

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ПОЛІСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет інженерії та енергетики

Кафедра електрифікації, автоматизації виробництва та інженерної екології

Кваліфікаційна робота

на правах рукопису

Семененко Назар Олегович

УДК 621.359.4

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

Аналіз та огляд технологій установок для пропитки та сушіння ізоляції
електродвигунів
(тема роботи)

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

Семененко Н. О.

(підпис, ініціали та прізвище здобувача вищої освіти)

Керівник роботи

Гончаренко Юрій Павлович

(прізвище, ім'я, по батькові)

к.т.н., доцент кафедри електрифікації,
автоматизації виробництва та інженерної екології

(науковий ступінь, вчене звання)

АНОТАЦІЯ

Семененко Н. О. Аналіз та огляд технологій установок для пропитки та сушіння ізоляції електродвигунів. Кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня магістра за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка – Поліський національний університет, Житомир, 2025.

Метою даної роботи є питання аналізу та огляду технологій установок які використовуються для пропитки та сушіння ізоляції електродвигунів.

Об'єктом дослідження є процеси зміни властивостей ізоляції обмоток в результаті їх відновлення.

Ключові слова: асинхронний двигун, ізоляція, діагностика, пропитка, сушіння ізоляції.

ABSTRACT

Semenenko N. O. Analysis and review of technologies of installations for impregnation and drying of insulation of electric motors. Qualification work for obtaining a master's degree in specialty 141 - Electric power, electrical engineering and electromechanics - Polessia National University, Zhytomyr, 2025.

The purpose of this work is the issue of analysis and review of technologies of installations used for impregnation and drying of insulation of electric motors.

The object of research is the processes of changing the properties of winding insulation as a result of their restoration.

Keywords: asynchronous motor, insulation, diagnostics, impregnation, insulation drying.

ЗМІСТ

ВСТУП	4
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ПРОЦЕСІВ В ОБМОТКАХ ЕЛЕКТРИЧНИХ ДВИГУНІВ ПРИ ВІДНОВЛЕННІ ІЗОЛЯЦІЇ	8
1.1 Аналіз факторів, що впливають на якість відновленої ізоляції обмоток двигунів під час обслуговування та ремонту	8
1.2. Аналіз процесів при сушінні ізоляції електродвигунів	21
Висновки по розділу 1	29
РОЗДІЛ 2. УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ПРОСОЧЕННЯ ТА СУШІННЯ ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ У СІЛЬСЬКОМУ ГОСПОДАРСТВІ НА ОСНОВІ АНАЛІЗУ ВПЛИВУ ДІЮЧИХ ФАКТОРІВ	30
2.1 Аналіз фізико-хімічних явищ, що відбуваються під час відновлення ізоляції статорних обмоток	30
2.2 Шляхи підвищення ефективності використання існуючих технологій ремонту ізоляції АД	39
Висновки по розділу 2	43
РОЗДІЛ 3. ПОРІВНЯЛЬНА ОЦІНКА РІЗНИХ СПОСОБІВ СУШІННЯ ІЗОЛЯЦІЇ ОБМОТОК ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ	44
3.1 Розрахунок ефекту теплових та розроблених способів сушіння ізоляції обмоток електродвигунів	45
3.2 Розрахунок енергозатрат на сушку ізоляції АД різними способами	50
Висновки по розділу 3	53
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	54
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	56

ВСТУП

Асинхронні двигуни (АД) у сільськогосподарському виробництві експлуатуються в різних умовах, які часто супроводжуються підвищеною вологістю. Особливо несприятливим слід вважати холодну пору року. В тваринництві електродвигуни в цей період працюють в умовах хімічно агресивного середовища, при різкій зміні температури. Тому відзначається інтенсивний вихід їх з ладу на гноєзбиральних транспортерах, витяжних вентиляторах, насосних установках, електродвигуни яких працюють у повторно-короткочасному режимі з тривалою технологічною паузою.

Заходи, спрямовані на зменшення негативного впливу навколишнього середовища на ізоляцію, можна розділити на дві групи. Заходи першої групи є захисними. Вони дозволяють сповільнити проникнення вологи в обмотку та накопичення її в небезпечних кількостях. До них відносяться:

- застосування електродвигунів спеціалізованих виконань; - модернізація електродвигунів під час ремонту;
- розміщення двигунів у сухих опалювальних примі- щеннях;
- електрообігрів електричних машин у неробочому стані.

Перший захід пов'язаний з виробництвом електродвигунів вологоморозостійкого, хімоустійкого, сільськогосподарського виконання. Для герметизації асинхронних двигунів спеціального виконання передбачені ущільнення підшипникових вузлів. Опір ізоляції спеціальних асинхронних двигунів знижується у вологому середовищі в півтора рази повільніше, ніж двигунів загальнопромислового призначення.

Проте покращені вологозахисні властивості асинхронних двигунів спеціалізованих виконань втрачаються в результаті старіння ізоляції в процесі експлуатації в сільському господарстві, а також після ремонту в електроцехах сільських підприємств. У сільському господарстві в умовах вологого та агресивного середовища працює у великій кількості АД загальнопромислового використання.

Модернізація асинхронних двигунів при ремонті полягає у підвищенні вологостійкості лобових частин обмотки. Лобові частини обмотки покривають емаллю, модифікованою одним з летких інгібіторів. При цьому зменшується вологонепроникність емалевої плівки, а в місцях відсутності емалі пари інгібіторів пасивують мідь, підвищуючи її стійкість. Інгібування покращує вологостійкість ізоляції, але не виключає її зволоження у важких умовах експлуатації.

Високою стійкістю до впливу навколишнього середовища володіють капсульовані обмотки. Сутність капсулювання полягає в герметизації лобових частин епоксидним або іншим компаундом. Його заливають у встановлену на статор форму, витримують до затвердіння. Опір ізоляції капсульованих двигунів в процесі експлуатації не зменшується нижче 500 МОм.

Розміщення електродвигунів в сухих опалюваних приміщеннях можливо далеко не завжди і для цього потребуються значні капітальні вкладення. Відомо, що проникнення вологого повітря всередину оболонки електричної машини і, як наслідок цього, зволоження ізоляції можливо тільки після того, як температура обмотки стане рівною температурі навколишнього повітря. Отже, якщо в неробочі періоди АД підтримувати температуру його обмоток дещо вище зовнішньої температури, то зволоження ізоляції можна уникнути. На цьому принципі заснована робота ряду пристроїв запобіжного підігріву обмоток.

З проведеного багатьма авторами аналізу статистичних даних причин виходу з ладу електродвигунів (ЕД) можна зробити висновок про те, що значну їх частку складають відмови, викликані старінням ізоляції обмоток статора під впливом ряду факторів, таких як волога, агресивні гази, теплові та механічні навантаження. Забезпечення сучасними пристроями захисту та діагностики мінімального впливу зовнішніх і внутрішніх факторів на обмотку електричних машин в процесі експлуатації, а також ремонтними службами високої якості відновлення працездатності електродвигунів на стадії технічного обслуговування та ремонту, дозволить максимально знизити попит

на ремонтні послуги за рахунок підвищення надійності вузлів електрообладнання та підвищити рівень сільськогосподарського виробництва.

У процесі вивчення фізико-хімічних явищ, що відбуваються під час відновлення ізоляції статорних обмоток, особливе місце необхідно відвести переносу енергії та маси речовини, які є одним з найважливіших предметів дослідження в сучасній науці та мають велике практичне значення в стаціонарній та промисловій енергетиці. Незважаючи на те, що існуючі на сьогоднішній день методи відновлення електричної ізоляції, зокрема, просочення та сушіння обмоток ЕД, не дозволяють повною мірою реалізувати основні положення теорії тепломасообміну, ці питання в теплоенергетичних процесах набувають особливого значення при їх значній інтенсифікації у зв'язку з переходом на високі режимні параметри.

Відповідно до вище зазначеного питання пов'язані з процесом відновлення ізоляції електродвигунів являється актуальним. Процес відновлення ізоляції ЕД може відбуватися шляхом використання певних технологій, які реалізуються в установках для пропитки та сушіння ізоляції електродвигунів.

Тому **метою даної роботи** є питання аналізу та огляду технологій установок які використовуються для пропитки та сушіння ізоляції електродвигунів.

Об'єктом дослідження є процеси зміни властивостей ізоляції обмоток в результаті їх відновлення.

Методи дослідження. Для вирішення основних задач дослідження використано системну методологію аналізу процесів старіння ізоляції та тепломасопереносу в капілярно-пористих тілах, методи теорії подібності та моделювання із застосуванням методів математичної статистики та чисельних методів розв'язання диференціальних рівнянь, логіко-ймовірнісний метод розрахунку складного виробу.

Перелік публікацій автора за темою дослідження :

Сімоненко Н.О. ОЦІНКА ЕЛЕКТРООСМОТИЧНОГО СПОСОБУ СУШІННЯ ІЗОЛЯЦІЇ ОБМОТОК ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ.

Матеріали науково-практичної конференції науково-педагогічних працівників, докторантів, аспірантів та молодих вчених факультету інженерії та енергетики «СТУДЕНТСЬКІ ЧИТАННЯ – 2025» 30 жовтня 2025 року. Житомир: Поліський національний університет, 2025.- С 195-198.

Бокренко М. О., Семененко Н. О. АНАЛІЗ ТЕПЛОВОГО ЗНОСУ ІЗОЛЯЦІЇ ОБМОТКИ АСИНХРОННОГО ЕЛЕКТРОДВИГУНА

Матеріали науково-практичної конференції науково-педагогічних працівників, докторантів, аспірантів та молодих вчених факультету інженерії та енергетики «СТУДЕНТСЬКІ ЧИТАННЯ – 2025» 30 жовтня 2025 року. Житомир: Поліський національний університет, 2025.- С 201-204.

Семененко Н. О., Федорчук Я. В. ЛОКАЛЬНИЙ ПЕРЕГРІВ ІЗОЛЯЦІЇ АСИНХРОННИХ МАШИН У ПЕРЕХІДНИХ РЕЖИМАХ РОБОТИ

Матеріали науково-практичної конференції науково-педагогічних працівників, докторантів, аспірантів та молодих вчених факультету інженерії та енергетики «СТУДЕНТСЬКІ ЧИТАННЯ – 2025» 30 жовтня 2025 року. Житомир: Поліський національний університет, 2025.- С 208-210.

РОЗДІЛІ

АНАЛІЗ ПРОЦЕСІВ В ОБМОТКАХ ЕЛЕКТРИЧНИХ ДВИГУНІВ ПРИ ВІДНОВЛЕННІ ІЗОЛЯЦІЇ

1.1 Аналіз факторів, що впливають на якість відновленої ізоляції обмоток двигунів під час обслуговування та ремонту

Дедалі зростаюча потреба в електрообладнанні не може бути повністю задоволена без організації його ремонту на технічному рівні та в масштабах, що забезпечують високу якість та економічність ремонтних робіт. Одним з найбільш дієвих засобів підтримання обладнання в належному технічному стані та продовження його терміну служби є, як відомо, своєчасний і якісний ремонт. Обсяг і складність електрообладнання, що ремонтується, безперервно зростає, у зв'язку з чим виникає необхідність у постійному вдосконаленні технології та скороченні термінів ремонту, залученні до робіт з ремонту електрообладнання найбільш кваліфікованих робітників.

В даний час електропривод займає провідне положення практично у всіх промислових і багатьох транспортних механізмах. Згідно зі статистикою, електроприводом оснащено приблизно 85 % всіх рухових і силових механізмів (насоси, компресори, вентилятори, верстати, різноманітні технологічні машини, побутова техніка та ін.). Асинхронні двигуни (АД) стали виробом масового застосування, і на сьогодні вони споживають близько 75 % виробленої у всьому світі електроенергії. Це обумовлює велике значення якості, надійності та енергетичних характеристик асинхронних електродвигунів. АД загального призначення потужністю від 0,1 до 100 кВт на напругу до 1000 В – найбільш широко застосовувані в промисловості електричні машини. Вони складають за кількістю 90 %, а за потужністю, приблизно, 60 % від загального парку[10].

Таке положення ці машини завоювали завдяки своїй здатності автоматично змінювати момент обертання на валу, високому ККД, відносній технологічній простоті та низькій вартості у порівнянні з іншими видами електродвигунів. Електричні двигуни беруть участь у багатьох складних і

відповідальних технологічних процесах і операціях. Відмова в їх роботі може спричинити за собою величезні збитки підприємства через простий технологічного обладнання, а також несе загрозу безпеці життя людей. Такі збитки можуть у багато разів перевищувати вартість самого електродвигуна, що вийшов з ладу.

Специфічні і важкі умови експлуатації призводять до зниження надійності і довговічності електродвигунів.

Навколишнє середовище промислово-виробничих приміщень може значно відрізнятись від нормованого для нормальної роботи електродвигунів. Присутність у вентильованому електродвигуном повітрі агресивних середовищ, парів кислот і лугів, струмопровідного та неструмопровідного пилу, а також інших механічних включень призводить до передчасного зносу, а то й до виходу з ладу як міжвиткової, так і корпусної ізоляції, що робить електродвигун непридатним.

Техніко-економічна досконалість та експлуатаційна надійність роботи електричних машин значною мірою залежать від ізоляції. Якщо врахувати те, що вартість ізоляції становить близько половини вартості всіх матеріалів машини, а ізоляція за час служби замінюється (іноді кілька разів), в той час як активні матеріали машини використовуються багаторазово, стає зрозумілим та велика увага, яка приділяється спеціальним питанням, пов'язаним з конструюванням, виготовленням, а особливо експлуатацією та діагностикою стану ізоляції електричних машин.

В загальному випадку середній термін служби АД становить 20000 годин (близько 5 років) і коливається в залежності від сфери застосування. По Україні, в середньому, протягом року піддається капітальному ремонту близько 20 % встановлених АД.

Асинхронні двигуни нерідко працюють у вельми важких умовах при незадовільному обслуговуванні або зовсім без будь-якого догляду. Тому в більшості випадків причинами відмов асинхронних двигунів є неправильне їх застосування (15-35 % відмов), недоліки експлуатації (35-50 % відмов) або

низька якість ремонту. Приблизно 30-35 % відмов відбувається внаслідок недоліків конструкції та технології виробництва двигунів. Лише 10-12 % двигунів виходять з ладу внаслідок природних процесів старіння і зносу.

