

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ПОЛІСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

Факультет інженерії та енергетики
Кафедра електрифікації, автоматизації
виробництва та інженерної екології
Кваліфікаційна робота
на правах рукопису

Артемчук Олександр Олександрович

УДК 620.93

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

**Підвищення якості ізоляції асинхронних двигунів сільськогосподарських
електроприводів за рахунок краплинного просочення обмоток при ремонті**

141 “Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка”
(шифр і назва спеціальності)

Подається на здобуття освітнього ступеня магістр кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

(підпис, ініціали та прізвище здобувача вищої освіти)

Керівник роботи
Савченко Л.Г.
к.і.н., доцент

Житомир – 2021

АНОТАЦІЯ

Артемчук Олександр Олександрович. Підвищення якості ізоляції асинхронних двигунів сільськогосподарських електроприводів за рахунок краплинного просочення обмоток при ремонті. – Кваліфікаційна робота на правах рукопису.

Кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня магістра за спеціальністю 141 “Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка”. – Поліський національний університет, Житомир, 2021.

В магістерській роботі встановлено, що за критерієм продуктивності просочення краплинний спосіб має область ефективного застосування. Розроблено експериментальну установку для вивчення просочення обмоток асинхронних двигунів. Вона дозволяє проводити просочення зануренням і краплинним способом обмоток асинхронних двигунів, що ремонтуються на малих сільськогосподарських ремонтних підприємствах і точно контролювати режим та якість просочення.

Експериментальні дослідження показників якості просочення дозволили встановити, що краплинне просочення покращує результати просочення зануренням: вологостійкість вища в 1,7 рази, електрична міцність у 1,8 рази, цементуюча здатність у 1,2 рази. При цьому ці показники більш стабільні, оскільки коефіцієнти варіації при краплинному просоченні в 1,2-1,8 разів нижче. За критерієм витрати лаку краплинне просочення економніше просочення зануренням майже в 4 рази.

Ключові слова: асинхронний двигун, обмотка, краплинне просочування, вологостійкість, міцність.

ANNOTATION

Artemchuk Alexander Alexandrovich. Improving the quality of insulation of asynchronous motors of agricultural electric drives due to drip impregnation of windings during repair. – Qualification work on the rights of the manuscript.

Qualification work for a master's degree in the specialty 141 "Power Engineering, Electrical Engineering and Electromechanics". - Polissya National University, Zhytomyr, 2021.

In the master's thesis it is established that according to the criterion of impregnation productivity the drip method has an area of effective application. An experimental setup for studying the impregnation of windings of induction motors has been developed. It allows impregnation by immersion and drip winding of induction motors repaired at small agricultural repair plants and accurately control the mode and quality of impregnation.

Experimental studies of impregnation quality indicators have shown that drip impregnation improves the results of immersion impregnation: moisture resistance is 1.7 times higher, electrical strength is 1.8 times, cementing capacity is 1.2 times. At the same time, these indicators are more stable, because the coefficients of variation in drip impregnation are 1.2-1.8 times lower. According to the criterion of varnish consumption, drip impregnation is more economical than immersion by immersion by almost 4 times.

Keywords: induction motor, winding, drip impregnation, moisture resistance, strength.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	5
РОЗДІЛ 1. РОЛЬ ПРОСОЧЕННЯ ІЗОЛЯЦІЇ АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ У ПІДВИЩЕННІ ЇХ НАДІЙНОСТІ.....	8
РОЗДІЛ 2. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	19
РОЗДІЛ 3. РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	26
ВИСНОВКИ.....	34
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	35

ВСТУП

Підйом сільськогосподарського виробництва, що намітився, підвищує вимоги до ефективності електрифікованого обладнання. Його основу становить асинхронні двигуни (АД). Вихід з ладу електродвигуна призводить не тільки до витрат на його відновлення, але й до порушення виробничих процесів та технологічних збитків, що у багато разів перевищує вартість самого АД [1-10]. Відомо велику кількість робіт, спрямовану на скорочення відмов роботи електрообладнання.

Серед відмов АД досі велика частка (20%) посідають відмови через зволоження ізоляції [8-14]. Тому ведеться пошук засобів посилення вологостійкості ізоляції. Для цих цілей застосовують: підігрів обмоток, капсулювання лобових частин, винесення артеріального тиску в окремі приміщення і т.д. Більш широко пошук йде у вдосконаленні способів просочення ізоляції. Тут досягнуто позитивних результатів при використанні крапельно-струминного способу просочення і просочення з вакуумуванням. Такі установки відрізняються величезними габаритами, енерговитратами. Тому вони знаходять застосування на великих машинобудівних заводах. Спосіб краплинного просочення має ряд переваг по вологостійкості і є перспективним в електромашинобудуванні. Доцільним є його поширення і на електроремонтні підприємства. Проте, нині великі електроремонтні підприємства, які б застосовувати дороге устаткування з електротехнічної промисловості припинили свою діяльність.

Головною причиною, що стримує застосування прогресивного краплинного методу у виробництві служить відсутність доступного за вартістю та габаритами просочувального обладнання. Отже, виникло важливе науково-технічне завдання — розробити та визначити параметри установки для краплинного просочування.

Мета і задачі дослідження. Мета роботи є полягала у підвищенні якості просочення за рахунок застосування пристрою краплинного просочення на сільськогосподарських електроремонтних підприємствах, а також обґрунтування параметрів та режимів роботи пристрою краплинного просочення обмоток.

Відповідно до поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

- аналіз існуючих способів просочення;
- розробити методику та обґрунтувати об'єкт дослідження;
- виготовити експериментальну установку та провести лабораторні та виробничі випробування.

Об'єкт дослідження: обмотки асинхронних двигунів сільськогосподарських електроприводів

Предмет дослідження: вплив краплинного просочення асинхронних двигунів на якість ізоляції його обмоток сільськогосподарських електроприводів.

Методи дослідження. У роботі був використаний ряд конкретних методів: класифікації, статистичного спостереження, порівняльного і факторного аналізу та ін. Основою бази дослідження прийнято фізико-хімічні процеси просочення. В експериментальних дослідженнях використовувалися сучасні засоби вимірювальної техніки.

Перелік публікацій за темою роботи:

1. Савченко Л.Г., Макачук П.М., **Артемчук О.О.** Горпиняк М.В. Ковальов Б.В. Комплексне забезпечення надійності і якості електропостачання у сільських розподільних мережах. Збірник тез *VII-ї* всеукраїнської науково-практичної конференції «*Перспективи і тенденції розвитку конструкцій та технічного сервісу сільськогосподарських машин і знарядь*» 31 березня 2021 року. Житомир : ЖАТК. С. 164-166.

2. Савченко Л.Г., **Артемчук О.О.** Горпиняк М.В. Генераторна установка як елемент системи електропостачання сільськогосподарських машин.

Інноваційні технології в АПК: збірник тез доповідей VIII всеукраїнської науково-практичної конференції, 20-21 травня 2021 р., м. Луцьк [Електронний ресурс]. Луцьк: Луцький НТУ, 2021. С. 107-109.

3. Савченко Л.Г., Макарчук П.М., **Артемчук О.О.** Горпиняк М.В. Ковальов Б.В. Особливості несиметричних та неповнофазних режимів . IV Всеукраїнська науково-практична інтернет конференція «Сучасні технології в енергетиці, електромеханіці, системах управління та машинобудуванні» (Бахмут 25-26 листопада 2021 р.), Бахмут :ННПП «УПА». С. 64-65

Практичне значення одержаних результатів. Розроблено пристосування для краплинного просочення обмоток асинхронних двигунів для малих сільськогосподарських електроремонтних підприємств, обґрунтовано його параметри та режими робо

Структура та обсяг роботи. Кваліфікаційна робота складається з вступу, трьох розділів, висновків, списку використаних джерел з 16 найменувань. Загальний обсяг роботи становить 36 сторінок комп'ютерного тексту, містить 1 таблицю і 15 рисунків.

РОЗДІЛ 1

РОЛЬ ПРОСОЧЕННЯ ІЗОЛЯЦІЇ АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ У ПІДВИЩЕННІ ЇХ НАДІЙНОСТІ

Дослідження показали, що найслабший елемент асинхронного електродвигуна – обмотка, на долю якої припадає понад 80% відмов від їхньої загальної кількості.

Надійність обмоток залежить стану ізоляції. У процесі експлуатації електричних машин, а також їх зберігання та транспортування вона піддається різноманітним зовнішнім впливам, що призводить до погіршення її властивостей [1-12].

