**УТОЧНЕННЯ СТАНУ МАГНІТНИХ СИСТЕМ СИНХРОННИХ МАШИН
ШЛЯХОМ ВІДЕОІДЕНТИФІКАЦІЙ ПОВЕРХНІ ЗУБЦІВ****В. В. Прус, О. О. Сьомка**

Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського

вул. Першотравнева, 20, м. Кременчук, 39600, Україна. E-mail: prus@kdu.edu.ua, oleksandrsmk@gmail.com

О. О. Дегтяренко

ПрАТ «Металургійний комбінат «Азовсталь»

вул. Лепорського, 1, м. Маріуполь, 87500, Україна. E-mail: a.o.degtyarenko@metinvestholding.com

Особливістю експлуатації синхронних машин є досить тривалий її термін, що може суттєво перевищувати задекларований виробником. Це переважно обумовлено тим фактом, що більшість синхронних машин відноситься до машин великої потужності. При цьому, не зважаючи на чітко виконуваний регламент профілактичних та ремонтних робіт, у синхронних машин досить часто проявляється вплив процесів старіння основних конструктивних вузлів, що обумовлює зміну електромагнітних, енергетичних та теплових параметрів. Одним з незамінних конструктивних вузлів, що суттєво впливає на стан таких машин, є шихтоване осердя статора. З урахуванням великої відносної потужності втрат, що виділяються у масиві осердя, актуальним питанням є систематична діагностика зміни його магнітних та електричних властивостей як у цілому, так і на окремих локальних ділянках. Це дозволяє достовірно прогнозувати реальний стан, рівень надійності та діапазони зміни параметрів синхронних машин. При розв'язанні поставленої задачі використовувались методи теорії тепломасопередачі, відеоідентифікації та теорії нейронних мереж. Обґрунтовано необхідність оснащення вимірювального сканера нагрівачим індуктором та відеокамерою, яка фіксує зображення поверхні у видимому та інфрачервоному режимі, що дозволяє, не використовуючи датчиків положення, виявляти види, розміри та локалізацію пошкоджень. Через відсутність чітких критеріїв розрізнення пошкоджень за результатами аналізу отриманих зображень для розв'язання даної задачі обґрунтовано ефективність використання апарату нейронних мереж. Розроблено процедури відеоідентифікації в інфрачервоному і видимому діапазоні, що дозволяють оцінювати положення індуктора по довжині зубця і коригувати його можливі осеві зміщення. Представлена структура і принцип роботи вимірювального пристрою, а також основні алгоритми обробки відеозображень.

Ключові слова: локальна діагностика, відеоідентифікація, нейронна мережа, синхронна машина.**УТОЧНЕНИЕ СОСТОЯНИЯ МАГНИТНЫХ СИСТЕМ СИНХРОННЫХ МАШИН
ПУТЕМ ВИДЕОИДЕНТИФИКАЦИИ ПОВЕРХНОСТИ ЗУБЦОВ****В. В. Прус, А. А. Семка**

Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского

ул. Первомайская, 20, г. Кременчуг, 39600, Украина. E-mail: prus@kdu.edu.ua, oleksandrsmk@gmail.com

А. О. Дегтяренко

ЧАО «Металлургический комбинат «Азовсталь»

ул. Лепорского, 1, г. Мариуполь, 87500, Украина. E-mail: a.o.degtyarenko@metinvestholding.com

