

**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ
ІНСТИТУТ ЕНЕРГЕТИКИ, АВТОМАТИКИ І ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ**

ПОГОДЖЕНО
Директор ННІ енергетики,
автоматики і енергозбереження

проф., д.т.н. _____ **КАПЛУН В.В.**
(підпис)

« _____ » 2026 p.

ДОПУСКАЄТЬСЯ ДО ЗАХИСТУ
Завідувач кафедри
електротехніки, електромеханіки та
електротехнологій

ДОЦ., К.Т.Н. ОКУШКО О.В.
(підпис)

«_____» _____ 2026 p.

МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

**на тему: «ОПТИМІЗАЦІЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ
ДІАГНОСТУВАННЯ НЕСПРАВНОСТЕЙ БАГАТОШАРОВИХ ОБМОТОК
ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПРИСТРОЇВ»**

Спеціальність 141 – електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

Освітня програма Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

Орієнтація освітньої програми освітньо-професійна

Гарант освітньої програми

К.Т.Н., ДОЦЕНТ
(науковий ступінь та вчене звання)

(підпис)

Чуєнко Р.М.

(ПИБ)

Керівник магістерської кваліфікаційної роботи

К.Т.Н., ДОЦЕНТ
(науковий ступінь та вчене звання)

(підпис)

Чуєнко Р.М.

(ПИБ)

Виконав

(підпис)

Костючик І.І.

(ПИБ)

КИЇВ – 2026

**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ
ІНСТИТУТ ЕНЕРГЕТИКИ, АВТОМАТИКИ І ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ**

ЗАТВЕРДЖУЮ

**Завідувач кафедри електротехніки,
електромеханіки та електротехнологій**

К.Т.Н., доц.

Окушко О.В.

(підпис)

« »

2026 р.

ЗАВДАННЯ

**ДО ВИКОНАННЯ МАГІСТЕРСЬКОЇ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ
ЗДОБУВАЧУ**

Костючику Івану Івановичу

Спеціальність 141 – електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

Освітня програма Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

Орієнтація освітньої програми освітньо-професійна

Тема магістерської кваліфікаційної роботи: «Оптимізація технологічних процесів діагностування несправностей багатошарових обмоток електромагнітних пристроїв»

затверджена наказом від 18.11.2024 № 2061”З”

Термін подання завершеної роботи на кафедру 14. 11. 2025

Вихідні дані до магістерської кваліфікаційної роботи: «Правила устаткування електроустановок»; «Правила технічної експлуатації електроустановок споживачів»; «Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів».

Перелік питань, що підлягають дослідженню:

1. Існуючі технології обробки кормів для птахів, їхні недоліки та переваги
2. Принципи дії електротехнологічного обладнання для обробки кормів
3. Розробка електротехнічного комплексу для покращення якості кормів
4. Економічна ефективність розробленого комплексу
5. Питання охорони праці на виробництві

Перелік графічного матеріалу: презентація виконана в програмному забезпеченні MS Power Point

Дата видачі завдання «19» листопада .2024 р.

**Керівник магістерської
кваліфікаційної роботи**

Завдання прийняв до виконання

(підпис)

(підпис)

Чуєнко Р.М.

(ПІБ)

Костючик І.І.

(ПІБ)

РЕФЕРАТ

Магістерська робота: 70 с., 12 рис., 11 табл., 30 джерел.

Мета дослідження. Підвищення ефективності діагностування несправностей багатошарових обмоток електромагнітних пристроїв шляхом удосконалення технологічних процесів контролю та застосування сучасних методів аналізу їх технічного стану.

Об'єкт дослідження. Процеси діагностування технічного стану багатошарових обмоток електромагнітних пристроїв.

Предмет дослідження. Методи і засоби виявлення несправностей багатошарових обмоток, а також способи підвищення точності та швидкості їх діагностування.

Дослідження проводились із застосуванням сучасних методик. Обробка результатів експерименту виконувалась на персональному комп'ютері з використанням табличного процесора Microsoft Excel, що дозволило здійснити побудову графічних залежностей та аналіз отриманих даних.

В магістерській роботі розглянуто вибір методів і засобів діагностування несправностей багатошарових обмоток електромагнітних пристроїв.

Проаналізовано питання безпеки праці. Проводяться техніко-економічні розрахунки.

Положення що виносяться на захист:

- Аналіз існуючих методів діагностування обмоток електромагнітних пристроїв з метою підвищення достовірності виявлення несправностей;
- Дослідження впливу конструктивних параметрів обмоток на результати діагностування;
- Проведення експериментальних досліджень із визначення залежностей електричних параметрів обмоток від їх технічного стану;
- Обробка та аналіз отриманих експериментальних даних з використанням сучасних програмних засобів;

- Розробка рекомендацій щодо оптимізації технологічного процесу діагностування обмоток електромагнітних пристроїв;
- Оцінка ефективності запропонованих підходів до діагностування;
- Забезпечення безпечних умов проведення експериментальних досліджень.

ЗМІСТ

ВСТУП	8
РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ТА АНАЛІЗ МЕТОДІВ ДІАГНОСТУВАННЯ ОБМОТОК ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПРИСТРОЇВ. 10	
1.1 Конструкція та особливості багат шарових обмоток електромагнітних пристроїв	10
1.2 Основні види пошкоджень та причини їх виникнення	13
1.3 Аналіз існуючих методів діагностування обмоток	15
1.4 Недоліки існуючих методів та особливості їх застосування	19
1.5 Обґрунтування напрямку оптимізації процесу діагностування	21
РОЗДІЛ 2. РОЗРОБКА ТА ОБҐРУНТУВАННЯ МЕТОДУ ДІАГНОСТУВАННЯ ОБМОТОК ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПРИСТРОЇВ	23
2.1 Обґрунтування підходу до діагностування обмоток	23
2.2 Суть запропонованого методу діагностування	24
2.3 Фізична модель процесів в обмотках електромагнітних пристроїв	26
2.4 Параметри, що використовуються для діагностування	27
2.5 Алгоритм діагностування обмоток електромагнітних пристроїв	29
РОЗДІЛ 3. РОЗРАХУНОК ТА АНАЛІЗ ЕЛЕКТРИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ОБМОТОК ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПРИСТРОЇВ	32
3.1 Аналіз активного опору обмоток на початку експерименту	32
3.2 Аналіз зміни активного опору після нагрівання	35
3.3 Аналіз зміни активного опору внаслідок нагрівання трансформатора	38
3.4 Аналіз впливу кількості витків на струм обмотки	40
3.5 Дослідження залежності струму від кількості витків обмотки	41
3.6 Узагальнення результатів розрахункового аналізу	45
РОЗДІЛ 4. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ ДІАГНОСТУВАННЯ ОБМОТОК ЕЛЕКТРОДВИГУНА З ВИКОРИСТАННЯМ ІДО-05	46
4.1 Опис експериментального стенда	46
4.2 Призначення, будова та принцип роботи пристрою ІДО-05	50
4.3 Проведення експериментальних досліджень	55
4.4 Аналіз роботи експериментального стенда та процесу діагностування	57
РОЗДІЛ 5. ОХОРОНА ПРАЦІ ПРИ ДІАГНОСТУВАННІ ОБМОТОК ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПРИСТРОЇВ	60

5.1 Небезпечні та шкідливі виробничі фактори під час проведення діагностування.....	60
5.2 Технічні та організаційні заходи безпеки	62
5.3 Електробезпека під час дослідження обмоток	64
5.4 Протипожежна безпека в лабораторії	66
ВИСНОВКИ.....	68
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	70

ВСТУП

У сучасних умовах розвитку енергетики та електротехнічних систем важливе значення має забезпечення надійної та безперебійної роботи електромагнітних пристроїв. Одним із ключових елементів таких пристроїв є обмотки, від технічного стану яких значною мірою залежить ефективність та безпечність їх експлуатації.

Особливу складність становлять багатошарові обмотки, оскільки їх конструкція ускладнює процес виявлення несправностей. Найбільш поширеними дефектами є міжвиткові короткі замикання, пошкодження ізоляції та механічні деформації, які можуть виникати в процесі експлуатації. Несвоєчасне виявлення таких несправностей призводить до погіршення технічних характеристик обладнання та може стати причиною аварійних ситуацій.

У зв'язку з цим актуальним є питання вдосконалення методів та технологічних процесів діагностування, що дозволяють своєчасно та точно визначати стан обмоток. Використання сучасних підходів до аналізу електричних параметрів дає можливість підвищити ефективність діагностики та зменшити витрати на обслуговування і ремонт обладнання.

Метою даної роботи є підвищення ефективності діагностування несправностей багатошарових обмоток електромагнітних пристроїв шляхом удосконалення технологічних процесів контролю та застосування сучасних методів аналізу їх технічного стану.

Об'єктом дослідження є процеси діагностування технічного стану багатошарових обмоток електромагнітних пристроїв.

Предметом дослідження є методи і засоби виявлення несправностей багатошарових обмоток та способи підвищення точності і швидкості їх діагностування.

У роботі розглянуто існуючі методи діагностики, проведено експериментальні дослідження залежності електричних параметрів від

конструктивних змін обмоток, а також запропоновано підходи до оптимізації процесів діагностування.

Для досягнення поставленої мети в роботі необхідно вирішити ряд задач, зокрема проаналізувати існуючі методи діагностування несправностей обмоток електромагнітних пристроїв, розглянути особливості конструкції багатошарових обмоток та основні види їх пошкоджень, дослідити вплив зміни кількості витків на електричні параметри обмотки, провести експериментальні вимірювання з подальшою обробкою отриманих результатів і побудовою графічних залежностей, а також оцінити можливість використання отриманих результатів для діагностування несправностей і запропонувати підходи до оптимізації технологічних процесів діагностики.

РОЗДІЛ 1

ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ТА АНАЛІЗ МЕТОДІВ ДІАГНОСТУВАННЯ ОБМОТОК ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПРИСТРОЇВ

1.1 Конструкція та особливості багатошарових обмоток електромагнітних пристроїв

Багатошарові обмотки є основним елементом більшості електромагнітних пристроїв, зокрема силових і вимірювальних трансформаторів, електричних машин, реакторів, електромагнітів та різних індукційних апаратів. Саме обмотки забезпечують створення електромагнітного поля, передачу енергії між електричними колами та формування робочих характеристик пристрою. Тому технічний стан обмоток безпосередньо впливає на надійність, безпечність і довговічність роботи обладнання. [1, 2]

Конструктивно обмотка являє собою систему провідників, які розміщуються на магнітопроводі або в пазах електричної машини. Провідниковим матеріалом найчастіше є мідь або алюміній, оскільки ці матеріали мають достатньо високу електропровідність і придатні для виготовлення обмоток різної потужності. Мідні обмотки мають кращу електропровідність, але є дорожчими, тоді як алюмінієві можуть застосовуватися у випадках, коли важливо зменшити вартість або масу обладнання.

Кожен виток обмотки має бути електрично ізолюваний від сусідніх витків, шарів та елементів магнітопроводу. Для цього використовують паперову, лакову, емалеву, компаундну або комбіновану ізоляцію. Ізоляція виконує не допоміжну, а одну з головних функцій, оскільки саме вона запобігає міжвитковим коротким замиканням, пробоям та втраті електричної міцності обмотки. У процесі роботи ізоляція зазнає дії нагрівання, вологи, механічних зусиль і електричного поля, тому її стан є одним з основних показників надійності пристрою [1]. [3]

У сучасних електромагнітних пристроях часто застосовуються саме багатошарові обмотки. Така конструкція дає можливість розмістити велику кількість витків у відносно обмеженому просторі, забезпечити потрібний рівень напруги, струму та магнітного потоку. При цьому провідники укладаються у

декілька шарів, а між шарами розміщується міжшарова ізоляція. У трансформаторах багатошаровість дозволяє сформувати первинну і вторинну обмотки з потрібним співвідношенням витків, а в електричних машинах — забезпечити необхідний розподіл магнітного поля.

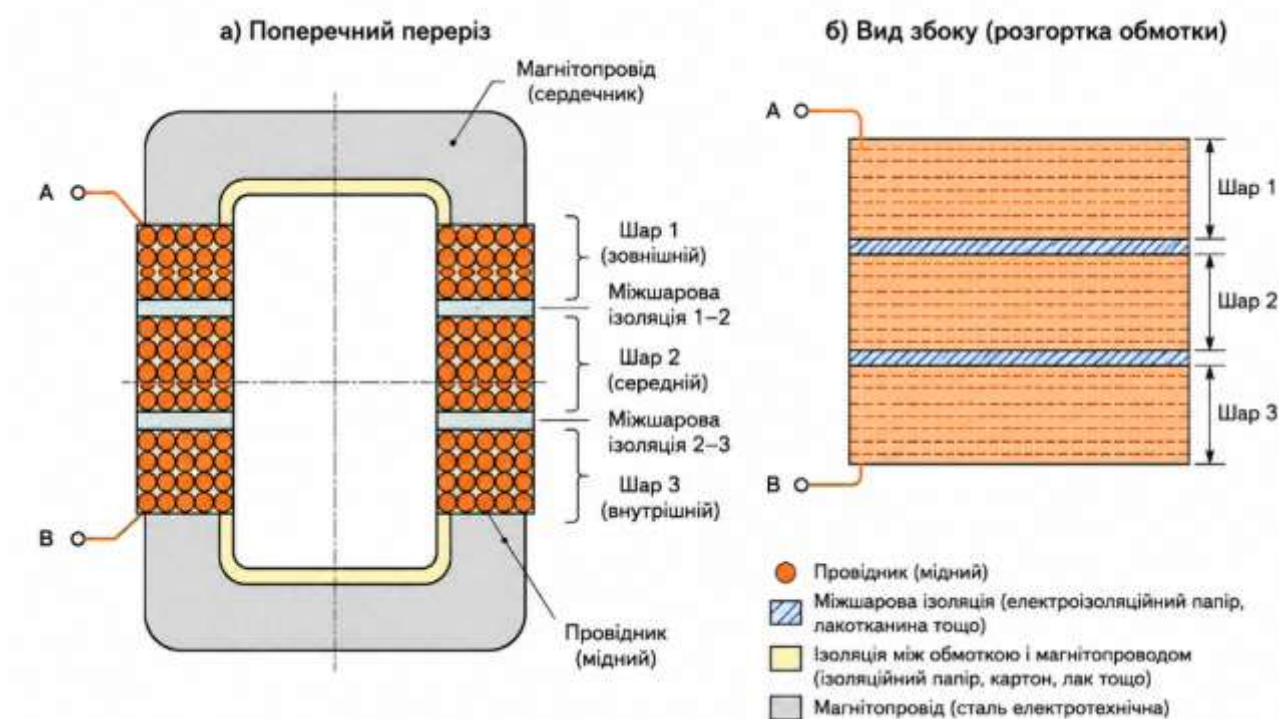


Рисунок 1.1 – Конструкція багатошарової обмотки електромагнітного пристрою

На рисунку 1.1 показано загальну будову багатошарової обмотки, де окремі шари провідників розділені міжшаровою ізоляцією. Така конструкція дозволяє розмістити значну кількість витків у компактному об'ємі, однак ускладнює виявлення внутрішніх пошкоджень під час діагностування.