Статистика виявляє різкі коливання в рівні аварійності та терміні служби двигунів у різних галузях промисловості. Середньорічний вихід двигунів у капітальний ремонт становив: у будівництві – 54 %, у гірничодобувній промисловості – 29 %, у промисловості будівельних матеріалів – 25 %, у харчовій промисловості – 24 %. Водночас у хімічній промисловості, де умови роботи двигунів так само досить несприятливі, середній вихід у капітальний ремонт на рік становив лише 9 %, у чорній металургії – 13 %. На деяких шахтах Кузбасу електродвигуни служать, в середньому, всього 6-7 місяців. В умовах хімічної промисловості середній технічний ресурс двигунів серії ВАО до першого капітального ремонту становить 60-80 тис. год, в той час як на вугільних шахтах тільки 5-6 тис. год, а для окремих приводних механізмів навіть близько 2 тис. год[10].

Розподіл пошкоджень за окремими вузлами асинхронних двигунів змінюється в залежності від умов їх застосування, проте найбільша кількість пошкоджень припадає на обмотку статора. В середньому, через пошкодження обмоток двигунів відбувається 85-95 % відмов, 3-8 % відмов відбувається внаслідок пошкоджень підшипників. За характером пошкоджень обмоток відмови асинхронних двигунів єдиної серії розподіляються наступним чином: міжвиткові замикання – 93 %, пошкодження міжфазової ізоляції – 5 %, пазової ізоляції – 2 %. Таким чином, у переважній більшості випадків причиною відмов є пошкодження міжвиткової ізоляції, типове для всіх обмоток. Пошкодження міжфазової та пазової ізоляції зазвичай виникають як наслідок міжвиткових замикань і представляють розвиток останніх[1].

Для асинхронних двигунів загальнопромислового застосування зміна інтенсивності відмов у функції часу має досить типовий характер, виявляючи виразні періоди припрацювання, нормальної експлуатації та зносу. Правильна форма кривої інтенсивності відмов зумовлена тим, що переважною причиною

відмов є міжвиткові замикання в обмотці статора і, таким чином, у більшості випадків відмови однотипні за своїм походженням [1].

Після 3-5 тис. год роботи АД настає період їх нормальної експлуатації; інтенсивність відмов протягом цього часу коливається біля деякої середньої величини порядку $(0,5 \pm 1)10^{-5}$ год⁻¹. У період нормальної експлуатації відмови є наслідком періодичного зростання навантажень, викликаного різними умовами, зовнішніми по відношенню до машини. Сюди відносяться: комутаційні перенапруги, перевантаження по струму, надмірне зростання з різних причин навантажувального моменту і т.п.

Тривалість періоду нормальної експлуатації залежить від умов роботи двигунів. За помірних навантажень і правильної експлуатації тривалість цього періоду вимірюється багатьма роками. Через неповне використання внаслідок систематичного недовантаження більшості асинхронних двигунів загальнопромислового застосування після 30 - 35 тис. год роботи, тобто 7-9 років експлуатації, відмови через теплове старіння ізоляції ще не виникають.

Умови застосування асинхронних двигунів досить різноманітні. Тому існують різні виконання та модифікації двигунів для задоволення специфічних вимог, пов'язаних з особливостями навантажень, навколишнього середовища та режимів роботи. Так, двигуни з підвищеним ковзанням $S_n = 8 \div 14$ % призначаються для приводу механізмів з великими маховими масами та нерівномірним графіком навантаження, а також механізмів з великою частотою пусків і реверсів. Збільшений активний опір ротора цих двигунів дозволяє зменшити їх нагрівання при перехідних процесах.

Двигуни з підвищеним пусковим моментом $M_n / M_n = 1,7 \div 2$ % служать для приводів механізмів з важкими умовами пуску, але відносно стабільним навантаженням. Двигуни пониженого використання призначені для установки на підприємствах, де через умови цілодобової роботи особливого значення набувають високі енергетичні показники. Існуючі виконання і модифікації, як правило, дозволяють вибрати найбільш підходящий для конкретних умов

роботи двигун. Крім того, ГОСТ 17494-72 передбачає 17 різних виконань електричних машин за ступенями захисту.

Надійна робота двигунів може бути гарантована лише за умови правильного їх вибору та застосування.

До 30 % відмов двигунів серії А за першу тисячу годин роботи було викликано неправильним використанням двигунів за умовами навколишнього середовища. В середньому для всіх типів двигунів близько 7,5 % відмов викликається неправильним вибором двигунів за потужністю.

Для визначення характеру і причин відмов електродвигунів за останні роки проводилося систематичне вивчення матеріалів експлуатації значної кількості асинхронних двигунів в різних галузях народного господарства.

На сьогоднішній день умови експлуатації АД у промисловості в більшості випадків незадовільні. Великі коливання температури, висока вологість, агресивні гази та пил, мастило є основними факторами, спільний вплив яких значною мірою впливає на надійність електродвигунів.

Також типовим для електродвигунів є часте недовантаження або перевантаження по потужності чи невикористання по нагріву. Основна причина цього – невиправдане завищення (заниження) потужності електродвигуна на стадії проектування, специфіка експлуатації тощо.

Узагальнюючи отримані дані про пошкодження ізоляції, можна назвати найбільш характерні з них: коротке замикання на корпус, пробій, короткі міжвиткові замикання, пробій і обвуглювання ізоляції, обрив обмотки статора.

Найбільш часте поєднання видів пошкоджень – це пробій і обвуглювання ізоляції з міжвитковим коротким замиканням і пошкодженням проводу. Таке поєднання видів пошкоджень мають 51,2 % з усіх електродвигунів, що вийшли з ладу та були обстежені. Обвуглювання ізоляції в поєднанні з пробоем спостерігається у 10,2 % двигунів, а обвуглювання ізоляції в поєднанні з міжвитковим коротким замиканням і пробоем – у 13,1 %. У «чистому» вигляді пробій ізоляції має місце у 4,8 %, обвуглювання ізоляції – у 13,5 %, міжвиткове коротке замикання – у 4,3 % електродвигунів. Лише 29 % електродвигунів

мали механічні пошкодження без пошкодження обмотки. Крім цього, за даними деяких досліджень, пробій на корпус спостерігався у 16 %, а згоряння обмоток – у 46 % електродвигунів[5].

Все це свідчить про те, наскільки високими мають бути вимоги до технології ремонту електродвигунів з урахуванням того, що сам процес ремонту на даний час є тривалим і недосконалим в більшості випадків.

Електричні машини мають ряд особливостей, які не дозволяють безпосередньо застосувати при дослідженні їх надійності методи, достатньо повно розроблені для пристроїв радіоелектроніки та автоматики. Такими особливостями є: принципова неможливість резервування елементів, велика складність окремих вузлів (наприклад, обмотки), схемна нескладність, навіть у порівнянні з найпростішими радіоелектронними пристроями, великий термін служби, невизначеність навколишніх умов і номінальних режимів роботи, особливо для електродвигунів загального застосування.

Для вирішення проблем надійності необхідний контроль під час експлуатації, виявлення та аналіз причин виходу з ладу. Для цього необхідні засоби та методи контролю і діагностування технічного стану.

Під час експлуатації ізоляція електрообладнання, в тому числі й електричних машин, піддається різним впливам, під впливом яких відбувається старіння ізоляції, тобто незворотне погіршення її властивостей. Для ізоляції електричних двигунів характерним є утворення місцевих дефектів (наприклад, тріщин), тобто суттєве погіршення її електричних властивостей на окремих невеликих ділянках.

Впливи, що викликають пошкодження ізоляційних матеріалів, поділяються на наступні групи: електричні, теплові, механічні та навколишнього середовища. Під час роботи обладнання його ізоляція відчуває ці впливи одночасно, при цьому можлива взаємодія, тобто одночасно прикладені впливи можуть викликати старіння ізоляції з іншою швидкістю, ніж прикладені по черзі.

Кожен з перелічених раніше видів впливу може виявитися в певних умовах основним, що визначає процес старіння ізоляції або її частини, в цьому випадку даному виду впливу буде відповідати певний характер старіння ізоляції і викликані цим старінням дефекти.

Теплове старіння ізоляції є наслідком поступової хімічної зміни органічних речовин, що входять до її складу. Неорганічні компоненти ізоляції при робочих температурах практично не зазнають будь-яких хімічних змін, тобто не старіють. У терморективній ізоляції старіє зв'язуюче – терморективний компаунд, він стає більш крихким (при цьому темніє) і від цього погіршуються механічні властивості ізоляції в цілому.

У мікалентній компаундованій ізоляції старіють паперова підкладка, лаки та компаунд. При цьому підкладка стає крихкою, поступово відбувається її хімічне та механічне руйнування, і в результаті вона може практично зовсім зникнути, особливо в таких напружених місцях, як вихід з паза. Масляний лак, що входить до складу мікаленти, та бітумний компаунд, яким вона просочується при компаундуванні, при старінні стають з в'язких також крихкими, частково випаровуються, при механічних впливах кришаться.

В результаті цього послаблюється зв'язок як між шарами мікаленти, так і між листками слюди в шарі, ізоляція легко розшаровується.

При тривалому нагріванні мікалентної ізоляції паралельно з хімічними процесами йде також процес так званого «розбухання», що має в своїй основі механічні явища. З підвищенням температури різко погіршуються механічні властивості лаку та компаунду, внаслідок чого листки слюди, зігнуті на кутах перерізу стержня, мають можливість дещо розпрямитися, тим самим збільшити радіус заокруглення ізоляції на кутах стержня. При цьому в меншій мірі розпрямляються внутрішні шари, що зазнають тиску зовнішніх шарів, в більшій мірі – зовнішні шари, стримувані лише в'язкістю зв'язуючого та покривною стрічкою. В результаті описаного процесу переріз ізольованого стержня набуває бочкоподібної форми, між шарами ізоляції, по-різному зігнутими, з'являються або збільшуються повітряні прошарки, з'являється або

збільшується зазор між внутрішнім шаром ізоляції та поверхнею провідників стержня.

Набрякання особливо сильно проявляється в місцях, де йому ніщо не перешкоджає, в лобових частинах (включаючи місце виходу з паза); в пазовій частині воно значною мірою обмежене розмірами паза і відбувається лише на величину початкового зазору між стрижнем і стінкою паза.

Можливі інші умови теплового старіння ізоляції – порівняно короткочасна дія температур, що суттєво перевищують допустимі робочі температури. Такі умови виникають, як правило, при місцевих перегрівках: замикання ряду елементарних провідників у пазовій частині стрижня зі швидким зростанням температури в місці замикання, злам провідника з випадковим контактом у місці зламу.

У терморективній ізоляції наслідки місцевих перегрівів за зовнішніми ознаками мало відрізняються від наслідків теплового старіння, за винятком обуглювання ізоляції, яке настає при температурах порядку сотень градусів.

У мікастрічкової компаундованій ізоляції при місцевих перегрівках, крім ознак загального теплового старіння, вираженого в більшій чи меншій мірі, і витікання чорного лаку з головок (із звичайним термопластичним заповненням) з'являються деякі специфічні ознаки. До них відноситься, в першу чергу, витікання лаку і компаунду (часто з утворенням затверділих напливів) в лобових частинах у випадку перегріву всього стрижня або його лобової частини. Крім того, в цьому випадку може змінитися форма перерізу стрижня: з прямокутного він стає овальним через значне набрякання, прискорене газоутворенням всередині ізоляції.

При місцевому перегріві стрижня в пазовій частині найбільш характерною із загальних ознак старіння є наявність ділянки з різко підвищеною крихкістю зв'язуючого.

При дії високих температур зв'язуюче вигоряє, і можуть з'явитися сліди дегідратації слюди: листки (пластинки) слюди біліють, стають непрозорими, особливо з країв, легко розсипаються на дрібні лусочки.

За сучасними поглядами пробій ізоляції електричних машин при тривалій дії напруги має іонізаційний характер, тобто обумовлений поступовим руйнуванням ізоляції частковими розрядами, що відбуваються в газових включеннях, які є в товщі ізоляції та під електродами.

У завершальній стадії такої пробій розвивається порівняно швидко і супроводжується, ймовірно, електричним пробоем деяких непошкоджених прошарків ізоляції. Але йому передують тривала стадія так званого електричного старіння - процес поступового розростання газових включень, формування ділянок шляху пробією і т.п.

Електричне старіння термореактивної ізоляції є наслідком поступового руйнування її міжшаровими розрядами, що починаються з місць розташування випадкових дефектів (складки, тріщини, розшарування і т.п.) в прилеглих до плетеного стрижня шарах ізоляції.

Розряди відбуваються в товщі ізоляції вздовж її шарів по поверхнях розділу її структурних елементів і призводять до пошкодження наступного шару ізоляції в найбільш слабкій його точці в зоні дії розрядів. З місця пошкодження, як з вістря, виникають міжшарові розряди вже під пошкодженим шаром, далі процес повторюється в кожному наступному шарі; відбувається безперервна ерозія шарів в зоні первинного дефекту з поступовим збільшенням глибини пошкодження.

Старіння плівок відбувається тільки в умовах безпосередньої дії розрядів на плівку і при наявності достатнього доступу кисню в зону розрядів.

Якщо ці умови виконані, то при тривалій витримці напруги через деякий час через електричне старіння відбувається пробій плівки і час до пробією тим менший, чим вища прикладена напруга.

Ізоляція має бути виконана таким чином, щоб при фазній нарузі дія електричного старіння, викликана частковими розрядами в її товщі, практично не впливала на термін її служби. Цій умові задовольняли всі види слюдовмісної ізоляції, що випускалася вітчизняними заводами: гільзова, мікалентна компаундована та термореактивна.

В обмоток, що працювали в повітряному середовищі, в деяких випадках спостерігалися сліди іонізаційного старіння у внутрішніх шарах ізоляції поблизу кутів перерізу стержня, де за відсутності спеціальних заходів була концентрація напруженості поля.

