

УДК 621.313

В. В. ПРУС, О. О. СЬОМКА, С. Є. ДЗЕНІС

ОБГРУНТУВАННЯ ВПЛИВУ ПРОЦЕСУ СТАРІННЯ НА ЕЛЕКТРИЧНІ ТА МАГНІТНІ ВЛАСТИВОСТІ ШИХТОВАНИХ ОСЕРДЬ ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИН

Розглянуто питання визначення зміни магнітних та електричних властивостей шихтованих осердь з електротехнічної сталі. Визначено параметри дослідних зразків осердь, запропоновано та реалізовано програму їх експериментальних випробувань при дослідженні природнього старіння й впливу температурного відпалювання при видаленні обмотки у ході капітального ремонту. Досліджено питання додаткового впливу вихрових струмів при видаленні міжлистової ізоляції електротехнічної сталі. Отримані результати надали можливість оцінити межі зміни основних електричних та магнітних властивостей окремо для листової електротехнічної сталі та шихтованих осердь електричних машин при теплових та механічних впливах, що відповідають режимам їх експлуатації та ремонту.

Ключові слова: електротехнічна сталь, шихтоване осердя, магнітна індукція, втрати у сталі, насичення, електромагнітні параметри, температура, вібрація

Рассмотрен вопрос определения изменения магнитных и электрических свойств шихтованных сердечников из электротехнической стали. Определены параметры исследуемых образцов шихтованных сердечников, предложена и реализована программа их экспериментальных испытаний при исследовании естественного старения и влияния температурного отжига при удалении обмотки в ходе капитального ремонта. Исследованы вопросы дополнительного влияния вихревых токов при удалении межлистовой изоляции электротехнической стали. Полученные результаты дали возможность оценить пределы изменения основных электрических и магнитных свойств отдельно для листової электротехнической стали и шихтованных сердечников электрических машин при тепловых и механических воздействиях, которые соответствуют режимам их эксплуатации и ремонта.

Ключевые слова: электротехническая сталь, шихтованный сердечник, магнитная индукция, потери в стали, насыщение, электромагнитные параметры, температура, вибрация

Purpose. Assessment of the limits of variation of basic electric and magnetic properties of electric steel laminated cores at thermal and mechanical impacts, which correspond to conditions of its operation as a part of electric machines, as well as prediction of estimated trends as to achievement of limit values of the researched parameters. **Methodology.** The parameters of analyzed samples of laminated cores are determined, the program of their experimental test during the research of natural aging and influence of temperature annealing in the process of removal of winding during an overhaul is proposed and implemented. Issues of additional influence of eddy currents during removal of electric steel inter-sheet insulation are researched. **Results.** The obtained results made it possible to assess the limits of variation of basic electric and magnetic properties separately for sheet electric steel and laminated cores of electric machines during thermal and mechanical actions corresponding to conditions of their operation and repair. A number of important conclusions as to laminated core properties variation influence on electromagnetic, thermal and vibration parameters of electric machines are obtained. **Originality.** The problem of determination of variation of magnetic and electrical properties of laminated cores made of electric steel by example of commercial steel used in production of magnetic circuits of low- and medium-power induction motors is solved. **Practical value.** As a result, the above said enables determination of laminated cores limit condition and forecast of the time of electric machines failure due to irreversible changes in magnetic system.

Keywords: electric steel, laminated core, magnetic induction, steel losses, saturation, electromagnetic parameters, temperature, vibration

Вступ. Результати досліджень поточного стану електричних машин (ЕМ) відзначають факт погіршення їх параметрів та характеристик, що переважно пояснюється старінням ЕМ під час ремонту та тривалій експлуатації [1]. При розгляданні цього питання важливим є визначення впливу на стан ЕМ зміни властивостей основних конструктивних вузлів електричних машин, таких як обмотка, магнітна система, підшипникові вузли, вузли комутації та струмознімання тощо. Такі дослідження набувають додаткової актуальності для практично невідновлюваних вузлів або за умови неможливості їх повного відновлення. Це у тому числі ставить задачу оцінювання зміни властивостей магнітної системи електричних машин, яка є основним конструктивним елементом, відновлення якого для ЕМ малої та середньої потужності є недоцільним. При розв'язанні даної задачі слід розрізнити зміну властивостей окремо листової електротехнічної сталі (ЕТС) та магнітопроводу, що зазвичай являє собою шихтоване осердя. Причина цього полягає у різних підходах щодо оцінки їх старіння, так як для листової сталі воно насамперед пояснюється зміною структури матеріалу, а для шихтованого осердя до цього додається факт локального погіршення властивостей міжлистової ізоляції. До того ж, слід окремо

враховувати вплив капітального ремонту ЕМ, будь-яка технологія якого спричинює додаткове погіршення властивостей як самої електротехнічної сталі, так і магнітної системи у цілому внаслідок теплових та механічних впливів.

Аналіз основних досягнень. Питання визначення реального стану магнітопроводів є особливо важливим для машин змінного струму, зокрема асинхронних двигунів (АД), що характеризуються більшим рівнем насичення магнітної системи.

Однією з основних причин, що приводить до змін характеристик ЕТС, є її природнє старіння [2, 3]. Воно обумовлюється нагрівом магнітопроводів у процесі експлуатації від втрат при перемагнічуванні і виділення тепла намагнічуючими обмотками. Підвищення температури осердь протягом тривалого часу сприяє структурним змінам, у результаті яких відбувається погіршення їх характеристик.

Другою причиною зміни характеристик шихтованих осердь є вплив різних видів ремонту. Так як основними причинами виходу з ладу АД є виткові замикання в обмотках статора (54%), поломки підшипників та підшипникових вузлів (20%) та пробій ізоляції на корпус (10%) [1, 4], у більшості випадків ремонт передбачає заміну обмоток статора або

© В.В. Прус, О.О. Сьомка, С.Є. Дзеніс, 2016

підшипникових вузлів. Для цього необхідно вилучити стару обмотку, за можливістю не пошкодивши осердя, що найчастіше реалізують відпалюванням в печі, гідролітичною обробкою в автоклаві або високочастотним нагріванням осердя [1, 5]. Найпоширенішим є перший варіант, причому статор відпалюють повністю у спеціалізованих печах певний час при визначеній температурі. У процесі відпалювання досягаються ефекти послаблення ізоляції та пом'якшення самої обмотки, що дозволяє досить просто обрізати її лобову частину та витягнути обмотку з пазів. При цьому шихтоване осердя піддається негативним тепловим та механічним впливам, що зумовлює різку зміну його магнітних та електричних характеристик [4–9].