Основною характеристикою ізоляції, що визначає надійність роботи електричної машини, є електрична міцність. Однак цю властивість ізоляція може зберегти в процесі експлуатації лише за наявності багатьох інших якостей, зниження рівня яких призводить до зменшення електричної міцності. Так ізоляція повинна зберігати високу теплопровідність, інакше неминуче виникнення підвищених місцевих нагрівань, що супроводжуються прискореним її руйнуванням.

Ізоляція повинна мати достатню механічну міцність і еластичність, які виключили б можливість утворення залишкової деформації тріщин, розшарування її під дією механічних зусиль.

Ізоляція повинна зберігати стабільний хімічний склад, оскільки його зміна призводить до зниження міцності електричної ізоляції. Необхідною умовою збереження електричної міцності є стійка структура ізоляції, так як лише однорідна і монолітна структура може мати високу теплопровідність, достатню вологостійкість і здатність довго працювати в електричних полях високої напруженості. Залежно від конкретних умов роботи до ізоляції можуть бути додаткові вимоги (хімостійкість, морозостійкість і т.д.) [4, 7].

Руйнування ізоляції відбувається в результаті нагрівання, механічних зусиль, впливу вологи та агресивних середовищ та інших факторів. Поступове руйнування ізоляції зазвичай завершується пробоем – явищем, що свідчить про значне зниження міцності електричної ізоляції [8, 12].

Одним з найважливіших факторів старіння та зносу ізоляції є механічні та термомеханічні навантаження. До перших відносять статичний тиск на ізоляцію, згинальні та скручувальні зусилля, удари та вібрація. Термомеханічними називаються навантаження, що виникають у результаті періодичних нагрівів та охолоджень обмотки.

Ізоляція пазової частини обмотки може відчувати тиск під дією електродинамічних сил, а за наявності зазорів в пазу вона також схильна до ударів і стирання об стінки паза. При згинанні лобових частин обмотки найбільші напруження виникають у місцях виходу стрижнів або котушок з пазів, де ізоляція відчуває напругу стиснення та розтягування.

Крім того, вона змінюється на прокладках та в місцях зіткнення з бандажами [4, 7].

Сучасні сорти ізоляції мають достатню стійкість по відношенню до статичних навантажень. Проте досвід показує, що навіть за порівняно невеликих деформаціях має місце значне зниження пробивної напруги, що відбувається залежно від величини деформації приблизно за лінійним законом [4, 8]. Для кожної температури існує певна межа деформації, за якою зняття навантаження не призводить до відновлення початкових діелектричних властивостей. Слід зазначити, що навіть у тих випадках, коли статичні навантаження не призводять до очевидних змін структури ізоляції, вони все ж таки сприяють її старінню.

Більш істотний вплив на процес руйнування ізоляції мають циклічні знакозмінні навантаження, що виникають під дією вібрацій різного походження. Нова ізоляція, міцна і еластична, мало схильна до вібраційного старіння, особливо при підвищених температурах, коли просочувальний склад

має високу пластичність. У міру старіння ізоляції руйнівна дія вібрації прогресує.

Цьому сприяє поступове ослаблення кріплення обмотки як у пазових, так і в лобових частинах. У роботі [5] наводяться результати дослідів, метою яких було з'ясування впливу різних факторів на довговічність ізоляції. З цих дослідів видно, що вібрація скорочує термін служби виткової ізоляції у кілька разів.

Важливим фактором старіння ізоляції є вплив вологи та хімічно активних середовищ. Волога проникає в ізоляцію машини, коли вона перебуває у неробочому стані. Особливо інтенсивно цей процес йде під час остигання машини після її роботи, тому що в цей період тиск у порах та капілярах ізоляції дещо нижчий за атмосферний. Мала в'язкість та інші властивості води зумовлюють її високу здатність проникати у найменші пори. Просочення обмоток зменшує швидкість поглинання вологи ізоляцією електричної машини, що підвищує її надійність.

Отже, основною причиною виходу з ладу ізоляції асинхронних двигунів у процесі експлуатації є зниження її пробивної напруги через зволоження, теплове старіння або механічне зношування.

Надійність ізоляції визначається не тільки властивостями самих електроізоляційних матеріалів, а й якістю просочення, що може значно уповільнити процеси теплового старіння та зволоження електроізоляційних матеріалів внаслідок зменшення площі їх дотику з навколишнім середовищем.

Просочення обмоток електричних машин має такі основні цілі [8,10]:

- підвищення нагрівостійкості;
- поліпшення теплопровідності;
- підвищення вологостійкості;
- підвищення електричної міцності;
- підвищення механічної міцності;
- підвищення хімічної стійкості.

Існують різні способи введення просочувального складу в обмотки електродвигуна. Вибір способу обумовлюється конструктивними особливостями просочених виробів, застосовуваним просочним складом, характером виробництва виробів [10].

Поширеним способом просочення є занурення вузлів, що несуть обмотку, у ванну з просочувальною сумішшю. Просочення зануренням представлено такими способами: холодне занурення, гаряче занурення, гаряче занурення з інтенсифікацією ультразвуковими коливаннями, вакуумне просочення.

При просоченні зануренням проникнення лаку в обмотку відбувається за рахунок капілярних сил та тиску, який здійснюється вагою лаку.

Краще, якщо перед зануренням обмотка нагріта до температури 60...70°C (гаряче занурення); при вищій температурі відбувається швидке випаровування органічних розчинників.

Спосіб просочення холодним зануренням можливий при застосуванні водоемульсійних лаків, вода в яких змішується з вологою обмотки. При подальшому сушінні вода і волога видаляються з обмотки. При холодному зануренні потрібно більш тривалий час витримки обмотки в лаку, але загальна тривалість процесу просочення і сушіння фактично знижується за рахунок скасування попереднього сушіння.

Число просочень вибирається, перш за все, виходячи з умов експлуатації обмоток. Якщо електрична машина працює в умовах підвищеної вологості і в процесі експлуатації обмотка піддається значним механічним навантаженням, насичення обмотки лаком має бути максимальним, що досягається в залежності від типу лаків різним числом просочення.

Кількість просочення (наповненість) лаком залежить також від застосованих ізоляційних матеріалів.

Оптимальне число просочення більшою мірою залежить від конструкції обмоток. Зокрема, чим більший коефіцієнт заповнення паза, тим при меншій

кількості просочування досягається оптимальне заповнення порожнеч просочувальною сумішшю.

Заповнення пор і порожнеч в ізоляції обмоток відбувається в основному при першому просоченні, а наступні просочення фактично є покрівельними.

Слід враховувати, що для невологих обмоток опір ізоляції в холодному і нагрітому станах у міру збільшення числа просочень знижується, тому що лак має нижчий опір ізоляції, ніж витіснене ним повітря, проте електроізоляційні характеристики ізоляції обмоток і в першу чергу вологостійкість зростають.

Останнім часом деякі підприємства виробляють просочення зануренням з інтенсифікацією ультразвуковими коливаннями. На думку Барембо К.М., Бернштейна Л.М. [8], цей спосіб просочення навряд чи знайде широке застосування. Так як результати дослідження ефективності застосування ультразвукових коливань для просочення вузлів із всипною обмоткою на макетах пазів дала наступні результати. Просочення проводилося в лаку МЛ-92 з різним вмістом нелетких складових. При дії на лак ультразвукових коливань відбувалося значне розігрівання і велике зростання в'язкості. За 20 хвилин дії УЗК – температура лаку підвищується на 75 ° С, а за 10 хвилин дії – в'язкість зростає вдвічі [8].

Порівняльні випробування макетів пазів не показали переваги ультразвукового просочення [8]. Прирости лаку і пробивні напруги при просоченні зануренням і ультразвуковій просочення виходять одного порядку. При цьому ультразвукове просочення вимагає відносно складного обладнання, не дає якісного ефекту і практично не скорочує цикл просочення і сушіння, який в основному визначається тривалістю процесу сушіння.

Вакуумне просочення, просочування під тиском і комбіноване просочення ефективні тільки для багатовиткових катушок, де методом занурення не можна досить глибоко просочити обмотування лаком.

При вакуумуванні відбувається глибоке видалення вологи та повітря з пор та капілярів, що полегшує проникнення просочувального лаку в обмотку.

Якщо до лаку, засмоктаному в обмотку під вакуумом прикласти підвищений тиск, то просочення відбудеться ще швидше і глибше.

На ряді заводів після просочення обмоток під вакуумом та тиском у котел подається вакуум для відсмоктування надлишків лаку. При цьому обмотка, станина та магнітопровід машини виявляються чистими та не вимагають замивання розчинниками. Однак широко рекомендувати вакуумування обмотки після просочення не можна, так як при цьому лак може відсмоктуватися не тільки з металічних поверхонь, але і з поверхні та з глибини ізоляції обмотки. Випробування показали, що при цьому вологостійкість ізоляції виявляється нижчою, ніж при просоченні зануренням у ті ж лаки [8].