Основними факторами дії на ізоляцію електричних машин навколишнього середовища є: дія газу, що оточує ізоляцію (наприклад, повітря); дія вологи, що міститься в повітрі, газі або потрапляє на ізоляцію у вигляді рідини (наприклад, потрапляння вологи ззовні при дії пристроїв пожежогасіння, при недбалому зберіганні статора тощо). Крім того, можлива абразивна дія пилу, що міститься в повітрі. Дія газу, що оточує ізоляцію, позначається в основному на процесах теплового та електричного старіння ізоляції.

Дія на ізоляцію великих металевих частинок і предметів, що потрапили в двигун ззовні або випали з різних його вузлів, з певним допущенням також може бути віднесена до дії навколишнього середовища.

Зволоження ізоляції під час роботи машини можливе лише при потраплянні води на обмотку. Зволоження ізоляції від дії вологого повітря можливе лише тоді, коли машина не працює (під час транспортування, монтажу, тривалого ремонту тощо). При цьому різні частини ізоляції зволожуються по-різному в залежності від матеріалу, з якого вони зроблені.

Сучасна термореактивна ізоляція всіх видів, яка не має дефектів, практично не схильна до об'ємного зволоження; в ній при правильному її виготовленні мало пор, проникаючи в які волога могла б знизити її електричну міцність (як це відбувається, наприклад, в папері та картоні), а термореактивні компаунди мало гігроскопічні і процес їх зволоження йде дуже повільно.

Значно інтенсивніше йде процес поверхневого зволоження, проте таке зволоження легко усувається підсушуванням ізоляції на повітрі навіть без нагрівання.

Лише за наявності дефектів зволоження може суттєво позначитися на пробивному напруженні ізоляції. Такими дефектами можуть бути тріщини, що утворилися при укладанні стрижнів і підгонці головок через неправильну

форму лобових частин або порушення технології укладання. Іншим дефектом може бути недостатнє просочення ізоляції та плетеного стрижня термореактивним компаундом.

Безперервна компаундована ізоляція, яка не має дефектів, практично також не схильна до об'ємного зволоження ні під дією звичайної вологи повітря, ні при короткочасному змочуванні водою: просочення компаундом хоча б зовнішніх шарів ізоляції робить її мало гігроскопічною. У такої ізоляції (як і термореактивної) можливе головним чином поверхнєве зволоження. Деяке проникнення вологи в товщу ізоляції можливе в основному вздовж шарів слюди (з кінців стрижня, якщо вони не ізольовані). Помітним таке зволоження стає лише після багатомісячної витримки ізоляції в повітрі з вологістю, близькою до 100 %.

Механічним впливам ізоляція піддається як під час виготовлення і ремонту, так і під час експлуатації його (особливо при невідповідності системи кріплення обмотки зусиллям, що виникають в ній).

Механічні впливи призводять до виникнення в ізоляції деформацій розтягування, стиснення, вигину, зминання, кручення, а також до тертя поверхні стрижнів об прилеглі до них деталі. За несприятливих обставин це призводить до появи дефектів ізоляції у вигляді тріщин, складок, розшарування її та місцевого зменшення товщини.

Рівень механічних впливів зі зростанням потужності двигунів безперервно зростає і збільшується небезпека механічного пошкодження ізоляції у разі найменших конструктивних або технологічних недоробок, упущень при монтажі, ремонтах і т.п., незважаючи на те, що термореактивна ізоляція істотно міцніша за мікалентну. У зв'язку з цим механічні пошкодження ізоляції є найбільш характерною причиною дефектів, що виявляються в машинах, які перебувають в експлуатації.

Термомеханічні впливи виникають при теплових циклах (нагріванні та охолодженні обмотки) в основному внаслідок різниці в температурах і коефіцієнтах лінійного розширення міді, активної сталі та ізоляції, а також

наявності значного тертя між поверхнею стрижня та стінками паза. Внаслідок зазначених причин при зміні струму в обмотці і відповідній зміні температури струмоведучої частини стрижня та довжини останньої (розширенні або стисненні) в ізоляції виникають напруження розтягування або стиснення, які посилюються тим, що переміщення стрижня в пазу відбуваються з зусиллям.

При термореактивній ізоляції та ущільненні стрижня в пазу бічними пружинячими прокладками зміщення міді та ізоляції відносно сталі сердечника практично однакові, тобто ізоляція не зміщується відносно струмоведучого стрижня, а утворює з ним комплекс з деяким загальним коефіцієнтом лінійного розширення.

Термомеханічні напруження при великій кількості циклів нагрівання та охолодження істотно впливають на стан термореактивної ізоляції і при поєднанні несприятливих умов, зокрема при недостатньо досконалій системі її, можуть призвести до пробою.

Аналіз усіх відомих способів підтримання експлуатаційної надійності ізоляції АД, основними з яких є її капітальний ремонт, технічне обслуговування, періодична діагностика, забезпечення надійним захистом, показує, що основними заходами, які сприяють створенню базового ресурсу роботи ізоляційної системи, є її просочення та сушіння спеціальними діелектричними сумішами.

В основі існуючих технологій проведення відновлювальних робіт лежить досвід їх раціоналізації, результатом якого на даний час є наступна послідовність технологічних операцій: деструкція зв'язуючого та видалення обмотки, операції обмотувально-ізоляційних робіт, попередній нагрів і сушіння ізоляції обмотки, заповнення обмоток спеціальними діелектричними сумішами, сушіння і, за необхідності, полімеризація [2]. Обмотувально-ізоляційні роботи є найважливішими при ремонті. Це зумовлено тим, що правильний вибір значень конструктивних параметрів обмотки забезпечує нормовані значення робочих та енергетичних характеристик електродвигуна, а якісне виконання робіт сприяє відсутності дефектів в емалевому покритті

провідників. У практиці експлуатації електрообладнання в сільському господарстві відомі випадки, коли після повної або часткової перемотки АД не піддавалися операціям просочення та сушіння. При цьому ЕД зберігали працездатний стан протягом деякого часу. Однак внаслідок впливу агресивних факторів емалеве покриття проводів порівняно швидко пошкоджувалося, і електродвигун виходив з ладу. Таким чином, експлуатаційна надійність ізоляції обмотки після обмотувально-ізоляційних робіт низька.

В основі існуючих технологій проведення відновлювальних робіт лежить досвід їх раціоналізації, результатом якого на даний час є наступна послідовність технологічних операцій: деструкція зв'язуючого та видалення обмотки, операції обмотувально-ізоляційних робіт, попередній нагрів та сушка ізоляції обмотки, заповнення обмоток спеціальними діелектричними сумішами, сушка та, за необхідності, полімеризація [2].

Обмотувально-ізоляційні роботи є найважливішими при ремонті. Це зумовлено тим, що правильний вибір значень конструктивних параметрів обмотки забезпечує нормовані значення робочих та енергетичних характеристик електродвигуна, а якісне виконання робіт сприяє відсутності дефектів в емалевому покритті провідників. У практиці експлуатації електрообладнання в сільському господарстві відомі випадки, коли після повної або часткової перемотки АД не піддавалися операціям просочення та сушки. При цьому ЕД зберігали працездатний стан протягом деякого часу. Однак внаслідок впливу агресивних факторів емалеве покриття проводів порівняно швидко пошкоджувалося, і електродвигун виходив з ладу. Таким чином, експлуатаційна надійність ізоляції обмотки після обмотувально-ізоляційних робіт низька.

У практиці електромашинобудування для підвищення надійності ізоляційних конструкцій низьковольтних електродвигунів використовується просочення та сушка їх обмоток. Сушка перед просоченням необхідна для видалення вологи з пор ізоляції, що перешкоджає проникненню лаку в тіло обмотки. Сушку перед просоченням потрібно виконувати ще й тому, що при

просоченні лаки та компаунди швидше і глибше проникають вглиб нагрітих обмоток внаслідок розрідження повітря в капілярах, яке виникає при нагріванні обмоток. Слід також відзначити, що чим вища температура, тим швидше відбувається видалення вологи з обмоток.

1.2. Аналіз процесів при сушінні ізоляції електродвигунів

Сушка до просочення може здійснюватися з використанням наступних методів: конвекційного, струмового, терморадіаційного, індукційного, електроосмосу, вакуумного, швидкісного електротермовакуумного.

Процес термообробки ізоляції можна розбити на наступні етапи:

- нагрівання ізоляції до заданої температури, значення якої визначається призначенням термообробки (сушка до просочення та капсулювання після);
- видалення з об'єму ізоляції низькомолекулярних сполук (волога – у випадку попередньої сушки; розчинники – в основному при капсулюванні ізоляції, просоченої електроізоляційним матеріалом(ЕІМ));
- полімеризація просочувального складу (лакової основи або зв'язуючого компаундів) при капсулюванні.

Температурні умови термообробки зазвичай жорстко визначені виробником просочувального складу, а її тривалість є функцією технологічних властивостей матеріалів, що утворюють систему ізоляції, їх маси, конструктивних характеристик оброблюваного вузла, тиску, а також методу підведення тепла до ізоляції. Ці ж фактори, доповнені показником вологості, визначають тривалість режимів попередньої сушки перед просоченням. Метод нагрівання є практично єдиним параметром, необмеженим регламентуючими рамками, і його обґрунтований вибір може суттєво вплинути на інтенсивність та ефективність розглядуваного технологічного процесу.

Існують наступні методи сушки ізоляції обмоток ЕМ [6, 7]:

- конвективний;
- вакуумний;
- індукційний;
- струмовий нагрів;

– терморадіаційний (ІЧ-випромінюванням).

У всіх цих методах передбачається процес нагрівання – передачі теплової енергії від одного тіла до іншого. При ремонті ЕМ найбільш широко використовуються конвективний метод сушки ізоляції обмоток [7], з використанням електричних печей, які будуть розглянуті докладніше далі.

Конвекційним методом сушіння обмоток статорів, роторів та якорів електричних машин проводять у спеціальних печах при 105 – 200 °С підігрітим повітрям(рис.1.1). При цьому необхідно обмежувати максимальну температуру сушіння, яка залежить від конструкції та класу нагрівостійкості ізоляції, але зазвичай не перевищує 200 °С.

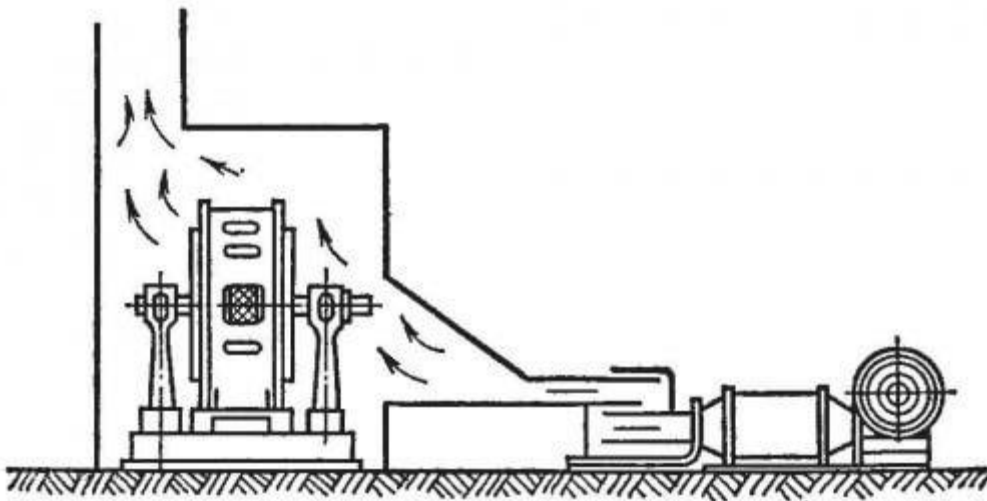


Рисунок 1.1 – Метод сушки шляхом конвекції

Теплоносієм в даному випадку є нагріте повітря, і передача тепла до ізоляції обмоток відбувається шляхом вільної та вимушеної конвекції. Теплова енергія, що надходить із зовнішньої поверхні ізоляції, створює умови для першочергового видалення низькомолекулярних сполук з приповерхневих шарів. Виникаючий градієнт концентрації обумовлює направлену до поверхні концентраційну дифузію [2]. Але через високий температурний градієнт значною виявляється роль термодифузії [9], що має протилежний напрямок. Це визначає велику тривалість процесу сушки ізоляції обмоток ЕМ конвективним методом, а також вірогідне виникнення дефектів, особливо при обробці просоченої в лаках ізоляції, так як вміст розчинника в лаку може

доходити до 90%. Причина можливого дефектоутворення полягає в тому, що необхідні для полімеризації температурні умови створюються, перш за все, на поверхні просоченої ізоляції (рисунок 1.2).

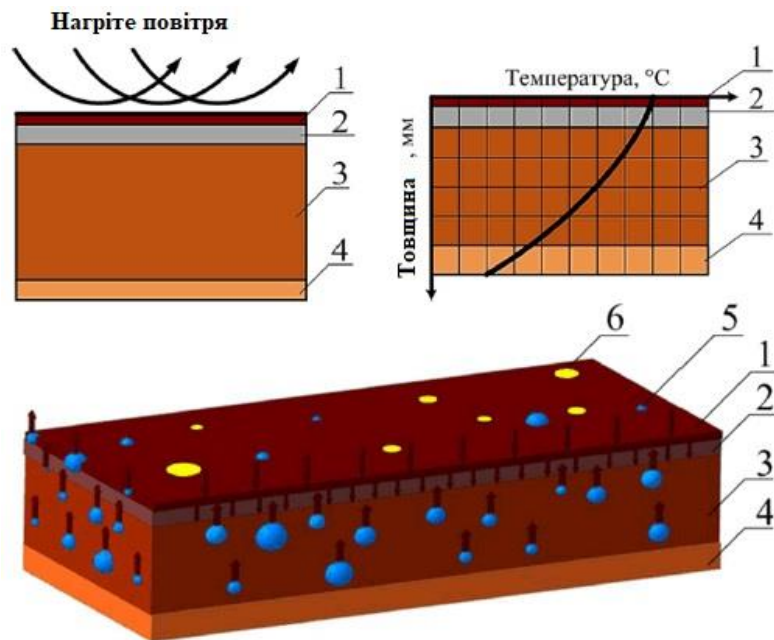


Рисунок 1.2. Дефектоутворення при використанні конвективного методу сушіння ізоляції обмоток ЕМ ТПС: 1 – лакова плівка; 2 – просочувальний матеріал (лак, компаунд); 3 – просочений ізоляційний матеріал; 4 – провідник обмотки; 5 – пари розчинника; 6 – порожнини (мікротріщини)

Утворена лакова плівка 1 перешкоджає виходу парів розчинника 5. В результаті, після того як пари розчинника все-таки вирвуться назовні, можуть сформуватися порожнини, які є зонами виникнення часткових розрядів, або відбутися локальні руйнування поверхневого лакового шару з утворенням порожнин (мікротріщин) 6, через які в процесі експлуатації ЕМ ТПС можуть виникнути пробої та міжвиткові замикання. Все це призводить до зниження функціональних властивостей ізоляції і на етапі виготовлення вимагає додаткової інтенсифікації процесу видалення низькомолекулярних сполук, наприклад, шляхом вакуумування.