Доведено, що відпалювання приводить до різкого зниження опору міжлистової ізоляції [5], а в деяких місцях до її руйнування, внаслідок чого в осерді статора відбуваються замикання листів та з'являються місця локальних перегрівів [4].

Вплив відпалювання осердя на втрати є неоднозначним. Згідно [5] втрати можуть як зростати, внаслідок погіршення міжлистової ізоляції так і спадати, внаслідок зменшення залишкових механічних напружень. Але уже після вкладання нової обмотки спостерігається зростання втрат через появу закорочувань між листами внаслідок їх зміщень, оскільки після відпалювання міжлистової ізоляції має дефектні місця. Відповідно до [4], після кожного процесу відпалювання відбувається зростання питомих втрат, що може досягати 9%. При збільшенні кількості відпалювань зростання втрат стає суттєвішим, при цьому повні втрати у сталі АД в середньому зростають удвічі відносно втрат до ремонту [4].

Результати аналізу праць вчених, що вивчали питання зростання втрат у сталі потужних ЕМ [10–11] свідчать, що більш суттєво та нерівномірно змінюються властивості сталі зубцевої зони. Це призводить до виникнення локальних контурів замикань ділянок сталі за довжиною та об'ємом осердя, з нерівномірним розподілом магнітної індукції та температури, та спричинює виникнення перегрівів обмотки на локальних ділянках і збільшення магнітної складової вібрації електричної машини. Але невизначеними залишається ряд питань, що стосуються природи даних змін. Це свідчить про необхідність більш глибокого вивчення питань старіння шихтованих осердь.

Мета роботи. Оцінити межі зміни основних електричних та магнітних властивостей для шихтованих осердь з ЕТС при теплових та механічних впливах, що відповідають режимам її експлуатації у складі ЕМ і технологіям капітального ремонту та спрогнозувати передбачувані тренди досягнення межових значень для досліджуваних параметрів.

Матеріали і результати досліджень. У магнітних системах ЕМ використовуються різні марки ЕТС. Це пояснюється рядом вимог щодо необхідних електричних та магнітних параметрів, а також конструкційними і вартісними обмеженнями. Останнє саме й визначає якість сталі. Так, для ЕМ загальнопромислового призначення застосовують

ЕТС марок 2013, 2212, 2312, 2411, 2421 та інші. Як видно, уся сталь є холоднокатаною ізотропною, про що свідчить перша цифра позначення марки. Наступні цифри фактично пояснюють основні вимоги щодо параметрів, зокрема, нормовані питомі втрати при індукції 1,5 Тл і частоті 50 Гц (третя цифра). При цьому для ЕМ з висотою валу до 250 мм перевагу віддають міцності (вміст кремнію менше ніж 0,8%) порівняно зі сталлю для магнітопроводів ЕМ середньої та великої потужності, де на перше місце виходять вимоги щодо зменшення величини вихрових струмів (більший вміст кремнію – від 2,8 до 3,8%), про що свідчить друга цифра у позначенні [12].

Як було зазначено вище, під старінням ЕТС, відповідно до існуючих стандартів, насамперед розуміють погіршення її магнітних та електричних властивостей, здебільшого викликане тривалим перевищенням температури осердь, що спричинює доменні зміни структури сталі [3].

Як свідчать результати досліджень, наведені у [2], після штучного старіння, що імітувало реальне старіння матеріалів у складі ЕМ, втрати для сталі із вмістом вуглецю 0,01% збільшуються на 40%. Для оцінки цього явища використовують відсотковий коефіцієнт старіння за питомими втратами, що визначається як різниця питомих втрат після штучного старіння p_1 та до старіння p_0 , віднесених до питомих втрат до старіння $(p_1 - p_0)/p_0$, %. Аналогічно визначаються коефіцієнти старіння за магнітною індукцією та коерцитивною силою: $(B_1 - B_0)/B_0$; $(H_{c1} - H_{c0})/H_{c0}$, % [2].

Відповідно до [3], для сталей із різним вмістом кремнію існують граничні коефіцієнти старіння за питомими втратами, а саме для масової частки кремнію 0,8% включно – не більше 8%, від більше 0,8% до 1,8% – не більше 6%, та для від більше 1,8% до 3,8% – не більше 4%. Слід зазначити, що наведені результати не враховують старіння сталі внаслідок пошкодження міжлистової ізоляції, що спричинює зменшення опору між сусідніми листами, їх закорочування та відповідну зміну магнітних властивостей осердь у цілому.

Окремим питанням є врахування зміни властивостей ЕТС після ряду ремонтів ЕМ, особливо після проведення демонтажу обмоток у ході капітального ремонту, так як при цьому теплові та механічні впливи є більш суттєвими.

Демонтаж обмоток статора переважно виконується механічним шляхом, чому передують попереднє послабленням пазової ізоляції обмотки та обрізання лобових частин з одного боку осердя. На підприємствах для пом'якшення пазової ізоляції обмоток широко застосовують відпалювання у герметизованих печах. Воно полягає у нагріві корпусу ЕМ, що регламентується для статорів у чавунному корпусі температурою 350 °С протягом 4–6 годин, а для статорів в алюмінієвому корпусі – температурою 250 °С. Даний спосіб демонтажу є найбільш економічним, екологічним та простим у виконанні, але його недоліком є суттєвий вплив на зміну властивостей міжлистової ізоляції. Після послаблення пазової ізоляції обмотку витягують за допомогою

крюків, якими чіпляють її за лобову частину, вручну для малих машин або спеціальним станком для великих машин. Останніми етапами демонтажу є чистка пазів від залишків пазової ізоляції за допомогою напилку та мийка осердя. Під час виконання зазначених технологічних операцій основними факторами, що спричиняють зміну властивостей ЕТС осердя є теплові та механічні впливи.