Перевагою способу просочення зануренням є універсальність технологічного обладнання, на якому можуть одночасно проводитися просочення та термообробка обмоток електричних машин різних типорозмірів. До недоліків відносяться тривалість процесу просочення і пов'язана з нею необхідність у великих виробничих площах, підвищеній витраті електроенергії, а також застосування ручних робіт із змивання та зачистки поверхні електричних машин від залишків просочувального складу.

У лаках із розчинниками вміст основи не перевищує 50-55 %. Після просочення і сушіння в ній залишається не більше 39-40% смоли, тому що в процесі сушіння, крім випаровування розчинника, відбувається часткове витікання смоли з обмотки. Внаслідок цього при використанні просочувальних складів з розчинниками зазвичай застосовують дворазове, а іноді і трикратне просочення. Тривалість просочення і сушіння в такому випадку становить 20-50 годин в залежності від габаритів виробів, що просочуються, це призводить до необхідності виділення для просочувальних ділянок відносно великих виробничих площ при значних витратах електроенергії на нагрівання сушильних печей [7, 10]. Цим визначається загальна тенденція до вдосконалення процесу просочування і сушіння обмоток лаками з розчинниками шляхом скорочення кількості просочення, для чого

пропонуються способи утримання в обмотці можливо більшої кількості основи лаку після одноразового просочення.

Іншим способом просочення обмоток електричних машин є крапельне просочення. Крапельне просочення – це дозована подача просочувального складу на розігріту лобову частину статора обмотки, що забезпечує максимальне заповнення міжвиткового простору за рахунок дії капілярних сил.

До основних переваг краплинного методу відносяться:

- значне скорочення тривалості процесу просочення та термообробки обмоток;
- відсутність необхідності в зачистці поверхонь пакетів від напливів просочувального складу;
- дуже малі витрати просочувальної суміші;
- хороше заповнення обмотки смолою при одноразовому просоченні;
- хороша цементация витків обмотки;
- не вимагає великі виробничі площі;
- зниження трудомісткості процесу просочення та термообробки;
- зниження витрати електроенергії; -
- не велике виділення летких складових суміші.

При краплинному методі просочення просочувальна суміш подається в обмотку тонким струменем через лобову частину. Для кращого проникнення просочення обмотка повинна бути нагріта до 60-80 °С.

Попадаючи на лобову частину обмотки просочувальний склад проникає між провідниками в пазу, а потім розташовану з протилежного боку, по відношенню до місця його подачі, лобову частину. Просочувальний склад проникає в обмотку під дією гравітаційних і капілярних сил.

Існують три основні способи введення просочувальної суміші в обмотку статора через лобову частину (рис. 1.1 а, б, в). Перший спосіб використовується при вертикальному положенні статора (рис. 1.1. а). Склад подається на верхню лобову частину через сопла. Сопло обертається і просочувальний склад

рівномірно просочує верхню лобову частину, а потім через пази проникає в нижню лобову частину. Іноді сопла роблять нерухомими, тоді обертається статор. У процесі просочення і після закінчення обмотка нагрівається. Потрапляючи на нагріту лобову частину, просочувальний склад розріджується, через що збільшується його просочувальна здатність. При просоченні статора у вертикальному положенні проникнення складу в обмотку багато в чому залежить від гравітаційних сил.

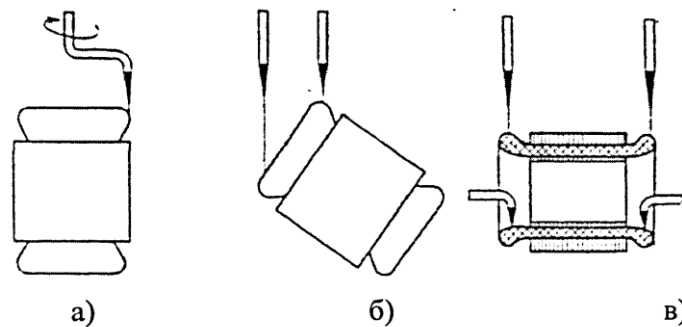


Рис. 1.1. Способи подачі просочувального складу в обмотку при краплинному методі просочення залежно від положення статора: а – вертикального; б – похилого; в – горизонтального

У міру нагрівання обмотки відбувається желатинізація просочувального складу. Цей процес починається в нижній лобовій частині, яка менше ніж верхня охолоджується. Потім він поширюється на пазову та верхню лобову частину обмотки. Після цього відбувається затвердіння складу.

Недоліком даного способу є нерівномірний розподіл просочувального складу: у верхній лобовій частині смоли менше ніж в нижній.

Щоб досягти рівномірного заповнення обмотки в той момент, коли в нижній частині почався процес желатинізації складу, проводять повторний полив верхньої лобової частини. Однак і в цьому випадку не вдається досягти рівномірного наповнення обмотки. Крім того, для забезпечення достатнього заповнення обмотки доводиться подавати надмірну кількість просочувальної суміші, що призводить до заливання отвору і зовнішньої поверхні пакета, а отже і до необхідності зачистки цих поверхонь.

Другий спосіб подачі просочувального лаку в обмотку – при похилому положенні виробу (рис. 1.1 б) – найбільш поширений. Суміш подається через верхню лобову частину обмотки, під дією гравітаційних та капілярних сил проникає у пази між провідниками, а потім у нижню лобову частину. Просочений сердечник статора при цьому обертається, що перешкоджає стіканню суміші. Після закінчення просочення сердечник приймає горизонтальне положення і продовжує обертатися до повного затвердіння просочення. Просочена суміш рівномірно розподіляється в обмотці і при правильній його подачі і дозуванні не заливає поверхні сердечника.

Третій спосіб – просочення при горизонтальному розташуванні сердечника (рис. 1.1. в) – застосовується рідше. При використанні даного способу основний вплив на процес просочення мають капілярні сили.

Отже, для хорошого проникнення складу необхідно, щоб вони були досить великі. Як і в двох попередніх випадках, виріб при просоченні обертається. Просочувальна суміш подається одночасно на обидві лобові частини.

При краплинному методі просочення перед подачею просочувальної суміші в обмотку проводиться його дозування. При надлишку просочувальної суміші відбувається витікання його з обмотки, що призводить до великих втрат суміші та забруднення обладнання. Крім того, суміш не встигає проникати в обмотку та заливає внутрішню та зовнішню поверхні пакета. При нестачі суміші обмотка просочується не повністю, що знижує її довговічність.

У практиці відомі два способи дозування суміші: за часом його закінчення та за обсягом.

При дозуванні за часом просочувальний склад подається до системи розподілу під постійним тиском, а швидкість його закінчення регулюється шляхом підбору діаметра сопла. Така система конструктивно простіше, ніж система дозування за об'ємом, але має недолік – при зміні в'язкості суміші швидкість його закінчення, а значить і кількість змінюватись у широких межах.

Отже, її доцільно застосовувати в тих випадках, коли в'язкість суміші в межах можливих коливань його температури залишається практично постійною. Якщо ця умова не дотримується, то в дозувальному пристрої передбачається система підігріву, що забезпечує підтримання постійної температури суміші. Обов'язковою є постійна в'язкість просочувальної суміші, як у стані поставки, так і при гарантованому часі зберігання.

При дозуванні за об'ємом кількість просочувальної суміші, яка подається в обмотку протягом заданого часу, не залежить від в'язкості.

Найчастіше дозування здійснюється дозаторами плунжерного типу.

Вказаний час подачі складу контролюється автоматично. Залежно від виду просочувальної суміші просочення здійснюється по-різному. Однокомпонентна суміш заливається в бак дозатора із заздалегідь введеним ініціатором і після дозування подається безпосередньо в обмотку. Для двокомпонентного складу потрібні два дозатори та змішувач. Обидва компоненти дозуються у певному співвідношенні за обсягом, після їх змішування склад надходить в обмотку.

Обмотки, які просочені швидкозатверділими при нагріванні сумішами без розчинників, піддаються термообробці. При краплинному просоченні найпоширенішим способом нагрівання обмоток є нагрівання струмом, рідше застосовується індукційне та терморадіаційне нагрівання.

Нагрів струмом найбільш економічний, тому що виділення теплоти відбувається в самій обмотці. Температура нагріву в окремих частинах сердечника статора в процесі струмового нагріву розподіляється наступним чином: найбільш високих значень досягає температура лобових частин, нижче – температура пазової частини і сердечника, якому обмотка інтенсивно віддає теплоту в процесі нагрівання.