Крім цього, конвективний метод сушіння ізоляції обмоток ЕМ, особливо це стосується великогабаритних вузлів (якір, остов), характеризується значними витратами часу на етапі нагріву до заданої температури (25-30 % від

загальної тривалості процесу) і нерівномірністю в її розподілі між окремими частинами обмоток. Технологія сушіння ізоляції обмоток ЕМ з використанням вакууму як самостійна не використовується [6]. Застосовують її як допоміжну, часто з конвективним методом (почергово), що забезпечує зниження температури і швидкості нагріву ізоляції без зниження інтенсивності процесу сушіння та вологовіддачі.

Сушіння вакуумним методом (технологія АВБ) полягає у вакуумуванні обмоток статора протягом 20–40 с. При цьому тиск всередині автоклава, в який поміщено оброблювану обмотку, менший, ніж в обмотці. За рахунок створеного вакуумного удару (швидко створеної різниці тисків) ввібрана обмоткою волога виходить назовні. Швидкісний електротермовакuumний метод відрізняється від попереднього лише тим, що час створення вакууму в ньому має значно менші значення за рахунок застосування швидкодіючих засувов, і досягається більша глибина вакууму.

Індукційний метод полягає в нагріванні обмотувальних виробів індукційними струмами, що утворюються в них під впливом пульсуючого магнітного поля, в якому знаходяться нагріті вузли ЕМ [6, 7]. Вироби поміщають у спеціальний індуктор, який живиться струмами високої частоти або струмами промислової частоти. Конфігурація індуктора відповідає формі та розмірам виробів. Під впливом змінного магнітного поля у виробі наводяться індукційні струми, які його нагрівають.

На рисунку 1.3 зображено схему індукційного нагріву та методи намотування провідників.

Кількість тепла, що утворюється в переманічованій сталі, знаходиться в прямій залежності від магнітної індукції та частоти струму, і чим вони більші, тим вища температура нагрітих вузлів ЕМ. Джерелом високочастотної енергії можуть бути промислові генератори ТВЧ. Індукційний метод сушіння струмами нормальної частоти не потребує спеціального обладнання: як джерело електромагнітних коливань застосовується змінний струм від мережі 50 Гц, що живить індуктори, які охоплюють вузли ЕМ ТПС, що піддаються

нагріванню. Процес сушіння ізоляції при індукційному нагріванні протікає зсередини назовні, що створює сприятливі умови для видалення розчинника та висихання лакової плівки. Висохле покриття не має ні здуття, ні пор. Однак конструкція індуктора повинна відповідати конфігурації та розмірам виробів, що обмежує поширення індукційного методу.

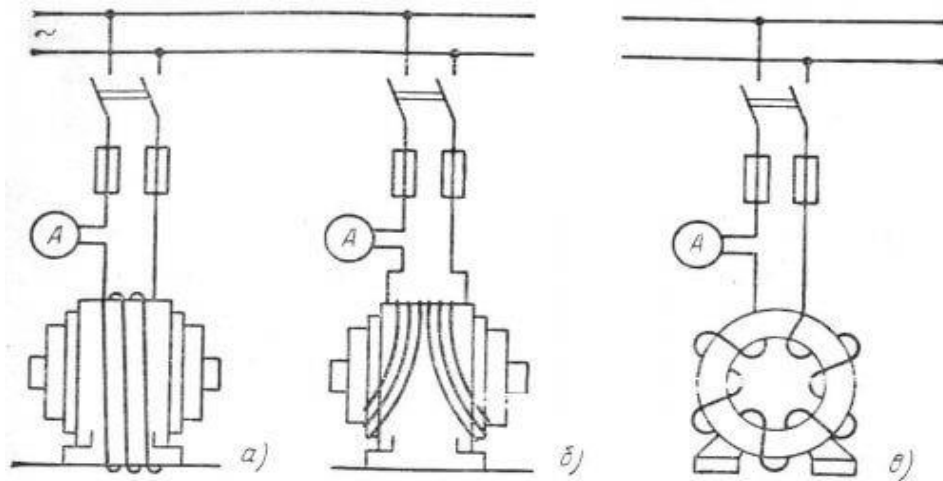


Рисунок 1.3. Схема індукційного нагріву та методи намотування провідників.

Суть струмового методу сушіння – пропускання електричного струму зниженої напруги через просочену в ЕІМ обмотку ЕМ, що викликає її подальший необхідний нагрів (сушіння ізоляції) [4].

Для струмового методу сушіння ізоляції обмоток може застосовуватися як постійний, так і змінний струм промислової частоти 50 Гц; в обох випадках ефект буде однаковим. На практиці найбільшого поширення для струмового нагріву набув змінний струм, при якому тепло генерується:

- а) в матеріалі проводів, де тепло виділяється за рахунок активних втрат;
- б) в сталі вузлів ЕМ, де тепло виділяється додатковими втратами за рахунок потоків розсіювання;
- в) за рахунок діелектричних втрат в ізолюючому матеріалі на початковій стадії процесу сушіння ізоляції.

При постійному струмі тепло генерується тільки в матеріалі проводів. Величини струму і напруги вибираються в залежності від конструкцій обмоток і вузла, умов сушіння і т. д.

Струмовий метод сушіння обмоток ЕМ може проводитися як на однофазному, так і на трифазному струмі. При застосуванні однофазної системи потрібне послідовне або паралельне з'єднання обмоток всіх трьох фаз вузлів машин, що не завжди можливо при трифазному струмі, оскільки не всі початки і кінці обмоток виводяться на дошку затискачів.

Основною умовою для визначення режимів струмового нагріву є визначення струму, при якому буде форсовано набір температури навколишнім середовищем до максимальної температури сушіння.

Одним із способів струмового сушіння є електротехнічний спосіб.

Електротехнічний спосіб просочення та сушіння ізоляції обмоток ЕМ полягає у пропусканні електричного струму через обмотку [12], паралельно до якої підключають набір конденсаторів і здійснюють одночасне просочення та сушіння обмотки, пропускаючи через неї змінний електричний струм промислової частоти в режимі резонансу струмів. Між витками обмотки при цьому виникають пондеромоторні сили, що призводять до поперечної мікровібрації витків, забезпечуючи ефективно заповнення повітряних і водних утворень просочувальним складом між витками обмотки.

Підвищена величина струму в обмотках при резонансі струмів (в 3-8 разів вище у порівнянні з номінальним струмом котушок в робочому режимі ЕМ) ефективно та рівномірно по всьому об'єму нагріває обмотку ЕМ відповідно до технології температурного та часового режиму обробки котушок індуктивності для кожного типорозміру.

Найбільш ефективним, порівняно з іншими методами, є терморадіаційний метод сушіння (інфрачервоним (ІЧ)-випромінюванням), який має щільність теплового потоку в рази більшу за інші [13].

Терморадіаційний спосіб сушіння полягає в нагріванні виробів інфрачервоними променями. Генераторами променів слугують спеціальні

електричні лампи, які є дещо видозміненими звичайними лампами розжарювання, а також трубчасті електронагрівальні елементи та спеціальні металеві панелі, нагріті до температури 300 – 450 °С, що випромінюють інфрачервоні промені. В першу чергу під впливом інфрачервоних променів нагріваються металеві частини, і за рахунок цього починається інтенсивне видалення вологи з пор обмотки, внаслідок чого даний спосіб сушіння є більш ефективним, ніж конвекційний.

При струмовому методі відбуваються великі теплові втрати, пов'язані з нагріванням міді обмотки провідників. Такі ж втрати присутні і при конвективному та індукційному методах, але вже у більшій кількості, оскільки тут відбувається нагрівання всіх частин ЕМ. У випадку терморадіаційного методу сушіння має місце лише селективний нагрів ізоляції без додаткових теплових та енергетичних втрат. При терморадіаційному методі сушіння ізоляції обмоток використовується принципово інший вид нагріву, що базується на поглинанні ізоляційними матеріалами енергії субінфра- та інфрачервоного випромінювання [12]. Перетворення енергії випромінювання в теплову відбувається в деякому шарі ізоляції, глибина якого визначається довжиною хвилі та оптичними властивостями ізоляційних матеріалів. Теплові промені (ІЧ-промені) [12], в основному коротко- та середньохвильові з довжиною хвилі 0,8-5,0 мкм, проходять відстань від джерела випромінювання до опромінюваної поверхні майже без втрат (в залежності від коефіцієнтів відбиття та поглинання ЕМ), а основні дифузійні процеси мають оптимальний напрямок (рисунок 1.4) [14].

Нагріті основним потоком ІЧ-променів металеві частини обмотки 3, в свою чергу, нагрівають лакофарбовий матеріал 2 знизу, сприяючи передачі тепла від нижніх шарів ізоляції до верхніх та прискорюючи видалення розчинника 4, тим самим значно скорочуючи процес сушіння.

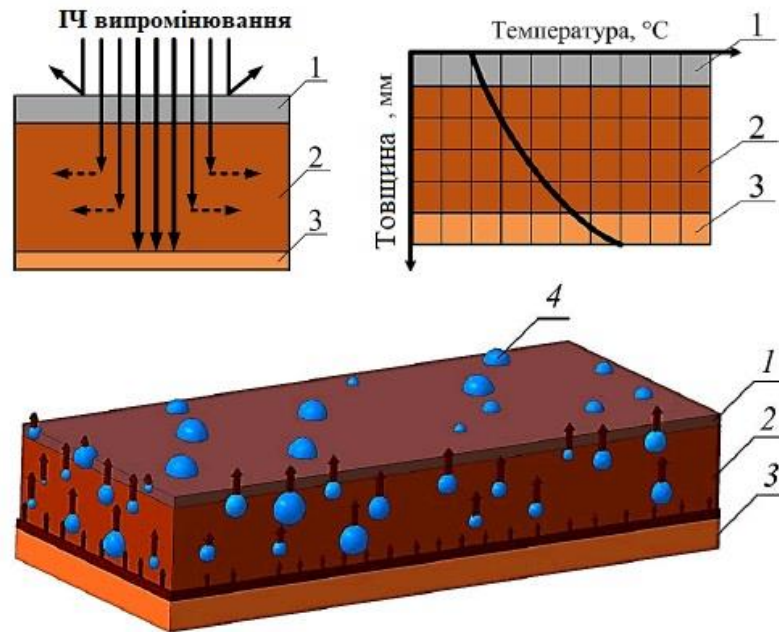


Рисунок 1.4. Розповсюдження ІЧ-променів по глибині шару просоченої ізоляції: 1 – електроізоляційний просочувальний матеріал (лак, компаунд); 2 – просочений ізоляційний матеріал; 3 – провідник обмотки; 4 – пари розчинника

Ефективність методу сушіння ІЧ-випромінюванням значною мірою обумовлюється властивостями лакового покриття — його відбивною здатністю, що залежить від кольору та природи лаку, а також властивостями основного матеріалу виробу. Покриття з прозорих матеріалів при високому коефіцієнті відбиття мають низькі коефіцієнти поглинання, і спроби нагрівання ІЧ-випромінюванням таких виробів не можуть супроводжуватися успіхом. Для ефективного використання ІЧ-випромінювання та досягнення високих температур необхідно створити покриття, що володіють високою поглинальною здатністю ІЧ частини спектру [3].

Спосіб сушіння обмоток електричних машин [6], суть якого полягає у тимчасовому покритті обмотки ЕМ пористим матеріалом, просоченим насиченим розчином солей, при цьому між зовнішньою поверхнею обмотки та пористим матеріалом розміщують мембрану, що пропускає воду і не пропускає іони розчину солей, потім подають постійну напругу від

зовнішнього джерела, причому позитивний полюс джерела напруги підключають до провідників обмотки, а негативний – до пористого матеріалу.

На рисунку 1.5 зображено схему процесу сушіння обмотки. Обмотка, що складається з ізоляції 1 та провідників 2, покрита мембраною 3 та пористим матеріалом 4, при цьому до провідників 2 підключено позитивний полюс 5 зовнішнього джерела постійної напруги (на схемі не показано), а негативний полюс – до пористого матеріалу 4.

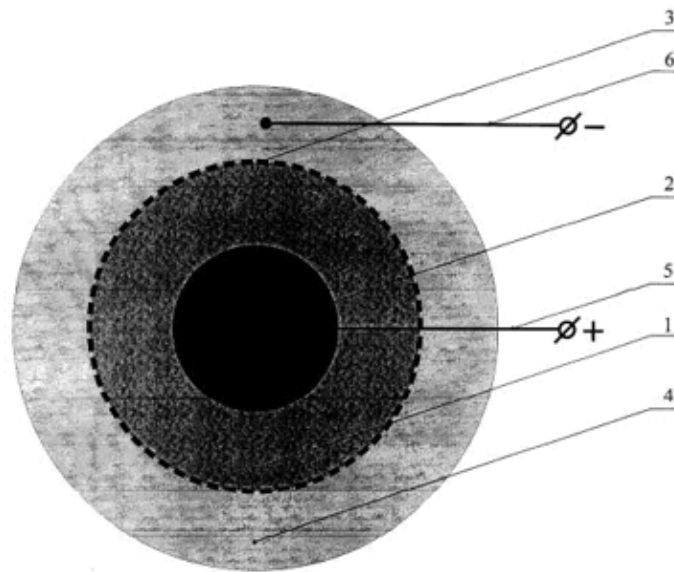


Рисунок 1.5. Процес сушіння обмотки

Висновки по першому розділу

Основним недоліком конвекційного, індукційного, терморадіаційного, струмового методів є тривалий перебіг процесу сушіння, внаслідок чого зростають енерговитрати, а отже, і фінансові витрати. Використання електроосмотичного методу небажане з огляду на, по-перше, тривалий перебіг процесу сушіння, а, по-друге, відсутність нагрівання виробу перед просоченням, як однієї з умов інтенсифікації останнього. Під час сушіння після просочення цей метод не може використовуватися взагалі. Недоліками вакуумного та швидкісного електротермовакuumного методу є необхідність використання спеціального обладнання та значні витрати на створення найбільш ефективних режимів сушіння.