Окрім зазначеної технології, послаблення пазової ізоляції можливе іншими термічними способами або хімічним шляхом.

Гідролізний демонтаж виконується у ванні, наповненій 5 % розчином каустичної соди при 85-90 °С протягом 5-6 годин. Після цього статори нейтралізують у ванні, наповненій 0,5 % розчином хромпіку при 40-60 °С протягом 15-20 хвилин та далі промивають проточною водою [13]. Головним недоліком такого способу є його низька екологічність.

Зазначені способи демонтажу є руйнівними для ЕТС, а відпалювання можна, щонайменше, порівняти із експериментальним визначенням коефіцієнту старіння за природних умов, котре у відповідності до [3] полягає у нагріванні зразків протягом 120 годин при 120 °С для слабо- та середньолегованої сталі та сталей підвищеної легованості, і при 150 °С – для високолегованої сталі. Гідролізний спосіб, меншою мірою, та хімічний демонтаж зменшують товщину та цілісність ЕТС у місцях пошкодження ізоляційного шару, що додатково викликає погіршення її властивостей.

Однією з найбільш перспективних технологій видалення обмотки є високочастотний нагрів осердя. Він полягає у передачі тепла від осердя пазовій ізоляції через лак, що знаходиться між ними, а від пазової ізоляції через лак – провідникам. Під час інтенсивного нагріву температура лаку між осердям та пазовою ізоляцією вища, ніж між пазовою ізоляцією та провідниками, а цементуюча властивість лаку – нижче. Таким чином, під час демонтажу обмотки з нагрітого осердя вона виходить разом із пазовими коробочками, залишаючи паз чистим [1]. Недоліком даного способу демонтажу є складність та високі затрати на його проведення.

Постановка завдань експериментальних досліджень. Як було зазначено вище, різні способи видалення обмотки, незважаючи на їх особливості та природу впливу, у будь-якому випадку обумовлюють певну зміну магнітних та електричних властивостей сталі. Для їх оцінки у часі залежно від режимів експлуатації та зовнішніх впливів на магнітні вузли необхідно отримати межові значення зміни властивостей та тренди їх досягнення. При цьому можна попередньо скористатись даними, наведеними у [2], відповідно до яких втрати у шихтованому осерді залежно від його ефективного поперечного розміру (кількості листів) можуть бути у 3,5 – 4 рази менше за втрати у нешихтованому матеріалі. Для побудови трендів було обумовлено проведення ряду експериментів для оцінки кожного із впливових факторів та їх можливої взаємодії.

Дослідження було проведено відповідно до

наступних умов.

1. Створено партію дослідних зразків, яку було розбито на п'ять умовних груп. Дослідні магнітопроводи виготовлено з кільцевих зразків [3]. Кожен із них складався з 10 штапованих листів холоднокатаної анізотропної ЕТС марки 2212, із зовнішнім діаметром 120 мм, внутрішнім 100 мм та товщиною 0,5 мм.

2. Зразки першої групи використовувались для визначення межової зміни параметрів. Для цього проводились випробування для двох випадків – без ушкодження ізоляції та з видаленою ізоляцією, з метою додаткової оцінки впливу вихрових струмів.

3. Зразки другої групи було призначено для дослідження природнього старіння сталі, яке імітувалось шляхом нагрівання зразків протягом 120 годин при 120 °С [3].

4. Зразки третьої групи використано для дослідження впливу термічного способу видалення обмотки на стан ЕТС та осердя з неї.

5. Оцінка зміни властивостей ЕТС, що є аналогічними до експлуатаційних (старіння) та післяремонтних впливів, проводилась за нормативними характеристиками (зміна залежності $p = f(B_m)$ питомих втрат та кривої $B_m = f(H)$ намагнічування) та параметрами (питомі p втрати у сталі, коефіцієнт α ступеня частоти, індукція B_s насичення та відповідна їй напруженість H магнітного поля).

6. Також додатково було досліджено зміну властивостей параметрів петлі гістерезису – залишкову індукцію B_j та коерцитивну силу H_c на постійному та змінному струмі при частоті 50 Гц, магнітну статичну μ та динамічну μ_d проникність, опір міжлистової ізоляції. Дані досліди були реалізовані відповідно до рекомендацій [3].

Принципи побудови вимірювального обладнання, організація вимірювань. З урахуванням необхідного діапазону зміни досліджуваних параметрів потрібно, щоб використовувана у процесі досліджень магнітна вимірювальна апаратура, а також методи обробки результатів вимірювань враховували нелінійні властивості магнітного кола.

Насамперед, це відноситься до вимірювань при високому ступені насичення шихтованого магнітопроводу, так як при цьому необхідно враховувати спектральний склад одержуваних сигналів. Це відрізняє магнітні вимірювання, виконувані при пошукових дослідженнях, від вимірювань, що проводяться у ході приймально-здавальних нормативних випробувань або при поточному виробничому контролі.

З урахуванням вимог до випробувальної апаратури [14], у розглянутому випадку найбільш обґрунтованим є використання індукційного способу вимірювань при змінному перемагнічуванні зразків зі зміною частоти.

Структура випробувального комплексу (ВК) була побудована відповідно до рис. 1.

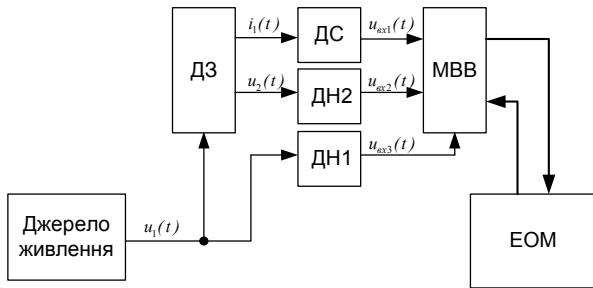


Рис. 1 – Структурна схема комплексу для випробувань шихтованих осердь з ЕТС

Тут ДЗ – досліджуваний зразок магнітопровода, що представляє собою магнітну систему із намагнічувальною та вимірювальною обмотками. Параметри, що характеризують режим випробування – струм $i_1(t)$ і напруга $u_2(t)$ з ДЗ надходять на датчики струму (ДС) і напруги (ДН2). На датчик напруги ДН1 надходить вихідний сигнал $u_1(t)$ від автономного джерела змінної синусоїдної напруги із регульованою частотою.

