

Прус В. В., Дегтяренко О. О., Дятловська В. Ю.

СПОСОБИ ПІДВИЩЕННЯ ІНФОРМАТИВНОСТІ ТА ВІРОГІДНОСТІ ДІАГНОСТИКИ ШИХТОВАНИХ ОСЕРДЬ СТАТОРІВ СИНХРОННИХ ДВИГУНІВ

У роботі визначено особливості оцінювання поточного стану шихтованих осердь статорів синхронних двигунів у ході ремонту та під впливом тривалої експлуатації. Обґрунтовано основні відмінності при застосуванні локальної діагностики до магнітних систем синхронних машин, обумовлені їх електромагнітними навантаженнями та ступенем насичення сталі. Вирішено питання формування умов діагностики включно з раціональними діапазонами зміни напруги та частоти джерела живлення і введення варійованої величини повітряного проміжку для компенсації нерівномірного прилягання індуктора до поверхні зубцевої зони шихтованого осердя статора. Обґрунтовано вибір діагностичних параметрів за принципом найбільшої величини зони нечутливості в умовах зміни похибки вимірювання за наявності можливих завод, що дозволяють визначати основні види пошкоджень магнітної системи шихтованих осердь синхронних двигунів. Обґрунтовані способи підвищення інформативності й вірогідності діагностики шихтованих осердь синхронних двигунів, що дозволяють компенсувати основні недоліки вихідного методу локального тестування, покладені в основу розробки дослідного зразка промислової системи їх локальної діагностики. Отримані теоретичні положення підтверджено експериментально у ході лабораторної апробації на базі дослідного промислового зразка автоматичної системи локального тестування. У результаті отримано діапазони зміни частоти та напруги живлення індуктора, що відповідають зоні коліна кривої намагнічування, яка обумовлює повільну зміну магнітної проникності діагностованого осердя, визначено чисельні діапазони зон нечутливості в умовах можливих завод для дефектів закорочування/послаблення пресування відносно нормальної ділянки шихтованого магнітопроводу, досліджено прояви штучно внесених типових поверхневих та глибинних дефектів осердя за результатами локальної діагностики.

Ключові слова: синхронний двигун, шихтоване осердя, локальна діагностика, вірогідність, інформативність.

Постановка проблеми. Синхронні двигуни, порівняно з іншими електричними машинами загальнопромислового призначення, насамперед характеризуються більш високою одиничною потужністю, габаритними розмірами та неуніфікованими підходами до проектування. Це у підсумку ставить задачу виробництва електричної машини з певними параметрами і характеристиками під вирішення конкретного технічного завдання на використуваному технологічному обладнанні. Зазначені особливості, поряд з реальними умовами експлуатації та більш досконалішими системами керування й захисту, визначають дещо інший характер старіння їх основних конструктивних вузлів та елементів [1].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Урахування особливостей старіння магнітних систем статорів синхронних двигунів має насамперед базуватись на усереднених характеристиках старіння самої електротехнічної сталі [2]. А, з огляду на високу собівартість виготовлення синхронних машин та характерні для них більш тривалі терміни експлуатації, природне старіння є основним впливовим процесом. Його слід враховувати при перевизначенні паспортних даних, енергетичних та електромагнітних параметрів. Воно, переважним чином, обумовлює і відносну зміну теплового стану синхронних машин, так як, з урахуванням їх порівняно більш високого діапазону робочих потужностей, зміна температурних режимів буде

Машинобудування і зварювальне виробництво

обумовлена насамперед зростанням втрат у міді статора при загальному погіршенні стану його магнітної системи. У той же час, слід більш ретельно досліджувати локальну зміну магнітних та електричних параметрів шихтованих осердь статора з метою виявлення їх розподілу, що обумовлює зміну вібраційних параметрів [3]. Також важливим питанням є визначення точного місця розташування глибинних локальних пошкоджень осердь в області обмоток, обумовлених можливими їх короткими замиканнями при попередніх виходах машини з ладу. Ще одним впливовим фактором є загальне ослаблення пресування осердя, що впливає на його перегрів, а також обумовлює зміни у характері перерозподілу електромагнітного поля, зростання складових шуму та вібрації електромагнітного характеру та ін. Зазначене визначає дещо інші завдання у процедурі локальної діагностики, порівняно з асинхронними двигунами [4].

Мета дослідження полягає в обґрунтуванні способів підвищення інформативності та вірогідності діагностики шихтованих осердь статорів синхронних двигунів у процесі їх старіння

Основний матеріал дослідження. Базовий метод локальної діагностики шихтованих осердь статорів пояснюється рис. 1 [3].