Особенностью эксплуатации синхронных машин является довольно длительный ее срок, что может существенно превышать задекларированный производителем. Это в основном обусловлено тем фактом, что большинство синхронных машин относится к машинам большой мощности. При этом, несмотря на четко исполняемый регламент профилактических и ремонтных работ, в синхронных машинах достаточно часто проявляется влияние процессов старения основных конструктивных узлов, что обуславливает изменение электромагнитных, энергетических и тепловых параметров. Одним из незаменимых конструктивных узлов, который существенно влияет на состояние таких машин, является шихтованный сердечник статора. С учетом большой относительной мощности потерь, выделяемых в массиве сердечника, актуальным вопросом является систематическая диагностика изменения его магнитных и электрических свойств как в целом, так и на отдельных локальных участках. Это позволяет достоверно прогнозировать реальное состояние, уровень надежности и диапазоны изменения параметров синхронных машин. При решении поставленной задачи использовались методы теории тепломасопередачки, видеоидентификации и теории нейронных сетей. Обоснована необходимость оснащения измерительного сканера нагревательным индуктором и видеокамерой, которая фиксирует изображение поверхности в видимом и инфракрасном режиме, что позволяет, не используя датчиков положения, выявлять виды, размеры и локализацию повреждений. Из-за отсутствия четких критериев различия повреждений по результатам анализа полученных изображений для решения данной задачи обоснована эффективность использования аппарата нейронных сетей. Разработаны процедуры видеоидентификации в инфракрасном и видимом диапазоне, позволяющие оценивать положение индуктора по длине зубца и корректировать его возможные осевые смещения. Представлена структура и принцип работы измерительного устройства, а также основные алгоритмы обработки видеозображений.

Ключевые слова: локальная диагностика, видеоидентификация, нейронная сеть, синхронная машина.

АКТУАЛЬНІСТЬ РОБОТИ. Відомо, що у ході тривалої експлуатації та ремонтів синхронних машин (СМ) порушується ізоляція між окремими листами осердя статора, що приводить до зміни його електричних і магнітних властивостей. Ці зміни найбільш суттєві у верхніх від ярма частинах зубців, що пояснюється особливостями конструкції, впливом технологій видалення обмотки під час капітального ремонту та природнім старінням осердя. Як наслідок, підсилюється вплив вихрових струмів, що приводить до нерівномірного нагріву обмотки статора двигуна у ході подальшої експлуатації.

Діагностику верхніх частин зубців осердя статора можна здійснювати різними способами [1, 2], однак внаслідок найбільшої простоти реалізації при достатній інформативності перевага віддається індукційним. Враховуючи те, що пошкодження здебільшого носять локальний характер, для їх визначення слід використовувати методи локальної діагностики [3].

Незважаючи на явні переваги, контактна локальна діагностика зубцевої зони пакетів сталі статорів має ряд суттєвих недоліків, що не дозволяють точно визначити вид ушкодження і його місцезнаходження як через низьку вірогідність діагностики, так і внаслідок виникнення додаткових похибок, що виникають при зміні ширини повітряного проміжку, сході з осі зубця індуктора й т.п. [3].

Мета роботи – оцінка ефективності введення у процес локальної діагностики додаткової процедури відеоідентифікації верхніх частин зубців осердя статора у видимому та інфрачервоному діапазоні з метою визначення виду їх дефектів і ступеня ушкодження, визначення та коригування положення індуктора відносно зубців статора.

МАТЕРІАЛ І РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ.

Як зазначено вище, об'єктом дослідження є магнітна система статорів СМ. Для забезпечення надійної роботи двигунів з параметрами та характеристиками, наближеними до заводських паспортних, необхідно враховувати зміну електричних та магнітних характеристик осердь у процесі ремонту та тривалої експлуатації. При індукційному способі тестування перемагнічування зубців статора фактично відповідає за видом тому, що відбувається під час роботи СМ, тому такий спосіб діагностики має високий рівень інформативності. Однак внаслідок зміни рівномірності прилягання контактної частини індуктора і поверхні зубців, магнітний потік у повітряному проміжку викривляється, що приводить до зниження вірогідності діагностики.

Враховуючи взаємозв'язок між електромагнітними та тепловими процесами у шихтованих магнітних системах, додатковою ознакою наявності у них пошкоджень є зміна теплового стану через підвищення рівня теплового випромінювання з поверхні внаслідок посилення дії

вихрових струмів, що формують джерела локальних перегрівів як при розпушенні, так і при закорочуванні окремих листів. Відповідно до цього, застосування термоконтролю дозволить підвищити вірогідність та інформативність процесу тестування. Для отримання повної інформації про стан осердя термоконтроль, як і локальну діагностику, необхідно проводити вздовж кожного із зубців. При цьому необхідно використовувати такі засоби, які можливо було б реалізувати, не вносячи суттєвих змін до конструкції сканера з вимірювальними індукторами та які б дозволяли за мінімальний час фіксувати тепловий стан поверхні зубців. Таким вимогам відповідають тепловізійні засоби термоконтролю [4].