РОЗДІЛ 2

УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ПРОСОЧЕННЯ ТА СУШІННЯ ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ У СІЛЬСЬКОМУ ГОСПОДАРСТВІ НА ОСНОВІ АНАЛІЗУ ВПЛИВУ ДІЮЧИХ ФАКТОРІВ

2.1 Аналіз фізико-хімічних явищ, що відбуваються під час відновлення ізоляції статорних обмоток

У процесі вивчення фізико-хімічних явищ, що відбуваються при відновленні ізоляції статорних обмоток, особливе місце необхідно відвести переносу енергії та маси речовини, які є одним з найважливіших предметів дослідження в сучасній науці та мають велике практичне значення в стаціонарній та промисловій енергетиці. Незважаючи на те, що існуючі на сьогоднішній день методи відновлення електричної ізоляції, зокрема, просочення та сушіння обмоток ЕД, не дозволяють в повній мірі реалізувати основні положення теорії тепломасообміну, дані питання в теплоенергетичних процесах набувають особливого значення при їх значній інтенсифікації у зв'язку з переходом на високі режимні параметри [1].

Теорія тепло- та масопереносу, яка є науковою основою багатьох теплоенергетичних процесів, дуже складна, розроблена недостатньо, і тому сучасна теорія тепло- та масообміну в основному є феноменологічною теорією, що базується на гідродинаміці та термодинаміці суцільних середовищ. Отримувані розв'язки, незважаючи на значні математичні труднощі, становлять безсумнівний інтерес не тільки для розрахунку процесів тепло- і масопереносу, але і для вивчення основних закономірностей тепло- і масообміну, зокрема, для розробки нових методів просочення та сушіння обмоток статорів ЕД.

Для розуміння процесів тепломасо- переносу в обмотці електричних машин нам необхідно знати фізико-хімічну структуру як самої обмотки, так і ізоляційних матеріалів, що є невід'ємною її частиною.

Очевидно, що обмотку двигуна можна вважати пористим тілом, що складається з капілярів або вузьких каналів, які розташовані по довжині статорного паза прямолінійно. Переріз таких капілярів є криволінійним трикутником. Пористе тіло характеризується такими параметрами, як пористість, проникність та рядом інших. Під пористістю обмотки статора електродвигуна розуміється відношення об'єму пор $V_{пор}$ до об'єму тіла обмотки $V_{тіл}$. У нашому випадку об'ємна пористість $П_5$ буде дорівнювати поверхневій пористості $П_5$, яка дорівнює відношенню поверхні пор до загальної поверхні тіла обмотки статора.

Як відомо, механічна пористість будь-яких покриттів зменшується зі збільшенням їхньої товщини та зростанням кількості нанесених шарів. Для кожного покриття існує мінімальна товщина безпористих покриттів δ_{min} , яка залежить від матеріалу, виду підкладки, способу нанесення та інших факторів. Вона досить мала (складає частки або одиниці мікрометрів) при отриманні покриттів з газової фази і набагато більша (досягає десятків і сотень мікрометрів) при отриманні їх з рідких середовищ. Відповідно до пористості змінюється і проникність покриттів K_f , що є властивістю пористого матеріалу пропускати крізь себе рідину, та являє собою провідність матеріалу по відношенню до рідини.

З точки зору забезпечення захисних властивостей покриттів проникність відіграє велику роль. Будучи показником, що визначається властивостями матеріалу плівки та зовнішнього середовища, яке контактує з нею, вона характеризує комплекс ізолюючих властивостей покриттів, їх здатність протидіяти проникненню рідин, парів і газів до поверхні підкладки з навколишнього середовища.

Як відомо, проникнення речовини через плівку складається з:

- адсорбції (розчинення);
- дифузії; десорбції з іншого боку плівки.

У процесі адсорбції беруть участь як мінімум два компоненти:

1) тверда речовина, на поверхні або в об'ємі пор якої відбувається концентрування поглинаємої речовини, називається адсорбентом;

2) поглинаєма речовина, що знаходиться в газовій або рідкій фазі, називається адсорбтивом, а після того як вона перейшла в адсорбований стан – адсорбатом.

Будь-яка тверда речовина має поверхню і, отже, потенційно є адсорбентом. Таким чином, обмотка статорів асинхронних електродвигунів з розвиненою внутрішньою поверхнею може бути представлена як твердий адсорбент [2].

Незважаючи на різноманіття характеру адсорбційних сил, усі адсорбційні явища можна поділити на два основних типи: фізичну адсорбцію та сорбцію, що ґрунтується на силах хімічної взаємодії. Різновидом адсорбції є капілярна конденсація, яка залежить від зв'язків адсорбованої речовини, що перебуває в рідкому стані, з поверхнею адсорбенту. Іноді перелічені види адсорбції супроводжують один одного. Так, у процесах поглинання адсорбентами, що мають пори різних розмірів, часто поєднуються як фізична адсорбція, так і капілярна конденсація. За відсутності сильної взаємодії між сорбентом і сорбатом рівновага встановлюється досить швидко, і швидкість сумарного процесу визначається швидкістю процесу дифузії. Однак на практиці для оцінки кількості речовини, що пройшла через плівку, частіше використовують коефіцієнт проникності, який являє собою добуток коефіцієнта дифузії D на коефіцієнт сорбції δ .

Аналіз та вивчення процесів перенесення речовини в капілярно-пористому тілі обмотки статора дозволило виділити одну з найважливіших умов якісного просочення обмоток електричних двигунів – забезпечення високого ступеня змочування внутрішньої та зовнішньої поверхонь матеріалу, що просочується, оскільки в іншому випадку утворення міцного адгезійного зв'язку між просочувальним складом (адгезивом) та обмоткою (субстратом) буде практично неможливим. Тому адгезія та змочування, як правило, взаємопов'язані і відповідним чином характеризують міжфазову взаємодію, яка підпорядковується закону Юнга [3].

Відповідно до закону Юнга та закону збереження енергії для системи «тверде тіло – рідина – газ», в якій рідина і тверде тіло взаємно не розчинні і не вступають в хімічну реакцію, тобто залишаються постійними і поверхневі натяги рідини на границі з твердим тілом і газом, проекції всіх сил, що діють на границі розділу фаз в точці 0 на будь-яку вісь, що проходить через цю точку, дорівнюють нулю [9]. В ході раніше виконаних досліджень [8] була розглянута величина, яка носить назву критерію змочування і може бути визначена наступним чином:

$$B = \cos \theta = \frac{\sigma_{1,3} - \sigma_{2,3}}{\sigma_{1,2}}. \quad (2.1)$$

Значення даного критерію варіюються в межах $+1 \geq B \geq -1$. Це означає, що при $B > 0$ просочувальна рідина змочує поверхню тіла обмотки ЕД, а при $B < 0$ – не змочує. Слід зазначити, що при неповному змочуванні поверхні вказаного об'єкта, коли $\theta = 0$, в рівняння розрахунку коефіцієнта поверхневого натягу необхідно вводити відповідну поправку [3, 5].

Крім того, як вже було сказано, на поверхні твердого тіла можуть адсорбуватися молекули змочувальної рідини, що призводить до зниження його поверхневого натягу. Особливо сильно адсорбція на поверхні матеріалу, який просочується, впливає на змочування в тих випадках, коли оточуючим середовищем є газ, знижуючи поверхневий натяг твердого тіла від значення $\sigma_{1,3}$ до меншого значення $\sigma^a_{1,3}$.

Різниця $\pi_{ns} = \sigma_{1,3} - \sigma^a_{1,3}$ називається поверхневим тиском, що залежить від природи рідини та твердого тіла [10]. У стані термодинамічної рівноваги периметр змочування межує не з вихідною поверхнею твердої підкладки, а з поверхнею, на якій адсорбовані молекули води та повітря. Таким чином, можна зробити висновок про те, що досягти покращення змочуваності можна зменшенням поверхневого натягу поверхні змочування $\sigma_{2,3}$.

Відомо, що при утворенні поверхні теплота поглинається [1], тобто для кожної окремої поверхні прихована теплота утворення поверхні завжди

позитивна, а, отже, температурний коефіцієнт поверхневого натягу від'ємний. Іншими словами, поверхневий натяг твердого тіла відносно просочуючої рідини знижується з підвищенням температури. Більш точний опис залежності поверхневого натягу на межі розділу від температури запропонував Л. Етвеш [5], зробивши висновок про те, що з підвищенням температури просочуючого складу та просочуваної поверхні твердого тіла можна досягти покращення змочуваності і, як наслідок, якості просочення.

У рамках дослідження було зроблено висновок про те, що навіть рідини, які не змочують поверхню твердого тіла, можуть проникати в пори, канали та капіляри тіла обмотки під дією певного градієнта тиску, створення якого можливе не тільки за рахунок надлишкового тиску, але й за рахунок вакууму певної глибини [8]. Але сама по собі дана можливість ще не означає отримання міцного адгезійного зв'язку, тому було знайдено залежність критерію змочування від роботи адгезії $W_a = \sigma_{1,3} + \sigma_{1,2} - \sigma_{2,3}$ та роботи когезії $W_k = 2 \sigma_{1,2}$.

З виразу (2.1) випливає, що

$$W_a = \sigma_{1,2} \cdot (1 + \cos \theta). \quad (2.2)$$

У такому разі шукана залежність, що носить назву закону Дюпре, набуде такого вигляду:

$$\cos \theta = \frac{2W_a - W_k}{W_k}. \quad (2.3)$$

Таким чином, відповідно до законів Юнга (1) і Дюпре (3), більша різниця між роботою адгезії та когезії відповідає кращій змочуваності просочувальним складом поверхні провідників обмотки. Тобто, чим вищий вплив адсорбції на поверхневий натяг просочуваного матеріалу, тим менша величина роботи адгезії, а, отже, тим гірший і адгезійний зв'язок між поверхнею тіла обмотки і просочувальним складом. Дослідження закономірностей формування адгезійного контакту в реальних ізоляційних системах показало, що слід враховувати кінетику процесів змочування і розтікання, зміну в'язкості під час просочування, а також мікрорельєф поверхні провідників [3, 8].

Зупинимось детальніше на таких показниках якості просочування, як висота підняття рідкого адгезиву в щілинах і порах твердої поверхні, а також глибина проникнення просочувального складу всередину тіла обмотки. Висотою капілярного підняття просочувальної рідини може бути охарактеризовано просочування зразків типу пучка дротів або волокон, а закон Пуазейля, отриманий експериментально в 1840 році, дозволяє задовільно описати рух рідини в капілярах твердого тіла:

$$\frac{\partial \ell}{\partial \tau} = \frac{P_{pm} \cdot r^2}{8 \cdot \eta \cdot \ell}, \quad (2.4)$$

де $\frac{\partial \ell}{\partial \tau}$ - середня лінійна швидкість; ℓ - глибина затікання; η - коефіцієнт динамічної вязкості; $P_{pm} = p_k - \rho \cdot q \cdot \ell \cdot \sin \alpha$ - рухомий тиск, α - кут нахилу капіляра.

Шляхом перетворення рівняння (2.4) було отримано залежність, яка означає, що глибина затікання рідини в капіляр зменшується зі зменшенням його радіуса [8]. Навпаки, висота рівноважного підняття рідини в капілярі, відповідно до закону капілярності, зі зменшенням r збільшується. Час підйому до встановлення гідростатичної рівноваги стовпа рідини буде дорівнювати:

$$\tau = \frac{2 \cdot \eta \cdot \ell^2}{\sigma \cdot r \cdot \cos \theta}. \quad (2.5)$$

З наведених виразів видно, що просочення та змочування реальних капілярно-пористих об'єктів є дуже складним процесом. Тому в ряді випадків користуються загальними залежностями, що дозволяють описувати просочення багатьох реальних пористих тіл [7]:

$$\begin{aligned} \ell^2 &= k \cdot \tau, \\ \ell &= k \cdot \tau^{1/2}. \end{aligned} \quad (2.6)$$

У даному випадку реальну систему розглядають спрощено, наприклад, вводячи поняття про еквівалентний радіус капілярів, припускаючи капіляри наскрізними і т. д.

На підставі розглянутих закономірностей можна зробити висновок про те, що основними факторами, які визначають повноту заповнення нерівностей і пор на поверхні підкладки, є в'язкість, густина і поверхневий натяг лакофарбового матеріалу, а також розміри, форма і розташування пор на поверхні тіла обмотки. При цьому форма капіляра відіграє суттєву роль, оскільки можливе виникнення таких умов, за яких переміщення фронту просочувального складу буде гальмуватися зацмеленим у тупикових порах повітрям [12]. Також, при розгляді впливу процесу адсорбції на якість просочення обмоток електричних двигунів було зроблено висновок про те, що при неврахуванні адсорбції рідини і газу відбувається погіршення розтікання просочувального складу по поверхні провідників обмотки, різке зниження утворення міцного адгезійного зв'язку, зниження проникнення просочувального складу всередину тіла обмотки. Видалення молекул води і повітря з тріщин, пор і капілярів дозволяє збільшити змочувану поверхню. Як показали дослідження [8, 13, 14], досягти цього можна шляхом вакуумування, використовуючи залежність температури кипіння рідини від величини і швидкості зміни тиску. Як відомо, явище переносу енергії і речовини при сушінні підпорядковується загальним закономірностям термодинаміки незворотних процесів [1].

Виходячи з загальної теорії систем, ці процеси можна об'єднати в одну систему, внаслідок чого проявляється тісний внутрішній зв'язок між абстрактною, складною ймовірнісною системою і її фізичною реалізацією. Для вивчення фізичної системи її замінюють абстрактною системою з тими ж відношеннями, і задача стає чисто математичною. Такого роду аналогія має місце і в динамічному випадку, де фізична система представляється системою диференціальних рівнянь.