Висновки по розділу

Серед відмов асинхронних двигунів досі велика частка (20%) припадає на зволоження ізоляції. Тому ведеться широкий пошук способів посилення вологостійкості ізоляції. Для цих цілей застосовують: підігрів обмоток, капсулювання лобових частин, винос асинхронних двигунів в окремі приміщення і т.д. Більш широко пошук йде по вдосконаленню способів просочення ізоляції. Тут досягнуто позитивних результатів при використанні крапельноструминного способу просочення і просочення з вакуумуванням. Такі установки відрізняються величезними габаритами, енерговитратами. Тому вони знаходять застосування на великих машинобудівних заводах. Спосіб краплинного просочення має ряд переваг по вологостійкості і є перспективним в електромашинобудуванні.

РОЗДІЛ 2

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ

Якість просочення обмоток асинхронних двигунів залежить від вибору просочувальної суміші та способу просочення. Виявити істинність попередніх теоретичних досліджень та розрахунків можна лише експериментальним шляхом. Звичайно, існує ще й економічна оцінка ефективності прийнятих рішень, але вона говорить лише про рентабельність прийнятого рішення. Експериментальне дослідження дозволить визначити правильність теоретичних рішень, оцінити прийняті рішення з погляду основних вимог до процесу просочення ізоляції АД.

Найбільш ефективним з точки зору достовірності отриманих результатів є статистичні дані, отримані за максимально великий термін з великою кількістю дослідних об'єктів за різноманітних умов зняття даних. Але, на жаль, останнім часом масштабні статистичні дослідження проводилися лише у сфері економіки та ринку, а галузі сільського господарства лише у вигляді критики існуючого становища.

З погляду умов проведення експерименту, дослідження способів просочення можливе як у промислових так і в лабораторних умовах. Лабораторні експерименти дозволяють досліджувати об'єкт всебічно, виявляючи найтонші його властивості у межах завдань експерименту.

Як об'єкт дослідження було прийнято модельні зразки секцій обмоток статора асинхронного двигуна 4АА63В2УЗ ($P_n = 0,55$ кВт, $U_H = 220/380$ В, $n_n = 3000$ об/хв, IP4).

Традиційно основним способом просочення є просочення зануренням. Дослідження, викладені у розділі 1, показали, що цей спосіб має низку недоліків. Позитивні результати очікуються при застосуванні краплинного способу просочення.

Для перевірки цих пропозицій у програму експериментальних досліджень входить: дослідження зміни опору від часу зволоження сек до просочення; дослідження зміни опору від часу сушіння до просочування; просочування двома способами: зануренням та краплинним; вимір опору ізоляції; дослідження зміни опору від часу зволоження секцій після просочення; вивчення зміни опору від часу сушіння після просочення; вивчення електричної міцності ізоляції; вивчення цементуючої здатності.

Відомості про способи дослідження, кількість дослідів та приладів для вимірювання наведено у наступних пунктах.

В лабораторних умовах була створена експериментальна установка, яка складається із зразків секцій обмотки, просочувальної ванни, установки краплинного просочення та комплексу вимірювальних приладів.

Склад приладів та обладнання дозволяє моделювати різні способи просочення, сушіння, вимірювати необхідні параметри. Клас точності всіх використовуваних приладів знаходиться в межах від 0,5 до 3,0, що дозволяє отримати точні достовірні відомості про параметри, що вимірюються.

Схема пристрою краплинного просочення наведено на рис. 2.1. принципова електрична схема експериментальної установки наведена на рис 2.2. Лабораторна експериментальна установка складається з камери вологості, ванни для просочення зануренням, установка для краплинного просочення, сушильного шафи, установки для випробування підвищеною напругою.

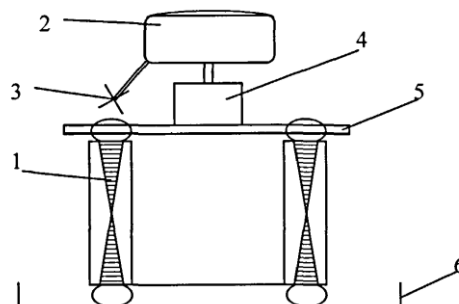


Рис. 2.1. Схема пристрою краплинного просочування ізоляції обмотки АД:
1 – статор АД, 2 – емність з лаком, 3 – капельниці, 4 – мікродвигун, 5 – опори, 6 – піддон

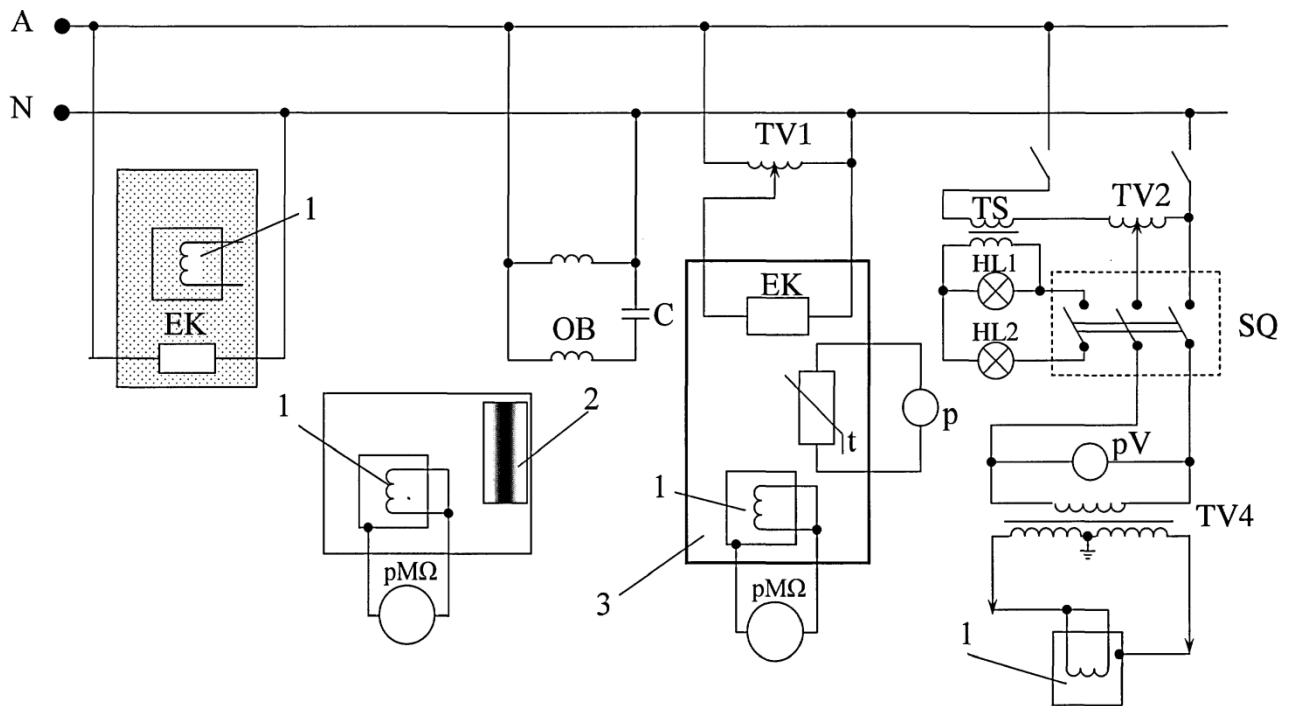


Рис. 2.2. Принципова електрична схема експериментальної установки: 1 – експериментальна секція обмотки; 2 – психрометр; 3 – сушильна шафа.

Експериментальна установка складається з п'яти блоків: просочування зануренням, установка краплинного просочення, блок зволоження, блок сушіння, установка для випробування електричної міцності ізоляції на базі АИМ-ТИ-60.

Блок просочення зануренням представлений ванною для просочення обмоток АД.

Пристрій краплинного просочення (ПКП) складається зі статора АД (1), ємності з лаком (2), крапельниці (3), мікродвигуна (4) та опори (5), а також піддону (6). Робочий процес ПКП полягає у наступному. За допомогою крана крапельниці (3) встановлюється потрібна подача лаку. Потім вмикається мікродвигун (4). Місткість з крапельницею починає обертання з частотою 3-8 об/хв. З крапельниці, яка фіксується над пазами АД, лак подається послідовно в кожну точку лобової частини обмотки. Далі лак опускається вниз і заповнює всі порожнечі, пори та капіляри ізоляції. Процес завершується після появи лаку у піддоні.

Блок зволоження представлений камерою вологості з вбудованим психрометром та мегаомметром. У камері вологості підтримувалася 86%-на вологість при температурі навколишнього середовища $20\pm 5^\circ\text{C}$ і проводилося вимірювання опору ізоляції протягом певного часу (щонайменше 7 діб).

Блок сушіння складається з сушильної шафи. Температура $120\pm 5^\circ\text{C}$ підтримувалася шляхом зміни напруги автотрансформатором TV1 на нагрівальному елементі ЕК і реєструвалася вимірювальним приладом RT на термопарі t. При цьому проводили вимірювання опору ізоляції мегаомметр рМΩ.