Разом з перевагами багатошарова конструкція має важливий недолік: вона ускладнює діагностування. Якщо дефект виникає на зовнішньому шарі, його іноді можна помітити за слідами перегріву, потемнінням ізоляції або механічним пошкодженням. Однак дефекти внутрішніх шарів часто не мають видимих ознак. У таких випадках стан обмотки доводиться оцінювати непрямыми методами, тобто через зміну її електричних параметрів.

Багатошарова обмотка не може розглядатися лише як провідник з певним активним опором. Вона має також індуктивність, взаємну індуктивність між

окремими частинами, міжвиткові та міжшарові ємності. У нормальному стані ці параметри перебувають у певному співвідношенні. При пошкодженні ізоляції, зміні кількості ефективних витків або деформації провідників це співвідношення порушується. Саме тому діагностування має враховувати не один показник, а сукупність параметрів. [4]

Особливе значення має залежність параметрів обмотки від кількості витків. Для електромагнітних пристроїв кількість витків є одним з визначальних конструктивних параметрів. Вона впливає на створення магнітного потоку, індуктивність, напругу та струм. Якщо внаслідок міжвиткового замикання частина витків фактично виключається з роботи, електричні характеристики обмотки змінюються. Тому дослідження впливу кількості витків на електричні параметри має практичне значення для діагностування. [5]

Не менш важливим є тепловий режим обмотки. Під час роботи через провідники протікає струм, внаслідок чого виділяється теплота. Нагрівання призводить до зміни активного опору провідника. Для мідних і алюмінієвих обмоток така залежність є достатньо помітною, тому результати вимірювання опору без урахування температури можуть бути неточними. Наприклад, збільшення опору може бути наслідком не дефекту, а нормального нагрівання після роботи пристрою. [6]

У багатошарових обмотках тепловий режим є нерівномірним. Зовнішні шари охолоджуються краще, а внутрішні можуть мати вищу температуру. Якщо всередині обмотки виникає локальний дефект, він може створювати місцевий перегрів, який складно виявити звичайним оглядом. При цьому активний опір, струм і загальний режим роботи вже можуть змінюватися. Це підтверджує необхідність використання методів, які враховують як електричні, так і теплові ознаки.

Таким чином, багатошарова обмотка є складною електромагнітною системою, технічний стан якої визначається станом провідника, ізоляції, контактів, геометрії витків і температурного режиму. Її діагностування потребує послідовного аналізу параметрів, а не випадкового вимірювання одного

показника. Саме ця особливість є основою для подальшого розгляду методів діагностування та їх удосконалення.

1.2 Основні види пошкоджень та причини їх виникнення

У процесі експлуатації електромагнітних пристроїв обмотки працюють під дією електричних, теплових і механічних навантажень. Ці фактори поступово впливають на стан провідників та ізоляції. У нормальному режимі обмотка розрахована на тривалу роботу, однак перевантаження, пуски, короткі замикання, вібрації, старіння матеріалів та несприятливі умови експлуатації можуть призводити до появи дефектів.

Найбільш характерним і небезпечним дефектом є міжвиткове коротке замикання. Воно виникає тоді, коли ізоляція між сусідніми витками втрачає електричну міцність, і частина витків замикається між собою. У результаті змінюється ефективна кількість витків, зменшується індуктивність, а в місці пошкодження виникають підвищені струми. Такі струми спричиняють локальний перегрів, який прискорює руйнування ізоляції та збільшує зону пошкодження. [7]

У процесі експлуатації одним із найбільш небезпечних дефектів є міжвиткове замикання. Воно виникає при пошкодженні ізоляції між сусідніми витками обмотки, внаслідок чого між ними починає протікати струм короткого замикання. Це призводить до локального перегріву, зміни електричних параметрів обмотки та подальшого руйнування ізоляції. На рисунку 1.2 наведено схему виникнення міжвиткового замикання в обмотці трансформатора.

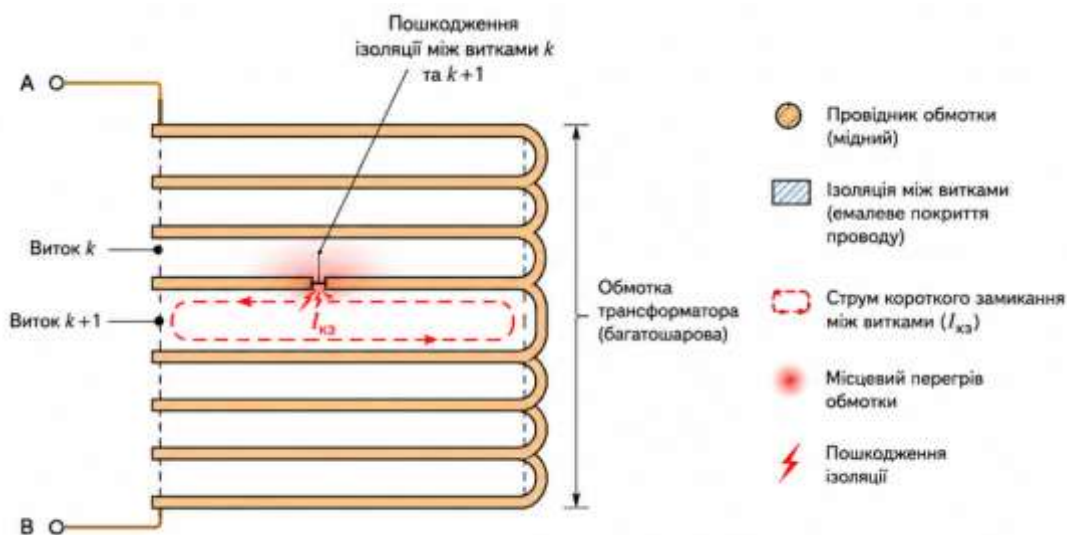


Рисунок 1.2 – Схема виникнення міжвиткового замикання в обмотці трансформатора

Примітка: k — умовний порядковий номер витка обмотки; $k + 1$ — наступний виток, розташований поряд із ним.

Міжвиткові замикання небезпечні тим, що на початкових стадіях вони можуть не призводити до повної відмови обладнання. Пристрій може продовжувати працювати, але його параметри вже відхиляються від нормальних. Якщо дефект не виявити вчасно, локальний перегрів може перейти у пробій ізоляції, пошкодження більшої частини обмотки або аварійне вимкнення обладнання.

Ще одним поширеним процесом є старіння ізоляції. Ізоляційні матеріали з часом втрачають свої властивості навіть за нормальних умов роботи. Підвищена температура, волога, пил, хімічні впливи та електричні перенапруги пришвидшують цей процес. Старіння ізоляції проявляється у зменшенні її електричної міцності, появі мікротріщин, втраті еластичності та погіршенні тепловідведення. [8]

У трансформаторах старіння ізоляції часто пов'язане з тривалим перегріванням, перевантаженнями та погіршенням умов охолодження. У електричних машинах додатково діють вібрації, часті пуски і змінні механічні навантаження. Через це одна і та сама причина може проявлятися по-різному залежно від типу електромагнітного пристрою.

Механічні пошкодження обмоток можуть виникати під час транспортування, монтажу, ремонту або внаслідок електродинамічних зусиль у режимах короткого замикання. При великих струмах у провідниках виникають значні сили, які здатні зміщувати витки або деформувати обмотку. Навіть невелика зміна положення витків може вплинути на розподіл магнітного поля та змінити індуктивні параметри.

Порушення контактних з'єднань також є поширеною причиною несправностей. Ослаблення болтових з'єднань, окиснення контактних поверхонь або неправильне підключення можуть призводити до збільшення перехідного опору. У місці поганого контакту виникає локальний перегрів, який іноді важко відрізнити від перегріву, викликаного дефектом самої обмотки. Тому під час діагностики необхідно перевіряти не лише обмотку, а й якість з'єднань.

Теплові пошкодження виникають при тривалій роботі в режимі перевантаження або при недостатньому охолодженні. Висока температура негативно впливає на ізоляцію і змінює активний опір провідника. Якщо нагрівання повторюється часто, ізоляція швидше старіє, а ймовірність міжвиткового замикання зростає. Тому контроль температурного впливу є важливим елементом діагностики. [9]

У реальних умовах дефекти рідко виникають ізольовано. Наприклад, перевантаження викликає нагрівання, нагрівання прискорює старіння ізоляції, а ослаблена ізоляція підвищує ризик міжвиткового замикання. Такий зв'язок між причинами і наслідками ускладнює діагностування, оскільки один і той самий зовнішній прояв може мати різні причини.

Для оцінки технічного стану обмоток найбільше значення мають ті дефекти, які змінюють вимірювані параметри: активний опір, індуктивність, повний опір, струм і температурну поведінку. Саме ці параметри можна використати для побудови діагностичних залежностей і подальшого вдосконалення технологічного процесу контролю.

1.3 Аналіз існуючих методів діагностування обмоток

Для оцінки технічного стану обмоток електромагнітних пристроїв застосовують електричні, теплові, частотні, імпульсні та комбіновані методи діагностування. Кожен з них дає змогу оцінити окрему сторону технічного стану, однак повна картина формується лише при порівнянні кількох параметрів. Це особливо важливо для багатошарових обмоток, де дефект може бути прихованим і не мати зовнішніх ознак. [10]

Одним із найпростіших методів є вимірювання активного опору обмотки. Такий метод дозволяє оцінити стан провідника, контактних з'єднань і виявити грубі пошкодження, зокрема обриви або значне збільшення перехідного опору. Перевагою методу є простота виконання та доступність приладів. Водночас активний опір слабо реагує на початкові міжвиткові дефекти, якщо пошкоджена лише невелика частина витків. [11]

Метод вимірювання індуктивності є більш чутливим до зміни кількості ефективних витків. Оскільки індуктивність залежить від числа витків, магнітопроводу та геометрії обмотки, її зміна може свідчити про міжвиткове замикання або деформацію обмотки. Для трифазних пристроїв доцільним є порівняння індуктивності між фазами або фазними парами. [12]

Метод визначення повного опору дозволяє враховувати активну і реактивну складові. Він є зручним для аналізу обмотки як електричного кола змінного струму. Зміна повного опору може свідчити про пошкодження провідників, зміну індуктивності або появу несиметрії між фазами. При цьому важливо виконувати вимірювання в однакових умовах, щоб результати можна було коректно порівняти.

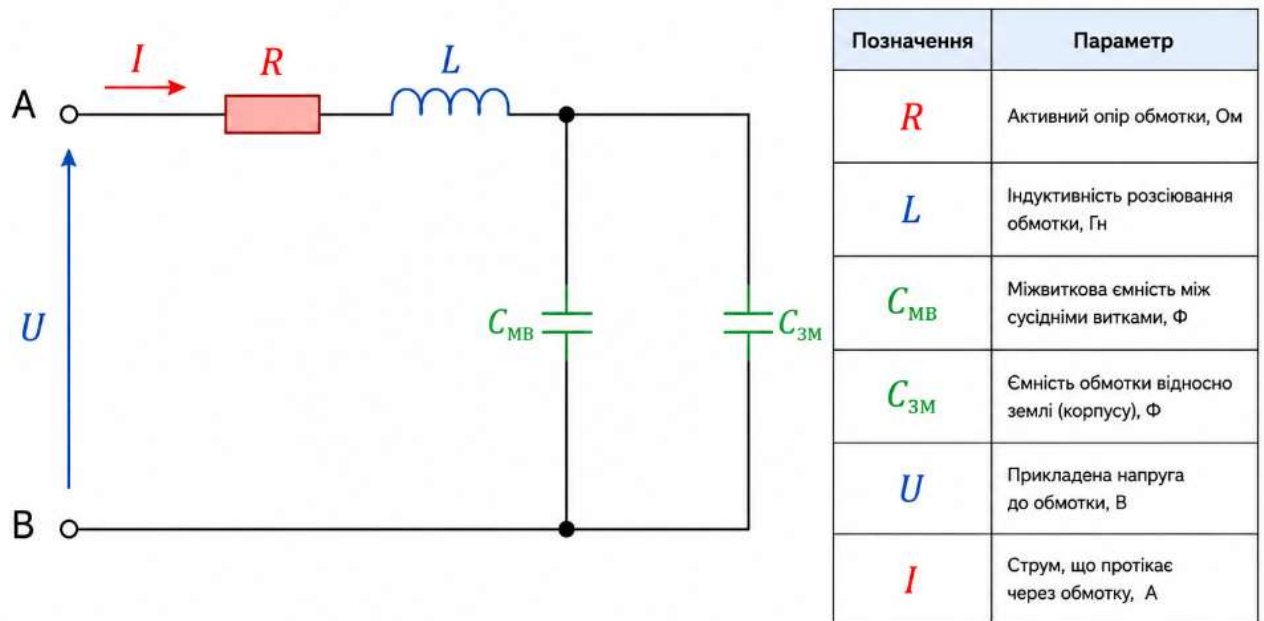


Рисунок 1.3 – Еквівалентна схема заміщення обмотки електромагнітного пристрою

Еквівалентна схема заміщення дозволяє представити обмотку електромагнітного пристрою у вигляді сукупності електричних параметрів, що визначають її поведінку в процесі роботи. Активний опір R враховує омичні втрати у провіднику, індуктивність L характеризує магнітні властивості обмотки, а паразитні ємності C_{MB} та $C_{ЗМ}$ враховують міжвиткові та ємнісні зв'язки відносно корпусу.

При виникненні дефектів, зокрема міжвиткових замикань, старіння або пошкодження ізоляції, значення цих параметрів змінюються. Саме тому аналіз активного опору, індуктивності та паразитних параметрів може використовуватись як основа для діагностування технічного стану обмоток електромагнітних пристроїв.

Частотні методи діагностування ґрунтуються на аналізі реакції обмотки на сигнали різної частоти. Обмотка розглядається як система з розподіленими параметрами, тому зміна її структури впливає на частотну характеристику. Такі методи можуть виявляти приховані дефекти, деформації та зміни ізоляції, але потребують спеціального обладнання та ретельної обробки результатів [2]. [13]

Імпульсні методи передбачають подачу короткочасного сигналу та аналіз відгуку обмотки. Якщо в обмотці є пошкодження, форма сигналу, його амплітуда або характер загасання змінюються. Перевагою такого підходу є висока чутливість, однак практичне застосування потребує досвіду роботи з осцилограмами та спеціальними приладами.