Він дозволяє визначати електричні й магнітні властивості стали зубців статора, додатково визначаючи місце розташування локальних пошкоджень осердя, таких як закорочування листів і ослаблення пресування. При цьому використовуються індуктори П- подібної форми, на які рівномірно нанесені, намагнічувальна $W_{нам}$ й вимірювальна $W_{вим}$ обмотки. Індуктор на рис. 1, а переміщуючись паралельно по двом зубцям осердя, створює в них і прилягаючої частини ярма необхідне значення магнітного потоку Φ , при якому визначаються магнітні параметри й втрати у сталі. Індуктор на рис. 1, б дозволяє додатково визначати точне місце розташування й характер ушкодження верхніх частин зубців осердя.

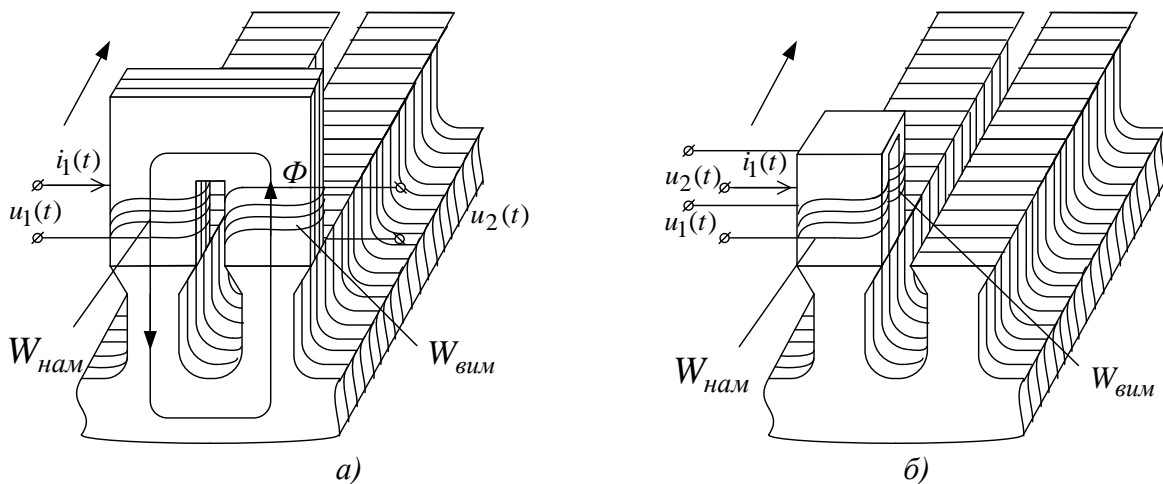


Рисунок 1 – Види діагностика шихтованих осердь електричних машин
(а – за двома зубцями, б – за одним зубцем)

Структура вимірювальної системи (ВС) має вид, представлений на рис. 2. Тут ЛМК – локальне магнітне коло, що складається з досліджуваної ділянки магнітопроводу осердя статора та одного з вимірювальних індукторів, яке представляє собою замкнену магнітну систему із намагнічувальною та вимірювальною обмотками. Параметри, що характеризують режим випробування – струм $i_1(t)$ і напруга $u_2(t)$ з ЛМК надходять на датчики струму ДС і напруги ДН2. На датчик напруги ДН1 надходить вихідний сигнал $u_1(t)$ від автономного джерела живлення.

Сигнали з датчиків через модуль вводу-виводу (МВВ) надходять до комп'ютера РС, який виконує функції збору, зберігання та обробки інформації. У використовуваній ВС у якості МВВ

Машинобудування і зварювальне виробництво

використається сертифікований вимірювальний модуль E14-440D (L-Card). Програмне забезпечення, з метою гнучкості переналаштування режимів роботи комплексу та максимальної візуалізації процесу вимірювань, було реалізоване у програмному середовищі LabView.

Тестування за двома зубцями дозволяє визначити основні магнітні параметри та втрати у сталі при заданих рівнях магнітної індукції.