Аналітична задача, що встановлює зв'язок між часовими та просторовими змінами потенціалів перенесення при сушінні вологих капілярно-пористих матеріалів, сформульована на основі системи диференціальних рівнянь молярно-молекулярного тепломасопереносу, яка є математичною моделлю

процесів перенесення при сушінні [10]. При виведенні системи рівнянь були зроблені наступні припущення:

- температура зв'язаної речовини (вологи) дорівнює температурі скелета тіла;
- конвективне перенесення – величина мала і нею можна знехтувати.

Аналіз даної системи з урахуванням рівняння кінетики сушіння дозволив виділити три основні способи інтенсифікації процесів перенесення речовини в тілі обмотки: збільшення різниці потенціалів Δt , Δu , Δp , збільшення поверхні контактів матеріалу з теплоносієм, збільшення кінетичних коефіцієнтів (коефіцієнтів дифузії, сушіння, теплота масопереносу) [8].

В результаті розв'язання системи диференціальних рівнянь молярно-молекулярного тепломасопереносу в [8] було отримано залежність між безрозмірними величинами U та P [10], яка при заміні граничної умови третього роду граничною умовою першого роду матиме наступний вигляд:

$$\left\{ \begin{array}{l} U(X, F_0) = \frac{Pn \cdot Pd \cdot Lu}{Lu^2 - 1} \cdot F(X, F_0) - 1; \\ P(X, F_0) = Pd \cdot F(X, F_0); \\ F(X, F_0) = F_0 + \frac{1}{2} \cdot (x^2 + 1) + \sum_{m=1}^{\infty} \frac{\cos \vartheta_m}{\vartheta^2 - 1^{m+1}} \cdot \exp(-\vartheta_m^2 F_0). \end{array} \right. \quad (2.7)$$

З наведених виразів видно, що між безрозмірними величинами U та P існує певний зв'язок:

$$U = \frac{Pn \cdot Lu}{Lu^2 - 1} \cdot P + 1, \quad U = k_{c.e} + 1. \quad (2.8)$$

Залежність (2.8) справедлива для відносно великих значень критерію Фур'є. Більш точний зв'язок між безрозмірними потенціалами відносної концентрації та тиску, що дозволяє задавати раціональні режими просочення і сушки, матиме наступний вигляд [8]:

$$U(X, F_0) = 1 - \sum_{m=1}^{\infty} \frac{2 \cdot \cos(\mu_n \cdot X)}{\mu_n - 1^{m+1}} \cdot \exp(-\mu_n^2 F_0) - \frac{Pn \cdot Lu}{Lu^2 - 1} \cdot P. \quad (2.9)$$

Безпосереднє визначення і безперервна реєстрація масовмісту в процесі просочення обмотки статора пов'язані з істотними труднощами. Використовуючи вираз (2.9) і знаючи критерії подібності Ликова і Поснова, можна визначити відносну безрозмірну концентрацію U , реєструючи показання приладу контролю зміни вакууму в автоклаві, що означає, що за характером зміни P , що визначає режим вакуумного просочення і сушіння, можна судити про значення U [8].

Розглянемо термовакuumний процес сушіння ізоляції електродвигунів в математичному представленні. Розв'язок системи диференціальних рівнянь молярно-молекулярного тепломасопереносу при лінійному характері скидання тиску в спрощеному вигляді на основі припущень, що молекулярна складова переносу речовини мала в порівнянні з членом фазового переходу, і що за рахунок тільки конвективного підведення тепла при вакуумуванні можна видалити з обмотки незначну частину зв'язаної речовини від всієї видаленої маси, можна представити як:

$$p_c \cdot \tau = p_0 - e_p \cdot \tau, \quad t_c \cdot \tau = t_0 - e_p \cdot \tau. \quad (2.10)$$

На основі аналізу отриманих залежностей було зроблено висновок про те, що зв'язок між безрозмірною температурою і безрозмірним потенціалом масовмісту має вигляд [10]:

$$U = \frac{1}{1 - K_0} \cdot T. \quad (2.11)$$

Критерієм K_0 у формулі (2.11) характеризуються компоненти зв'язаної речовини в обмотці статора. Знаючи фізичні параметри компонента, що видалається з обмотки, критерій термомеханічного захоплення та безрозмірну температуру T , можна визначити кількість компонента, що видалається.

На основі розглянутих розв'язків математичних моделей просочення та сушіння обмоток електричних двигунів було зроблено висновок, що безрозмірний потенціал масовмісту прямо пропорційний безрозмірним величинам температури та тиску, а, отже, швидкості їх зміни [10]. Тобто, за

однакові проміжки часу безрозмірна відносна концентрація більше зміниться в тому випадку, в якому швидкість зміни зазначених величин вища.

2.2 Шляхи підвищення ефективності використання існуючих технологій ремонту ізоляції АД

На даний час на ремонтних підприємствах, що обслуговують підприємства агропромислового комплексу та промисловості, набули поширення технології просочення та сушіння ізоляції, які забезпечують різні рівні її якості. Одним із шляхів підвищення ефективності використання існуючих технологій ремонту ізоляції АД є обґрунтування параметрів технологічного процесу її просочення та сушіння на основі їх оптимізації. Єдиним, але суттєвим недоліком даного методу є його дорожнеча, тому оптимізація даного методу за економічними критеріями є актуальною задачею.

В процесі проведення технологічних операцій ремонту електродвигунів вимірюються деякі величини, які ми будемо називати частковими показниками якості. Кожен з часткових показників якості є характеристикою успішності виконуваних операцій технологічного процесу.

Основний інтерес представляє технічний аспект використання тих чи інших показників якості.

В даний час для діагностики ізоляції електродвигунів поширення набули тестові засоби діагностики та контролю, що працюють за принципом посилення спеціального сигналу з подальшою його обробкою, а також різні електричні прилади. До діагностуючих приладів, що забезпечують мінімальні затрати при здійсненні процесу оцінки стану ізоляції, належать ручні автоматичні прилади та пристрої періодичного контролю.

До технічних засобів діагностики та контролю обмоток електродвигунів відносяться електромеханічні, цифрові та електронні омметри, вимірювальні мости, спеціальні пристрої для вимірювання добротності та ємності. Найбільшого поширення останнім часом набули аналогові електромеханічні та електронні цифрові прилади. Іноді для вимірювання ємності застосовуються вимірювальні мости. Всі показники якості можна розділити на

електричні та неелектричні величини. До електричних величин віднесемо опір міжвитковий та корпусний, корпусна ємність і т.п. До неелектричних величин віднесемо глибину проникнення лаку в обмотку, лакопоглинання, вологовидалення, коефіцієнт просочення і т.п.

Результати досліджень дозволяють використовувати для оцінки кожного етапу технологічного процесу наступні показники. Якість виконання обмотувально-ізоляційних робіт може бути оцінена наступними величинами: опором ізоляції відносно корпусу R_K та міжвитковим опором R_6 . Етапи сушіння до просочення та сушіння після просочення схожі за фізичними процесами, що протікають. Тому для них будуть характерні одні й ті ж критерії якості: R_K , R_6 , величина вологовидалення A_w , коефіцієнт просочення K_n . Якість просочення може бути оцінена наступними частковими показниками якості: глибиною проникнення лаку h , лакопоглинанням w , коефіцієнтом просочення K_n .

Як статистика, так і теорія інформації мають справу з різноманітністю елементів деякої сукупності, але їх підхід до задач абсолютно різний. Статистика розглядає різноманітність як зло і намагається з'ясувати, що ж можна все-таки стверджувати або зробити, незважаючи на різноманітність. Теорія інформації розглядає різноманітність як позитивне явище, без якого такі операції, як відбір, зв'язок, специфікація, були б неможливі; ця теорія прагне з'ясувати, що можна досягти завдяки деякому ступеню різноманітності. Різноманітність властива кожному природному явищу [3].

На основі інформаційного аналізу вдається отримати наступні результати:

- побудувати оптимальну «класифікацію» явищ та параметрів для даних досліджень (величина кроку рангу, кількість рангів і т.д.);
- виявити область значень параметра, де явище стійке (інваріантне);
- визначити міру залежності явища від кожного стану параметра, від параметра в цілому і від сукупності станів параметрів;
- виключити параметри, пов'язані з явищем побічно, в основному в результаті взаємного зв'язку з деяким третім явищем;

- на підставі виявлених зв'язків створюється можливість для наукової постановки дослідів з вивчення даного явища.

Інформаційний аналіз є лише першим кроком в обробці матеріалу. Але встановлення форми логічної залежності явища від розглянутого набору параметрів вирішується із застосуванням функцій багатозначної логіки [4].

Аналіз існуючих методів діагностики стану ізоляції обмоток АД дозволив запропонувати для використання в ролі узагальнюючого показника якості ізоляції узагальнений діагностичний параметр (УДП) Ψ . Ця величина може бути отримана при використанні методу хвильових згасаючих коливань в обмотці, розробленому в результаті досліджень з діагностики і прогнозування стану електродвигунів в процесі експлуатації. Даний діагностичний параметр найбільш повно характеризує згасаючий коливальний процес, що протікає в обмотці електродвигуна при подачі на неї імпульсу прямокутної форми. Ця характеристика може використовуватися для оцінки стану ізоляції на всіх етапах технологічного процесу ремонту, а також під час експлуатації електродвигуна. Вона є універсальною і замінює групу часткових показників якості.

Діагностичний параметр Ψ відображає інтенсивність згасання хвильових коливань в обмотці електричної машини. Він є величиною непрямого вимірювання, тобто отримується шляхом математичної обробки результатів прямих вимірювань. Вищезазначена діагностична апаратура вимірює такі величини як амплітуда першого півперіоду, амплітуда другого півперіоду, період коливань T (мкс).

В результаті логічного аналізу було отримано наступну залежність для УДП.

$$\Psi = K_{Г.В.} \vee (K_{TC} \vee K_{Tnp} \vee K_m) \otimes K_{В.У.} \otimes K_{tc},$$

де K – ефективність каналу зв'язку: $K_{Г.В.} = 0,262$ – глибина вакууму; $K_{TC} = 0,171$ – час сушіння; $K_{Tnp} = 0,167$ – час просочення; $K_m = 0,163$ – температура просочення; $K_{В.У.} = 0,103$ – кількість вакуумних ударів; $K_{tc} = 0,033$ – час сушіння.

Дана логічна залежність виражає наступне:

а) в моделі параметри вишикувані за ступенем впливу на УДП зліва направо, а значення ефективностей каналу зв'язку кожного з параметрів виражають кількісне вплив кожного з параметрів на УДП;

б) логічна функція диз'юнкції, позначена \vee , відображає прямо пропорційну залежність між відповідним параметром і УДП, а функція \otimes логічного множення відображає неоднорідний характер залежності між УДП і параметром (в нашому випадку прямо пропорційну залежність до певного значення параметра);

в) дужки позначають приблизно одна- кове значення ефективності каналу зв'язку параметрів, що знаходяться в них, а, відтак, приблизно однаковий вплив кожного з параметра в дужках на УДП.

Метод суцільного перебору варіантів найбільш простий у реалізації процедур порівняння. У випадку розв'язання задач з обмеженнями він полягає у послідовному відборі варіантів, що задовольняють встановленим умовам. Спочатку обчислюються значення терміну служби та єдиного економічного критерію, які характеризують ефективність використання кожної технології відновлення ізоляції стосовно заданих умов експлуатації.

У випадку вибору стратегії мінімізації єдиного економічного критерію при обмеженні терміну служби та часу ремонту здійснюється послідовний відбір варіантів за умовами обмеження часу ремонту та обмеження мінімального терміну служби. З варіантів, що залишилися, обирається варіант з мінімальним значенням єдиного економічного критерію.

У разі вибору стратегії максимізації терміну служби при обмеженні значень єдиного економічного критерію та часу ремонту проводиться послідовний відбір варіантів за умовами обмеження єдиного економічного критерію та обмеження часу ремонту. З варіантів, що залишилися, вибирається варіант з максимальним значенням терміну служби.

У разі вибору стратегії мінімізації часу ремонту при обмеженні терміну служби та єдиного економічного критерію проводиться послідовний відбір

варіантів за умовами обмеження значень єдиного економічного критерію та обмеження мінімального терміну служби. З варіантів, що залишилися, вибирається варіант з мінімальним значенням часу ремонту.

Висновки по другому розділу

Отримана модель дозволяє визначити кількісну оцінку впливу кожного з факторів на показник якості ремонту, ступінь спільного впливу на вихідний параметр.

РОЗДІЛ 3

ПОРІВНЯЛЬНА ОЦІНКА РІЗНИХ СПОСОБІВ СУШІННЯ ІЗОЛЯЦІЇ ОБМОТОК ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ

Зволоження ізоляції обмоток є значною причиною виходу з ладу електродвигунів (ЕД) у промисловому виробництві. У сільському господарстві з цієї причини виходять з ладу до 20 % ЕД. Теплові способи сушіння ізоляції обмоток мають характерні недоліки: ЕД потрібно розбирати та демонтувати з робочого місця; ізоляція обмоток ЕД схильна до термічної деструкції; підвищена витрата електроенергії; великі трудовитрати і т. д.

На сьогоднішній день розроблено електроосмотичне сушіння (ЕОС), яке базується на електрокінетичних явищах. ЕОС можна застосовувати спільно з легким струмовим підігрівом або з тепловою конвекцією обмоток ЕД. Таким чином, на основі ЕОС додатково розроблено електроосмотеплове та конвективно-електроосмотичне сушіння.

Електроосмотичне сушіння — це сучасний метод нетеплового зневоднення ізоляції обмоток електродвигунів і генераторів, заснований на принципі електроосмосу, коли під дією постійного електричного поля волога переміщується з мікротріщин ізоляції назовні, не вимагаючи розбирання обладнання, що подовжує термін його служби та підвищує надійність.

Процес використовує імпульси струму для «витягування» води, запобігаючи перегріву та деградації ізоляції, і може застосовуватися як для низьковольтних (до 1000 В), так і для високовольтних машин.