Сигнали з датчиків через модуль вводу-виводу (МВВ) надходять до ЕОМ, яка виконує функції збору, зберігання та обробки інформації. У розробленому ВК у якості МВВ використовувався сертифікований вимірювальний модуль E14-440D (L-Card) із прикладним програмним забезпеченням власної розробки.

У процесі розв'язання задачі обґрунтована необхідність урахування видів намагнічування осердь у змінних магнітних полях [14–15], що розрізняються спектральним складом кривих магнітної індукції $B(t)$ та напруженості магнітного поля $H(t)$ на лінійній ділянці кривої намагнічування до точки насичення й сформульовані умови їх поділу.

З огляду на описані вище особливості випробувань, в основу визначення усіх параметрів було покладено попереднє розкладання вимірюваних сигналів у ряд Фур'є, на основі результатів якого розраховано необхідні параметри.

Магнітна індукція

$$B_m = U_{2cep} / 4fW_e S_m, \quad (1)$$

де U_{2cep} – середнє значення напруги на вимірювальній обмотці;

W_e – число витків вимірювальної обмотки; S_m – площа перетину осердя магнітопровода;

f – частота перемагнічування.

Напруженість магнітного поля

$$H = I_1 W_n / l, \quad (2)$$

де I_1 – діюче значення струму в обмотці, що намагнічує;

W_n – число витків намагнічувальної обмотки;

l – середня довжина магнітної лінії у магнітопроводі.

У випадку несинусоїдності $B(t)$ і $H(t)$ на

лінійній ділянці кривої намагнічування розрахунок проводився тільки по першим гармонікам.

Несинусоїдність оцінювалась за допомогою коефіцієнтів гармонік вимірюваних сигналів струму $i_1(t)$ і напруги $u_2(t)$ із співвідношення

$$k_2 = \sqrt{\sum_{p=2}^k A_p^2} / A_1, \quad (3)$$

де p , k – номер гармоніки та число гармонік сигналів, що враховуються;

A_1 , A_p – діючі значення першої та p -ї гармоніки у сигналах.

Втрати у сталі осердя

$$P_c = \frac{W_H}{W_e} (a_{1p} a_{u2p} + b_{1p} b_{u2p}) / 4. \quad (4)$$

Тут a_{1p} , b_{1p} , a_{u2p} , b_{u2p} – відповідно квадратурні складові сигналів струму $i_1(t)$ та напруги $u_2(t)$, отримані з перетворення Фур'є.

Після обробки вимірюваних величин $i_1(t)$ і $u_2(t)$ у відомому масштабі будувалась динамічна петля гістерезису.

При цьому миттєве значення напруженості магнітного поля визначалось із співвідношення

$$H(t) = i_1(t) W_n / l. \quad (5)$$

Миттєве значення магнітної індукції $B(t)$ визначалось шляхом перетворення із кривої $u_2(t)$

$$B(t) = \frac{1}{W_e S_m} \sum_p \frac{U_{2mp}}{p\omega} \cos(p\omega t + \varphi_p), \quad (6)$$

де $\omega = 2\pi f$ – кутова частота основної гармоніки сигналу;

$T = 1/f$ – період досліджуваного сигналу;

U_{2mp} , φ_p – відповідно амплітуда та початкова фаза гармонічних складові напруги $u_2(t)$, одержувані з розкладання в ряд Фур'є.

У ході досліджень було обґрунтовано можливості визначення співвідношення між вимірюваними на різних частотах значеннями втрат у сталі з метою їх розподілу на складові від гістерезису та вихрових струмів за умови сталості магнітного потоку. Для цього амплітуда напруги живлення змінювалась пропорційно її частоті:

$$\frac{U}{f} = const, \quad (7)$$

де U , f – амплітуда та частота напруги живлення.

Значення складових втрат на гістерезис і вихрові струми виражались відповідно до співвідношення:

$$P_c = P_{ce} + P_{cex} = C_2 f + C_{ex} f^2, \quad (8)$$

де P_c , P_{ce} , P_{cex} – втрати у сталі – сумарні, на гістерезис і на вихрові струми;

C_2 і C_{ex} – відповідні їм коефіцієнти.

З коефіцієнтів C_2 і C_{ex} визначались питомі втрати на гістерезис і вихрові струми згідно із співвідношеннями

$$P_{z1,0/50} = \frac{50C_2}{m \left(\frac{B_m}{1,0} \right)^2}; \quad (9)$$

$$P_{ex1,0/50} = \frac{2500C_{ex}}{m \left(\frac{B_m}{1,0} \right)^2}. \quad (10)$$

Тут $P_{z1,0/50}$, $P_{ex1,0/50}$ – питомі магнітні втрати на гістерезис і вихрові струми при магнітній індукції 1 Тл на частоті 50 Гц;

B_m – магнітна індукція, для якої визначалися коефіцієнти C_2 і C_{ex} ;

m – маса випробовуваного зразка.

Далі шляхом розв'язання системи рівнянь

$$\begin{cases} P_{z1,0/50} + P_{ex1,0/50} = P_{1,0/50} \\ P_{z1,0/50} \left(\frac{f}{50} \right) + P_{ex1,0/50} \left(\frac{f}{50} \right)^2 = P_{1,0/50} \left(\frac{f}{50} \right)^\alpha \end{cases} \quad (11)$$

при довільному значенні частоти уточнювались значення питомих сумарних магнітних втрат при магнітній індукції 1 Тл на частоті 50 Гц $P_{1,0/50}$ та коефіцієнта α .