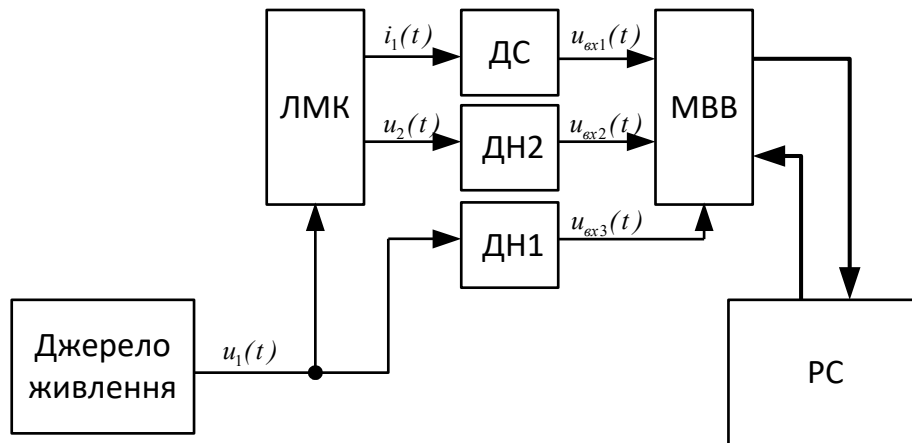


Рисунок 2 – Структурна схема вимірювальної системи кожного з індукторів

При цьому у ході проведених досліджень було доведено, що середній рівень магнітної індукції може відрізнитись як від нормованого стандартного (1,0; 1,5; 1,7 Тл), так і від робочого значення магнітної індукції у зубцях та в ярмі статора і може бути у подальшому з достатньою для аналізу досліджуваних процесів точністю перерахований на них на основі співвідношень для питомих втрат [5], та відкоригований на величину, що обумовлює старіння сталі через зміну співвідношення значень напруженості H_i магнітного поля, магнітної індукції B_{mi} та втрат $P_{\mu i}$ у сталі на двох довільно обраних частотах з урахуванням відповідних вихідних характеристик використовуваної сталі та нормованих трендів старіння відповідної електротехнічної сталі й шихтованого осердя [2, 6].

Так як для визначення глибинних пошкоджень осердь при тестуванні за одним зубцем необхідно змінювати глибину проникнення магнітного потоку, що визначається співвідношенням

$$z = \frac{1}{2\pi\sqrt{f\mu\sigma}}, \quad (1)$$

де z - глибина проникнення магнітного потоку; f - частота зміни магнітного потоку, що наводиться; μ - магнітна проникність досліджуваної сталі; σ - питома провідність сталі, було обумовлено формування відповідних законів зміни амплітуди та частоти напруги живлення вимірювальних індукторів.

Це завдання було вирішено у результаті розробки й використання в якості джерела живлення стабілізованого генератора синусоїдальних сигналів, побудованого на основі однофазного перетворювача частоти Danfoss Micro Drive FC-51 зі зворотним зв'язком за струмом, що працює за принципом «струмового дзеркала». При цьому необхідні амплітуда, форма й частота напруги живлення задаються з виходу цифро-аналогового перетворювача (ЦАП) промислового модуля вводу-виводу E14-440, що підтримує синхронізацію за аналоговим виходом.

Для забезпечення необхідної вірогідності тестування використовувалася зміна ступеня насичення магнітної системи індуктор-досліджувана ділянка статора. Умовою визначення

Машинобудування і зварювальне виробництво

ступеня насичення виступала наявність достатньої кількості чітких незалежних діагностичних параметрів, похибка вимірювання яких не перекидає інтервалу чутливості до розрізнення основних видів дефектів [7].

При цьому нелінійність зміни характеристик досліджуваних ділянок осердя, що визначається індуктивною складовою опору контуру намагнічування еквівалентної заступної схеми, обумовлює можливість підвищення чутливості ряду діагностичних параметрів до існуючих видів пошкоджень при різних значеннях частоти магнітного потоку, що наводиться, і тим самим має сприяти зростанню їх інформативності.

За умови насичення досліджуваного кола, діючи значення напруг U_1, U_2 і струму I_1 , отримані по сигналам $u_1(t)$, $u_2(t)$ і $i_1(t)$, не зв'язані однозначно певними чисельними співвідношеннями з їх середніми й амплітудними значеннями, а кути зсуву фаз між цими сигналами фактично не мають чіткої фізичної інтерпретації.

Тобто, можна окремо аналізувати параметри для кожної з гармонік i , крім цього, ряд інтегральних параметрів, які характеризують сигнал у цілому. Останні найчастіше також не мають фізичного сенсу, але чутливі до діагностованих ушкоджень осердь.

У якості діагностичних оцінювалися параметри, що характеризують основні електричні й магнітні властивості кола індуктор – ділянка осердя: напруженість H магнітного поля, магнітна індукція B_m , коефіцієнти гармонік кривих струму THD_{I1} намагнічування й напруги THD_{U2} на вимірювальній обмотці, повний магнітний опір Z_m кола, втрати P_{μ} у сталі, кут ϕ_{I1U2} зсуву фаз між кривими струму намагнічування й напругою на вимірювальній обмотці, активний $R_{\mu 1}$ і реактивний $X_{\mu 1}$ опору контуру намагнічування на першій гармоніці, а також окремі амплітуди складових миттєвої потужності, розраховувані згідно [4].

Система локального тестування осердь статорів та технічної паспортизації синхронних двигунів середньої та великої потужності складається з наступних конструктивних блоків: персональний комп'ютер, механічна частина автоматична система локального тестування з робочим органом, блок керування та вимірювання, змонтований у металевій шафі.