Установка для випробування електричної міцності ізоляції була виконана на базі установки АИМТИ-60. Виконаний апарат, у вигляді колонки, всередині якої поміщений маслонаповнений підвищуючий трансформатор TV4 потужністю 3 кВА. До обмотки ВН цього трансформатора підключаються спеціальні високовольтні виводи експериментальної секції обмотки. Живлення цього трансформатора провадиться від повітряного автотрансформатора TV2, додаткова обмотка TS якого використовується для сигнальних ламп HL1, HL2.

Автотрансформатор TV2 підключається до мережі 127 або 220 і дає можливість плавно підвищувати напругу високовольтного трансформатора від 0 до 60 кВ.

Пробій при випробуваннях визначається за утворенням суцільної яскравої іскри між електродами і спаданням до нуля стрілки вольтметра (цей же вольтметр служить для відліку величини пробивної напруги).

Вимкнення напруги при пробої забезпечується автоматичним вимикачем SQ.

Всі експерименти, що проводилися, виконувались відповідно з загальноприйнятими методиками.

З розмірів паза статора обраного АД і форми паза рис. 2.3. було виготовлено моделі пазів статора (рис. 2.4). З мідного дроту ПЕВ $d = 0,425$ було виготовлено котушки з параметрами: число витків – 101; середня довжина

витка – 350 мм. Котушки були укладені в моделі пазів статора з пазовою ізоляцією з електротехнічного паперу. Як клин був використаний електротехнічний картон. Для кожного виду просочення було виготовлено 11 зразків.

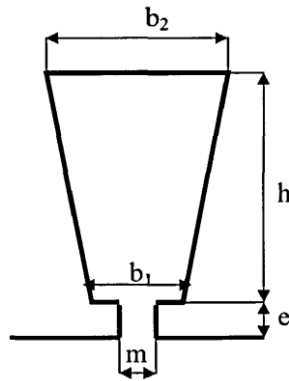


Рис. 2.3. Форма паза статора АД 4АА63В2УЗ

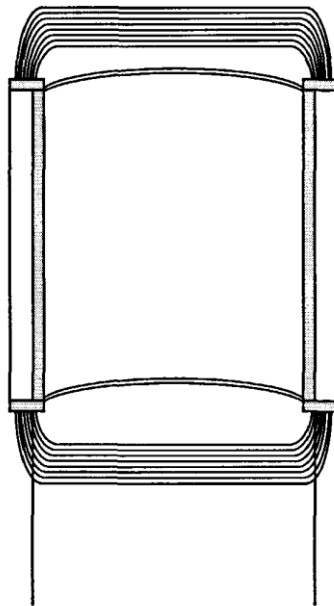


Рис. 2.4. Експериментальний зразок секції обмотки статора АД

Експериментальні зразки секцій обмотки статора АТ 4АА63В2УЗ представлені на фотографіях рис. 2.5.



Рис. 2.5. Фотографія експериментальних зразків секцій статора обмотки АД.

Далі всі зразки були поділені на дві групи та пронумеровані.

Фотографію пристосування краплинного просочення (ПКП) наведено на рис. 2.6.

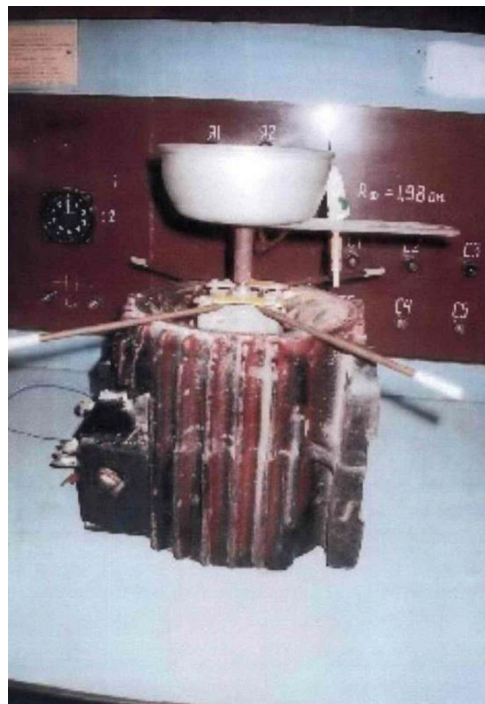


Рис. 2.6. Фотографія пристосування для крапельного просочування

ПКП дозволяє проводити просочення крапельним способом статорів асинхронних електродвигунів діаметром від 66 до 184 мм. Кількість обслуговуючого персоналу – 1 особа.

Використання ПКП дозволяє скоротити час на проведення просочення, порівняно з просоченням зануренням, на 15-20%.

Висновки по розділу

В другому розділі магістерської роботи розроблено методику проведення досліджень та предсталено будову розроблено пристосування для крапельного просочування обмоток АД.

РОЗДІЛ 3

РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

З метою перевірки порівняння двох способів просочення було проведено випробування вологостійкості ізоляції.

При проведенні досліду в камері вологості підтримувалася 86% вологість з температурою навколишнього середовища 20 ± 5 °С. Змінним чинником було опір ізоляції.

Мета експерименту порівняти два способи просочення і виявити найкращий із них.

Зразки секцій були поміщені в камеру вологості з параметрами: температура 20 ± 5 °С, відносна вологість повітря 86%, при цьому проводилося вимірювання опору ізоляції протягом певного часу (зазвичай не менше 7 діб).



Рис. 3.1. Фотографія експериментальної установки для визначення вологостійкості ізоляції

На рис. 3.2. наведено середню криву зволоження для групи крапельного просочування «К» до просочення, на рис. 3.3. – середня крива зволоження групи занурення «З» до просочування.

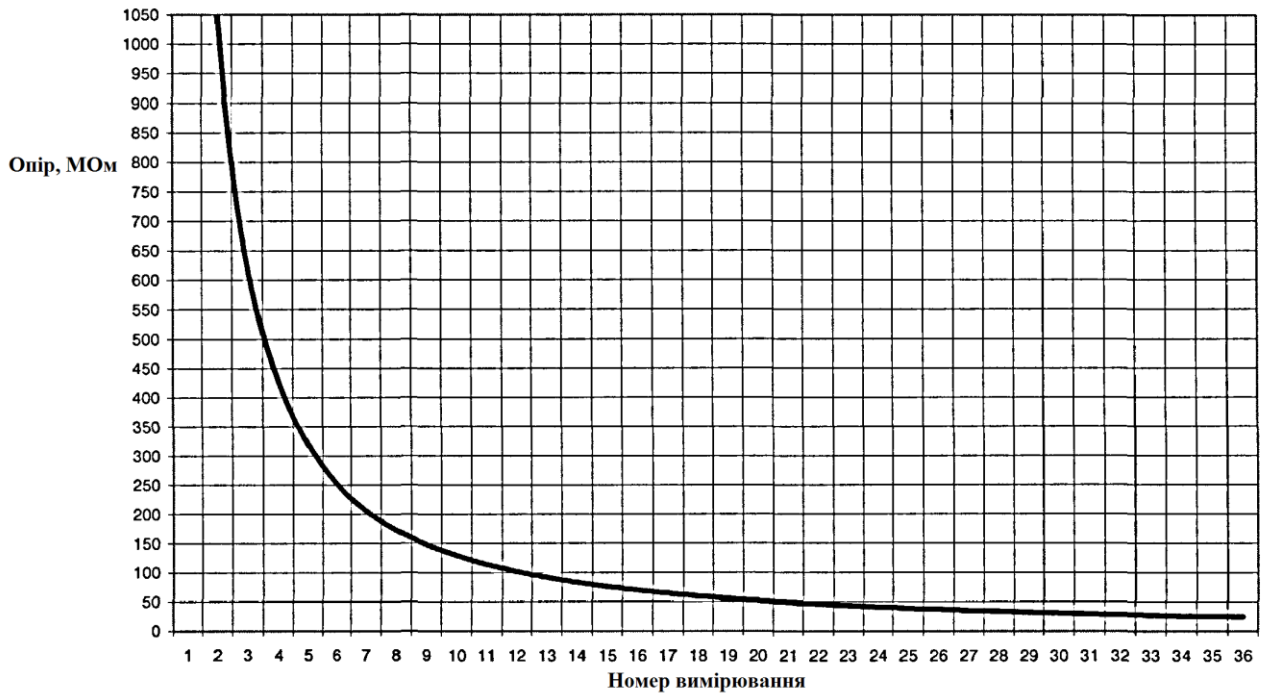


Рис. 3.2. Середня крива зволоження групи «К»