Принцип дії сушіння ізоляції:

- *Електроосмос:* В основі лежить переміщення молекул води під дією електричного поля. Мікротріщини в ізоляції діють як капіляри, і електричний струм змушує вологу виходити з них.

- *Імпульсний струм:* Пристрої генерують спеціальні імпульси струму, які ефективно «витягують» вологу зсередини ізоляції назовні.

- Нетепловий процес: На відміну від традиційного конвективного сушіння гарячим повітрям, цей метод не викликає теплового старіння та короблення ізоляції, працюючи навіть за 100% вологості повітря.

Переваги електроосмотичного сушіння:

- Сушіння без розбирання: Обладнання можна сушити прямо на місці встановлення.
- Продовження ресурсу: Запобігає термічній деструкції та підвищує надійність електричних машин.
- Діагностика: Дозволяє діагностувати стан ізоляції.
- Усунення «розпарювання»: Ефективно бореться з початковим зниженням опору ізоляції під час вмикання.

ЕОС позбавлене недоліків, властивих тепловим методам сушіння. Електроосмотичне сушіння (без струмового підігріву та теплової конвекції) відбувається без підвищення температури і є холодним сушінням. Принцип ЕОС реалізовано в пристроях УЕСІ-0,4кВ, УЕСІ-3-10кВ, ВУЕОС-6-10кВ, УЕСТ-0,6 кВ, а також в пристроях вологозахисту електрообладнання УВНЕД-1, УВНЕД-1М, УЕВ-6-10кВ, УВНЕД-2. Пристрої сушіння (ПС) успішно експлуатуються на багатьох промислових та сільськогосподарських підприємствах України[11].

3.1 Розрахунок ефекту теплових та розроблених способів сушіння ізоляції обмоток електродвигунів

Особливості теплових і розроблених способів сушіння ізоляції обмоток електродвигунів наведено на рис. 3.1. При порівнянні цих способів виявляються переваги нових розробок: енергоекономічність, зниження трудовитрат і т. ін.

Розрахунки ефекту від використання нових пристроїв сушіння стосовно виробництва виконувалися за алгоритмами описаними нижче. Обчислення здійснювалися для наступних способів і пристроїв сушіння:

- пічне сушіння (ПС): сушильна шафа СНОЛ 3,5 × 3,5 для ЕД 0,25–2,2 кВт;
- сушильна шафа з нагрівачами 10 кВт для ЕД 3–55 кВт;

- струмове сушіння (СС): трансформатор трифазний для живлення інструменту ТСІ-2,5; зварювальний трансформатор ТД-102;
- електроосмотичне сушіння: пристрій ЕОС; – конвективне сушіння (КС): пристрій КС (УКС);
- конвективно-електроосмотичне сушіння (КЕС): пристрій КЕС.

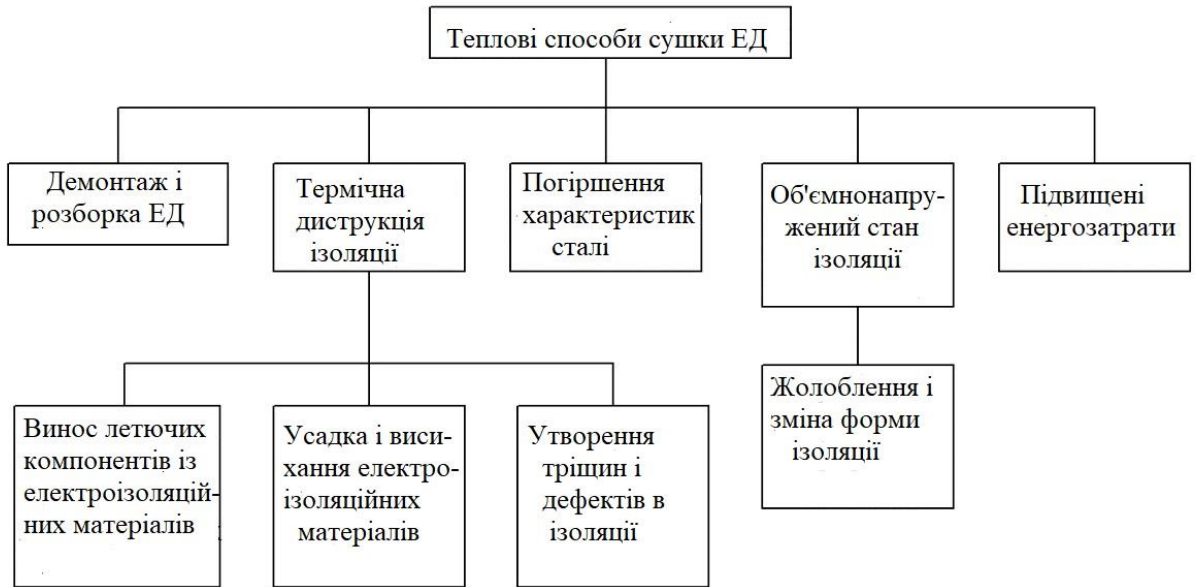


Рисунок 3.1. Особливості теплових способів сушіння

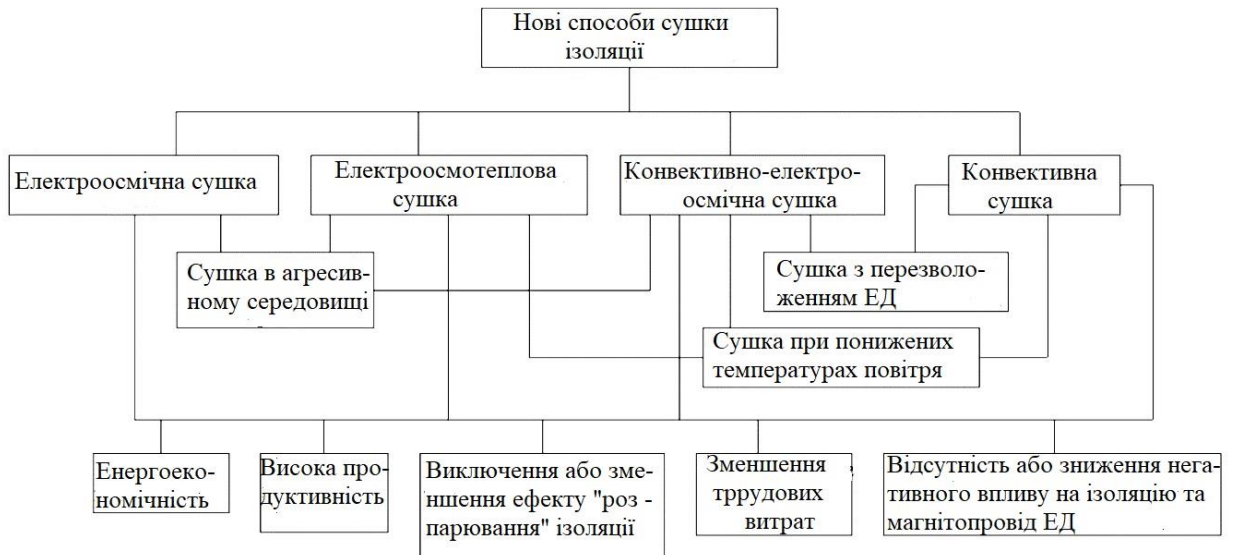


Рисунок 3.2. Особливості розроблених способів сушіння

Найбільш поширені теплові способи сушіння ПС, СС і КС можуть слугувати базою для порівняння з новими способами ЕОС і КЕС. Варіант КС, запропонований для розрахунку, має багато переваг і відрізняється від відомих

способів зниженими трудовитратами за рахунок виключення розбирання ЕД. Ефект від використання нового ПС для однієї сушки i -го за потужністю ЕД визначається за формулами [15]:

$$E_i = z_{1i} \cdot T_{1i} \cdot \alpha - z_{2i} \cdot T_{2i} + (B'_{1i} - B'_{2i}), \quad (3.1)$$

або

$$E_i = (z_{1i} \cdot T_{1i} \cdot \alpha + B'_{1i}) - (z_{2i} \cdot T_{2i} + B'_{2i}).$$

де z_{1i}, z_{2i} – питомі наведені витрати на використання відповідно базової та нової УС ЕД протягом години, грн/год; T_{1i}, T_{2i} – тривалість однієї операції сушіння обмоток ЕД i -ї групи відповідно за допомогою базової та нової УС, год; B'_{1i}, B'_{2i} – додаткові витрати споживача понад витрати, враховані у наведених витратах (демонтаж та монтаж ЕД, транспортування до місця сушіння ЕД), у розрахунку на одну операцію сушіння, грн; α – коефіцієнт, що враховує зміну терміну служби нової УС у порівнянні з базовою [15]:

$$\alpha = \frac{P_1 + E_n}{P_2 + E_n}, \quad (3.2)$$

тут P_1, P_2 – частки відрахувань від балансової вартості на реновацію базового та нового УС ($P = I/T_c$); T_c – термін служби УС з урахуванням зносу, років; E_n – нормативний коефіцієнт ефективності ($E_n = 0,15$).

Виділення тривалості сушіння обмоток ЕД як окремого показника дозволяє привести порівнювані варіанти до співставного вигляду за обсягом виконуваної роботи. Питомі наведені витрати за кожним варіантом порівнюваних пристроїв дорівнюють

$$z = \frac{Z}{T_p}, \quad (3.3)$$

де Z – наведені витрати на виготовлення УС, грн.; T_p – час роботи пристроїв, год.

Час роботи пристроїв з урахуванням їх постійної завантаженості приймемо рівним річному фонду робочого часу при однозмінній роботі робітників, оскільки однозмінна організація праці набула найбільшого поширення серед працівників електроенергетичних служб у промисловому та

сільськогосподарському виробництві. При наявності двозмінної роботи необхідно врахувати коригувальний коефіцієнт K_c , тоді

$$z = \frac{Z}{T_p K_c}, \quad (3.4)$$

де $K_c = 2$.

Приведені витрати визначаються наступним чином:

$$Z = E_n K + B, \quad (3.5)$$

де K – капітальні вкладення на виготовлення одного пристрою, грн.; B – щорічні витрати виробництва, грн.

Зважаючи на відсутність витрат у процесі будівництва будівлі, споруди, виробництва оснащення тощо, в розрахунок приймаємо лише прямі капітальні вкладення на виготовлення УС:

$$z = C_0 \cdot n \cdot (1 + \sigma_m + \sigma_b + \sigma_n), \quad (3.6)$$

де C_0 – оптова ціна обладнання, для пристроїв визначається за даними прејскурантів²; σ_t – коефіцієнт, що враховує транспортно-заготівельні витрати, пов'язані з придбанням обладнання; σ_b – коефіцієнт, що враховує витрати на будівельні роботи; σ_n – коефіцієнт, що враховує витрати на монтаж та налагодження обладнання.

Оптова ціна для нововиготовлених пристроїв за відсутності аналога за головним параметром визначається так:

$$C_0 = Z_n + P, \quad (3.7)$$

де Z_n – повні витрати на виробництво пристрою, грн.; P – плановий прибуток, грн.

На стадії проектних розробок повні витрати на виробництво пристрою визначаємо наближеним методом за структурою витрат на аналогічну техніку:

$$Z_n = \frac{Z_m}{\gamma}, \quad (3.8)$$

де Z_m – вартість основних матеріалів та напівфабрикатів для виготовлення проєктованих пристроїв з урахуванням транспортно-заготівельних витрат,

грн.; γ – питома вага цих витрат до повних витрат на виробництво аналогічного обладнання (для нашого випадку прийнято рівним 0,72).

Витрати на матеріали обчислюємо за формулою[16]

$$Z_m = \sum_{j=1}^n C_{nj} \cdot K_{mj}, \quad (3.9)$$

де $j = (1, \dots, n)$ – групи матеріалів та напівфабрикатів; C_{nj} – оптова ціна матеріалів та напівфабрикатів i -ї групи, грн.; K_{mj} – коефіцієнт, що враховує транспортно-заготівельні витрати для j -ї групи матеріалів та напівфабрикатів (прийmemo $K_{mj} \approx 1,03-1,05$).

За відсутності фактичних даних на проєктній стадії розробки плановий прибуток у першому наближенні визначається як

$$П = \beta (Z_n - Z_m), \quad (3.10)$$

де β – коефіцієнт, що враховує величину планового прибутку (приймаємо середньогалузеве значення, що дорівнює 0,41).

Річні витрати на експлуатацію електрообладнання знаходимо за формулою

$$B = B_a + B_{об} + B_e, \quad (3.11)$$

де B_a – витрати на амортизацію обладнання (повне відновлення та капітальний ремонт), грн.; $B_{об}$ – витрати на обслуговування, грн.; B_e – вартість втрат електроенергії, грн.

Витрати на амортизацію обчислюються так:

$$B_a = \frac{H_a \cdot K}{100}, \quad (3.12)$$

де H_a – норма амортизаційних відрахувань, %; K – початкові капітальні вкладення, грн.

Витрати на обслуговування включають в основному витрати на оплату праці обслуговуючого персоналу та поточний ремонт[16]:

$$B_{об} = \frac{H_{об} \cdot K}{100}, \quad (3.13)$$

де $H_{об}$ – норма щорічних витрат на поточний ремонт та обслуговування.

Витрати на втрати електроенергії в УС та при нагріванні обмоток ЕД i -ї групи розраховуються за формулою

$$B_e = b_0 \cdot (\Delta P_{yi} + \Delta P_{gi}) \cdot T_p, \quad (3/14)$$

де ΔP_{yi} – втрати потужності в УС i -ї групи ЕД, кВт; ΔP_{gi} – втрати потужності при сушінні нагріванням обмоток ЕД i -ї групи, кВт; b_0 – тариф на електроенергію для споживачів, грн/кВт.

Втрати потужності ΔP_{gi} визначаються розрахунковим шляхом, а ΔP_{yi} – за паспортними даними УС.

3.2 Розрахунок енергозатрат на сушку ізоляції АД різними способами

Енерговитрати різних установок для сушіння ізоляції ЕД потужністю 3 кВт наведено в табл. 3.1. Найбільш енергоємними є сушіння зварювальними трансформаторами та в сушильній шафі, а найбільш енергоощадними – сушіння пристроями ЕОС (УЕОС) та КЕС (УКЕС). Витрати на ЕОС слід відзначити особливо. Вони становлять всього 0,5 % по відношенню до енерговитрат під час ТС за допомогою зварювальних трансформаторів. Тривалість сушіння визначено експериментально.