ПЕОМ з передумовленим програмним забезпеченням є окремою частиною системи і пов'язується з нею за допомогою шнура USB та спільного сигнального заземлення, виконаного з плетеного дроту необхідного перерізу.

Загальний вигляд механічної частини використовуваної у роботі автоматичної системи локального тестування (АСЛТ) наведено на рис. 3.

Базовою деталлю механічної частини є напрямна 1, у поздовжньому пазу якої переміщується індуктор 2. Переміщення здійснюється за допомогою гвинтової пари, що включає гвинт 3 і повзушку гайки 4 з багатозахідною різьбою. Легкість обертання забезпечують радіальні шарикопідшипники 5, розташовані у передній кришці-фіксаторі 6 і у торцевій розточці повзушки.

Гвинт 3 одержує обертання від фланцевого крокового електродвигуна (КД) 7, закріпленого на бічній стороні кожуха 8. Для передачі обертання на гвинт використовуються черв'як 9, закріплений на валу електродвигуна та черв'ячне колесо 10, установлене безпосередньо на гвинт.

Машинобудування і зварювальне виробництво

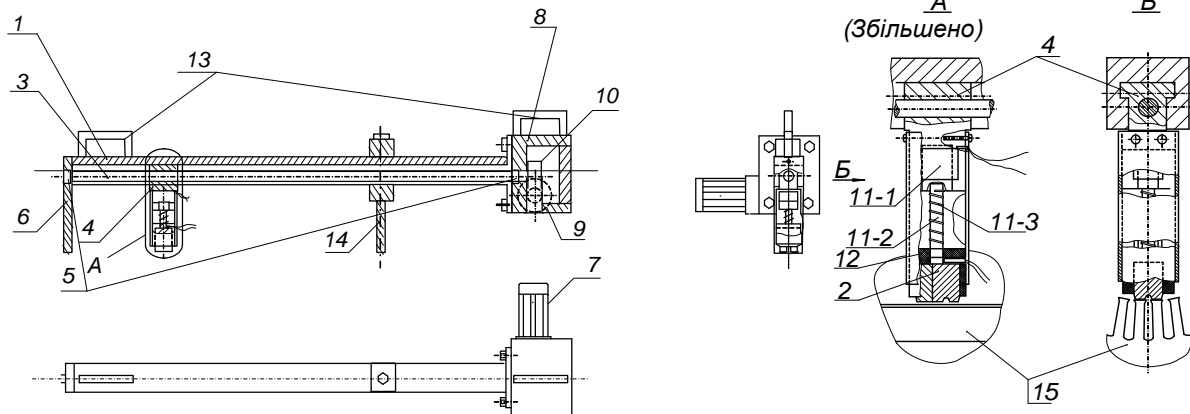


Рисунок 3 – Загальний вигляд механічної частини АСЛТ

Вимірювальна голівка складається із зазначеної вище повзушки – гайки, до якої за допомогою напрямної пари приєднується неуніфікований вузол керування 11, що складається з електромагніту 11-1, приєднувальної шпильки 11-2 і пружини 11-3. У нижній частині голівки до шпильки приєднується змінна втулка з немагнітного матеріалу 12. Розмір втулки у кожному окремому випадку залежить від максимальної величини індуктора 2 та від властивостей сталі тестованого осердя статора. Вивід проводів від вузла керування 11 і від індуктора здійснюється через запобіжні втулки.

Після встановлення статора робочий орган заводиться усередину осердя за допомогою ручок 13, фіксується на сердечнику за допомогою затискача 14 після підведення індуктора до зубців статора 15 у його нерозпушеній частині з величиною повітряного проміжку $1 \pm 0,5$ мм.

За допомогою КД поздовжнього переміщення робочий орган автоматично підводиться до крайніх листів сталі осердя. За допомогою включення-відключення керуючого магніту індуктор підводиться впритул до зубців контрольованої ділянки сердечника та відводиться від них. Механічна частина використовуваної АСЛТ мала габаритні розміри $1000 \times 200 \times 50$ мм. Тип використовуваного приводного двигуна – ДШ65-0,06-3.

Зовнішній вигляд робочого органу автоматичної системи локального тестування наведено на рис. 4.

Тут 1, 2 – роз'єми для підключення робочого органу до блоку керування та вимірювання; 3, 4 – вимірювальні індуктори для тестування за двома та одним зубцем у відповідних гільзах, що забезпечують їх точне переміщення; 5, 6 – роз'єми для підключення відповідно намагнічувальних та вимірювальних обмоток індукторів; 7 – ряд кнопок для ручного керування КД з метою встановлення початкового положення робочого органу; 8 – датчики кінцевих положень робочого органу, виконані на основі перетворювачів Хола.