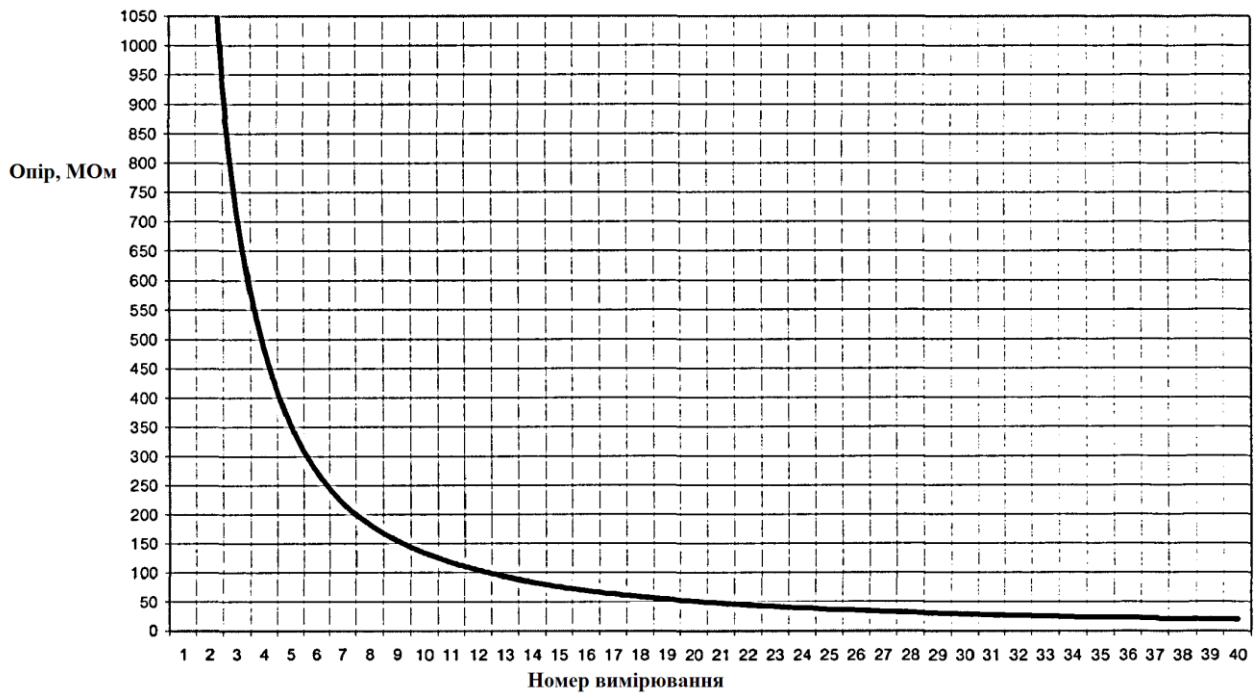


Рис. 3.3. Середня крива зволоження групи «З»

Потім провели просочення для групи "К" – краплинним способом, а для групи "З" – холодним зануренням. Після просочення і сушіння зразки секцій були поміщені в камеру вологості з тими ж параметрами і так само вимірювали опір ізоляції.

На рис. 3.4. наведено середню криву зволоження групи «К» після краплинного просочення, на рис. 3.5. – середня крива зволоження групи «З» після просочення зануренням, на рис. 3.6. – криві розподіли опору при зволоженні.

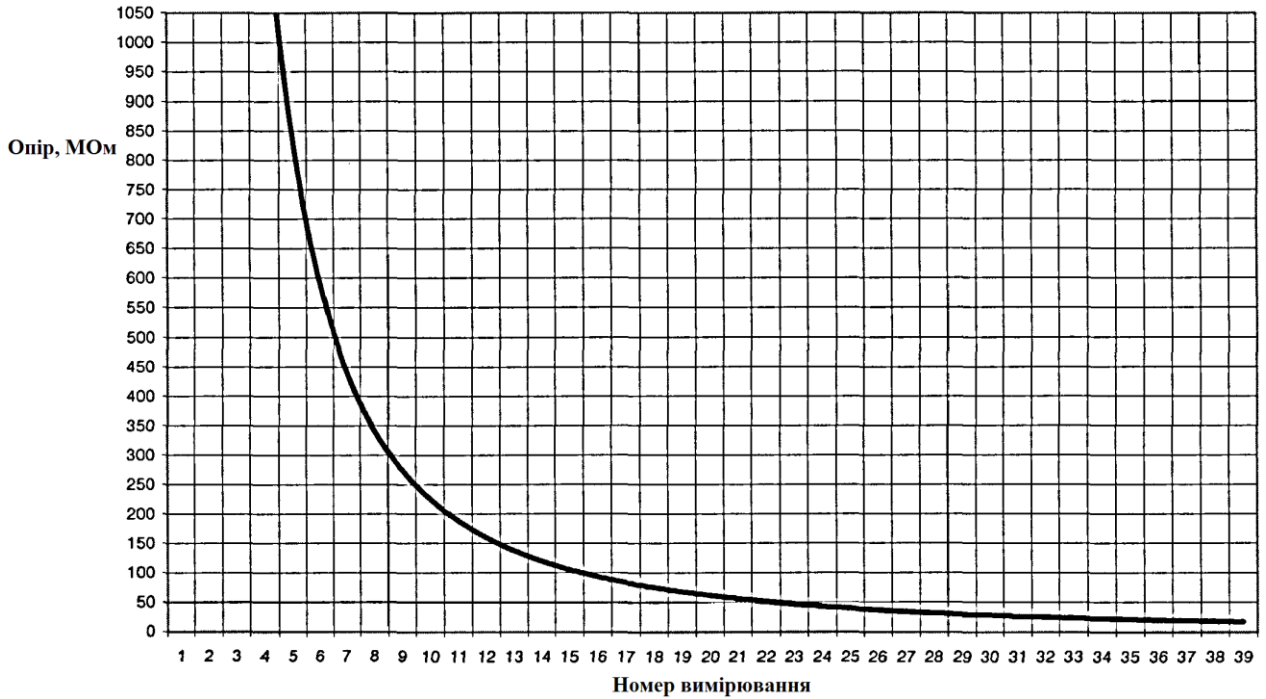


Рис. 3.4. Середня крива зволоження групи «К» після просочування.

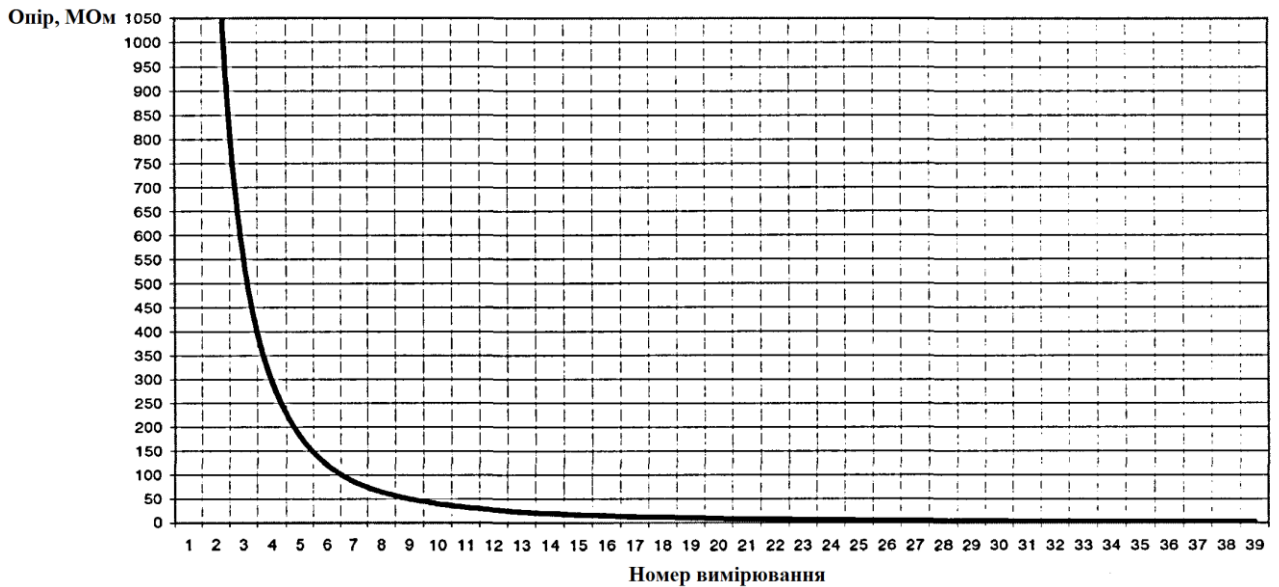


Рис. 3.5. Середня крива зволоження групи «З» після просочування.