Статична магнітна проникність визначалась за співвідношенням

$$\mu = B_m / H_m, \quad (12)$$

де B_m , H_m – амплітудні значення магнітної індукції та напруженості магнітного поля, отримувані за вершинами часткових петель гістерезису; а динамічна – за співвідношенням

$$\mu = dB_m / dH_m, \quad (13)$$

де dB_m , dH_m – похідні магнітної індукції та напруженості магнітного поля.

Для оцінки структурних змін в ЕТС у ході досліджень додатково здійснювався металографічний контроль зразків за допомогою електронного мікроскопу.

Аналіз отриманих результатів. Результати проведених досліджень наведено у табл. 1 та вибірково представлено на рис. 2–6.

Дані табл. 1 свідчать про помірне зростання сумарних втрат у ході природного старіння сталі при збільшенні відносної частки втрат на вихрові струми. У той же час, як видно з рис. 2–3, прояв цього явища при магнітній індукції, що не перевищує 1 Тл, є несуттєвим.

Значно у більшому ступені зменшується магнітна індукція B_s насичення. Як видно з рис. 6, цьому додатково сприяє вплив вихрових струмів. Термічна обробка характеризується більшим відсотком зростання втрат, причому починаючи з третього

відпалювання, приріст втрат збільшується, що співпадає із зростанням коефіцієнту α . Аналогічно можна сказати про зменшення індукції B_s насичення та її зв'язок із зростанням реактивної дії вихрових струмів.

Таблиця 1 – Результати дослідження зміни властивостей ЕТС

Параметр	Вихідне значення	Межа зміни	Відпалювання	Експлуатація
$P_{1,0/50}$, Вт/кг	2,62	+43,4 %	+5,41 % +10,8 % +18,6 %	+4,34 %
α	1,54	+29,8 %	+7,24 % +16,5 % +25,9 %	+6,12 %
B_s , Тл	1,56	-25,7 %	-12,3 % -18,7 % -21,2 %	-7,21 %
H , А/м	1123	-10,9 %	-3,32 % -4,87 % -6,25 %	-2,72 %

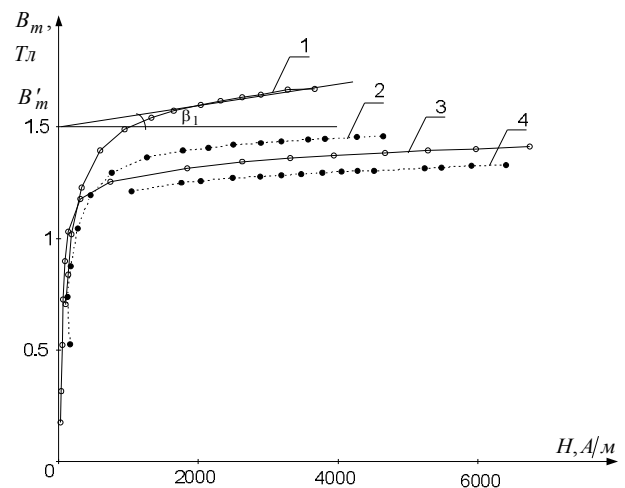


Рис. 2 – Залежності $B_m = f(H)$ магнітної індукції від напруженості магнітного поля

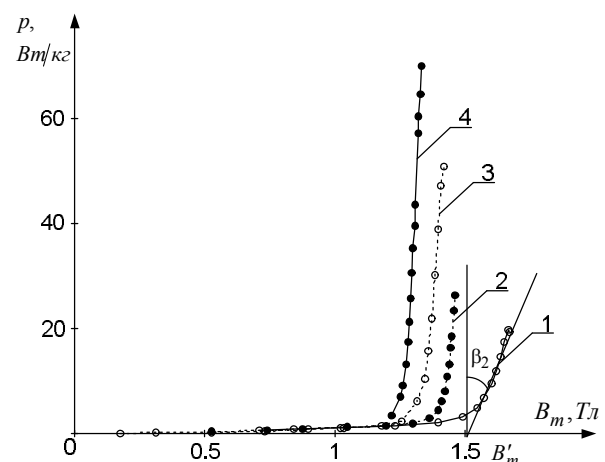


Рис. 3 – Залежності $p = f(B_m)$ питомих втрат від магнітної індукції

Криві 1 і 3 на рис. 2–3 відповідають вихідному

стану й стану після першого відпалювання для осердя з ізованих листів, криві 2 і 4 – вихідному стану й стану після першого відпалювання для осердя з листів зі знятою ізоляцією.

Таким чином, як видно з рис. 2–3 і додатково підтверджено результатами металографічних досліджень на рис. 5–6, старіння шихтованої сталі проявляється в зниженні рівня магнітної індукції при зменшенні кута β_1 нахилу насиченого ділянки кривій намагнічування (рис. 2), а також більш різкому росту питомих втрат, що характеризується збільшенням кута β_2 (рис. 3).

При цьому для рис. 2–3 характерним є наявність індукції B'_m , відповідної точкам зламу як кривої намагнічування, так і залежності для питомих втрат. І, хоча погіршення цих параметрів відбувається на фоні зменшення напруженості H магнітного поля, проаналізувавши діапазони дійсної зміни магнітної індукції, можна дійти висновку, що реальне погіршення властивостей шихтованих осердь є набагато гіршим.

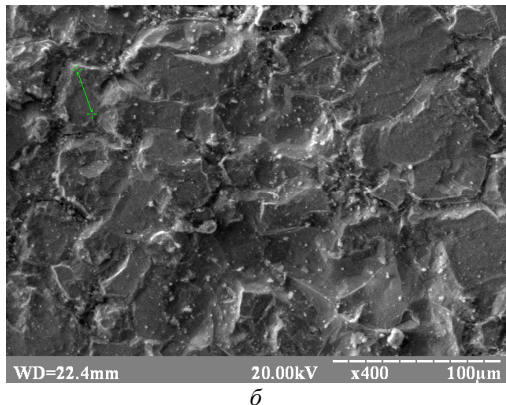
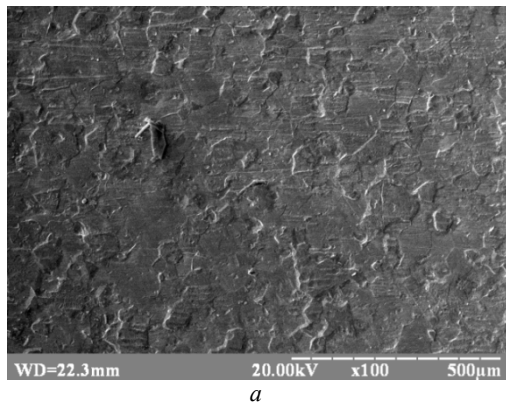


Рис. 4 – Текстура поверхні листа відпаленого зразка без ізоляції: *a* – загальний вид; *б* – збільшене зображення ключової ділянки

Так, для АД, статор яких виготовлено зі сталі марки 2212, магнітна індукція в ярмі лежить у діапазоні 1,15–1,65 Тл, а у зубцях 1,25–1,9 Тл.