Теплові методи базуються на аналізі температурного режиму. Локальні перегріву можуть виникати через поганий контакт, міжвиткове замикання або перевантаження. Тепловізійний контроль дозволяє швидко визначити місця підвищеної температури, але не завжди вказує точну причину дефекту. Тому теплові методи доцільно поєднувати з електричними вимірюваннями. [14]

Окреме місце займає вимірювання опору до і після нагрівання. Такий підхід дозволяє оцінити вплив температури на параметри обмотки і врахувати цю залежність під час діагностування. Якщо не враховувати нагрів, то нормальне збільшення опору може бути помилково прийняте за дефект або навпаки приховати реальне пошкодження.

Візуальний контроль є допоміжним методом. Він дозволяє виявити очевидні пошкодження: підгорілу ізоляцію, механічні деформації, сліди перегріву або пошкодження клем. Для багат шарових обмоток його можливості обмежені, оскільки внутрішні шари залишаються недоступними. Тому візуальний контроль доцільно використовувати лише як перший етап діагностики.

Найбільш раціональним є комбінований підхід, коли кілька методів застосовуються послідовно. Наприклад, спочатку виконується огляд і перевірка контактів, далі вимірюються активний опір, індуктивність та повний опір, після чого результати порівнюються між фазами і аналізуються з урахуванням температури. Така послідовність дозволяє зменшити ймовірність помилкового висновку. [15]

Таблиця 1.1 – Порівняльна характеристика методів діагностування обмоток

Метод	Що оцінює	Переваги	Обмеження
Вимірювання активного опору	Стан провідника та контактів	Простий і доступний метод	Залежить від температури, слабо виявляє ранні міжвиткові дефекти
Вимірювання індуктивності	Ефективну кількість витків і стан магнітного кола	Чутливий до зміни витків	Залежить від частоти та умов вимірювання
Вимірювання повного опору	Активну та реактивну складові	Зручний для порівняння фаз	Потребує однакових умов вимірювання
Частотні методи	Реакцію обмотки на сигнал різної частоти	Виявляють приховані дефекти	Потребують складнішого обладнання
Теплові методи	Локальні перегріву	Швидко виявлення зон нагріву	Не завжди визначають причину дефекту

1.4 Недоліки існуючих методів та особливості їх застосування

Аналіз існуючих методів показує, що основна проблема полягає не у відсутності засобів діагностування, а в обмеженій інформативності кожного методу при окремому застосуванні. Один метод може добре виявляти грубі пошкодження, але бути недостатньо чутливим до початкових дефектів. Інший метод може мати високу чутливість, але потребувати складного обладнання або спеціальної підготовки.

Метод активного опору є доступним, але його результати сильно залежать від температури. Якщо опір вимірюється після роботи пристрою, нагрівання може суттєво вплинути на результат. Без урахування температури неможливо впевнено визначити, чи є зміна опору наслідком дефекту, чи нормальним наслідком нагрівання провідника.

Методи індуктивності та повного опору більш чутливі до зміни структури обмотки, але вони також залежать від режиму вимірювання. Частота тестового сигналу, стан магнітопроводу і схема з'єднання обмоток можуть впливати на результат. Це означає, що такі методи потребують чіткої методики проведення вимірювань.

Частотні та імпульсні методи є перспективними, але їх складність обмежує широке застосування. Для правильного аналізу необхідно не тільки отримати сигнал, а й правильно його інтерпретувати. У навчальних або виробничих умовах це не завжди зручно, особливо якщо потрібно швидко виконати попередню оцінку стану обладнання.

Теплові методи добре показують наслідки дефекту, але не завжди дозволяють визначити його природу. Наприклад, перегрів може бути спричинений міжвитковим замиканням, поганим контактом або перевантаженням. Без додаткових електричних вимірювань зробити точний висновок складно.

Для трифазних пристроїв важливим є порівняльний аналіз параметрів між фазами. У справному стані параметри фаз або фазних пар мають бути близькими. Помітне відхилення однієї з них може свідчити про несиметрію, пошкодження або поганий контакт. Проте таке порівняння має виконуватися в однакових умовах, інакше результат може бути неточним. [16]

Суттєвим недоліком практичного діагностування є відсутність чіткої послідовності дій. На практиці часто вимірюють один параметр і одразу роблять висновок. Такий підхід не завжди є достатнім. Для підвищення достовірності необхідно поєднувати кілька вимірювань, перевіряти повторюваність результатів і аналізувати їх у взаємозв'язку.

Отже, існуючі методи мають значну практичну цінність, але потребують раціонального поєднання. Саме комбінування електричних і теплових ознак дає можливість підвищити точність оцінки стану багатошарових обмоток.

1.5 Обґрунтування напрямку оптимізації процесу діагностування

З урахуванням розглянутих особливостей доцільно зосередити увагу на вдосконаленні технологічного процесу діагностування. Йдеться не про заміну існуючих методів, а про їх більш раціональне використання, порівняння результатів та встановлення залежностей між параметрами обмотки і її технічним станом.

Однією з важливих діагностичних ознак є зміна ефективної кількості витків. При міжвитковому замиканні частина витків фактично перестає працювати як повноцінна частина обмотки. Це впливає на струм, індуктивність і повний опір. Тому дослідження залежності струму від кількості витків дає можливість краще зрозуміти, як подібний дефект може проявлятися у вимірюваннях.

Іншою важливою ознакою є зміна активного опору при нагріванні. Оскільки опір провідника залежить від температури, результати вимірювань необхідно оцінювати з урахуванням теплового стану. Дослід із нагріванням трансформатора при замкнутій обмотці дозволяє простежити, як змінюється опір після температурного впливу.

Для трифазних обмоток доцільним є аналіз несиметрії параметрів. Якщо активний опір, індуктивність або повний опір однієї фазної пари помітно відрізняється від інших, це може бути ознакою пошкодження. Такий підхід є зручним, оскільки він не потребує складного розбирання об'єкта і може бути реалізований за допомогою вимірювальних приладів.

Оптимізація процесу діагностування полягає у формуванні послідовності контролю, за якої результати не розглядаються окремо. Спочатку виконується підготовка об'єкта і перевірка контактів, потім проводяться вимірювання основних параметрів, після цього результати заносяться у таблиці, обробляються в Microsoft Excel і подаються у вигляді графічних залежностей. Такий підхід робить аналіз більш наочним і зменшує ймовірність випадкової помилки. [17]

Встановлення залежностей між кількістю витків, струмом, опором, індуктивністю та температурою дозволяє сформувати набір практичних ознак для оцінки стану обмоток. Це має значення для навчальних лабораторних досліджень і для попереднього контролю електромагнітних пристроїв у виробничих умовах.

Таким чином, удосконалення діагностування досягається за рахунок поєднання відомих методів, правильного вибору контрольованих параметрів та аналізу їх зміни у різних умовах. Такий підхід дозволяє підвищити достовірність оцінки стану багатошарових обмоток без ускладнення самого процесу вимірювання.

Кожен із розглянутих методів діагностування дає змогу оцінити окремі параметри технічного стану обмоток, однак найбільш ефективним є їх поєднання в єдину послідовність контролю. Врахування активного опору, індуктивності, повного опору, температурного режиму та несиметрії між фазами дозволяє більш точно визначити наявність відхилень у роботі електромагнітного пристрою. Такий підхід сприяє підвищенню достовірності діагностування, своєчасному виявленню можливих несправностей та зменшенню ризику подальшого пошкодження обмоток під час експлуатації. [18]

РОЗДІЛ 2

РОЗРОБКА ТА ОБҐРУНТУВАННЯ МЕТОДУ ДІАГНОСТУВАННЯ ОБМОТОК ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПРИСТРОЇВ

2.1 Обґрунтування підходу до діагностування обмоток

Надійність роботи електромагнітних пристроїв значною мірою визначається технічним станом їх обмоток. При цьому більшість дефектів, що виникають у процесі експлуатації, не мають чітко виражених зовнішніх ознак на початкових стадіях розвитку. Це ускладнює їх своєчасне виявлення та підвищує ризик подальшого пошкодження обладнання.

Існуючі методи діагностування дозволяють оцінити окремі параметри обмоток, однак їх застосування окремо не завжди забезпечує достатню достовірність результатів. Зокрема, вимірювання активного опору є ефективним для виявлення обривів, значного погіршення контактів або грубих пошкоджень провідника, але має обмежену чутливість до початкових міжвиткових замикань [1, 4].

Методи, що базуються на визначенні індуктивності або повного опору, є більш інформативними для оцінки зміни електромагнітних властивостей обмотки. Проте їх результати залежать від умов проведення вимірювань, частоти сигналу, температурного стану та особливостей конструкції пристрою. Тому такі методи потребують правильного порівняння результатів і не можуть застосовуватися без урахування режиму випробування [5, 7].

Доцільним є застосування підходу, який базується на аналізі не одного, а декількох електричних параметрів обмотки. У такому випадку враховується комплексний вплив дефектів на електромагнітні процеси, а оцінка технічного стану стає більш обґрунтованою. Особливо важливим є поєднання вимірювання активного опору, індуктивності, повного опору та аналізу зміни струму при зміні конструктивних або режимних умов.

Окремого значення набуває аналіз залежностей між параметрами обмотки та її фізичним станом. Зміна кількості ефективних витків, порушення ізоляції або нагрівання призводять до зміни струму, опору та індуктивності. Саме ці зміни

можуть використовуватися як діагностичні ознаки, що дозволяють виявляти відхилення ще до повного руйнування обмотки.

Важливим є також врахування температурного фактору. Активний опір провідників залежить від температури, тому результати вимірювань можуть змінюватися навіть у справній обмотці. Якщо не враховувати нагрівання, можна неправильно оцінити стан обладнання. Тому процес діагностування має передбачати аналіз параметрів у різних теплових станах або приведення результатів до однакових умов вимірювання.

Для трифазних електромагнітних пристроїв важливим є порівняння параметрів між фазами або фазними парами. У справному стані значення активного опору, індуктивності та повного опору мають бути близькими. Поява помітної несиметрії може свідчити про дефект обмотки, погіршення контакту або інші порушення у роботі пристрою.

Таким чином, підхід до діагностування обмоток повинен бути комплексним і послідовним. Його основою є не тільки вимірювання окремих параметрів, а й порівняння їх між собою, аналіз змін у різних режимах та встановлення характерних ознак несправностей.

2.2 Суть запропонованого методу діагностування

Запропонований підхід до діагностування обмоток електромагнітних пристроїв базується на аналізі зміни їх електричних параметрів під впливом факторів, які відображають реальні умови виникнення дефектів. Основна ідея полягає у тому, що пошкодження обмотки змінює її еквівалентні параметри, а ці зміни можна зафіксувати за допомогою вимірювань.

Міжвиткові замикання фактично зменшують кількість витків, які повноцінно беруть участь у роботі обмотки. У результаті змінюється індуктивність, струм та характер розподілу магнітного поля. Тому дослідження впливу кількості витків на електричні параметри дозволяє сформулювати діагностичну ознаку для виявлення подібних пошкоджень.

Нагрівання обмотки змінює активний опір провідника. Така зміна є закономірною і не завжди пов'язана з дефектом, однак її необхідно враховувати під час діагностування. Якщо відомо, як опір змінюється при нагріванні, результати вимірювань можна оцінювати точніше і не плутати температурний вплив із пошкодженням.

Для реалізації такого підходу доцільно розглядати декілька характерних режимів, у яких проявляється зміна параметрів обмотки. До них належать режим зміни кількості витків, режим короткого замикання та режим нагрівання. Кожен із цих режимів дозволяє оцінити окремий аспект технічного стану обмотки.

Режим зміни кількості витків дозволяє простежити, як конструктивні зміни обмотки впливають на її електричні характеристики. Такий дослід є наближеною моделлю міжвиткового пошкодження, оскільки при реальному дефекті частина витків також може виключатися з нормальної роботи. Аналіз залежності струму від кількості витків дає можливість оцінити чутливість обмотки до таких змін.

Режим короткого замикання використовується для створення умов підвищених струмів, які є характерними для аварійних або близьких до аварійних режимів. У цьому режимі обмотка нагрівається інтенсивніше, що дає можливість оцінити зміну її активного опору внаслідок нагрівання.

Дослідження нагрівання дозволяє визначити залежність активного опору від температурного стану обмотки. Це важливо для практичного діагностування, оскільки вимірювання, виконані до і після нагрівання, можуть мати різні значення навіть при відсутності нового дефекту.

Додатково доцільно використовувати порівняльний аналіз параметрів між фазами або фазними парами. Такий підхід дозволяє виявляти несиметрію, яка є однією з характерних ознак пошкодження обмоток у трифазних пристроях. Якщо одна з фаз має помітне відхилення від інших, це може бути підставою для подальшої перевірки.

Суть запропонованого методу полягає у раціональному поєднанні вже відомих способів контролю з додатковим аналізом залежностей параметрів

обмотки. Такий підхід не замінює існуючі методи, а доповнює їх і робить процес діагностування більш послідовним та інформативним.

У рамках даної роботи запропонований підхід було реалізовано шляхом експериментальної зміни кількості витків обмотки. На відміну від традиційних методів діагностування, у даному випадку зміна параметрів обмотки здійснювалась вручну, що дозволило змодельовати зміну ефективної кількості витків, характерну для міжвиткових пошкоджень.

Застосування такого підходу дало можливість безпосередньо дослідити вплив кількості витків на електричні параметри обмотки, зокрема на значення струму. Отримані результати підтвердили, що навіть незначна зміна кількості витків призводить до помітної зміни струму, що може бути використано як діагностична ознака.

Практична цінність запропонованого підходу полягає у можливості моделювання дефектів обмоток у контрольованих умовах без їх фактичного виникнення. Це дозволяє оцінити чутливість електричних параметрів до зміни кількості витків та використовувати отримані залежності для діагностування електромагнітних пристроїв.

2.3 Фізична модель процесів в обмотках електромагнітних пристроїв

Робота обмоток електромагнітних пристроїв базується на взаємодії електричних і магнітних процесів, які виникають при протіканні струму через провідники. Обмотку доцільно розглядати як складну електромагнітну систему, параметри якої визначаються активним опором, індуктивністю, взаємними зв'язками між витками та тепловим станом.

У нормальному режимі електричні параметри обмотки залишаються відносно стабільними та визначаються її конструктивними особливостями. При протіканні струму створюється магнітне поле, величина якого залежить від сили струму та кількості витків. Взаємодія цього поля з магнітопроводом визначає індуктивні властивості обмотки.

Якщо в обмотці виникає міжвиткове замикання, змінюється ефективна кількість витків. Це призводить до зміни магнітного потоку, індуктивності та струму. Одночасно у місці пошкодження може виникати локальне збільшення густини струму, що викликає нагрівання і прискорює руйнування ізоляції.

Активний опір обмотки визначається матеріалом провідника, його довжиною, площею поперечного перерізу та температурою. Для мідних і алюмінієвих провідників характерним є зростання опору при нагріванні. Через це результати вимірювання опору потрібно аналізувати з урахуванням температурного стану.