Блок керування та вимірювання АСЛТ являв собою стійку із встановленими платами наступних пристроїв: схеми керування КД поздовжнього руху, схеми датчиків контрольованих параметрів, мікроконтролерна схема керування системою, 16-канальний сертифікований модуль аналогово-цифрового вводу-виводу E14-440 фірми LCard, що підключається безпосередньо до комп'ютера через шину USB.

Крім цього, до складу блоку входять трансформатори блоків живлення пристроїв АСЛТ та зовнішній роз'єм, встановлений на корпусі блоку керування та вимірювання (рис. 5).

Машинобудування і зварювальне виробництво

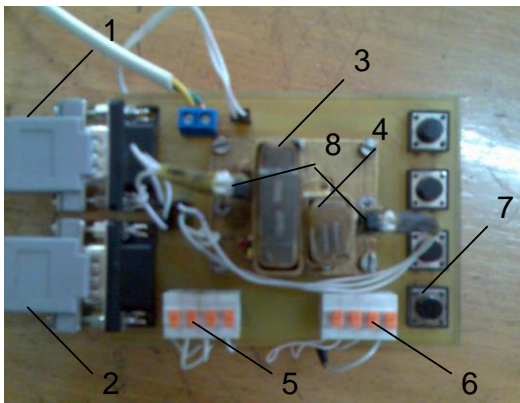


Рисунок 4 – Зовнішній вигляд робочого органу автоматичної системи локального тестування



Рисунок 5 – Зовнішній роз'єм блоку керування та вимірювання

На рис. 5: 1 – роз'єм для підключення напруги живлення; 2 – автоматичний вимикач; 3 – вимикач блокування однофазного перетворювача частоти; 4 – вимикач подання живлення на індуктор для тестування за двома зубцями; 5 – вимикач для подання живлення на кроковий двигун; 6 – роз'єм для підключення крокового двигуна; 7 – інформаційний роз'єм.

Вимірюваними величинами, відповідно до рис. 2, були змінний струм у вимірювальній обмотці індуктора і напруги на виводах його намагнічувальної та вимірювальної обмоток. Використовувані датчики напруги та струму мали клас точності 0,1-0,2% та виконували підсилення входних сигналів з нелінійним викривленням 0,1%. У якості датчиків положення використовувались стандартні імпульсні датчики лінійного переміщення, оснащені інтерфейсом RS232C.

У ході досліджень використовувалось осердя статора синхронного двигуна Siemens типу 1FT7102-5AF71-1DG зі штучно внесеними ушкодженнями магнітної системи: поверхневим і глибинним закороченнями ділянок та моделюванням послаблення пресування шляхом розпушення крайніх листів осердя.

Метою проведених досліджень було наступне.

1. Визначення основних умов локального тестування (ступень насичення магнітної системи, що визначає рівень напруги живлення, діапазон зміни її частоти, відстань від поверхні індуктора до зубців статора).

При розв'язанні цієї задачі застосовувався метод розрахунку нелінійних кіл зі сталлю у функції миттєвих значень [7]. У результаті було отримано діапазони зміни частоти та напруги живлення індуктора для тестування по одному зубцю відповідно 7,3-11,2 Гц при 1,15-2,3 В та 41,7-44,9 Гц при 6,24-7,19 В, що відповідають зоні коліна кривої намагнічування, яка обумовлює повільну зміну магнітної проникності діагностованого осердя. При цьому відстань від поверхні індуктора до зубців статора за результатами розрахунків має бути мінімальною і визначається припустимим технологічним перепадом при збиранні осердя у 0,75 мм.

2. Визначення достатнього набору діагностичних параметрів, що дозволяють з припустимою вірогідністю характеризувати основні види пошкоджень магнітної системи.

Для визначених у попередньому пункті умов, з аналізованих параметрів найбільш інформативними є коефіцієнт гармонік напруги $THDU_2$ на вимірювальній обмотці, повний магнітний опір Z_m ділянки магнітного кола «індуктор-зубець», втрати P_{σ} у сталі на ділянці статора. Для них зона нечутливості в умовах можливих завод є найбільшою і становить у відсотках для дефектів закорочування/послаблення пресування відносно нормальної ділянки відповідно +7,24/-13,31%; +3,79/+8,42%; +5,26/-7,34%. За необхідності до них можуть бути

Машинобудування і зварювальне виробництво

додані синусна та косинусна складові третьої гармоніки миттєвої потужності втрат у сталі, зона нечутливості для яких складала порядку 4-5% за умови низької похибки та симетричної зміни відносно відповідних значень на нормальній ділянці [8].

3. Визначення локального розподілу електричних та магнітних параметрів осердя за результатами тестування за двома зубцями.