Як правило, в АД передбачається сталість робочого значення B_{mv} магнітної індукції для ділянок магнітного кола. З рис. 2 видно, що за цих умов для кривих намагнічування ЕТС, що характеризуються певною ознакою старіння, робоче значення напруженості H магнітного поля може зростати у 10–

70 разів. При цьому робоча точка магнітної системи зміщується у зону більш високого насичення, що приводить до несинусоїдності як магнітної індукції так і намагнічувальної складової I_μ струму статора.

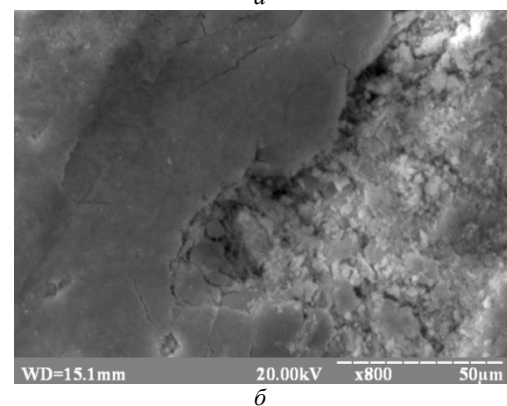
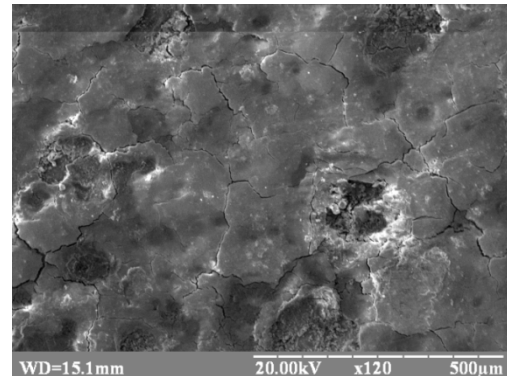


Рис. 5 – Текстура поверхні листа відпаленого зразка з ізоляцією: *a* – загальний вид; *б* – збільшене зображення ключової ділянки.

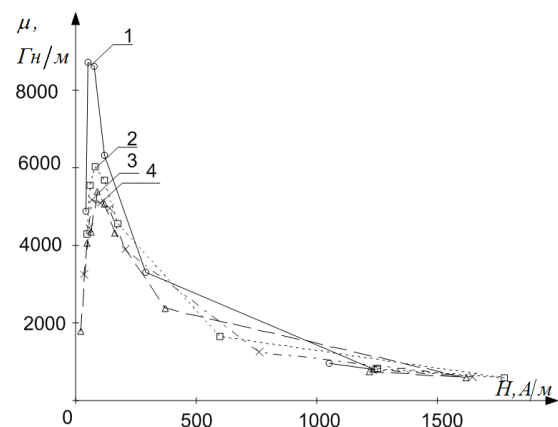


Рис. 6 – Залежність магнітної проникності від напруженості магнітного поля на різних частотах для зразка без ізоляції листів (1 – частота 100 Гц; 2 – частота 210 Гц; 3 – частота 265 Гц; 4 – частота 315 Гц)

Як видно з рис. 3, зазначеним умовам відповідає стрімке зростання втрат (до 20–30 разів для зубців та до 1,5–5 разів для ярма). Враховуючи у 3–5 разів більшу масу ярма порівняно із зубцями, результуючі втрати в осерді приймають значення, що на 20–50% перевищують зростання втрат у ярмі.

Як видно з рис. 5, основною причиною описаних

явищ для ЕТС є порушення ізоляції листів електротехнічної сталі, що полягає у її руйнуванні від теплових та механічних впливів. Для ЕТС без ізоляції (рис. 4) властивості сталі додатково погіршуються через оміднення поверхневих шарів металу під час відпалювання осердь, що додатково збільшує втрати на вихрові струми.

Узагальнюючи, слід відмітити, що зазначені зміни приводять до суттєвого збільшення робочого значення H напруженості, що обумовлює зростання намагнічувальної складової I_μ струму статора і втрат P_c у сталі та збільшення температури θ_c обмотки статора. У такий спосіб граничний стан шихтованого осердя може бути виражений через відносні значення B'_m , β_1 , β_2 шляхом обґрунтування нерациональності його використання через високий приріст I_μ і P_c .

Це дозволяє у перспективі одержати трьохфакторну модель надійності шихтованих осердь у вигляді

$$T = b_0 + b_1 \frac{B'_m}{B'_{mn}} + b_2 \frac{\beta_1}{\beta_{1n}} + b_3 \frac{\beta_2}{\beta_{2n}} + b_4 \frac{B'_m \beta_1}{B'_{mn} \beta_{1n}} + b_5 \frac{B'_m \beta_2}{B'_{mn} \beta_{2n}} + b_6 \frac{\beta_1 \beta_2}{\beta_{1n} \beta_{2n}} + b_7 \frac{B'_m \beta_1 \beta_2}{B'_{mn} \beta_{1n} \beta_{2n}}, \quad (14)$$

де B'_m , β_{1n} , β_{2n} – значення параметрів, що відповідають нормальному стану осердя.