Другою задачею, розв'язання якої потрібно для досягнення необхідної вірогідності діагностики, є забезпечення співосності та необхідного контакту вимірювального пристрою з поверхнею зубця, що діагностується.

Крім цього, виникає задача забезпечення точності відпрацювання координат переміщення індуктора по зубцям осердя, що можливе за рахунок використання датчиків положення або засобів ідентифікації поверхні, по якій переміщується індуктор.

Вирішення обох задач можна поєднати за рахунок використання засобу відеоідентифікації у видимому та інфрачервоному діапазоні, в якості якого може бути застосована промислова безкорпусна відеокамера.

Видимий режим дозволяє виділити контури досліджуваного зубця, завдяки чому можливо контролювати співосність індуктора та поверхні зубців. Відеоідентифікація поверхні листів і міжлистових проміжків дозволяє контролювати координати переміщення індукторів вздовж зубця.

Інфрачервоний режим дає можливість контролювати тепловий стан поверхні зубців.

Враховуючи те, що нагрів зубців при проходженні вимірювального індуктора незначний, було обґрунтовано необхідність введення в конструкцію сканера додаткового нагрівачого елемента. Враховуючи природу об'єкта діагностики, що обумовлюється неоднорідністю поверхні тестування, а також характером досліджуваних типів пошкоджень, найбільш раціональним є використання індукційного нагрівача.

Таким чином, остаточно базова структура сканера має бути доповнена нагрівачим індуктором та відеокамерою, що відображено на рис. 1.

Відповідно до структури, першим досліджувану ділянку проходить нагрівачий індуктор 2, потім – відеокамера 3, за нею – вимірювальні індуктори для тестування по двом зубцям 4 та по одному зубцю 5. Така послідовність дозволяє камері сканувати в інфрачервоному та видимому режимі попередньо нагріту поверхню.

Рисунок 1 – Схема способу тестування пакета статора за допомогою сканера

Для усунення залишкової намагніченості перед тестуванням досліджуваної ділянки вимірювальним індуктором процес її перемагнічування необхідно завершувати операцією розмагнічування. Загальний алгоритм опитування інформаційних каналів сканера при тестуванні представлений на рис. 2.

Функціональну схему пристрою, що здійснює вимірювання і обробку даних, наведено на рис. 3, на якому ВС – вимірювальний сканер, що складається з нагріваючого індуктора (НІ), відеокамери (В) та блоку вимірювальних індукторів (БВІ).

Після запуску системи на НІ та на В подається живлення і вмикається таймер. Відеокамера В починає зйомку в ІЧ-режимі. По закінченню витримки часу відбувається перемикання камери у видимий діапазон.

Дані, одержані у ході відеоспостереження, передаються на промисловий комп'ютер (РС) через TV-тюнер, де здійснюється їх обробка та аналіз блоком програмного забезпечення (БПЗ), що включає підпрограму попередньої обробки відеозображення (ППОВ), підпрограму контролю координат положення ВС (ПККП), підпрограму синхронізації опитування вимірювальних каналів системи (ПСОВК), підпрограму попередньої обробки термограм (ППОТ), систему нейронних мереж та підпрограму розрахунку діагностичних параметрів (ПРДП), блок гіпотез (БГ) та базу даних, що зберігає результати тестування (БДРТ).

Враховуючи великий об'єм обчислень і неодноразовість опитування усіх вимірювальних каналів сканера на досліджуваній ділянці, у режимі реального часу здійснюється тільки обробка зображення, отриманого у видимому діапазоні, що є необхідним для визначення координат переміщення і положення сканера відносно осі зубця (рис. 4).