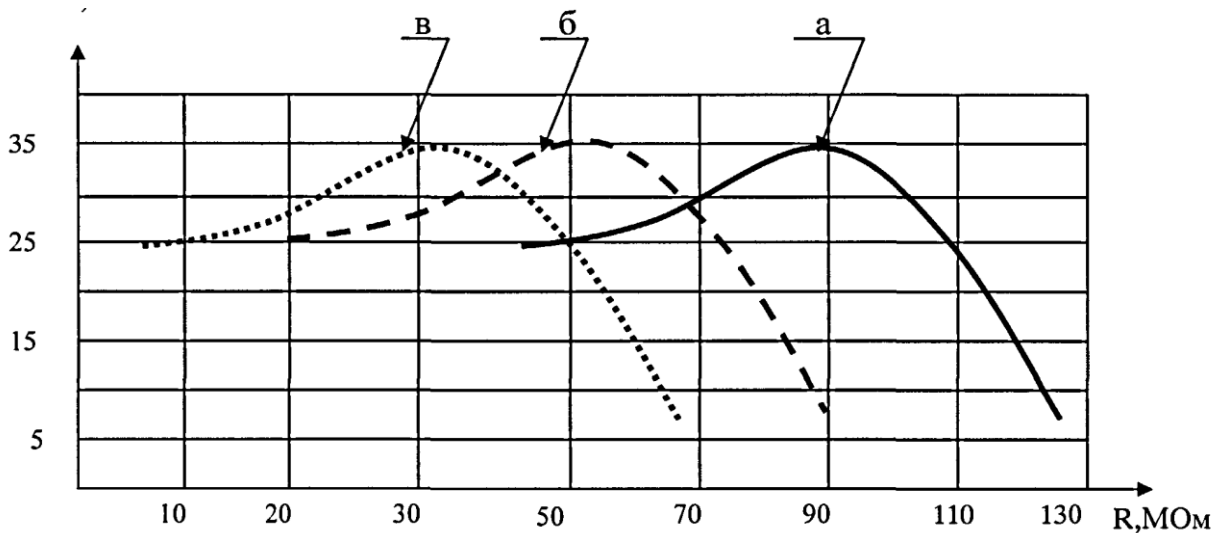


Рис. 3.6. Криві розподіли опору при зволоженні: а – краплинне просочення; б – просочування зануренням; в – без просочення

Як видно із графіків рис. 3.2-3.6, щодо вологостійкості ізоляції краплинне просочення має перевагу. На графіку рис. 3.6. наведені криві розподілу опору ізоляції при зволоженні на яких видно, що максимум кривою краплинного просочення (а) припадає на 89,3 МОм, а просочення зануренням – лише на 53,3 МОм. Це прямо вказує на перевагу краплинного просочення перед просоченням зануренням щодо вологостійкості ізоляції.

Аналізуючи результати дослід з вологостійкості ізоляції котушок можна зробити висновок, що просочення зануренням у порівнянні з непросоченими котушками підвищує надійність ізоляції обмотки (середня величина опору збільшується в 1,58 разів, знижується дисперсія, середньоквадратичне відхилення та коефіцієнт варіації). Крапельне ж просочування ще більше покращує результати просочення зануренням: середня величина опору збільшується в 1,68 разів у порівнянні з просоченням зануренням і в 2,64 рази в порівнянні з непросоченими котушками, ще більше знижується дисперсія, середньо квадратичне відхилення, коефіцієнт варіації менший у 1,79 разів порівняно з просоченням зануренням і в 3,08 разів порівняно з непросоченими котушками, що свідчить про перевагу краплинного просочення над просоченням зануренням.

З метою порівняння двох способів просочення було проведено випробування теплопровідності ізоляції.

При проведенні досліду була використана сушильна шафа, в якій підтримувалася температура 120 ± 5 °С. Змінним чинником було опір ізоляції.

Мета експерименту порівняти два способи просочення і виявити найкращий із них. На рис. 3.7. представлено криві розподілу опору при сушінні після просочення.

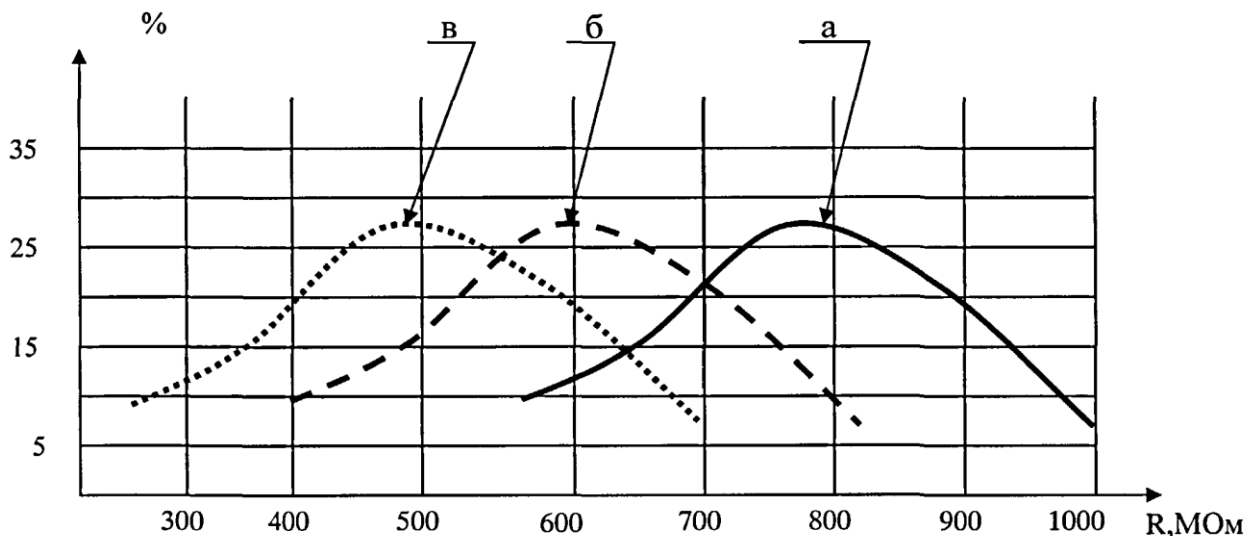


Рис. 3.7. Криві розподілу опору при сушінні після просочування: а – крапельне просочування; б – просочування зануренням; в – без просочування.

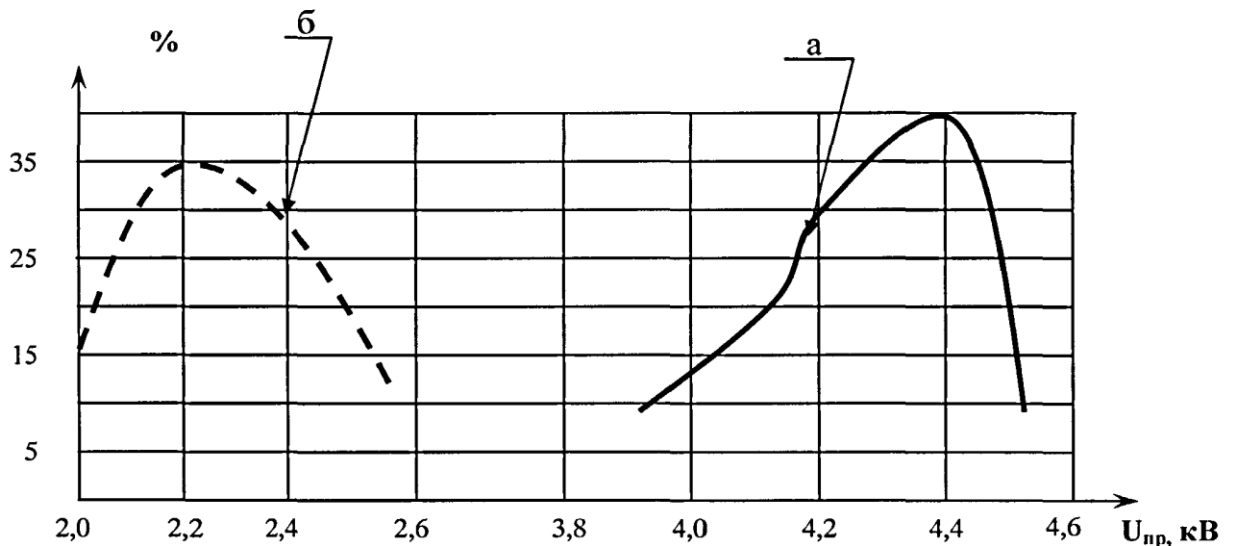
На графіку рис. 3.7. наведені криві розподілу опору ізоляції при сушінні, на яких видно, що максимум кривої краплинного просочення (а) припадає на 800 МОм, а просочення зануренням (б) – лише на 600 МОм. Це прямо вказує на перевагу краплинного просочення перед просоченням зануренням щодо теплостійкості ізоляції.