Висновки. 1. Підтверджена необхідність врахування зміни властивостей ЕТС магнітних систем ЕМ залежно від терміну й інтенсивності їх експлуатації та кількості й умов проведених капітальних ремонтів.

2. Визначено параметри дослідних зразків шихтованих осердь, запропоновано та реалізовано програму їх експериментальних випробувань при дослідженні природнього старіння й впливу температурного відпалювання при видаленні обмотки у ході капітального ремонту.

3. Досліджено питання додаткового впливу вихрових струмів при видаленні міжлистової ізоляції ЕТС та доведено зв'язок їх реактивної дії з послабленням межового рівня магнітної індукції.

4. Отримані результати надають можливість оцінити межі зміни основних електричних та магнітних властивостей шихтованих осердь ЕМ при теплових та механічних впливах, що відповідають режимам їх експлуатації та ремонту.

5. У підсумку обґрунтовані тренди зміни властивостей дозволяють визначати межовий стан шихтованих осердь та прогнозувати час виходу з ладу ЕМ з причини незворотних змін у магнітній системі.

Список літератури:

1. Антонов М. В. Эксплуатация и ремонт электрических машин / М. В. Антонов, Н. А. Акимова, Н. Ф. Котеленец – М.: Высшая школа, – 1989. – 192 с.
2. Дружинин В. В. Магнитные свойства электротехнической стали / В. В. Дружинин, – М.: Энергия, – 1974. – 240 с.

3. ГОСТ 21427.2–83. Сталь электротехническая холоднокатаная изотропная тонколистовая. Технические условия. – М.: Изд-во стандартов, 1983. – 10 с.
4. Максимов М. Н. Обоснование необходимости пересмотра объемов послеремонтных испытаний АД / М. Н. Максимов, Д. И. Родькин – УкрИНТЭИ, – 1994 – 18 с.
5. Брайнин Э. И. Влияние обжига и гидротехнической обработки изоляции монолит на магнитные характеристики статора / Э. И. Брайнин, А. К. Сорочан // – Электротехника. – 1985. – № 2. – С. 64-67.
6. Прус В. В. Исследование электрических и магнитных свойств электротехнической стали после температурных воздействий / В. В. Прус, Д. И. Родькин // Научные труды Кременчугского государственного политехнического университета «Проблемы создания новых машин и технологий». – Кременчуг: КГПУ, 2000. – Вып. 2. – С. 228–234.
7. Прус В. В. Оценка эксплуатационных параметров отремонтированных асинхронных двигателей / В. В. Прус, О. Ф. Кирьянов, А. С. Гераскин // Вісник Кременчугського державного політехнічного університету: Наукові праці КДПУ. – 2002. – Вип. 1 (12). – С. 174–179.
8. Prus V. V. Grounds for Efficiency and Prospect of the Use of Instantaneous Power Components in Electric Systems Diagnostics / V. V. Prus, M. V. Zagirnyak, A. V. Nikitina // Przegląd Elektrotechniczny (Electrical Review). – 2006, № 12. – P. 123–125.
9. Zagirnyak M. Ways of efficiency improvement of local diagnostic of the cores of induction motor stators / M. Zagirnyak, A. Miroshnykova, V. Prus // Przegląd Elektrotechniczny (Electrical Review). – 2015, R. 91, № 1. – P. 217–220.
10. Счастливы Г. Г. Расчет нагрева и оценка потерь в крайних пакетах сердечника статора турбогенератора / Г. Г. Счастливый, Г. М. Федоренко, В. И. Выговский // Электротехника. – 1980. – № 7 – С. 42–46.
11. Данилевич Я. В. Электромагнитные и тепловые процессы в сердечнике статора турбогенератора при замыкании листов активной стали / Я. В. Данилевич, И. И. Елин, Э. В. Казарян, В. Б. Каплунов, И. Я. Черемисов // Электротехника – 1980 – № 4. – С. 50–53.
12. Копылов И. П. Проектирование электрических машин / И. П. Копылов – М.: Издательство Юрайт, 2011. – 767 с.
13. Петриков Л. В. Асинхронные электродвигатели: обмоточные данные, ремонт, модернизация: справочник / Л. В. Петриков, Г. Н. Корначенко – М.: Энергоатомиздат, 2000. – 496 с.
14. Мейзда Ф. Электронные измерительные приборы и методы измерений / Ф. Мейзда – М.: Мир, 1990. – 535 с.
15. Преображенский А. А. Магнитные материалы и элементы / А. А. Преображенский, Е. Г. Бишард – М.: Высшая школа, 1986. – 352 с.

References (transliterated):

1. Antonov M. V., Akimova N. A., Kotelenets N. F. *Ekspluatatsiya i remont elektricheskikh mashin* [Operation and repair of electric machines]. M, Vysshaya shkola, 1989. 192 p.
2. Druzhinin V. V. *Magnitnyye svoystva elektrotehnicheskoy stali* [Magnetic properties of electric steel]. M, Energiya, 1974. 240 p.
3. GOST 21427.2–83. *Stal elektrotehnicheskaya holdnokatanaya izotropnaya tonkolistovaya. Tehnicheskie usloviya*. [State Standard 21427.2-83. Electric cold-rolled isotropic light-gage steel. Specification.] M, Izd-vo standartov, 1983. 27 p.
4. Maksimov M. N., Rodkin D. I. *Obosnovanie neobhodimosti persmotra ob'emov posleremontnykh ispytaniy AD* [Substantiation of the necessity for revision of the amount of IM post-repair test]. UkrINTEI, 1994. 18 p.
5. Braynin E. I., Sorochan A. K. *Vliyanie obzhiga i gidroliticheskoy obrabotki izolyatsii monolit na magnitnyye harakteristiki statora* [Influence of annealing and monolith insulation hydrolytic processing on the stator magnetic characteristics]. *Elektrotehnika*. 1985. no.2. pp. 64-67.
6. Prus V. V., Rodkin D. I. *Issledovanie elektricheskikh i magnitnykh svoystv elektrotehnicheskoy stali posle temperaturnykh vozddeystviy*. [Research of electric steel electric and magnetic properties after thermal impacts]. *Nauchnyye trudy Kremenchugskogo gosudarstvennogo politehnicheskogo universiteta "Problemyi sozdaniya novykh mashin i tehnologiy"* [Scientific proceedings of the Kremenchug state Polytechnical University "Problems of