Для цього отримані кадри конвертуються у напівтоновий формат, після чого, з метою бінаризації, визначається коефіцієнт середньої яскравості зображення.

Рисунок 2 – Алгоритм процедури опитування інформаційних каналів сканера при тестуванні

Відповідно до співвідношення розмірів зображення поверхні зубця та фону в кадрі визначається кількість сегментів, на які розбивається отримане зображення з метою підрахунку у кожному з них кількості світлих та темних пікселів, що є визначальним критерієм наявності зубця у кадрі – поверхні зубця відповідають світлі пікселі зображення відносно темних пікселів фону.

Рисунок 3 – Функціональна схема пристрою для тестування статорів СМ

Підрахунок кількості світлих пікселів здійснюється у двох напрямках – по горизонталі та по вертикалі, що відповідає ширині та довжині зубця. Відповідність кількості світлих пікселів по горизонталі ширині зубця свідчить про наявність у кадрі зубця. Підрахунок пікселів по вертикалі здійснюється лише для першого кадру при тестуванні кожного із зубців з метою визначення довжини захопленої ділянки зубцевої поверхні.

При наступних переміщеннях сканера для контролю його координат положення вздовж осі зубця до цього початкового значення додається величина кроку переміщення сканера.

Для виявлення в ході тестування відхилення індуктора від заданої траєкторії визначається зсувом положення осі відеокамери. Процедура контролю положення зводиться до перевірки наявності і підрахунку кількості світлих пікселів у кожній з цих областей, що відповідають зоні зміщення сканера вліво або вправо від осі зубця. Критична кількість пікселів для кожної області, яка свідчить про зміщення індуктора з зубця, визначається, виходячи із зіставлення розмірів фону та зображення зубця у кадрі. У випадку наявності зміщення через індикатори, розташовані на поверхні сканера, операторові подається сигнал про його зміщення вліво чи вправо відносно осі зубця, що дозволяє на наступних кроках тестування скоригувати траєкторію переміщення.

На етапі обробки результатів тестування дані контролю положення індуктора відносно осі зубця дозволяють коригувати параметри, отримані за індукційним методом, якщо вони не є достовірними внаслідок зміщення індуктора з його поверхні.

При обробці зображень з метою виявлення пошкоджень на поверхні зубця висновок про його стан формулюється, виходячи з двох факторів – середньої яскравості на досліджуваній ділянці та контрастності зображення [5].

Критерії виявлення і розрізнення пошкоджень

сформовані, виходячи з того, що:

- пікселі поверхні листів пакету світліші і мають найбільше значення;
- міжлистовий простір знаходиться в області локального мінімуму, тобто значення пікселів у даній області наближається до 0.

У випадку відсутності пошкодження встановлюється еталонна яскравість x_1 , сумарне значення якої складається з комбінації яскравості поверхні та міжлистових щілин.

Виходячи з цього, у випадку розпушеної ділянки кількість темних пікселів переважає, середнє значення яскравості зменшується. У випадку короткозамкнутої ділянки переважає кількість світлих пікселів, середнє значення яскравості при цьому збільшується (рис. 5).

Критерії розрізнення пошкоджень приймають форму наступних нерівностей:

- на розпушеній ділянці градація яскравості має відповідати умові $x_p < x_1$, а контрастність наближатись до значення $\sigma \rightarrow 255$, де x_p – градація яскравості на розпушеній ділянці, x_1 – градація яскравості на нормальній ділянці;
- на закороченій ділянці градація яскравості має відповідати умові $x_1 < x_k$, контрастність наближається до значення $\sigma \rightarrow 0$, де x_k – градація яскравості на закороченій ділянці;
- на ділянці без пошкоджень градація яскравості дорівнює x_1 , а контрастність $0 < \sigma < 255$.

Для обробки відеозображень обґрунтовано застосування нейронної мережі Елмана, що обумовлюється мінімумом апіорної інформації про об'єкт тестування і відсутністю чітких меж для критеріїв розрізнення пошкоджень по даним відеоспостереження як у видимому, так і у інфрачервоному режимі [6]. При вирішенні даної задачі нейронна мережа виконує роль багатоканального класифікатора.

