследовании напряжений в мощных электромашинах. *Вісник НТУ ХПІ: Динаміка та міцність машин*. Харків. 2009. № 42. С. 116–122.
6. Остерник Э.С. О механических параметрах для оценки надежности турбогенераторов разъемной конструкции. *Вісник НТУ ХПІ: Динаміка та міцність машин*. Харків. 2011. № 52. С. 135–141.
7. Левицький А.С., Новік А.І., Федоренко Г.М. Контроль ступеня розпушення крайніх пакетів зубцевої зони осердя статора турбогенератора з застосуванням ємнісного сенсора. *Технічна електродинаміка*. 2013. № 6. С. 88–93.
8. Ясинский Ю.А., Ходин Н.Е., Шапкин И.А. Диагностика технического состояния сердечника статора электродвигателя. *Світлотехніка та електроенергетика*. 2007. № 3–4. С. 64–67.
9. Грень Я.В., Роман В.І. Дослідження розповсюдження ультразвукового імпульсу в пакеті листів електротехнічної сталі. *Вісник Національного університету Львівська політехніка*. 2011. № 707. С. 36–41.
10. 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.
11. Kuchynskyi K., Titko V., Hutorova M., Mystetskyi V., Khudyakov A., Prus V. Mathematical model and research results of vibromechanical processes in the elements of the powerful synchronous generator end area. Proceedings of the International Conference on *Modern Electrical and Energy Systems*. IEEE-MEES'17. Kremenchuk Mykhailo. Ostrohradskyi National University, Ukraine, November 15-17, 2017. Pp. 308–311. DOI: <http://ieeexplore.ieee.org/document/8248918>

12. Kuchynskiy K.A., Titko V.O., Hutorova M.S., Mystetskiy V.A. Mechanical processes in the terminal parts of the turbogenerator stator imbricated core in the presence of the tooth area pressing defects. *Вісник Національного технічного університету ХПІ*. Серія: Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії. Харків. 2018. № 5 (1281). С. 110–115.

УДК 621.313

ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЕФЕКТОВ ПРЕССОВАНИЯ ЗУБЦОВОЙ ЗОНЫ СТАТОРА ТУРБОГЕНЕРАТОРА

В.А. Титко, канд. техн. наук, **Л.Б. Остапчук**, канд. техн. наук, **М.С. Гуторова**, канд. техн. наук, **А.М. Мельник**, канд. техн. наук

Институт электродинамики НАН Украины,
пр. Победы, 56, Киев, 03057, Украина

Разработаны оптимальные схемы установки сенсоров виброускорения, устройство контроля усилий затяжки сердечника статора и диагностические процедуры. Для подтверждения теоретических положений проведены эксперименты на физической модели конечной зоны сердечника статора турбогенератора. Установлено влияние развития дефектов прессования зубцовой зоны сердечника на гармоники вибраций основной частоты электромагнитных усилий. Библ. 12, рис. 5.

Ключевые слова: турбогенератор, моделирование, шихтованный магнитопровод, сердечник статора, зубцовая зона, нажимные пальцы, механические напряжения, усилия, линейное удлинение.

PHYSICAL MODELING OF TOOTH PRESSING DEFECTS STATORS OF THE TURBOGENERATOR

V. Titko, L. Ostapchuk, M. Hutorova, A. Melnyk

Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine,
pr. Peremohy, 56, Kyiv, 03057, Ukraine

Optimal schemes for installing vibration acceleration sensors, a device for monitoring the stator core tightening forces, and diagnostic procedures have been developed. To confirm the theoretical positions, experiments were conducted on a physical model of the final zone of the stator core of a turbogenerator. The influence of the development of pressing defects of the tooth zone of the core on the harmonics of vibrations of the fundamental frequency of electromagnetic forces is established. References 12, figures 5.

Key words: turbogenerator, modeling, lined magnetic core, stator core, tooth zone, pressure fingers, mechanical stresses, forces, linear elongation.

1. Tytko O.I., Melnyk A.M. Modeling and distribution of electromagnetic forces acting on the tooth and core windings of a turbine generator stator. *Tekhnichna elektrodynamika*. 2015. No 3. Pp. 40–46. (Ukr)
2. Schastlivyy G.G., Fedorenko G.M., Vygovskiy V.I. Monitoring the state of compaction of the core of the stator of the turbogenerator by the method of temperature diagnostics. *Tekhnicheskaya elektrodynamika*. 1983. No 4. Pp. 47–51. (Rus)
3. Butov A.V., Pikulskiy V.A., Polyakov F.A., Shandybin M. The electromagnetic method for detecting short circuits of stator active steel sheets. *Elektricheskiye stantsii*. 1998. No 11. (Rus)
4. Titko V.O. Models and methods of calculation of characteristics and means of increase of reliability of turbogenerators: avtoref. dys. na zdobuttia nauk. stupenia kand. tekhn. nauk: spets. 05.09.01. Kharkiv, 2013. 20 p. (Ukr)
5. Osternik E.S. Modeling and analysis of circuit errors in the study of voltages in powerful electric machines. *Visnyk NTU KhPI: Dynamika ta mitsnist mashyn*. 2009. No 42. Pp. 116–122. (Rus)
6. Osternik E.S. On the mechanical parameters for assessing the reliability of detachable turbogenerators. *Visnyk NTU KhPI: Dynamika ta mitsnist mashyn*. 2011. No 52. Pp. 135–141. (Rus)
7. Levytskyi A.S., Novik A.I., Fedorenko H.M. The control of the stage of the extreme packet of the teeth of the tooth zone of the stator of the turbogenerator with the closed sensor of the multi-sensor. *Tekhnichna elektrodynamika*. 2013. No 6. Pp. 88–93. (Ukr)
8. Yasinskiy Yu.A., Khodin N.E., Shapkin I.A. Diagnostics of the technical condition of the stator core of the electric motor. *Svitlotekhnika ta elektroenerhetyka*. 2007. No 3–4. Pp. 64–67. (Rus)
9. Hren Ya.V., Roman V.I. Retrieval of the ultrasonic pulse in the package of electrical steel. *Visnyk Natsionalnoho universytetu «Lvivska politekhnika»*. 2011. No 707. Pp. 36–41. (Ukr)
10. Butov A.V., Mamikonyants L.G., Pikulskiy V.A., Polyakov F.A., Shandybin M.I., Sheyko P.A. Damage and control of the tooth zones of baked extreme packages of steel cores of stators of turbogenerators. *Elektricheskiye stantsii*. 2001. No 5. (Rus)
11. Mathematical model and research results of vibromechanical processes in the elements of the powerful synchronous generator end area. Proceedings of the International Conference on *Modern Electrical and Energy Systems. IEEE-MEES'17*. Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskiy National University. Ukraine, November 15–17. 2017. Pp. 308–311. DOI: <http://ieeexplore.ieee.org/document/8248918>
12. Kuchynskiy K.A., Titko V.O., Hutorova M.S., Mystetskiy V.A. Mechanical processes in the terminal parts of the turbogenerator stator imbricated core in the presence of the tooth area pressing defects. *Вісник Національного технічного університету ХПІ*. Серія: Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії. 2018. No 5 (1281). Pp. 110–115.