- creating new machines and technologies"]. Kremenchug, KGPU, 2000. no. 2. pp. 228–234.
7. Prus V. V., Kiryanov O. F., Geraskin A. S. Otsenka ekspluatatsionnykh parametrov otre-montirovannykh asinhronnykh dvigateley [Assessment of operation parameters of repaired induction motors]. *Visnik Kremenchut'skogo derzhavnogo politehnichnogo universitetu: Naukoviy pratsi KDPU* [Bulletin of the Kremenchug state Polytechnical University: Scientific works of KSPU]. Kremenchuk, KDPU, 2001. no. 1 (12). pp. 174–179.
 8. Zagirnyak M. V., Prus V. V., Nikitina A. V. Grounds for Efficiency and Prospect of the Use of In-stantaneous Power Components in Electric Systems Diagnostics. *Przeglad Elektrotechniczny (Electrical Review)*. 2006, no. 12. pp. 123–125.
 9. Zagirnyak M., Prus V., Miroshnykova A. Ways of efficiency improvement of local diagnostic of the cores of induction motor. *Przeglad Elektrotechniczny (Electrical Review)*. 2015, R. 91, no. 1. pp. 217–220.
 10. Schastlivyy G. G., Fedorenko G. M., Vyigovskiy V. I. Raschet nagreva i otsenka poter v kraynih paketah serdecznika statora turbogeneratora [Calculation of heat and assessment of losses in the end stacks of turbogenerator stator core]. *Elektrotehnika*. 1980. no. 7. pp. 42–46.
 11. Danilevich Ya. V., Elin I. I., Kazaryan E. V., Kaplunov V. B., Cheremisov I. Ya. Elektromagnitnyye i teplovyye protsessy v serdecznike statora turbogeneratora pri zamykanii listov aktivnoy stali [Electromagnetic and thermal processes in a turbogenerator stator core at shorting of active steel sheets]. *Elektrotehnika*. 1980. no. 4. pp. 50–53.
 12. Kopylov I. P. *Proektirovanie elektricheskikh mashin* [Electric machine design]. M, Izdatelstvo Yurayt, 2011. P. 767.
 13. Petrikov L. V., Kornachenko G. N. *Asinhronnyye elektrodvigateli: obmotochnyye dannyye, remont, modernizatsiya: spravochnik* [Induction motors: winding data, repair, modernization: reference book]. M, Energoatomizdat, 2000. P.496.
 14. Meyzda F. *Elektronnyye izmeritelnyye pribory i metody izmereniy* [Electronic measuring devices and methods of measurement]. M, Mir, 1990. P. 535.
 15. Preobrazhenskiy A. A., Bishard E. G. *Magnitnyye materialy i elementy* [Magnetic materials and elements]. M, Vysshaya shkola, 1986. P. 352.

Надійшла (received) 15.09.2016

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Обоснование влияния процесса старения на электрические и магнитные свойства шихтованных сердечников электрических машин / В. В. Прус, О. О. Сьомка, С. Е. Дзеніс // Вісник НТУ «ХПІ». Тематичний випуск «Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії». – Х. : НТУ «ХПІ», 2016. – № 11 (1183). – С. 115–122. – Бібліогр.: 15 назв. – ISSN 2409-9295.

Обоснование влияния процесса старения на электрические и магнитные свойства шихтованных сердечников электрических машин / В. В. Прус, О. О. Сьомка, С. Е. Дзеніс // Вісник НТУ «ХПІ». Тематичний випуск «Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії». – Х. : НТУ «ХПІ», 2016. – № 11 (1183). – С. 115–122. – Библиогр.: 15 назв. – ISSN 2409-9295.

Substantiation of aging process influence on electric and magnetic properties of laminated cores of electric machines / V. V. Prus, O. O. Somka, S. E. Dzenis // Bulletin of NTU "KhPI". Thematic edition "Electric machines and electromechanical energy conversion". – Kharkiv : NTU "KhPI", 2016. – № 11 (1183). – P. 115–122. – Bibliogr. 15. – ISSN 2409-9295.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Прус В'ячеслав В'ячеславович, кандидат технічних наук, доцент, Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, доцент кафедри електричних машин та апаратів, +38 (067) 572-70-94; e-mail: viacheslav.prus@gmail.com

Прус Вячеслав Вячеславович, кандидат технических наук, доцент, Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского, доцент кафедры электрических машин и аппаратов, +38 (067) 572-70-94; e-mail: viacheslav.prus@gmail.com

Prus Viacheslav Viacheslavovich, Candidate of Engineering Science Associate Professor, Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskiy National University, Associate Professor at the Department of Electric Machines and Devices, +38 (067) 572-70-94; e-mail: viacheslav.prus@gmail.com

Сьомка Александр Александрович, Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградського, ассистент кафедры электрических машин и аппаратов, +38 (096) 436-74-00; e-mail: oleksandrsmk@gmail.com

Сьомка Олександр Олександрович, Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, асистент кафедри електричних машин та апаратів, +38 (096) 436-74-00; e-mail: oleksandrsmk@gmail.com

Somka Oleksandr Oleksandrovych, Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskiy National University, Lecturer at the Department of Electric Machines and Devices, +38 (096) 436-74-00; e-mail: oleksandrsmk@gmail.com

Дзеніс Сергій Євгенович, начальник Спеціального конструкторського бюро ПАТ «Електромашина», м. Харків, тел. (057)373-75-30, +380506328429, e-mail: s_dzenis@rambler.ru

Дзеніс Сергей Евгеньевич, начальник Специального конструкторского бюро ПАО «Электромашина», г. Харьков, тел. (057)373-75-30, +380506328429, e-mail: s_dzenis@rambler.ru

Dzenis Sergii Evgenovych, Chief of the Special design Bureau of Public Company "Electromashina", Kharkiv, (057) 373-75-30, +380506328429, e-mail: s_dzenis@rambler.ru