Фрагмент результатів отриманого розподілу наведено у табл. 1.

Таблиця 1 – Фрагмент результатів тестування

№ п/п зубця	B_m , Тл	H , А/м	$P_{1,0/50}$, Вт/кг	Ідентифікація ділянки
1	1,307	740	4,32	нормальна
	1,285	871	3,86	послаблене пресування
	1,303	730	4,45	нормальна
	1,274	902	3,71	послаблене пресування
	1,278	852	3,93	послаблене пресування
	1,291	777	5,28	закорочена
	1,294	760	4,61	нормальна
	1,299	726	4,44	нормальна
	1,295	750	4,29	нормальна
	1,279	832	5,75	закорочена

4. Дослідження проявів штучно внесених типових поверхневих та глибинних дефектів осердя за результатами тестування за одним зубцем.

Результати тестування досліджуваного осердя статора по його довжині за різних співвідношень напруга-частота індуктором за одним зубцем у виді первинних профілів для магнітної індукції $B_m = f(l_1)$ та втрат у сталі $P_\mu = f(l_1)$ наведено на рис. 6.

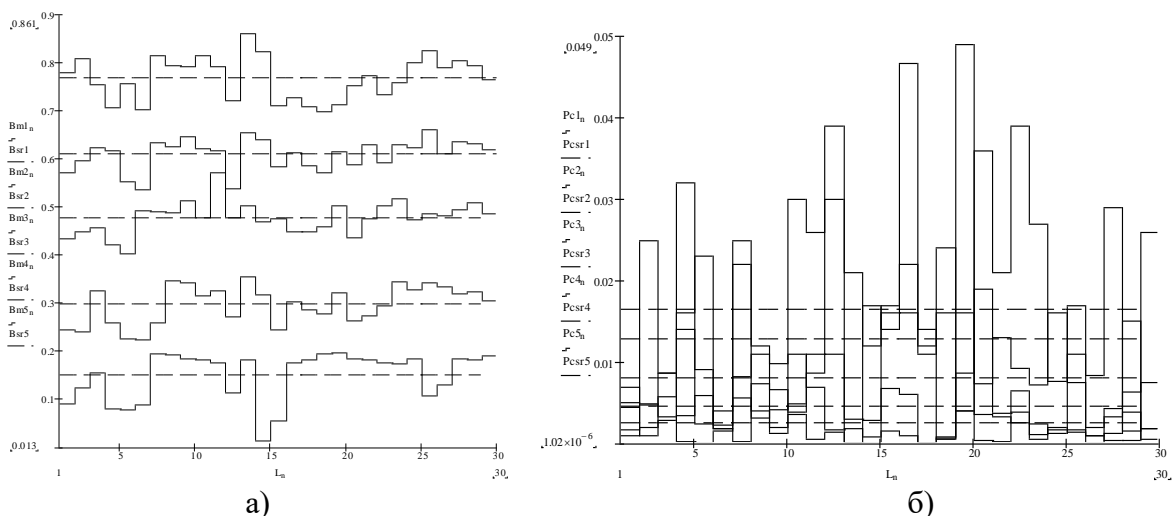


Рисунок 6 – Первинні профілі локального тестування:

а – для магнітної індукції $B_m = f(l_1)$, б – для втрат у сталі $P_\mu = f(l_1)$

Отримані результати підтвердили місце розташування штучно внесених дефектів осердя.

ВИСНОВКИ

1. Обґрунтовано способи підвищення інформативності й вірогідності діагностики шихтованих осердь синхронних двигунів, що дозволяють компенсувати основні недоліки вихідного методу локального тестування, покладені в основу розробки досліду зразка промислової системи їх локальної діагностики.

2. Теоретично обґрунтовані й експериментально підтверджені основні умови локального тестування (ступень насичення магнітної системи, що визначає рівень напруги живлення, діапазон зміни її частоти, відстань від поверхні індуктора до зубців статора).

3. Визначено достатній набір діагностичних параметрів, що дозволяють з припустимою вірогідністю визначати основні види пошкоджень магнітної системи.

4. Доведено ефективність розроблених заходів у плані визначення місця розташування поверхневих та глибинних дефектів шихтованих осердь.