Витрата електроенергії на сушіння ЕД різних потужностей наведена в табл. 3.2. Висновки аналогічні поясненню до табл. 3.1. Зазначимо, що зі збільшенням потужності ЕД енерговитрати на сушіння УКЕС зменшуються швидше, ніж для інших способів сушіння, і для ЕД 55 кВт поступаються лише УЕОС.

Результати розрахунку економічної ефективності сушіння ЕД потужністю 3 кВт різними способами представлено в табл. 3.3. Мінімальні питомі зведені витрати на 1 годину роботи установки та максимальний ефект на одне сушіння з урахуванням транспортних витрат має УЕОС.

Таблиця 3.1. Витрата електроенергії на сушіння ізоляції електродвигуна потужністю 3 кВт за допомогою різних установок

Пристрій сушки	Споживана потужність, кВт/ЕД	Тривалість сушки, г	Витрати електроенергії, кВт·ч	Порівняльна оцінка витрат електроенергії, %
Сушильний шкаф на 10 кВт	2,5	3,67	9,18	155,0
Трансформатор ТСИ-2,5	0,15	0,92	0,14	2,4
Зварювальний трансформатор ТД-102	18,0	0,92	5,91	100,0
УЕОС	0,02	1,6	0,03	0,5
УКС	0,77	1,5	1,16	19,6
УКЕС	0,79	0,6	0,47	8,0

Таблиця 3. 2. Витрата електроенергії на сушіння ізоляції електродвигунів за допомогою різних установок

Пристрій сушки	Витрата електроенергії, кВт·г, на сушку ЕД різних потужностей, кВт									
	0,25	1,1	2,2	3,0	5,5	7,5	11,0	18,5	30,0	55,0
Сушильний шкаф СНОЛ 3,5 × 3,5	1,99	4,80	7,61	–	–	–	–	–	–	–
Сушильний шкаф на 10 кВт	–	–	–	9,18	15,6	24,2	26,5	57,0	65,0	85,0
Трансформатор ТСИ-2,5	0,02	0,07	0,11	0,14	0,19	0,22	0,26	0,39	0,74	1,27
Зварювальний трансформатор ТД-102	0,83	3,20	4,82	5,91	6,91	7,56	8,23	9,67	11,8	17,2
Зварювальний трансформатор ТД-500	2,33	8,97	13,5	16,5	19,3	21,0	22,9	26,8	32,6	46,9
УЕОС	0,025	0,029	0,031	0,032	0,035	0,038	0,042	0,052	0,060	0,069
УКС	0,39	0,71	0,96	1,16	1,41	1,48	0,54	1,67	1,85	2,27
УКЕС	0,13	0,29	0,38	0,47	0,53	0,55	0,59	0,68	0,81	1,08

У табл. 3.3 не враховано тривалість сушіння, тому з корекцією тривалості операції сушіння визначимо приведені витрати на одне сушіння для трьох випадків:

1. На ремонтній базі підприємства є централізована УС (установка сушіння). Вологі ЕД (електродвигуни) доставляються до місця сушіння, і тому враховуються витрати на транспортування з припущення середньої відстані перевезення в 3 км. У цьому випадку найкращі показники будуть при сушінні УЕОС (установка електроозонового сушіння), а найгірші – при використанні сушильних шкаф. Інші варіанти практично рівнозначні.

2. УС розташовуються безпосередньо на підприємствах. Для ЕД 4 кВт і вище витрати на сушіння пристроями УКЕС (установка контактної електросушіння), УЕОС, ТСИ-2,5 приблизно однакові, а застосування сушильних шкаф також не вигідне.

3. УС на підприємствах немає, але при необхідності їх привозять. Тут враховуються транспортні витрати з доставки самих УС, якщо їх вага перевищує допустиму для ручного перенесення. Транспорт необхідний для доставки сушильної шафи і трансформаторів ТСИ-2,5, ТД-102. Видно, що мінімум витрат мають УЕОС, потім ідуть УКЕС, УКС (установка конвективного сушіння).

Таблиця 3.3. Розрахунок економічної ефективності різних способів, що застосовуються для сушіння електродвигунів потужністю 3 кВт[17]

Економічні показники	Спосіб сушки					
	ПС	ТС		ЭОС	КС	КЭС
	Установки сушки					
	Сушильний шкаф на 10 кВт	Трансформатор ТСИ-2,5	Зварювальний трансформатор ТД-102	УЭОС	УКС	УКЭС
Капітальні затрати, грн.	19816,16	4999,77	18291,84	5352,54	14938,3	20290,9
Витрати на амортизацію і експлуатаційне обслуговування, грн.	2873,34	469,27	7023,85	572,71	1941,3	2512,95
Кошторис затрат на електроенергію, грн./г	8513,33	521,54	21884,88	68,59	2621,8	2690,42
Питомі приведені затрати, грн./г	6,89	0,84	15,13	0,70	3,26	3,95
Додаткові затрати споживача, грн./сушку	721,87	130,66	130,66	–	130,66	130,66
Приведені затрати на 1 сушку з урахуванням транспортних витрат, грн.	746,92	131,74	144,81	1,09	135,01	133,92
Приведені витрати на 1 сушку без урахування транспортних витрат, грн.	616,26	0,76	122,82	1,09	4,90	2,40
Ефект від використання УС для 1 сушки з урахуванням транспортних витрат, грн.	–	615,17	590,13	742,56	611,91	614,08
Ефект від використання УС для 1 сушки без урахування транспортних витрат, грн.	–	612,99	590,13	611,91	611,91	614,08

Для цих же трьох випадків розраховано економічний ефект від використання УС для однієї операції сушіння. За базу для порівняння прийнято варіант сушіння ЕД в сушильній шафі. Аналізуючи результати, можна зробити висновок, що УЕОС найбільш ефективна в першому випадку.

Для другого випадку вигідний варіант УКЕС. У третьому випадку найоптимальнішим є сушіння УКС, а УЕОС і УКЕС за ефективністю близькі до УКС.

Таблиця 4.4. Економічні показники сушіння електродвигунів з перезволоженими обмотками

Економічні показники	Потужність електродвигуна, кВт									
	0,37	0,55	0,75	1,1	1,5	2,2	3,0	4,0	7,5	18,0
Сушильний шкаф										
Питомі приведені витрати, грн./г	6,76	6,76	6,76	6,76	6,76	6,76	6,89	9,17	13,7	27,55
Додаткові затрати на демонтаж і монтаж ЕД, грн./сушку	591,22	591,22	591,22	591,22	591,22	591,22	591,22	685,94	685,94	685,94
Установка КЕС										
Питомі приведені затрати, грн./г	4,61	4,61	4,61	4,61	4,61	4,61	4,61	4,61	4,61	4,61
Додаткові затрати на демонтаж і монтаж ЕД, грн./сушку	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Ефект від використання УС для 1 сушки, грн./сушку	597,75	599,93	602,11	606,46	608,64	614,08	624,97	737,12	838,38	1055,05

Висновки по третьому розділу

Підсумкові розрахунки показали, що економічний ефект від впровадження розроблених пристроїв електроосмотичного сушіння забезпечується за рахунок підвищення продуктивності праці в 1,5–11,4 рази, економії електроенергії у 80–1 230 разів залежно від потужності ЕД, а також підвищення довговічності ізоляції шляхом зведення деструкції до нуля (електроосмотичне сушіння та вологозахист) або зменшення її в 10 разів (конвективно-електроосмотичне сушіння).

У разі доставки пристроїв до місця сушіння ЕД найбільш економічними є розроблені пристрої електроосмотичного та конвективного сушіння, установка конвективно-електроосмотичного сушіння. Для ЕД з перезволоженими обмотками ефект від застосування установки конвективно-електроосмотичного сушіння в процесі одного сушіння сягає 1 055 грн. (у цінах на 31.12.20), причому УКЕС доцільно використовувати для сушіння ізоляції ЕД підвищеної потужності.

ВИСНОВКИ

Пол проведеним дослідженням в ході виконання роботи можна зробити наступні висновки:

1. Специфічні і важкі умови експлуатації АД в сільському господарстві призводять до зниження надійності і довговічності електродвигунів.

В загальному випадку середній термін служби АД становить 20000 годин (близько 5 років) і коливається в залежності від сфери застосування. Асинхронні двигуни нерідко працюють у вельми важких умовах при незадовільному обслуговуванні або зовсім без будь-якого догляду. У практиці електромашинобудування для підвищення надійності ізоляційних конструкцій низьковольтних електродвигунів використовується просочення та сушка їх обмоток.

2. Аналіз способів сушіння обмоток ЕМ визначив, що основним недоліком конвекційного, індукційного, терморадіаційного, струмового методів є тривалий перебіг процесу сушіння, внаслідок чого зростають енерговитрати, а отже, і фінансові витрати. Використання електроосмотичного методу небажане з огляду на, по-перше, тривалий перебіг процесу сушіння, а, по-друге, відсутність нагрівання виробу перед просоченням, як однієї з умов інтенсифікації останнього. Під час сушіння після просочення цей метод не може використовуватися взагалі. Недоліками вакуумного та швидкісного електротермовакuumного методу є необхідність використання спеціального обладнання та значні витрати на створення найбільш ефективних режимів сушіння.

3. Аналіз існуючих методів діагностики стану ізоляції обмоток АД дозволив запропонувати для використання в ролі узагальнюючого показника якості ізоляції узагальнений діагностичний параметр (УДП). Даний діагностичний параметр найбільш повно характеризує згасаючий коливальний процес, що протікає в обмотці електродвигуна. Ця характеристика може використовуватися для оцінки стану ізоляції на всіх етапах технологічного

процесу ремонту, а також під час експлуатації електродвигуна. Вона є універсальною і замінює групу часткових показників якості.

4. Підсумкові розрахунки різних способів сушіння ізоляції обмоток електродвигунів показали, що економічний ефект від впровадження розроблених пристроїв електроосмотичного сушіння забезпечується за рахунок підвищення продуктивності праці в 1,5–11,4 рази, економії електроенергії у 80–1 230 разів залежно від потужності ЕД, а також підвищення довговічності ізоляції шляхом зведення деструкції до нуля (електроосмотичне сушіння та вологозахист) або зменшення її в 10 разів (конвективно-електроосмотичне сушіння).

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Нікольський, О. І. Моделювання теплових процесів в РЕА : навчальний посібник /О. І. Нікольський, О. П. Шеремета. – Вінниця : ВНТУ, 2017. – 116 с.
2. В. І. Стецюк, М. Ю. Власюк МОДЕЛЮВАННЯ ТЕПЛОВИХ ПРОЦЕСІВ ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИН/ Вісник Хмельницького національного університету, №6, 2020 (291). – С. 141-145
3. Осташевський М. О., Петренко О. М. , Юр'єва О. Ю. О 76 Теплові розрахунки електричних машин : навч. посібник / М. О. Осташевський, О. М. Петренко, О. Ю. Юр'єва – Харків : ХНУМГ ім. О.М. Бекетова, 2020. - 450 с.
4. Експлуатація і ремонт електротехнічного обладнання. Методичні вказівки до лабораторної роботи № 17 «Технологія сушіння обмоток електродвигунів» для здобувачів ступеня вищої освіти «Бакалавр» зі спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка». - Таврійський державний агротехнологічний університет, 2017. – 21 с.
5. Ермолаев С. А. Эксплуатация энергооборудования в сельском хозяйстве / С.А. Ермолаев, Е.П. Масюткин, В.Ф. Яковлев- К.: Фирма «Инкос», 2005. - 670с.
6. Бондар В.М. Практична електротехніка для робітничих професій: [Підруч. для учнів проф.-навч. закладів з різноманіт. галузей пром.-сті та побут, обслуг] / Бондар В.М., Гаврилюк В.А., та ін. - К.: Веселка, 1997. - 191 с.
7. Єгоров Г.П. Пристрій, монтаж, експлуатація та ремонт промислових електроустановок [Підручник для професійно-технічних учбових закладів та підгот. робітників на виробі] / Єгоров Г.П., Коварський О.І. М., "Вища школа", 1972 (І кв.) 352 с. з ілл.
8. Кисаримов Р.А. Довідник електрика / Кисаримов Р.А. К.: Веселка, 1998. - 253 с.
9. vpu7.com.ua/documents/e-library/spec-tech-eroe/67.pdf
10. Лут М.Т., Мірошник О.В., Трунова І.М.. Основи технічної експлуатації енергетичного обладнання АПК.: Підручник для студентів ВНЗ. – Харків: Факт, 2008. - 438 с

11. <https://leg.co.ua/info/elektricheskie-mashiny/tehnologiya-i-oborudovanie-proizvodstva-elektricheskikh-mashin-63.html>
12. <https://leg.co.ua/info/elektricheskie-mashiny/propitka-i-sushka-elektrovdigateley.html>
13. leg.co.ua/info/elektricheskie-mashiny/propitka-i-sushka-elektrovdigateley.html
14. http://www.ni.biz.ua/6/6_4/6_46939_propitka-i-sushka-obmotok-metodi-ih-dostoinstva-i-nedostatki.html
15. Монтаж, ремонт та експлуатація обладнання Практикум з дисципліни для студ. напряму 6.050503 ««Машинобудування» професійного спрямування «Обладнання переробних і харчових виробництв» (Обладнання м'ясо-молочних виробництв) ден. та заочн. форм навч. / Уклад.: І.Г. Бабанов, В.М. Таран, О.І. Бабанова. – К.: НУХТ, 2013. – 66 с.
16. eq.nja.v.ua/articles/vartist-materialiv-dlja-remontu-elektrovdiguniv.html
17. mogfe.rkku.v.ua/articles/vitrata-materialiv-pid-chas-remontu.html
18. Методичні вказівки до виконання практичних занять за курсу «Організація та управління енергетичним господарством» для студентів спеціальності 7.05070108 «Енергетичний менеджмент». Укл.: ст. викладач Шрамко Ю.Ю. – Дніпродзержинськ, ДДТУ, 2013, с.