Аналізуючи результати досліду з теплопровідності ізоляції котушок можна зробити висновок, що просочування зануренням у порівнянні з непросоченими котушками підвищує надійність ізоляції обмотки (середня величина опору збільшується в 1,2 рази, знижується коефіцієнт варіації в 1,02 рази). Крапельне ж просочування ще більше покращує результати просочення зануренням: середня величина опору збільшується в 1,33 рази в порівнянні з

просоченням зануренням і в 1,6 рази в порівнянні з непросоченими котушками, коефіцієнт варіації менше в 1,23 рази в порівнянні з просоченням зануренням і в 1,3 рази порівняно з непросоченими котушками, що свідчить про перевагу краплинного просочення над просоченням зануренням.

З метою порівняння двох способів просочення було проведено випробування ізоляції на електричну міцність.

Випробування проводилося на стенді АИМТИ-60. До котушки підводилася напруга від стенду, що дає можливість плавно підвищувати напругу від 0 до 60 кВ і кіловольтметром замірялася напруга котушки.



Мал. 3.8. Криві розподілу пробивної напруги ізоляції секцій після просочення: а – краплинне просочення; б – просочування зануренням.

Як видно із графіків рис. 3.8. електрична міцність ізоляції експериментальних секцій просочених крапельним способом у 2 рази вище за електричну міцність ізоляції котушок, просочених традиційним способом – зануренням. Це говорить про те, що краплинне просочення має більший запас електричної міцності, ніж просочення зануренням.

Електрична міцність непросочених матеріалів визначається переважно електричною міцністю повітряних прошарків. Так як електрична міцність повітря низька, то при просоченні електрична міцність матеріалів зростає внаслідок заповнення пор та капілярів лаками. Таким чином, чим вище

електрична міцність ізоляції, тим більший відсоток заповнення пір і капілярів просочувальним складом. Як показав експеримент, краплинне просочення має, в порівнянні з просоченням зануренням, електричну міцність в 2 рази більше, отже у неї вище відсоток заповнення пор і капілярів просочення.

Просочення обмоток не тільки підвищує механічну міцність окремих елементів ізоляційних конструкцій, але й забезпечує цементацію витків обмотки, чим запобігає зношуванню виткової ізоляції від вібрацій, електродинамічних зусиль і наслідків теплових розширень при роботі електричних машин.

З метою порівняння двох способів просочення було проведено випробування ізоляції експериментальних секцій на механічну міцність.

У таблиці 3.1. показано, який розривний вантаж потрібен для розриву провідників, просочених різними способами.

Таблиця 3.1. Цементуюча здатність лаку МЛ-92

Крапельне просочування	Розривний вантаж, кг	Крапельне просочування	Розривний вантаж, кг
1П	13,5	1К	10
2П	12	2К	10,5
3П	15	3К	11
4П	10,5	4К	15
5П	11	5К	12
6П	6	6К	10
7П	9,5	7К	8,5
8П	7,5	8К	10,5
9П	8	9К	12
10П	4,5	10К	10,5
11П	6	11К	14
Середнє	9,41	Середнє	11,27

Як видно з розрахунків, для розриву провідників просочених крапельним способом, потрібен більший розривний вантаж ніж для провідників, які просочені зануренням. Це говорить про те, що у нього вищий відсоток заповнення пор і капілярів просочувальним складом і вища механічна міцність.

Висновки по розділу

1. Аналізуючи результати дослідження з вологостійкості ізоляції котушок можна зробити висновок, що краплинне просочування покращує результати просочення зануренням: середня величина опору збільшується в 1,68 разів у порівнянні з просоченням зануренням і в 2,64 рази в порівнянні з непросоченими котушками, коефіцієнт варіації менше в 1,23 рази у порівнянні з просоченням зануренням та в 3,08 разів порівняно з непросоченими котушками.

2. Аналізуючи результати дослідження з теплопровідності ізоляції котушок отримуємо, що краплинне просочення покращує результати просочення зануренням: середня величина опору збільшується в 1,33 рази порівняно з просоченням зануренням і в 1,6 рази порівняно з непросочуваними котушками, коефіцієнт варіації менше в 1,23 рази порівняно з просоченням зануренням і в 1,3 рази порівняно з непросоченими котушками.

3. Доведено, що краплинне просочення має перевагу в електричній міцності порівняно з просоченням зануренням: середня пробивна напруга збільшується в 1,83 рази, коефіцієнт варіації знижується в 1,65 разів.

4. Доведено, що краплинне просочення має перевагу по механічній міцності порівняно з просоченням зануренням: цементуюча здатність збільшується в 1,2 рази, коефіцієнт варіації знижується в 2,13 рази.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Серед відмов асинхронних двигунів досі велика частка припадає на відмови через низьку якість ізоляції. Тому ведеться широкий пошук способів посилення теплостійкості та вологостійкості ізоляції. Одним із способів підвищення якості ізоляції асинхронних двигунів є застосування краплинного просочення. Такі установки відрізняються величезними габаритами, енерговитратами. Тому вони знаходять застосування на великих машинобудівних заводах. Головною причиною, що стримує застосування прогресивного краплинного методу у виробництві, служить відсутність доступного за вартістю та габаритами просочувального обладнання. Отже, виникло важливе науково-технічне завдання – визначити параметри пристосування для крапельного просочування.

2. Встановлено, що за критерієм продуктивності просочення краплинний спосіб має область ефективного застосування. Вона справедлива для лаків із малою в'язкістю та високою температурою.

3. Розроблено експериментальну установку для вивчення просочення обмоток асинхронних двигунів. Вона дозволяє проводити просочення зануренням і краплинним способом обмоток асинхронних двигунів, що ремонтуються на малих сільськогосподарських ремонтних підприємствах і точно контролювати режим та якість просочення.

4. Експериментальні дослідження показників якості просочення дозволили встановити, що краплинне просочення покращує результати просочення зануренням: вологостійкість вища в 1,7 раза, електрична міцність у 1,8 раза, цементуюча здатність у 1,2 раза. При цьому ці показники більш стабільні, оскільки коефіцієнти варіації при краплинному просоченні в 1,2-1,8 разів нижче. За критерієм витрати лаку краплинне просочення економніше просочення зануренням майже в 4 рази.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Araújo R.E. (ed.) Induction Motors: Modelling and Control. Rijeka: InTech, 2012. 557 p.
2. Recalde R.I.G. Induction Motors: Applications, Control and Fault Diagnostics. AvE4EvA, 2015. 381 p.
3. Забудский Е.И. Электрические машины. Часть 2. Асинхронные машины. М.: Мегapolis, 2017. 304 с.
4. Thomson W., Culbert I. Current Signature Analysis for Condition Monitoring of Cage Induction Motors: Industrial Application and Case Histories. Wiley-IEEE Press, 2017. 427 p.
5. Боев М.А., Канискин В.А. и др. Эксплуатация силовых электрических кабелей. Часть 2. Диагностика силовых кабелей и определение остаточного ресурса в условиях эксплуатации. Санкт-Петербург: ПЭИПК, 2001. 76 с.
6. Логачев И.С., Родин Г.Г. Ремонт обмоток машин постоянного тока. Москва : Энергия, 1968. 128 с.
7. Шевченко В.П. Ремонт електричних машин. Одеса : Наука і техніка, 2004. 120 с.
8. Маршак Е.Л., Уманцев Р.Б. Ремонт электрических машин общепромышленного применения. Москва : Энергия, 1982. 280 с.
9. Овчаров В.В. Эксплуатационные режимы работы и непрерывная диагностика электрических машин в сельскохозяйственном производстве. Киев: УСХА. 1990. 168 с.
10. Клоков Б.К. Обмотчик электрических машин. М.: Высшая школа, 1987. 256 с.
11. Лихачев В.Л. Справочник обмотчика асинхронных электродвигателей. Москва: Солон-Пресс, 2008. 239 с.

12. Сечин В.И., Моисеева О.В. Обмотки электрических машин и трансформаторов. Хабаровск: Изд-во ДВГУПС, 2008. 166 с.

13. Мякишев Н. Ф. Электропривод и электрооборудование автоматизированных сельскохозяйственных установок.. Москва : «Агропромиздат», 1986. 176 с.

14. Богатырев Н. И. Практикум по электроприводу. Краснодар, 2009. 288 с.

15. Маршак Е.Л. Ремонт обмоток статоров электрических машин переменного тока. Москва : Энергия, 1966. 112 с.

16. Маршак Е.Л. Ремонт и модернизация асинхронных двигателей. Москва : Энергия, 1970. 280 с.