Список використаних джерел:

1. *Котеленец, Н. Ф.* Испытания и надежность электрических машин / *Н. Ф. Котеленец, Н. Л. Кузнецов.* – М. : Высшая школа, 1988. – 232 с.
2. *Дружинин, В. В.* Магнитные свойства электротехнической стали / *В. В. Дружинин.* – Изд. 2-е. – М. : Энергия, 1974. – 240с.
3. Пат. 62491А Україна, МПК G01R 31/34 (2006.01), G01R 33/12 (2006.01), H02K 15/00, H02K 15/02 (2006.01), G01R 31/00 Спосіб діагностики зубцевої зони пакетів електротехнічної сталі електричних машин / *Прус В. В., Родькін Д. Й., Войтех О. А., Петров Р. М.* – № 2003042863 ; заявл. 02.04.2003 ; опубл. 15.12.2003, Бюл. № 12.
4. *Zagirnyak, M.* Ways of efficiency improvement of local diagnostic of the cores of induction motor stators / *M. Zagirnyak, V. Prus, A. Miroshnykova* // *Przeгляд Elektrotechniczny.* – 2015. – R. 91, N 1. – S. 217–220.
5. *Прус, В. В.* Формування достатнього набору діагностичних параметрів при локальному тестуванні пакетів сталі статорів АД / *В. В. Прус, А. О. Суторміна, Д. А. Холодов* // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету / Кременчуц. нац. ун-т ім. М. Остроградського. – Кременчук, 2005. – Вип. 3/2005 (32). – С. 164–168.
6. *Прус, В. В.* Обґрунтування впливу процесу старіння на електричні та магнітні властивості шихтованих осердь електричних машин / *В. В. Прус, С. Є. Дзеніс, О. О. Сьомка* // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехн. ін-т : зб. наукових праць. – Харків, 2016. – № 11 (1183). – С. 115–122. – (Серія : Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії).
7. *Zagirnyak, M.* Improved method for calculation of parameters of electromagnetic and power processes in electric circuits with steel in saturation mode / *M. Zagirnyak, V. Prus, D. Miljavec* // *Технічна електродинаміка.* – 2015. – № 4. – С. 12–18.
8. *Прус, В. В.* Алгоритм визначення складових миттєвої потужності при полігармонічних напрузі і струмі, їх аналіз та інтерпретація / *В. В. Прус, А. В. Нікітіна* // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету. – Кременчук, 2004. – Вип. 4/2004 (27). – С. 45–50.

Прус В. В., Дегтяренко А. О., Дятловская В. Л.

СПОСОБЫ ПОВЫШЕНИЯ ИНФОРМАТИВНОСТИ И ДОСТОВЕРНОСТИ ДИАГНОСТИКИ ШИХТОВАННЫХ СЕРДЕЧНИКОВ СТАТОРОВ СИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

В работе определены особенности оценивания текущего состояния шихтованных

Машинобудування і зварювальне виробництво

сердечников статоров синхронных двигателей в ходе ремонта и под влиянием продолжительной эксплуатации. Обоснованы основные отличия при применении локальной диагностики к магнитным системам синхронных машин, обусловленные их электромагнитными нагрузками и степенью насыщения стали. Решены вопросы формирования условий диагностики, включая рациональные диапазоны изменения напряжения и частоты источника питания и введение варьированной величины воздушного зазора для компенсации неравномерного прилегания индуктора к поверхности зубцовой зоны шихтованного сердечника статора. Обоснован выбор диагностических параметров по принципу наибольшей величины зоны нечувствительности в условиях изменения погрешности измерения при наличии возможных помех, которые позволяют определять основные виды повреждений магнитной системы шихтованных сердечников синхронных двигателей. Обоснованы способы повышения информативности и достоверности диагностики шихтованных сердечников синхронных двигателей, которые позволяют компенсировать основные недостатки базового метода локального тестирования, положенные в основу разработки опытного образца промышленной системы их локальной диагностики. Полученные теоретические положения подтверждены экспериментально в ходе лабораторной апробации на базе промышленного образца автоматической системы локального тестирования. В результате получены диапазоны изменения частоты и напряжения питания индуктора, соответствующие зоне колена кривой намагничивания, которая обуславливает медленное изменение магнитной проницаемости диагностируемого сердечника, определены численные диапазоны зон нечувствительности в условиях возможных помех для дефектов закорачивания и ослабления прессования относительно нормального участка шихтованного магнитопровода, исследованы проявления искусственно внесенных типичных поверхностных и глубинных дефектов сердечника по результатам локальной диагностики.

Ключевые слова: синхронная машина, шихтованный сердечник, локальная диагностика, достоверность, информативность.

Prus V. V., Dehtiarenko O. O., Diatlovska V. L.