Індуктивність обмотки залежить від кількості витків, геометрії обмотки, магнітної проникності магнітопроводу та взаємного розташування елементів. У разі деформації, зміщення витків або часткового замикання індуктивність змінюється, що може бути використано як діагностична ознака.

Повний опір обмотки поєднує активну та реактивну складову. Його значення залежить не тільки від опору провідника, а й від частоти, індуктивності та стану магнітного кола. Тому повний опір є більш узагальненим параметром, який може відображати як електричні, так і електромагнітні зміни.

Між окремими витками та шарами існують паразитні ємнісні й індуктивні зв'язки. У справному стані їх вплив є сталим, але при порушенні ізоляції або зміні геометрії обмотки ці зв'язки можуть змінюватися. Це особливо важливо для багатошарових обмоток, де внутрішні дефекти можуть не мати зовнішніх проявів.

Фізична модель процесів в обмотці повинна враховувати не один параметр, а сукупність електричних, магнітних і теплових явищ. Саме тому для оцінки стану обмоток доцільно використовувати комплексний аналіз, у якому враховується зміна струму, опору, індуктивності та повного опору.

2.4 Параметри, що використовуються для діагностування

Для оцінки технічного стану обмоток доцільно використовувати параметри, які найбільш чутливо реагують на зміну їх стану. До таких параметрів

належать активний опір, індуктивність, повний опір, струм у різних режимах роботи, а також відхилення параметрів між фазами.

Активний опір є базовим параметром, який дозволяє оцінити стан провідника та контактних з'єднань. Його збільшення може свідчити про перегрів, погіршення контактів або пошкодження провідника. Разом з тим активний опір суттєво залежить від температури, тому цей параметр необхідно аналізувати разом з умовами вимірювання.

Індуктивність обмотки є інформативною для виявлення змін у кількості витків або стані магнітного кола. Зменшення ефективної кількості витків, яке може виникати при міжвитковому замиканні, призводить до зміни індуктивності. Саме тому цей параметр є важливим при діагностуванні прихованих дефектів.

Повний опір обмотки дозволяє враховувати як активну, так і реактивну складову. Його аналіз дає змогу отримати більш повну характеристику стану обмотки, ніж просте вимірювання активного опору. Для трифазних пристроїв особливо корисним є порівняння повного опору між фазними парами.

Струм обмотки є важливим показником, який відображає зміну електричних параметрів у різних режимах. При зміні кількості витків або при появі дефекту струм може змінюватися, що дозволяє використовувати його як додаткову діагностичну ознаку.

Порівняльний аналіз параметрів між фазами має важливе значення для трифазних електромагнітних пристроїв. У справному стані параметри фаз мають бути близькими. Якщо одна з фаз помітно відрізняється від інших, це може свідчити про несиметрію, пошкодження ізоляції або порушення контактів.

Під час аналізу отриманих даних важливо враховувати не тільки абсолютні значення параметрів, а й характер їх зміни. Наприклад, поступове зростання опору може бути пов'язане з нагріванням, тоді як різке відхилення однієї фази від інших може вказувати на локальну несправність.

Таким чином, використання сукупності параметрів дозволяє отримати більш достовірну оцінку технічного стану обмоток. Найбільшу інформативність

має не окреме вимірювання, а порівняння параметрів у різних режимах та між окремими фазами.

2.5 Алгоритм діагностування обмоток електромагнітних пристроїв

Для підвищення достовірності оцінки технічного стану обмоток доцільно використовувати послідовний алгоритм діагностування. Такий алгоритм дозволяє систематизувати процес вимірювань, зменшити ймовірність помилок та забезпечити правильне порівняння отриманих результатів.

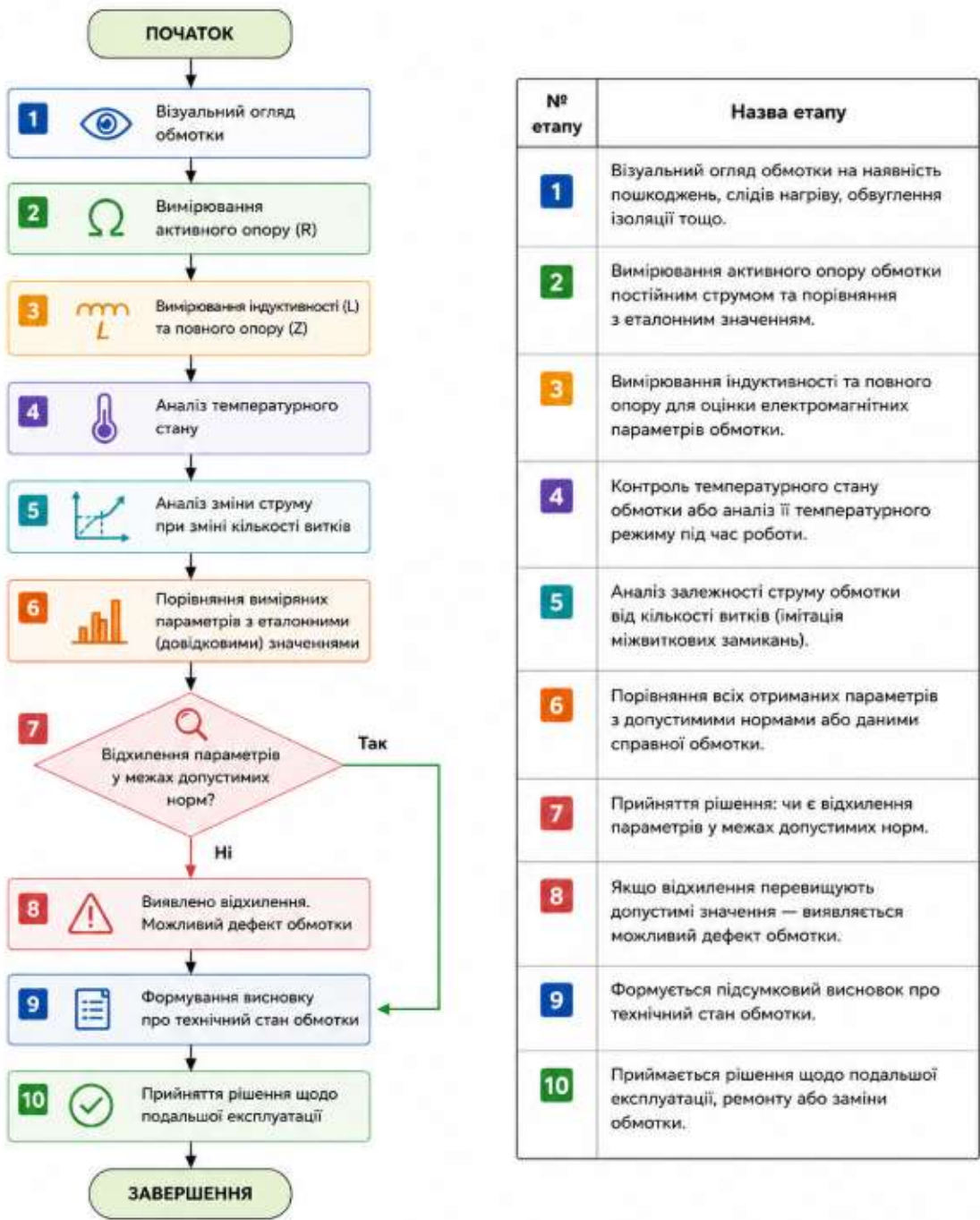


Рисунок 2.1 – Алгоритм діагностування обмоток електромагнітних пристроїв

Запропонований алгоритм передбачає послідовне виконання етапів контролю: від попереднього огляду обмотки до аналізу вимірних параметрів і формування висновку про її технічний стан. Така послідовність дозволяє не розглядати окремі вимірювання ізольовано, а оцінювати стан обмотки комплексно — з урахуванням активного опору, індуктивності, повного опору, температурного режиму та зміни струму.

На першому етапі виконується попередній аналіз стану обмотки. Він включає візуальний огляд, перевірку контактних з'єднань, оцінку стану виводів та фіксацію зовнішніх ознак пошкоджень. Цей етап дозволяє виявити очевидні дефекти і підготувати об'єкт до подальших вимірювань.

Другий етап передбачає вимірювання базових електричних параметрів, насамперед активного опору. Отримані значення дозволяють оцінити загальний стан провідника та контактів. Для підвищення точності результати доцільно порівнювати між фазами або з попередніми вимірюваннями.

На третьому етапі визначаються індуктивність та повний опір обмотки. Ці параметри дають змогу оцінити електромагнітні характеристики обмотки та виявити відхилення, пов'язані зі зміною кількості витків або порушенням структури обмотки.

Четвертий етап передбачає проведення вимірювань у різних режимах. До таких режимів належать зміна кількості витків, короткозамкнений режим та нагрівання обмотки. Це дозволяє дослідити, як параметри реагують на зміну умов, і визначити найбільш інформативні діагностичні ознаки.

П'ятий етап полягає в обробці результатів. Дані заносяться у таблиці, після чого виконуються розрахунки, побудова графічних залежностей і порівняння отриманих значень. Для цього доцільно використовувати табличний процесор Microsoft Excel, оскільки він дозволяє швидко виконувати обчислення та будувати графіки.

На завершальному етапі формується оцінка технічного стану обмотки. Вона базується на аналізі зміни параметрів, наявності несиметрії між фазами, впливі температури та характері залежностей, отриманих під час експериментів.

Запропонований алгоритм дозволяє не тільки виконати окремі вимірювання, а й побудувати логічну послідовність діагностування. Це підвищує достовірність результатів і дає змогу використовувати отримані дані для подальших розрахунків та експериментального підтвердження.

Поєднання аналізу активного опору, індуктивності, повного опору, струму та температурного стану дозволяє сформувати більш повну оцінку технічного стану обмоток. Такий підхід є основою для подальших розрахунків і експериментальних досліджень, оскільки дає змогу перейти від загального аналізу методів до конкретної перевірки зміни параметрів у різних режимах роботи.

РОЗДІЛ 3

РОЗРАХУНОК ТА АНАЛІЗ ЕЛЕКТРИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ОБМОТОК ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПРИСТРОЇВ

3.1 Аналіз активного опору обмоток на початку експерименту

На початковому етапі дослідження було виконано вимірювання активного опору обмоток трансформатора при температурі навколишнього середовища

20 °С. Активний опір є одним із базових параметрів, що застосовується під час діагностування електромагнітних пристроїв, оскільки дозволяє оцінити стан провідника, якість контактних з'єднань та наявність можливих дефектів.



Рисунок 3.1 – Експериментальна установка для вимірювання активного опору обмоток трансформатора

На рисунку 3.1 показано експериментальну установку, яка використовувалася для вимірювання активного опору обмоток трансформатора. Вимірювання виконувалося між фазними виводами обмотки за допомогою цифрового мультиметра в режимі омметра. Отримані значення використовувалися для подальшого аналізу симетрії обмоток та оцінки їх технічного стану.

Активний опір обмоток визначається за виразом:

$$R = \rho \cdot l / S, \quad (3.1)$$

де:

R – активний опір провідника, Ом;

ρ – питомий опір матеріалу провідника, Ом·мм²/м;

l – довжина провідника, м;

S – площа поперечного перерізу провідника, мм².

З наведеної залежності видно, що значення активного опору залежить не тільки від геометричних параметрів обмотки, але й від властивостей матеріалу провідника. У більшості випадків обмотки трансформаторів виконуються з міді, для якої характерний малий питомий опір та достатньо стабільні електричні характеристики.

У процесі експлуатації трансформатора можливе виникнення дефектів, які впливають на значення активного опору. До таких дефектів можна віднести погіршення контактних з'єднань, часткове пошкодження провідника, локальний перегрів або порушення цілісності обмотки. Саме тому вимірювання активного опору є важливим етапом технічного діагностування.

Отримані значення опору між фазними виводами наведено у таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Значення активного опору обмоток до нагрівання

Ділянка вимірювання	Опір, Ом
R_AB	90,2
R_AC	90,1
R_BC	89,8

Для оцінки симетрії обмоток визначимо середнє значення активного опору:

$$R_{cp} = (R_{AB} + R_{AC} + R_{BC}) / 3, \quad (3.2)$$

де:

R_{cp} – середнє значення активного опору, Ом;

R_{AB}, R_{AC}, R_{BC} – виміряні значення опору між фазними виводами, Ом.

Підставимо отримані значення:

$$R_{cp} = (90,2 + 90,1 + 89,8) / 3 = 90,03 \text{ Ом.}$$

$$\Delta R = |R_i - R_{cp}|, \quad (3.3)$$

де:

ΔR – відхилення опору від середнього значення, Ом;

R_i – виміряне значення активного опору, Ом.

Найбільше відхилення становить:

$$\Delta R = |90,2 - 90,03| = 0,17 \text{ Ом.}$$

Відносне відхилення визначається:

$$\delta = (\Delta R / R_{cp}) \cdot 100\%, \quad (3.4)$$

де:

δ – відносне відхилення активного опору, %.

$$\delta = (0,17 / 90,03) \cdot 100\% = 0,19 \text{ \%}.$$

Отримані результати свідчать про те, що на початковому етапі експерименту значення активного опору між фазними виводами практично однакові. Відносне відхилення не перевищує 0,2 %, що вказує на симетричний стан обмоток та відсутність явних пошкоджень на момент початкового вимірювання.

3.2 Аналіз зміни активного опору після нагрівання

Після виконання початкових вимірювань трансформатор був підданий нагріванню, після чого проведено повторне визначення активного опору обмоток. Контроль температурного стану здійснювався за допомогою тепловізора, що дозволило оцінити температуру без прямого контакту з об'єктом дослідження.

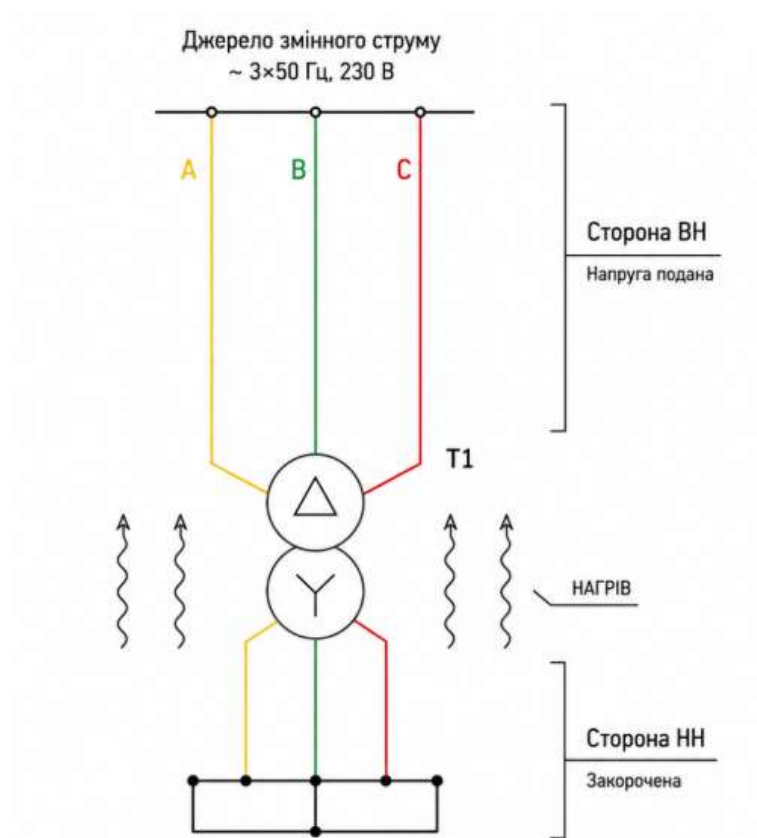


Рисунок 3.2 – Принципова схема нагрівання трансформатора в режимі короткого замикання

На рисунку 3.2 показано схему випробування трансформатора в режимі короткого замикання. Під час дослідів напруга подавалася на сторону ВН, а сторона НН була закорочена. У такому режимі в обмотках виникають підвищені струми, що призводить до нагрівання трансформатора. Отриманий тепловий стан надалі враховувався під час повторного вимірювання активного опору обмоток.