Рисунок 4 – Алгоритм процедури обробки відеозображення у процесі тестування

Рисунок 5 – Відеозображення пошкоджених ділянок зубця статора СМ малої потужності

Перед поданням відеосигналів на входи мереж виконується їх попередня обробка, що складається з двох етапів. Відповідно до першого етапу, подібно до процедури визначення координат переміщення сканера, зображення, отримані у видимому та інфрачервоному режимі, переводяться до

напівтонового формату та бінаризуються і визначається відношення яскравості отриманого з відеокамери зображення до його контрастності. Другий етап полягає у нормалізації отриманих на першому етапі даних з метою зменшення часу та підвищення точності роботи мережі в процесі навчання.

Навчання нейронних мереж здійснюється за допомогою вибірок, що сформовані на базі сигналів, отриманих на ділянках пакету сталі із штучно внесеними пошкодженнями заданих типів. В процесі навчання мереж розраховується функція похибки відгуків, на основі якої здійснюється корегування значення ваги кожного з нейронів мереж. Умовою завершення навчання є досягнення нуля функцією похибки.

На основі вхідних даних кожна з мереж формує висновок про стан досліджуваної ділянки пакету, відносячи її до однієї з трьох категорій – закороченої, нормальної чи розпушеної. Кожній категорії відповідає свій вихід кожної з мереж. Функція активації виходів мережі є сигмоїдальною, що збільшує вірогідність виявлення дефекту незалежно від ступеню пошкодження.

Висновки нейронної мережі разом з розрахованими по результатам індукційного тестування діагностичними параметрами поступають до блоку обробки гіпотез. Сформований блоком гіпотез висновок щодо стану кожної досліджуваної ділянки передається до бази даних з результатами тестування у формі змінних, що відповідають за вид та ступінь пошкодження.

ВИСНОВКИ.

1. Визначений перелік заходів, необхідних для підвищення вірогідності процесу локальної діагностики за рахунок забезпечення точності позиціонування вимірювального сканера на поверхні зубців статора і проведення теплового контролю поверхні зубців.

2. З метою контролю теплового стану та відеоідентифікації поверхні зубцевої зони при забезпеченні позиціонування вимірювальних індукторів структуру сканера доповнено нагріваючим індуктором та відеокамерою, яка фіксує зображення поверхні у видимому та інфрачервоному режимі, що дозволяє, не використовуючи датчиків положення, виявляти види та розміри пошкоджень.

3. Внаслідок відсутності чітких критеріїв розрізнення пошкоджень за результатами аналізу отриманих зображень для розв'язання даної задачі обґрунтовано ефективність використання апарату нейронних мереж.

ЛІТЕРАТУРА

1. Анемподистов В. П., Белонин В. К., Дегусаров Ю. А. и др. Выявление местных нагревов сердечников статора. *Электротехника*. 1982. № 10. С. 62–63.
2. Данилевич Я. Б., Елин И. И., Казарян Э. В.

и др. Электромагнитные и тепловые процессы в сердечнике статора турбогенератора при замыкании листов активной стали. *Электротехника*. 1980. № 4. С. 50–53.

3. Прус В. В., Родькин Д. Й., Войтех О. А., Петров Р. М. Спосіб діагностики зубцевої зони пакетів електротехнічної сталі електричних машин : деклараційний патент № 62491А Україна : МКИ G01R 31/34, G01R 33/14, H02K 15/00 : опубл. 15.12.2003, Бюл. № 12.

4. Вавилов В. П., Ширяев В. В., Нестерук Д. А. Процедуры обработки инфракрасных изображений в активном тепловом контроле. *Контроль. Диагностика*. 2003. № 11. С. 41–48.

5. Филинов М. В., Фурсов А. С. Автоматизация алгоритмов обработки изображений в неразрушающем контроле. *Контроль. Диагностика*. 2005. № 10. С. 8–12.