METHODS FOR INCREASING INFORMATION CAPACITY AND RELIABILITY OF DIAGNOSTICS OF SYNCHRONOUS MOTOR STATOR CORE DIAGNOSTICS

The paper contains the definition of special features of the assessment of the current condition of the laminated cores of synchronous motor stators in the course of repair and under the action of long operation. The main differences in the application of local diagnostics to magnetic systems of synchronous machines, determined by their electromagnetic loads and the degree of steel saturation, are substantiated. The problem of forming diagnostic conditions, including rational ranges of the change of voltage and frequency of the power supply and the introduction of a variable value of the air gap to compensate for the uneven fit of the inductor to the surface of the toothed zone of the stator core is solved. The diagnostic parameters choice according to the principle of the largest value of the insensitivity zone under the conditions of the change of measurement error in the presence of possible interferences, allowing the definition of the basic types of damages of magnetic system of the laminated cores of synchronous motors, is substantiated. The substantiated ways of improving the informativeness and reliability of diagnostics of the synchronous motors laminated cores, making it possible to compensate for the basic lacks of an initial method of local testing, are the basis of the development of a prototype of the industrial system of their local diagnostics. The obtained theoretical positions were confirmed experimentally during laboratory testing based on the experimental industrial sample of an automatic local testing system. As a result, the ranges of the change of frequency and supply voltage of the inductor, corresponding to the zone of the knee of the magnetization curve, which causes a slow change in the magnetic permeability of the diagnosed core, are obtained; numerical ranges of

insensitivity zones under the conditions of possible interferences for the defects of short-circuit/slackening of movement in relation to the normal section of the laminated magnetic circuit are determined; the manifestation of artificially introduced typical superficial and deep defects of the core are researched according to the results of local diagnostics.

Keywords: *synchronous machine, laminated core, local diagnostics, probability, information content*

Стаття прийнята 05.01.2021 р.

УДК 621.791.75

doi.org/10.31498/2522-9990242021248963

Зусін В. Я., Зусін А. М.

ОПТИМІЗАЦІЯ МОДУЛЯ КРІОЛІТА ПРИ АВТОМАТИЧНОМУ ЗВАРЮВАННІ ТОВСТОЛИСТОВОГО АЛЮМІНІЮ ЗАКРИТОЮ ДУГОЮ

При зварюванні алюмінію широко використовуються високоактивні флюси, що складаються з хлоридів і фторидів лужних і лужноземельних металів. Основою цих флюсів є штучний кріоліт, зі збільшенням вмісту якого у флюсі зростає його рафінуюча здатність. Заводи виготовляють технічний кріоліт з різним модулем (молярним співвідношенням NaF/AlF_3), що призводить до зміни фізико-хімічних властивостей флюсів (температури плавлення, густини, електропровідності, в'язкості). Це впливає на стабільність процесу зварювання, формування шва і на властивості зварних з'єднань. З метою оптимізації модуля кріоліта при зварюванні алюмінію закритою дугою проведені дослідження модуля штучного кріоліту на деякі фізико-хімічні властивості флюсу. Для проведення експериментів були виготовлені вісім партій флюсів однакового складу, але при цьому використовувався кріоліт з модулем від $M = 1,52$ до $M = 2,13$. При збільшенні модуля кріоліта понад $M = 1,65$ відбувається зростання температури плавлення флюсу, яка наближається до температури плавлення зварюваного металу при модулі кріоліта $M = 1,75$. При модулі кріоліта $M = 2,13$ значно перевищує її і становить майже 1000°C . Так само зростає електропровідність флюсу. Збільшення модуля кріоліта призводить до зростання щільності флюсу, при збільшенні модуля кріоліта на $0,1$ щільність флюсу зростає на $0,04\text{--}0,06\text{ г/см}^3$, проте отримані значення щільності флюсу не перевищують щільності розплавленого металу, що зварюється. З перевищенням температури щільність флюсу знижується лінійно. Зменшення модуля кріоліта тягне за собою збільшення рідиннотекучості флюсу, що пояснюється підвищенням вмісту комплексних аніонів AlF_6^{3-} . Зі збільшенням температури вологотекучість всіх флюсів зростає. При зварці алюмінію закритою дугою флюс повинен володіти температурою плавлення і щільністю нижче ніж у зварюється, певною рідиннотекучістю і незначною електропровідністю забезпечує стійкий дугового процес зварювання. За результатами досліджень фізико-хімічних властивостей флюсів з різним модулем кріоліта найбільш повно цим вимогам відповідають флюси, виготовлені на кріоліті з модулем $1,55\text{--}1,70$.

Ключові слова: *алюміній, модуль кріоліту, зварювання, флюс, пористість, мікроструктура, режими зварювання, температура плавлення, електропровідність, ізотерми.*

Постановка проблеми. Однією з основних труднощів, що виникають при зварюванні алюмінію та його сплавів, є видалення тугоплавкої оксидної плівки [1, 2]. Найбільш повно цей процес здійснюється при використанні високоактивних флюсів, що складаються з хлоридів та фторидів лужних та лужноземельних металів [3]. Основою цих флюсів є штучний кріоліт, зі збільшенням вмісту якого у флюсі зростає його рафінуюча здатність.