Температура поверхні трансформатора під час вимірювань становила приблизно 65 °С. Слід зазначити, що температура обмоток може відрізнятися від температури поверхні, однак отримане значення є достатнім для оцінки загального теплового стану об'єкта.

Відомо, що електричний опір провідників залежить від температури. Ця залежність може бути описана наступною формулою:

$$R_2 = R_1 \cdot (1 + \alpha \cdot (t_2 - t_1)), \quad (3.5)$$

де:

R_1 – опір провідника при температурі t_1 , Ом;

R_2 – опір провідника при температурі t_2 , Ом;

α – температурний коефіцієнт опору;

t_1, t_2 – початкова та кінцева температура, °С.

Для мідних провідників значення температурного коефіцієнта становить приблизно $\alpha = 0,004 \text{ 1/}^\circ\text{C}$, що обумовлює помітне зростання опору навіть при відносно невеликому нагріванні. Результати вимірювання активного опору після нагрівання наведено у таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 – Значення активного опору обмоток після нагрівання

Ділянка вимірювання	Опір, Ом
R_AB	106,12
R_AC	106,00
R_BC	105,65

Для подальшого аналізу визначимо середнє значення активного опору після нагрівання:

$$R_{cp2} = (R_{AB} + R_{AC} + R_{BC}) / 3, \quad (3.6)$$

Підставляючи значення, отримаємо:

$$R_{cp2} = (106,12 + 106,00 + 105,65) / 3 = 105,92 \text{ Ом.}$$

Оцінимо відхилення окремих значень від середнього:

$$\Delta R_2 = |R_i - R_{cp2}|, \quad (3.7)$$

Найбільше відхилення становить:

$$\Delta R_2 = |106,12 - 105,92| = 0,20 \text{ Ом.}$$

Відносне відхилення визначається за формулою:

$$\delta_2 = (\Delta R_2 / R_{cp2}) \cdot 100\%, \quad (3.8)$$

$$\delta_2 = (0,20 / 105,92) \cdot 100\% \approx 0,19 \text{ \%}.$$

Отримані результати свідчать про те, що після нагрівання зберігається симетричність значень активного опору між фазами. Це означає, що нагрівання відбувалося рівномірно, а обмотки не мають локальних пошкоджень.

Таким чином, можна зробити висновок, що зміна активного опору обумовлена виключно температурним фактором, що підтверджує коректність проведених вимірювань і відповідає теоретичним положенням електротехніки.

3.3 Аналіз зміни активного опору внаслідок нагрівання трансформатора

Для оцінки впливу нагрівання на електричні параметри обмоток визначимо зміну активного опору між початковим і нагрітим станом трансформатора.

Абсолютна зміна активного опору визначається за формулою:

$$\Delta R = R_2 - R_1, \quad (3.9)$$

де:

ΔR – зміна активного опору, Ом;

R_1 – значення опору до нагрівання, Ом;

R_2 – значення опору після нагрівання, Ом.

Виконаємо розрахунок для кожної ділянки.

Для ділянки АВ:

$$\Delta R_{AB} = 106,12 - 90,2 = 15,92 \text{ Ом.}$$

Для ділянки АС:

$$\Delta R_{AC} = 106,00 - 90,1 = 15,90 \text{ Ом.}$$

Для ділянки ВС:

$$\Delta R_{BC} = 105,65 - 89,8 = 15,85 \text{ Ом.}$$

Отримані результати занесено у таблицю 3.3.

Таблиця 3.3 – Зміна активного опору обмоток після нагрівання

Ділянка вимірювання	Опір до нагрівання, Ом	Опір після нагрівання, Ом	ΔR , Ом
R_AB	90,2	106,12	15,92
R_AC	90,1	106,00	15,90
R_BC	89,8	105,65	15,85

Для більш повного аналізу визначимо відносну зміну активного опору:

$$\delta_R = (\Delta R / R_1) \cdot 100\%, \quad (3.10)$$

де:

δ_R – відносна зміна опору, %.

Розрахунок для ділянки АВ:

$$\delta_R = (15,92 / 90,2) \cdot 100\% \approx 17,65 \, \%.$$

Аналогічні значення отримуються і для інших ділянок, що свідчить про рівномірний характер зміни параметрів.

Отримані результати підтверджують, що нагрівання трансформатора призводить до істотного збільшення активного опору обмоток. Це обумовлено фізичними властивостями провідника, зокрема збільшенням питомого опору матеріалу при підвищенні температури.

Важливо зазначити, що однаковий характер зміни опору між фазами свідчить про відсутність локальних пошкоджень або дефектів обмоток. У випадку наявності міжвиткових замикань або інших несправностей спостерігалася б асиметрія значень активного опору.

Таким чином, проведений аналіз показує, що зміна активного опору в даному експерименті обумовлена виключно температурним впливом і не пов'язана з пошкодженням обмоток.

3.4 Аналіз впливу кількості витків на струм обмотки

Одним із важливих параметрів, що визначає електричні характеристики обмотки електромагнітного пристрою, є кількість витків. Зміна кількості витків безпосередньо впливає на індуктивність обмотки, що, у свою чергу, визначає режим її роботи.

Індуктивність обмотки пов'язана з кількістю витків співвідношенням:

$$L \sim N^2, \quad (3.11)$$

де:

L – індуктивність обмотки, Гн;

N – кількість витків.

З наведеного виразу видно, що навіть незначна зміна кількості витків може призвести до суттєвої зміни індуктивності. Це, у свою чергу, впливає на індуктивний опір обмотки.

Індуктивний опір визначається за формулою:

$$X_L = 2\pi fL, \quad (3.12)$$

де:

X_L – індуктивний опір, Ом;

f – частота струму, Гц;

L – індуктивність, Гн.

Повний опір обмотки враховує як активну, так і індуктивну складові:

$$Z = \sqrt{R^2 + X_L^2}, \quad (3.13)$$

де:

Z – повний опір обмотки, Ом;

R – активний опір, Ом.

Сила струму в обмотці визначається законом Ома для змінного струму:

$$I = U / Z, (3.14)$$

де:

I – струм, А;

U – напруга, В;

Z – повний опір, Ом.

Таким чином, при збільшенні кількості витків індуктивність обмотки зростає, що призводить до збільшення повного опору та зменшення струму. При зменшенні кількості витків спостерігається протилежна ситуація — струм зростає.

У реальних умовах експлуатації трансформаторів зміна ефективної кількості витків може бути викликана міжвитковими замиканнями. У цьому випадку частина витків фактично виключається з роботи, що призводить до зменшення індуктивності обмотки та зміни її електричних параметрів.

Особливістю міжвиткових замикань є те, що вони можуть виникати поступово і на початкових стадіях не викликають значних змін у роботі пристрою. Саме тому важливо мати чутливі методи діагностування, здатні виявляти такі дефекти на ранніх етапах.

Аналіз залежності струму від кількості витків дозволяє оцінити, наскільки чутливим є цей параметр до змін у структурі обмотки. Це створює передумови для використання струму як інформативного діагностичного параметра.

3.5 Дослідження залежності струму від кількості витків обмотки

У рамках виконання даної роботи було проведено експериментальне дослідження впливу кількості витків обмотки на значення струму. Особливістю дослідження є те, що зміна кількості витків здійснювалася вручну, що дозволило змодельовати зміну ефективної кількості витків, характерну для міжвиткових замикань.

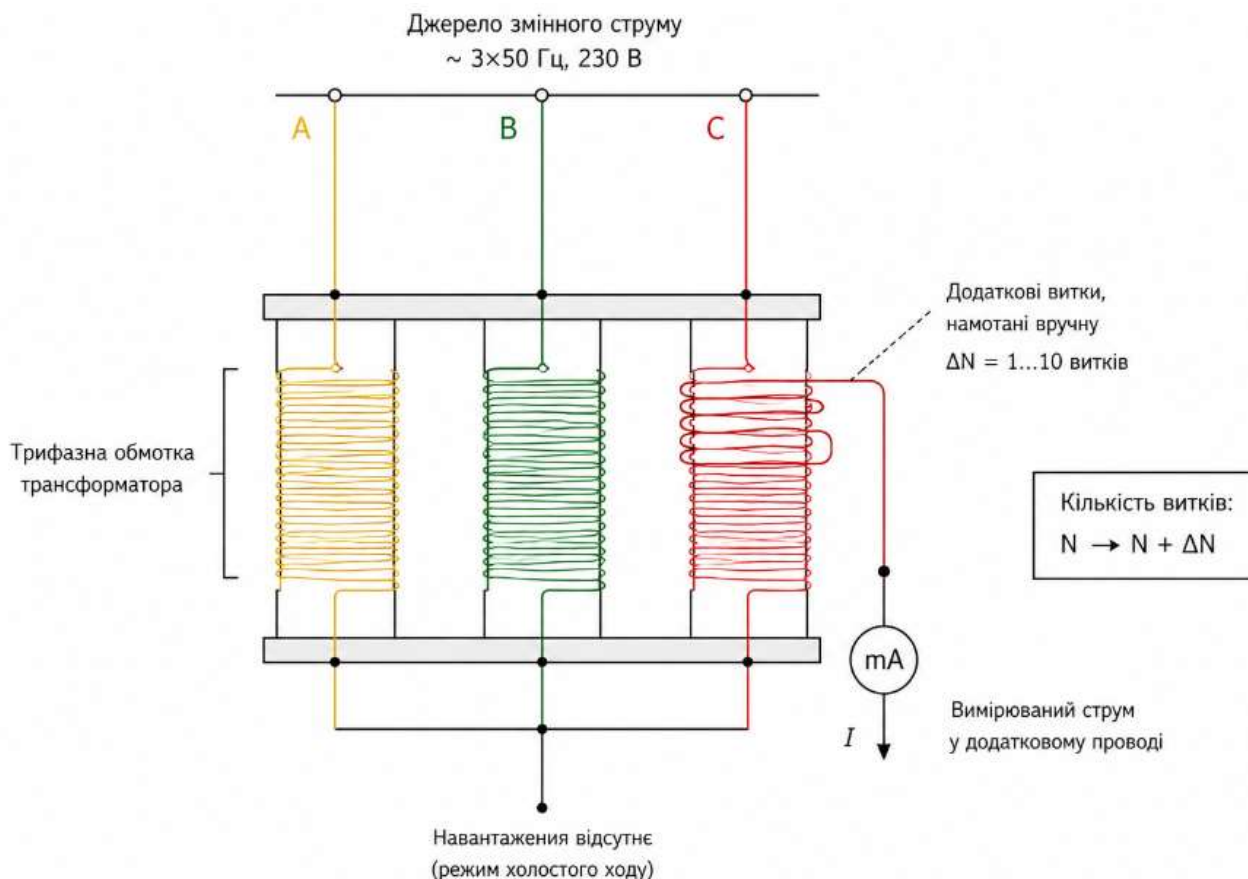


Рисунок 3.3 – Схема експерименту зі зміною кількості витків обмотки

На відміну від традиційних методів діагностування, у даному випадку не створювався реальний дефект, а імітувалася його дія шляхом зміни кількості витків. Це дозволило дослідити поведінку обмотки в контрольованих умовах та оцінити вплив даного параметра на струм.

У процесі експерименту кількість витків змінювалася від 10 до 0, після чого для кожного значення фіксувалося значення струму. Отримані результати наведено у таблиці 3.5.

Таблиця 3.5 – Залежність струму від кількості витків обмотки

Кількість витків	Струм, мА
10	535
9	530
8	526
7	515
6	505
5	475
4	445
3	367
2	240
1	200

Аналіз отриманих даних показує, що залежність струму від кількості витків має нелінійний характер. У діапазоні великих значень кількості витків зміна струму є незначною, що свідчить про стабільність електричних параметрів обмотки. Однак при зменшенні кількості витків нижче певного рівня спостерігається різке зниження струму.

Це пояснюється тим, що при значному зменшенні кількості витків суттєво змінюється індуктивність обмотки, що призводить до зміни її повного опору. У результаті змінюється режим роботи обмотки та характер протікання електромагнітних процесів.

Графічне представлення отриманої залежності наведено на рисунку 3.1.

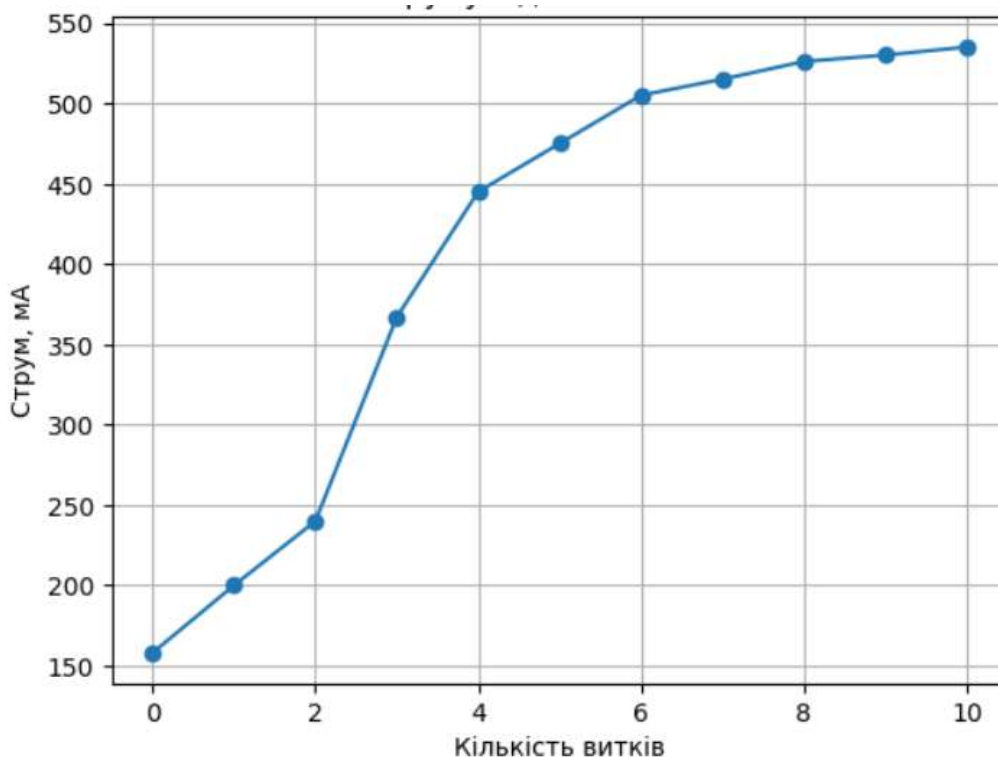


Рисунок 3.1 – Залежність струму від кількості витків обмотки

Побудований графік дозволяє більш наочно оцінити характер зміни струму. Видно, що крива має виражений нелінійний характер, що обумовлено складністю електромагнітних процесів у обмотці.