6. Заенцев И. В. Нейронные сети. Воронеж. 1999.

SPECIFICATION OF THE STATE OF MAGNETIC SYSTEMS OF SYNCHRONOUS MACHINES BY VIDEO IDENTIFICATION OF THE SURFACE OF THE TEETH

V. Prus, O. Somka

Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University

vul. Pershotravneva, 20, Kremenchuk, 39600, Ukraine. E-mail: prus@kdu.edu.ua, oleksandrsmk@gmail.com

O. Dehtiarenko

PJSC “Azovstal iron & steel works”

vul. Leporskogo, 1, Mariupol, 87500, Ukraine. E-mail: a.o.degtyarenko@metinvestholding.com

A feature of synchronous machines operation consists in its rather long period, which can significantly exceed the one declared by the manufacturer. This is mainly due to the fact that most synchronous machines are heavy-duty machines. At the same time, despite the clearly executed regulations of preventive and repair work, the influence of aging processes of the main structural units is quite often manifested in synchronous machines, which causes a change in electromagnetic, energy and thermal parameters. A stator laminated core is one of the irreplaceable structural units that significantly affects the condition of such machines. Taking into account the high relative power of the losses released in the core array, a topical issue is the systematic diagnostics of changes in its magnetic and electrical properties, both in general and in separate local areas. This makes it possible to accurately predict the real state, the level of reliability and the variation ranges of parameters of synchronous machines. **Methodology.** When solving the problem, the methods of the theory of heat and mass transfer, video identification and the theory of neural networks were used. **Results.** The necessity of equipping the measuring scanner with a heating inductor and a video camera, which captures the image of the surface in visible and infrared mode, is substantiated. This makes it possible, without using position sensors, to identify the types, sizes and localization of damage. **Originality.** Because of the lack of clear criteria for distinguishing damage based on the results of the analysis of the obtained images, the efficiency of using the apparatus of neural networks to solve this problem is substantiated. **Practical value.** Procedures for video identification in the infrared and visible range have been developed, which enables the assessment of the position of the inductor along the length of the tooth and correction of its possible axial displacements. The structure and principle of operation of the measuring device, as well as the main algorithms for processing video images are presented. Figures 5, references 6.

Key words: local diagnostics, video identification, neural network, synchronous machine.

REFERENCES

1. Anempodistov, V. P., Belonin, V. K., Degusarov, Yu. A. et al. (1982). Vviyavlenie mestnyih nagrevov serdechnikov statora. *Elektrotehnika*, 10, 62–63. [in Russian]

2. Danilevich, Ya. B., Elin, I. I., Kazaryan, E.V. et al. (1980). Elektromagnitnyie i teplovyye protsessy v serdechnike statora turbogeneratora pri zamykani listov aktivnoy stali. *Elektrotehnika*, 4, 50–53. [in Russian]

3. Prus, V. V., Rodkin, D. Y., Voitek, O. A., & Petrov, R. M. (2003). Sposib diahnostryky zubtsevoi zony paketiv elektrotekhnichnoi stali elektrychnykh mashyn [Method for diagnosing tooth zone of electrical steel packages of electric machines]. Deklaratsiinyi Patent UA, no. 62491A, MKY G01R 31/34, G01R 33/14, H02K 15/00. Bull. 12. [in Ukrainian]

4. Vavilov, V. P., Shiryayev, V.V. & Nesteruk, D.A. (2003). Protседury obrabotki infrakrasnykh izobrazheniy v aktivnom teplovom. *Kontrol. Diagnostika*, 11, 41–48. [in Russian]

5. Filinov, M. V., & Fursov, A. S. (2005). Avtomatizatsiya algoritmov obrabotki izobrazheniy v nerazrushayuschem kontrole. *Kontrol. Diagnostika*, 10, 8–12. [in Russian]

6. Zaentsev, I. V. (1999). *Neyronnyie seti [Neural networks]*. Voronezh. [in Russian]

Стаття надійшла 21.08.2020.