Практичне значення отриманих результатів полягає у можливості використання даної залежності для діагностування міжвиткових замикань. У разі виникнення такого дефекту фактична кількість витків зменшується, що призводить до зміни струму.

Порівнюючи експериментально отриману залежність з реальними значеннями струму в процесі експлуатації, можна оцінити ступінь пошкодження обмотки. Це дозволяє виявляти дефекти на ранніх стадіях та запобігати розвитку аварійних ситуацій.

Отримана залежність може бути використана як еталонна при проведенні діагностування обмоток у реальних умовах експлуатації.

3.6 Узагальнення результатів розрахункового аналізу

У даному розділі було виконано аналіз зміни електричних параметрів обмоток електромагнітних пристроїв під впливом температури та зміни кількості витків.

Встановлено, що активний опір обмоток суттєво залежить від температурного стану трансформатора. При підвищенні температури спостерігається закономірне зростання опору, що обумовлено фізичними властивостями провідникового матеріалу. При цьому симетричність значень між фазами зберігається, що свідчить про відсутність локальних пошкоджень обмоток.

Проведене дослідження впливу кількості витків показало, що даний параметр істотно впливає на значення струму. Зменшення кількості витків призводить до зміни індуктивності обмотки та, як наслідок, до зміни режиму її роботи.

Особливу увагу слід приділити тому, що залежність струму від кількості витків має нелінійний характер. Це дозволяє використовувати струм як чутливий параметр для діагностування стану обмоток, зокрема для виявлення міжвиткових замикань.

Отримана експериментальна залежність може бути використана як еталонна при проведенні діагностування електромагнітних пристроїв у реальних умовах експлуатації. Це дозволяє оцінювати ступінь розвитку дефекту та своєчасно виявляти відхилення від нормального режиму роботи.

Таким чином, результати проведеного аналізу підтверджують доцільність використання комплексного підходу до діагностування, що базується на поєднанні аналізу активного опору, температурного стану та залежності струму від кількості витків.

РОЗДІЛ 4

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ ДІАГНОСТУВАННЯ ОБМОТОК ЕЛЕКТРОДВИГУНА З ВИКОРИСТАННЯМ ІДО-05

4.1 Опис експериментального стенда

Експериментальні дослідження проводилися на лабораторному стенді, до складу якого входили трифазний асинхронний електродвигун, пристрій ІДО-05, блок живлення та керування, вимірювальні проводи, клемні з'єднання і допоміжні вимірювальні елементи. Даний стенд використовувався для практичної перевірки можливості контролю стану обмоток електродвигуна та аналізу режимів його роботи під час діагностування.

Досліджуваним об'єктом був асинхронний електродвигун із короткозамкненим ротором. Такий тип електродвигунів широко застосовується у виробничих механізмах, вентиляторах, насосах, приводах верстатів та іншому електромеханічному обладнанні. Основним елементом, стан якого суттєво впливає на надійність роботи двигуна, є статорна обмотка. Саме тому контроль параметрів обмотки є важливим етапом технічного діагностування.

Електродвигун був розміщений на робочій поверхні лабораторного стенда. Клемна коробка двигуна була відкрита, що дало можливість виконувати підключення вимірювальних проводів без розбирання корпусу машини. Такий підхід є зручним для навчального та експериментального дослідження, оскільки дозволяє наочно показати зв'язок між схемою підключення, режимом роботи двигуна та контрольованими параметрами.

Пристрій ІДО-05 використовувався як основний засіб контролю у складі експериментальної установки. Він підключався до клем електродвигуна через вимірювальні проводи та дозволяв контролювати параметри, пов'язані зі станом обмоток. У процесі дослідження пристрій використовувався для спостереження за режимом роботи двигуна та оцінки можливих відхилень у роботі обмоток.

Живлення стенда здійснювалося від мережі змінного струму через лабораторний блок керування. На панелі стенда були розміщені органи

керування, індикатори та вимірювальні прилади, які дозволяли контролювати подачу напруги та режим роботи установки. Це забезпечувало можливість безпечного запуску двигуна, контролю підключення та спостереження за роботою досліджуваного об'єкта.

Перед початком дослідження виконувалася перевірка правильності підключення електродвигуна та пристрою ІДО-05. Особлива увага приділялася надійності контакту в клемній коробці, правильності приєднання вимірювальних проводів і відсутності пошкоджень ізоляції. Така перевірка є необхідною, оскільки неправильне підключення може призвести до помилкових результатів або аварійного режиму роботи стенда.

У процесі експерименту ІДО-05 розміщувався безпосередньо поруч із електродвигуном. Це дозволяло швидко контролювати покази приладу та спостерігати за змінами під час роботи установки. Така організація стенда є зручною, оскільки всі основні елементи дослідження знаходилися в межах однієї робочої зони: електродвигун, клемні з'єднання, вимірювальні проводи, пристрій контролю та панель керування.

Загальний вигляд експериментального стенда наведено на рисунку 4.1. На ньому показано взаємне розташування асинхронного електродвигуна, пристрою ІДО-05, вимірювальних проводів та лабораторної панелі керування. Такий рисунок доцільно використовувати саме в експериментальному розділі, оскільки він підтверджує реальне проведення дослідження та показує фактичний вигляд установки.



Рисунок 4.1 - Загальний вигляд експериментального стенда з асинхронним електродвигуном та пристроєм ІДО-05

На рисунку 4.1 видно, що пристрій ІДО-05 підключений до електродвигуна через вимірювальні проводи, а сам двигун встановлений перед лабораторною панеллю керування. Відкрита клемна коробка дозволяє контролювати підключення обмоток і виконувати необхідні вимірювання без демонтажу двигуна. Це важливо для практичного діагностування, оскільки в реальних умовах часто потрібно виконати перевірку без повного розбирання обладнання.

Для зручності подальшого опису основні елементи експериментального стенда наведено в таблиці 4.1. Таблиця дозволяє чітко розділити призначення кожного елемента та показати його роль у проведенні дослідження.

Таблиця 4.1 - Основні елементи експериментального стенда

Елемент стенда	Призначення	Роль у дослідженні
Асинхронний електродвигун	Досліджуваний електромагнітний пристрій	Об'єкт контролю параметрів обмоток
Пристрій ІДО-05	Прилад контролю та діагностування	Використовувався для контролю режиму роботи обмоток
Лабораторна панель керування	Подача живлення та керування стендом	Забезпечувала запуск і контроль роботи установки
Клемна коробка двигуна	Місце підключення обмоток	Дозволяла виконувати підключення вимірювальних проводів
Вимірювальні проводи	З'єднання приладу з об'єктом	Забезпечували передавання сигналів до ІДО-05
Додаткові вимірювальні прилади	Контроль електричних параметрів	Використовувалися для перевірки режиму роботи стенда

Структура стенда дозволяє розглядати експеримент не як окреме вимірювання, а як послідовний процес діагностування. Спочатку виконується підготовка об'єкта, далі перевіряється схема підключення, після цього підключається пристрій ІДО-05 і проводиться контроль параметрів під час роботи двигуна. Саме така послідовність відповідає практичному підходу до технічної діагностики електромагнітних пристроїв.

Перевагою використаної установки є її наочність. Відкрита клемна коробка дає змогу бачити фактичне підключення обмоток, а розташування ІДО-05 поруч із двигуном дозволяє безпосередньо пов'язати покази приладу з режимом роботи електродвигуна. Це спрощує аналіз результатів та дозволяє краще зрозуміти взаємозв'язок між електричними параметрами і технічним станом обмоток.

Таким чином, експериментальний стенд забезпечив можливість виконання практичного дослідження роботи асинхронного електродвигуна із застосуванням ІДО-05. Його використання дозволило перейти від теоретичного

опису методів діагностування до практичного контролю параметрів реального електромагнітного пристрою.

4.2 Призначення, будова та принцип роботи пристрою ІДО-05

Пристрій ІДО-05 у складі експериментального стенда використовувався як допоміжний засіб контролю стану електродвигуна та його обмоток. Його призначення полягає у фіксації змін електричних параметрів, які виникають під час роботи електромагнітного пристрою, а також у виявленні відхилень, що можуть свідчити про погіршення технічного стану обмоток.

У межах даного дослідження ІДО-05 розглядався не як окремий ізолюваний прилад, а як частина загальної експериментальної установки. Тобто його робота оцінювалася разом із асинхронним електродвигуном, лабораторним стендом, клемними з'єднаннями та вимірювальними проводами. Такий підхід є більш правильним, оскільки у практичних умовах діагностування результат залежить не тільки від самого приладу, але й від правильності підключення та стабільності режиму роботи об'єкта.

Основним об'єктом контролю були обмотки асинхронного електродвигуна. Саме обмотки є найбільш важливим елементом електромагнітної системи двигуна, оскільки через них протікає струм, формується магнітне поле та створюється електромагнітний момент. Пошкодження ізоляції, погіршення контакту або міжвиткові дефекти можуть змінювати електричні параметри обмоток і впливати на роботу двигуна.

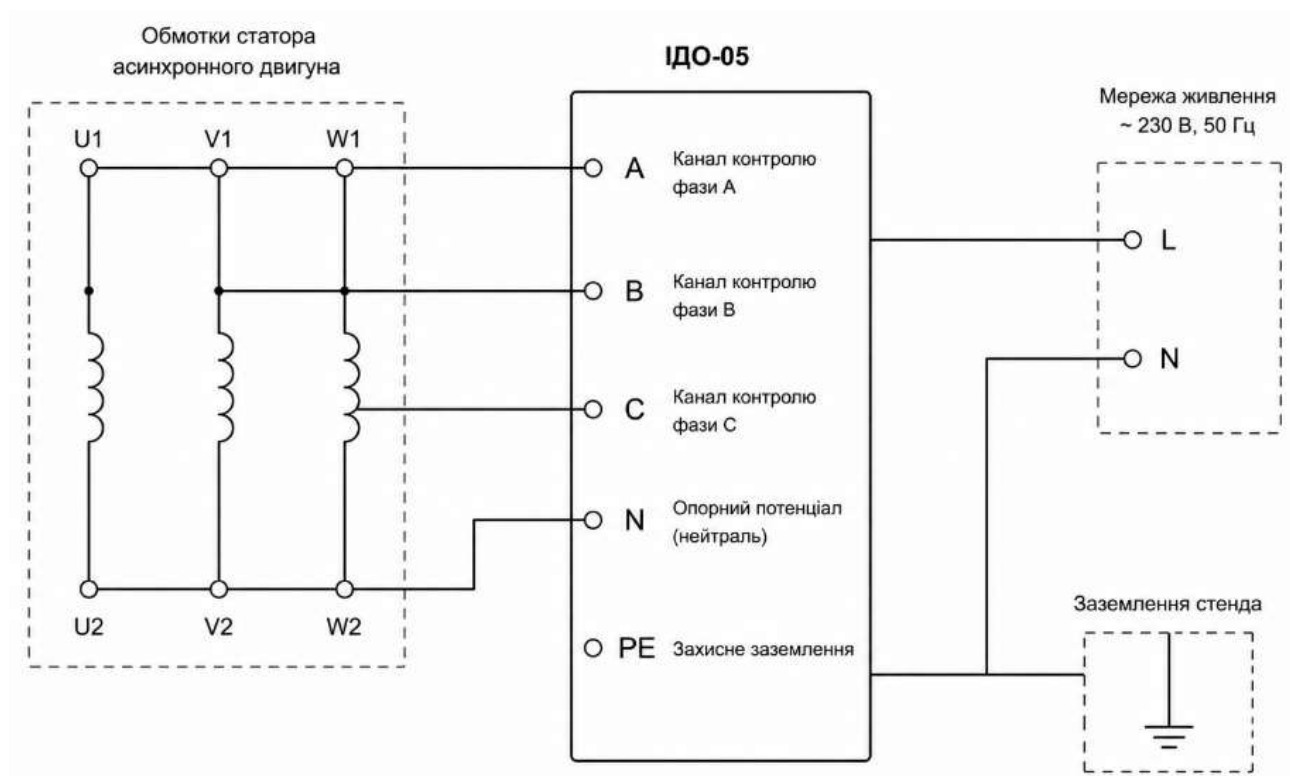


Рисунок 4.2 – Схема підключення пристрою ІДО-05 до обмоток статора асинхронного двигуна

На рисунку 4.2 показано схему підключення пристрою ІДО-05 до обмоток статора асинхронного двигуна. Контрольні канали приладу підключаються до фазних виводів U1–U2, V1–V2 та W1–W2. Таке підключення дозволяє виконувати контроль стану обмоток без розбирання електродвигуна та оцінювати справність фазних кіл. Захисне заземлення використовується для підвищення безпеки проведення вимірювань та стабільності роботи стенда.

ІДО-05 дозволяє виконувати попередній контроль стану обмоток без розбирання електродвигуна. Це є важливою перевагою, оскільки в реальних умовах експлуатації повне розбирання двигуна потребує значного часу, зупинки обладнання та додаткових витрат. Тому застосування приладу для оперативного контролю дає можливість швидше оцінити стан електромагнітного пристрою.

На корпусі пристрою розміщені органи керування та індикації, за допомогою яких виконується вибір режиму роботи та контроль результатів.

Наявність індикації дозволяє оператору спостерігати за станом приладу під час проведення досліду та контролювати правильність виконання вимірювання.

Підключення ІДО-05 до двигуна виконувалося через вимірювальні проводи, які з'єднували прилад із клемми електродвигуна. Перед початком роботи перевірялася надійність контактів, оскільки слабе або нестабільне з'єднання може суттєво спотворити результати діагностування. Особливо це важливо під час контролю обмоток, де навіть незначний перехідний опір у контакті може впливати на покази.

Принцип роботи ІДО-05 полягає в тому, що прилад подає або приймає контрольний електричний сигнал і за його зміною оцінює стан досліджуваного кола. Якщо обмотка справна, електричний відгук має стабільний характер. Якщо ж у колі є порушення, наприклад поганий контакт, пошкодження ізоляції або міжвиткове відхилення, характер сигналу може змінюватися.

У практичному сенсі ІДО-05 дозволяє не просто увімкнути двигун, а саме проконтролювати його електричний стан. Це відрізняє діагностичний підхід від звичайної перевірки працездатності, коли оцінюється лише факт запуску або обертання вала. Для діагностування важливо не тільки те, що двигун працює, а й те, у якому стані перебувають його обмотки.

Під час роботи стенда ІДО-05 дозволяв контролювати стан електричного кола та спостерігати реакцію двигуна на підключення. Важливим є те, що прилад застосовувався безпосередньо з реальним електродвигуном, а не лише як навчальний макет. Це підвищує практичну цінність дослідження, оскільки результати можна пов'язати з реальною роботою електромагнітного пристрою.

Пристрій доцільно використовувати для попереднього діагностування електродвигунів перед їх запуском, після ремонту, після тривалого простою або при підозрі на несправність обмоток. У таких випадках контроль за допомогою ІДО-05 дозволяє зменшити ризик запуску двигуна з прихованим дефектом.

Особливе значення має застосування ІДО-05 для виявлення початкових несправностей. На ранній стадії дефект може не проявлятися зовні: двигун може запускатися, працювати без сильного шуму або перегріву, але електричні параметри обмоток уже можуть мати відхилення. Саме тому контроль обмоток доцільно виконувати до появи явних ознак аварійного режиму.

У складі експериментального стенда ІДО-05 виконував роль контрольного приладу, який доповнював візуальний огляд та вимірювання мультиметром. Такий комплексний підхід дозволяє отримати більш повну інформацію про технічний стан електродвигуна, оскільки один прилад не завжди може повністю охарактеризувати стан обмоток.

Важливо також враховувати, що правильність роботи ІДО-05 залежить від підготовки об'єкта до вимірювання. Перед підключенням необхідно перевірити чистоту клем, надійність затискачів, відсутність обривів у з'єднувальних проводах та правильність вибору точок підключення. Якщо ці умови не виконані, результати можуть бути неточними.

Застосування ІДО-05 у лабораторному дослідженні дозволило показати практичну сторону діагностування обмоток. У теоретичній частині роботи було розглянуто, що зміна стану обмотки впливає на її електричні параметри. У даному підрозділі це положення доповнюється практичним описом приладу, який може використовуватися для контролю таких змін.

Таблиця 4.2 – Технічні характеристики індикатора дефектів обмоток
електричних машин ІДО-05

Параметр	Значення
Контрольовані параметри під час перевірки котушок розподілених обмоток, укладених у пази, на наявність міжвиткових замикань і поганої якості міжвиткової ізоляції	Струм у перевірюваній котушці
Контрольовані параметри під час перевірки котушок зосереджених обмоток на наявність міжвиткових замикань	Коефіцієнт відмінності напруги на котушках Кр
Контрольований діапазон Кр, %	0–99
Контрольований діапазон Ri, МОм	0–500
Величина Кр у разі замикання одного витка в котушці, %, не менше ніж	10
Амплітуда імпульсної випробувальної напруги під час перевірки котушок розподілених обмоток, В/виток	1; 2; 4; 8; 16
Амплітуда імпульсної випробувальної напруги під час перевірки котушок зосереджених обмоток, В	400
Вихідна постійна напруга під час вимірювання Ri, В	1000 (100 + 100)
Індикація	Світлодіодна та світлодіодна алфавітно-цифрова трирозрядна
Живлення	Автономне або від зовнішнього блока живлення

Технічні характеристики пристрою ІДО-05 наведено відповідно до технічної документації та інформації постачальника вимірювального обладнання [19].

У таблиці 4.2 наведено основні елементи пристрою ІДО-05, які використовувалися під час проведення дослідження. Найбільше значення для експерименту мали індикаторний блок, клеми підключення та вимірювальні проводи, оскільки саме через них здійснювався контроль стану електродвигуна.

4.3 Проведення експериментальних досліджень

На початковому етапі проведення дослідження виконувалося підключення асинхронного електродвигуна до лабораторного стенда та перевірка правильності схеми підключення. Особлива увага приділялася стану контактів, надійності затискачів та правильності підключення вимірювальних проводів до клем електродвигуна та пристрою ІДО-05.

Після завершення підготовки стенда виконувався запуск електродвигуна та контроль режимів його роботи. У процесі роботи стенда здійснювався контроль електромагнітних параметрів обмоток, а також спостереження за стабільністю режиму роботи двигуна. Для цього використовувався ІДО-05 та допоміжні вимірювальні прилади.

Під час проведення експерименту контролювався характер роботи обмоток електродвигуна при різних режимах роботи стенда. У процесі дослідження оцінювалася стабільність електромагнітних процесів та реакція електродвигуна на зміну режиму роботи.

Особливістю даного дослідження було те, що контроль параметрів виконувався без розбирання електродвигуна. Це дозволило оцінити можливість використання ІДО-05 для оперативного діагностування електромагнітних пристроїв у реальних умовах експлуатації.

У процесі проведення дослідження здійснювалося декілька циклів вимірювань. Для кожного режиму роботи стенда контролювалися параметри обмоток, характер роботи електродвигуна та стабільність електромагнітних процесів. Отримані результати порівнювалися між собою для оцінки повторюваності вимірювань.

Під час проведення досліджень особлива увага приділялася правильності роботи ІДО-05 та стабільності його підключення до електродвигуна. Навіть незначне погіршення контакту у вимірювальному колі може впливати на

результати контролю, тому перед кожним запуском стенда перевірявся стан вимірювальних проводів та затискачів.

У процесі проведення експерименту спостерігалася зміна характеру електромагнітних процесів залежно від режиму роботи електродвигуна. Це підтвердило, що параметри обмоток мають безпосередній вплив на роботу електромагнітного пристрою та можуть використовуватися як діагностичні ознаки під час оцінки технічного стану.

Використання ІДО-05 у складі лабораторного стенда дозволило виконувати контроль параметрів у режимі реального часу. Це значно підвищило наочність проведення експерименту та дозволило більш детально спостерігати поведінку електродвигуна під час роботи.

Під час проведення дослідження також оцінювалася практична зручність використання ІДО-05. Було встановлено, що пристрій може ефективно застосовуватися для попереднього контролю стану електродвигуна перед запуском або після проведення ремонтних робіт.

Проведені експериментальні дослідження показали, що комплексний підхід із використанням ІДО-05, візуального контролю та вимірювальних приладів дозволяє більш повно оцінити технічний стан електродвигуна та підвищити достовірність результатів діагностування.

Таблиця 4.3 – Основні етапи проведення експерименту

Етап дослідження	Зміст виконуваних робіт
Підготовка стенда	Перевірка підключення електродвигуна та вимірювальних проводів
Підключення ІДО-05	З'єднання приладу з контрольними точками електродвигуна
Запуск двигуна	Подача живлення та контроль режиму роботи
Контроль параметрів	Спостереження за електромагнітними процесами та станом обмоток
Повторні вимірювання	Порівняння результатів при різних режимах роботи
Аналіз результатів	Оцінка технічного стану електродвигуна

Наведені етапи проведення експерименту дозволили систематизувати процес дослідження та забезпечити послідовне виконання вимірювань. Особливе значення мало дотримання правильної послідовності підключення та контролю параметрів, оскільки це безпосередньо впливало на достовірність отриманих результатів.

4.4 Аналіз роботи експериментального стенда та процесу діагностування

Під час проведення експериментального дослідження основна увага приділялася не отриманню великої кількості числових параметрів, а аналізу процесу діагностування електродвигуна та оцінці можливостей використання ІДО-05 у складі лабораторного стенда. Такий підхід дозволив більш детально розглянути принцип контролю стану обмоток та особливості проведення діагностичних робіт.

У процесі проведення дослідження виконувалося підключення ІДО-05 до контрольних точок електродвигуна та спостереження за роботою обмоток у різних режимах роботи стенда. Особлива увага приділялася стабільності роботи двигуна, правильності підключення та реакції системи на зміну режиму роботи.

Одним із головних завдань проведення дослідження був контроль стану обмоток електродвигуна без його розбирання. Використання ІДО-05 дозволило оцінити можливість оперативного контролю електромагнітних параметрів та виконання попереднього діагностування електродвигуна перед його введенням у роботу.

У процесі роботи стенда оцінювалася реакція електродвигуна на підключення, характер роботи обмоток та стабільність електромагнітних процесів. Було встановлено, що правильність підключення вимірювальних проводів та надійність контактів суттєво впливають на якість проведення діагностування.

Під час проведення дослідження також оцінювалася зручність використання ІДО-05 у складі лабораторного стенда. Наявність індикаторів та можливість швидкого підключення до контрольних точок двигуна дозволяли оперативно проводити підготовку до вимірювання та контроль стану обмоток.

Проведений аналіз показав, що використання ІДО-05 є доцільним для попереднього контролю стану електродвигунів, перевірки обмоток після ремонту та проведення навчальних лабораторних досліджень. Пристрій дозволяє спростити процес діагностування та підвищити наочність проведення контролю.

Особливе значення у процесі діагностування має правильна організація підключення елементів стенда. Неправильне підключення вимірювальних проводів або недостатня надійність контактів можуть впливати на результати контролю та ускладнювати оцінку технічного стану електродвигуна.

У результаті проведення дослідження було підтверджено, що використання ІДО-05 у складі лабораторного стенда дозволяє виконувати контроль стану обмоток електродвигуна без складного демонтажу обладнання. Це є важливою перевагою під час проведення технічного обслуговування та попереднього діагностування електромагнітних пристроїв.

Таблиця 4.5 – Основні етапи процесу діагностування електродвигуна

Етап роботи	Виконувана дія	Що контролюється	Мета контролю
Підготовка стенда	Перевірка підключення двигуна та ІДО-05	Стан контактів та схема підключення	Забезпечення правильності проведення дослідів
Підключення приладу	З'єднання ІДО-05 з контрольними точками	Надійність електричних з'єднань	Підготовка до контролю обмоток
Запуск електродвигуна	Подача живлення на стенд	Стабільність роботи двигуна	Оцінка початкового режиму роботи
Контроль параметрів	Спостереження за роботою обмоток	Електромагнітні процеси	Виявлення можливих відхилень
Завершення дослідження	Відключення стенда та перевірка підключень	Стан елементів стенда	Безпечне завершення роботи

Наведені етапи проведення діагностування дозволяють систематизувати процес роботи з лабораторним стендом та забезпечити правильну послідовність виконання контролю стану електродвигуна. Дотримання послідовності проведення діагностичних операцій є важливою умовою отримання достовірних результатів.

РОЗДІЛ 5

ОХОРОНА ПРАЦІ ПРИ ДІАГНОСТУВАННІ ОБМОТОК ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПРИСТРОЇВ

5.1 Небезпечні та шкідливі виробничі фактори під час проведення діагностування

Під час проведення діагностування обмоток електромагнітних пристроїв існує низка небезпечних та шкідливих факторів, які можуть впливати на безпеку персоналу та справність обладнання. До таких факторів належать дія електричного струму, нагрівання елементів обладнання, можливість виникнення коротких замикань, пошкодження ізоляції, а також підвищене електромагнітне навантаження під час проведення вимірювань і випробувань.

Основну небезпеку під час проведення діагностичних робіт становить ураження електричним струмом. Під час підключення трансформаторів, електродвигунів та вимірювальних приладів працівник контактує з електричними колами, які можуть перебувати під напругою. Особливо небезпечними є режими короткого замикання та проведення випробувань із нагріванням обмоток, оскільки у таких умовах виникають підвищені струми та збільшується ризик пошкодження ізоляції.

Під час проведення досліджень використовувалися лабораторний стенд, електродвигун, трансформатор та індикатор дефектів обмоток ІДО-05. У процесі роботи виконувалося підключення вимірювальних проводів до контрольних точок обмоток, подача живлення на стенд і контроль стану електромагнітних параметрів. Неправильне підключення елементів схеми або пошкодження ізоляції можуть призвести до виникнення аварійного режиму роботи.

Окрему небезпеку становить нагрівання обмоток електромагнітних пристроїв. Під час проведення експериментів із трансформатором у режимі короткого замикання температура обмоток і поверхні обладнання суттєво зростає. При дотику до нагрітих частин можливе отримання термічних опіків.

Крім того, перегрів негативно впливає на стан ізоляції та може спричинити її прискорене старіння.

Під час роботи електромагнітних пристроїв утворюються електромагнітні поля, які також належать до шкідливих виробничих факторів. Хоча рівень електромагнітного випромінювання лабораторного обладнання є відносно невеликим, тривале перебування поблизу працюючих установок потребує дотримання вимог безпеки та правильного розміщення обладнання в лабораторії.

Небезпечним фактором є також можливість виникнення короткого замикання внаслідок помилкового підключення обмоток або пошкодження провідників. У такому випадку виникає різке зростання струму, що може призвести до перегрівання провідників, пошкодження обладнання та виникнення пожежонебезпечної ситуації.

Під час проведення діагностування важливе значення має стан робочого місця. Наявність пошкоджених кабелів, ненадійних контактів, захаращення проходів або недостатнього освітлення може ускладнювати виконання вимірювань і підвищувати ризик помилкових дій оператора. Для безпечного виконання робіт необхідно забезпечити справність обладнання, достатній рівень освітлення та вільний доступ до аварійного відключення живлення.

Під час роботи з вимірювальними приладами необхідно враховувати можливість механічного пошкодження з'єднувальних проводів і контактів. Несправність вимірювальних щупів або ненадійне з'єднання можуть спричинити спотворення результатів вимірювання та створити небезпечну ситуацію під час роботи стенда.

Таким чином, проведення діагностування обмоток електромагнітних пристроїв пов'язане з дією електричних, теплових та організаційних небезпечних факторів. Для забезпечення безпечних умов праці необхідно

дотримуватися правил електробезпеки, контролювати технічний стан обладнання та правильно організовувати процес проведення досліджень.

5.2 Технічні та організаційні заходи безпеки

Під час проведення діагностування обмоток електромагнітних пристроїв важливе значення має дотримання технічних та організаційних заходів безпеки. Виконання таких заходів дозволяє зменшити ризик ураження електричним струмом, запобігти пошкодженню обладнання та забезпечити безпечні умови праці під час проведення лабораторних досліджень.

До проведення діагностичних робіт допускаються особи, які пройшли інструктаж з охорони праці, ознайомлені з правилами роботи в електроустановках та мають відповідний рівень підготовки для роботи з вимірювальним обладнанням. Перед початком виконання робіт необхідно перевірити справність лабораторного стенда, стан ізоляції проводів, надійність контактних з'єднань і правильність підключення елементів схеми.

Особлива увага приділяється перевірці технічного стану вимірювальних приладів, лабораторного стенда, пристрою ІДО-05, електродвигуна та трансформатора. Забороняється використовувати кабелі з пошкодженою ізоляцією, вимірювальні щупи з тріщинами, ослаблені затискачі або обладнання зі слідами перегрівання. Перед подачею напруги необхідно впевнитися у правильності зібраної схеми та відсутності коротких замикань.

Під час проведення досліджень електродвигунів і трансформаторів необхідно забезпечити надійне заземлення металевих частин обладнання. Захисне заземлення використовується для зменшення небезпеки ураження електричним струмом у випадку пошкодження ізоляції або появи напруги на корпусі обладнання. Усі металеві частини лабораторного стенда, які можуть опинитися під напругою, повинні бути приєднані до захисного провідника.

Організація робочого місця повинна забезпечувати вільний доступ до органів керування стендом та аварійного відключення живлення. Проводи необхідно розміщувати таким чином, щоб виключити можливість їх механічного пошкодження, натягування або випадкового дотику до струмовідних частин. Робоче місце має бути добре освітленим, не захащеним сторонніми предметами та зручним для виконання вимірювань.

Під час проведення експериментів із нагріванням обмоток необхідно контролювати температурний стан обладнання та не допускати перегрівання трансформатора або електродвигуна. Після завершення дослідження обладнання повинно бути відключене від мережі, а перед зміною підключень необхідно перевірити відсутність напруги на контрольних точках.

Важливим організаційним заходом є дотримання правильної послідовності виконання робіт. Спочатку виконується перевірка схеми та підключення обладнання, після цього проводиться подача живлення і контроль параметрів. Після завершення вимірювань необхідно відключити живлення, переконатися у відсутності небезпечної напруги та лише після цього виконувати зміну підключень.

Під час роботи з пристроєм ІДО-05 необхідно дотримуватися вимог щодо підключення вимірювальних проводів і не перевищувати допустимі режими роботи обладнання. Неправильне використання приладу може призвести до спотворення результатів контролю або пошкодження елементів стенда. Перед початком роботи слід переконатися, що прилад підключений до відповідних контрольних точок, а контакти мають надійне з'єднання.

Для забезпечення безпечних умов праці також необхідно використовувати засоби індивідуального захисту. До них належать діелектричні рукавички, інструмент з ізольованими ручками, захисне взуття та інші засоби, передбачені умовами виконання робіт. Використання таких засобів дозволяє зменшити ризик травмування під час роботи з електроустановками.

Дотримання технічних та організаційних заходів безпеки є обов'язковою умовою проведення діагностування обмоток електромагнітних пристроїв. Правильна організація робіт, контроль технічного стану обладнання, справність заземлення та виконання вимог електробезпеки дозволяють забезпечити надійну та безпечну роботу лабораторного стенда.

Таблиця 5.1 – Основні технічні та організаційні заходи безпеки під час діагностування

Заходи безпеки	Зміст заходу	Практичне значення
Перевірка обладнання	Огляд стенда, приладів, проводів, щупів та контактів перед початком роботи	Запобігання аварійним режимам та помилкам під час вимірювань
Захисне заземлення	Підключення металевих частин обладнання до захисного провідника	Зменшення ризику ураження струмом при пошкодженні ізоляції
Організація робочого місця	Вільний доступ до стенда, відсутність сторонніх предметів, належне освітлення	Зниження ймовірності випадкових дій та механічного пошкодження проводів
Безпечна послідовність робіт	Підключення виконують при відключеному живленні, а зміну схеми - після перевірки відсутності напруги	Зменшення ризику короткого замикання та ураження струмом
Використання ЗІЗ	Застосування діелектричних рукавичок, ізольованого інструменту та захисного взуття	Додатковий захист персоналу під час роботи з електроустановками

5.3 Електробезпека під час дослідження обмоток

Під час проведення діагностування обмоток електромагнітних пристроїв особлива увага приділяється питанням електробезпеки, оскільки роботи виконуються з електрообладнанням, яке перебуває під напругою. Порухення правил безпечної експлуатації електроустановок може призвести до ураження

електричним струмом, пошкодження обладнання та виникнення аварійних ситуацій.

Електричний струм є одним із найбільш небезпечних виробничих факторів під час роботи з лабораторними стендами, трансформаторами та електродвигунами. Небезпека ураження залежить від величини струму, тривалості його дії, стану організму людини та умов навколишнього середовища. Найбільш небезпечним є проходження струму через грудну клітину та серце людини.

Під час виконання експериментальних досліджень необхідно забезпечити захист від випадкового дотику до струмовідних частин. Для цього застосовуються ізольовані провідники, захисні кожухи та надійна ізоляція елементів лабораторного стенда. Усі металеві частини обладнання, які можуть опинитися під напругою у випадку пошкодження ізоляції, повинні бути заземлені.

Важливим засобом забезпечення електробезпеки є використання захисного заземлення. Захисне заземлення дозволяє знизити напругу дотику на корпусі обладнання та забезпечити спрацювання захисних апаратів у разі аварійного режиму роботи. Під час проведення досліджень необхідно регулярно перевіряти справність заземлювальних з'єднань.

Перед початком роботи оператор повинен перевірити технічний стан обладнання, справність вимірювальних приладів і відсутність механічних пошкоджень проводів. Забороняється використовувати кабелі з пошкодженою ізоляцією або прилади зі слідами перегрівання.

Під час зміни схеми підключення обладнання необхідно повністю відключити живлення лабораторного стенда. Виконання підключень під напругою створює підвищену небезпеку ураження електричним струмом та може призвести до короткого замикання.

Для підвищення безпеки проведення досліджень необхідно використовувати засоби індивідуального захисту: діелектричні рукавички, інструмент з ізольованими ручками та захисне взуття. Такі засоби дозволяють зменшити ризик ураження струмом під час роботи з електроустановками.

У разі виникнення аварійної ситуації або появи ознак несправності обладнання необхідно негайно відключити живлення стенда та повідомити відповідальну особу. У випадку ураження людини електричним струмом необхідно швидко звільнити потерпілого від дії струму, дотримуючись правил особистої безпеки, та надати першу домедичну допомогу.

Дотримання правил електробезпеки під час проведення діагностування обмоток електромагнітних пристроїв є обов'язковою умовою безпечного виконання лабораторних робіт та забезпечення надійної роботи обладнання.

5.4 Протипожежна безпека в лабораторії

Під час проведення діагностування обмоток електромагнітних пристроїв важливе значення має забезпечення протипожежної безпеки, оскільки робота виконується з електрообладнанням, яке може бути джерелом займання у разі аварійного режиму роботи або порушення правил експлуатації.

Основними причинами виникнення пожеж під час роботи лабораторного стенда є короткі замикання, перевантаження електричних кіл, перегрівання провідників, пошкодження ізоляції та неправильне підключення обладнання. Особливо небезпечними є режими випробування трансформаторів і електродвигунів, пов'язані з нагріванням обмоток.

Для запобігання виникненню пожежі необхідно використовувати лише справне обладнання та контролювати технічний стан кабелів, вимірювальних проводів і контактних з'єднань. Забороняється експлуатація обладнання зі слідами пошкодження ізоляції або перегрівання.

Під час проведення експериментальних досліджень необхідно забезпечити вільний доступ до засобів пожежогасіння та аварійного відключення живлення. У лабораторії повинні бути наявні вогнегасники, придатні для гасіння електроустановок, що перебувають під напругою.

Особливу увагу необхідно приділяти вентиляції приміщення. Під час тривалої роботи трансформаторів і електродвигунів можливе підвищення температури повітря та нагрівання елементів стенда. Недостатня вентиляція може призвести до накопичення тепла та підвищення пожежної небезпеки.

Робоче місце повинно підтримуватися в чистоті. Забороняється зберігати поблизу електрообладнання легкозаймисті матеріали, папір, тканини або сторонні предмети, які можуть сприяти поширенню пожежі.

У разі появи запаху горілої ізоляції, диму або ознак перегрівання обладнання необхідно негайно відключити живлення лабораторного стенда та повідомити відповідальну особу. Після цього потрібно визначити причину несправності та не допускати повторного ввімкнення обладнання до усунення пошкоджень.

Під час виникнення пожежі в електроустановці забороняється використовувати воду для гасіння обладнання, яке перебуває під напругою. Для ліквідації займання необхідно застосовувати порошкові або вуглекислотні вогнегасники.

Дотримання правил протипожежної безпеки під час проведення діагностування обмоток електромагнітних пристроїв дозволяє забезпечити безпечні умови праці, зменшити ризик аварійних ситуацій та підвищити надійність роботи лабораторного обладнання.

ВИСНОВКИ

У магістерській роботі було розглянуто питання оптимізації технологічних процесів діагностування несправностей багатошарових обмоток електромагнітних пристроїв. Проведений аналіз літературних джерел показав, що сучасні методи діагностування дозволяють оцінювати окремі параметри технічного стану обмоток, однак найбільш ефективним є комплексний підхід, при якому результати різних методів аналізуються у взаємозв'язку.

У першому розділі було проаналізовано основні види дефектів обмоток електромагнітних пристроїв, причини їх виникнення та особливості прояву під час експлуатації. Розглянуто електричні, теплові та комбіновані методи діагностування, а також визначено їх переваги та недоліки. Встановлено, що підвищення достовірності оцінки технічного стану обмоток досягається шляхом поєднання кількох методів контролю та аналізу зміни параметрів у різних режимах роботи.

У другому розділі було розроблено алгоритм діагностування обмоток електромагнітних пристроїв, який передбачає послідовне виконання етапів контролю: підготовку об'єкта, перевірку контактів, вимірювання основних параметрів, обробку результатів та аналіз отриманих залежностей. Встановлено, що використання послідовного алгоритму дозволяє зменшити ймовірність помилок під час проведення вимірювань і забезпечити більш наочне представлення результатів діагностування.

У третьому розділі було проведено експериментальні дослідження трансформатора з багатошаровими обмотками. Під час дослідження виконувалося вимірювання активного опору до та після нагрівання трансформатора у режимі короткого замикання. Встановлено, що підвищення температури призводить до зміни активного опору обмоток, при цьому зберігається симетричність параметрів між фазами. Отримані результати

підтвердили можливість використання аналізу активного опору як однієї з діагностичних ознак технічного стану обмоток.

У четвертому розділі було розглянуто процес діагностування електродвигуна за допомогою індикатора дефектів обмоток ІДО-05. Проведено аналіз роботи лабораторного стенда, схеми підключення та принципу функціонування приладу. Встановлено, що використання ІДО-05 дозволяє виконувати оперативний контроль стану обмоток без складного демонтажу обладнання та забезпечує підвищення наочності процесу діагностування під час проведення лабораторних досліджень.

У п'ятому розділі було розглянуто питання охорони праці під час проведення діагностування обмоток електромагнітних пристроїв. Проаналізовано основні небезпечні та шкідливі виробничі фактори, технічні та організаційні заходи безпеки, вимоги електробезпеки та протипожежного захисту. Встановлено, що дотримання правил безпечної експлуатації електроустановок є необхідною умовою безпечного проведення експериментальних досліджень.

У результаті виконання роботи було підтверджено, що комплексний підхід до діагностування, який базується на поєднанні електричних параметрів, температурного аналізу та послідовного алгоритму контролю, дозволяє підвищити достовірність оцінки технічного стану багатошарових обмоток електромагнітних пристроїв. Запропонований підхід може бути використаний під час навчальних лабораторних досліджень, попереднього технічного контролю електродвигунів і трансформаторів, а також для вдосконалення процесу діагностування електромагнітного обладнання.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Правила улаштування електроустановок : наказ Міністерства енергетики та вугільної промисловості України від 21.07.2017 № 476.
2. Правила технічної експлуатації електроустановок споживачів : наказ Міністерства палива та енергетики України від 25.07.2006 № 258.
3. Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів : наказ Міністерства праці та соціальної політики України від 09.01.1998 № 4.
4. ДСТУ EN 60076-1:2016. Трансформатори силові. Частина 1. Загальні відомості (EN 60076-1:2011, IDT).
5. ДСТУ EN 60034-1:2016. Машини електричні обертові. Частина 1. Номінальні та робочі характеристики.
6. IEC 60076-1:2011. Power transformers – Part 1: General.
7. IEC 60034-1:2026. Rotating electrical machines – Part 1: Rating and performance.
8. IEEE C57.152-2013. IEEE Guide for Diagnostic Field Testing of Fluid-Filled Power Transformers, Regulators, and Reactors.
9. Megger. A Guide to Transformer Winding Resistance Measurements.
10. OMICRON. The DC Winding Resistance Test.
11. Beheshti Asl M. A Comprehensive Review of Transformer Winding Health Assessment Using Frequency Response Analysis and Machine Learning // Energies. 2025.
12. García-Rodríguez L. C. Detection of Short-Circuit Faults in Induction Motor Winding Using Current Signals // Processes. 2025.
13. Pietrowski W. Detection of inter-turn short-circuit at start-up of induction machine // Open Physics. 2017.
14. A review of transformer FRA measurement and diagnosis techniques // Transformers Magazine.
15. Прилади діагностики та пристрої захисту електродвигунів.
16. Індикатор дефектів обмоток електричних машин ИДО-06.
17. ДСТУ ІЕС 61558-1:2010. Безпечність силових трансформаторів, блоків живлення, реакторів та аналогічних виробів.
18. Наказ від 25.07.2006 № 258. Про затвердження Правил технічної експлуатації електроустановок споживачів.
19. Індикатор дефектів обмоток електричних машин ИДО-05 : технічні характеристики.
20. Кузнецов В. Г. Діагностика електричних машин та трансформаторів : навчальний посібник. – Харків : ХНУМГ, 2018. – 256 с.

21. Бондаренко М. О. Методи контролю технічного стану електромагнітних пристроїв // Електротехніка і електромеханіка. – 2020. – №4. – С. 35–41.
22. Сегеда М. С. Електричні машини : підручник. – Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2018. – 608 с.
23. Правила технічної експлуатації електроустановок споживачів. – Київ : Міністерство енергетики України, 2021. – 412 с.
24. ДСТУ EN 60034-1:2015 Машини електричні обертові. Частина 1. Номінальні параметри та характеристики.
25. Болюх В. Ф. Теорія електричних апаратів та електромагнітних систем. – Харків : НТУ «ХПІ», 2019. – 324 с.
26. Технічний опис та інструкція з експлуатації індикатора дефектів обмоток ІДО-05
27. ДСТУ 7237:2011 Система стандартів безпеки праці. Електробезпека. Загальні вимоги.
28. Коцур М. І. Дослідження теплових режимів електричних машин // Вісник КНУТД. – 2019. – №2. – С. 52–58.
29. IEEE Guide for Diagnostic Field Testing of Electric Power Apparatus – IEEE Standards Association, 2020.
30. IEC 60076-1 Power transformers – Part 1: General. International Electrotechnical Commission, 2018.