

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

УДК 621.3.016

ПОГОДЖЕНО
Директор ННІ енергетики,
автоматики і
енергозбереження

ДОПУСКАЄТЬСЯ ДО ЗАХИСТУ
В.о. завідувача кафедри
інженерії енергосистем

_____ /Каплун В.В./
(підпис)

« _____ » _____ 2024 р.

_____ /Антипов Є.О./
(підпис)

« _____ » _____ 2024 р.

МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

**на тему: «ПОРІВНЯННЯ МЕТОДІВ ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ СХЕМ
ЗАМІЩЕННЯ НА ПРИКЛАДІ АСИНХРОННИХ ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ»**

Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»
(код і назва)

Освітня програма Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
(назва)

Орієнтація освітньої програми Освітньо-професійна
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Гарант освітньої програми

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

(підпис)

Усенко С.М
(ПІБ)

Керівник магістерської кваліфікаційної роботи

Д.Т.Н., професор
(науковий ступінь та вчене звання)

(підпис)

Кривоносов В.Є.
(ПІБ)

Виконав

(підпис)

Романюк О.І.
(ПІБ)

КИЇВ – 2024

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

ЗАТВЕРДЖУЮ

В.о. завідувача кафедри

інженерії енергосистем

к.т.н доцент _____ Антипов Є.О.
(ступінь, звання) (підпис) (ПІБ)
« ____ » _____ 2024 р.

**ЗАВДАННЯ
ДО ВИКОНАННЯ МАГІСТЕРСЬКОЇ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ СТУДЕНТУ**

Романюку Олексію Ігоровичу

Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»
(код і назва)

Освітня програма Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
(назва)

Орієнтація освітньої програми Освітньо професійна
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Тема магістерської роботи «ПОРІВНЯННЯ МЕТОДІВ ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ СХЕМ ЗАМІЩЕННЯ НА ПРИКЛАДІ АСИНХРОННИХ ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ» затверджена наказом ректора Національного університету біоресурсів і природокористування України від 26 вересня 2024 р. № 1666 «С»

Термін подання завершеної роботи на кафедру 2024.11.15
(рік, місяць, число)

Вихідні дані до магістерської роботи: літературні джерела в наукових статтях. Данні лабораторних іспитів, дослідження холостого ходу, дослідження короткого замикання асинхронних двигунів.

Перелік питань, що підлягають дослідженню: 1. Дослідити причину появи міжвиткових замикань у обмотці статора. 2. Дослідити причину руйнування ізоляції асинхронних двигунів. 3 Дослідити вплив варіації параметрів схеми заміщення асинхронного двигуна на точність виявлення виткового замикання в обмотці статора. 4. Дослідити математичну модель температурного стану ізоляції асинхронного двигуна за наявності виткових замикань і несиметрії мережі живлення

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

Дата видачі завдання «26» вересня 2024 р.

Керівник магістерської роботи _____
(підпис)

Кривонос В.Є
(ПІБ)

Завдання прийняв до виконання _____
(підпис)

Романюк О.І
(ПІБ)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка містить: 68 стор., 10 табл., 13 рис., 57 формул, 21 літературних джерел.

Магістерська робота присвячена дослідженню асинхронних електродвигунів, аналізу факторів, що впливають на їх роботу, а також удосконаленню методів визначення параметрів схем заміщення та діагностики несправностей.

У роботі розглянуто основні характеристики та конструктивні особливості асинхронних електродвигунів, зокрема двигунів із короткозамкненим ротором. Досліджено види та будову статорних обмоток, які є ключовим елементом для створення обертового магнітного поля.

Проаналізовано фактори, що призводять до аварійних ситуацій, зокрема проблему руйнування ізоляції обмоток статора. Вивчено вплив теплових і електричних перевантажень, що можуть викликати деградацію ізоляції, а також запропоновано методи діагностики та профілактики цих явищ.

У роботі детально описано класифікацію схем заміщення асинхронних двигунів, таких як П-схема та Г-схема. Проведено порівняльний аналіз їхніх переваг та недоліків. Особливу увагу приділено методам визначення параметрів схем заміщення, що дозволяють точно моделювати роботу двигунів і прогнозувати їхню поведінку в різних режимах.

Окремий розділ присвячено дослідженню причин появи виткових замикань у статорних обмотках. Розроблено математичні моделі теплових і температурних процесів в обмотках статора, які дозволяють оцінити ризики пошкоджень за умов несиметрії активних опорів, мережі живлення або розбіжності параметрів схеми заміщення.

Результати дослідження сприяють підвищенню надійності та ефективності роботи асинхронних двигунів. Запропоновані математичні моделі, методи аналізу та діагностики можуть бути використані для вдосконалення сучасних систем технічного обслуговування електродвигунів.

Мета роботи: розробка та вдосконалення методів визначення параметрів схем заміщення асинхронних двигунів, аналіз факторів, що впливають на їх аварійні ситуації, та розробка підходів до діагностики й запобігання несправностям, зокрема витковим замиканням у статорних обмотках..

Об'єкт дослідження: асинхронні електродвигуни, їхні електромагнітні та теплові процеси, а також схеми заміщення, що використовуються для моделювання, аналізу, діагностики та прогнозування їхніх робочих характеристик і можливих несправностей.

Предмет дослідження: методи визначення параметрів схем заміщення асинхронних двигунів, фактори, що впливають на їхню роботу і викликають аварійні ситуації, а також математичні моделі теплових і електричних процесів у статорних обмотках для діагностики та запобігання витковим замиканням.

Ключові слова: Асинхронні електродвигуни, характеристики асинхронних двигунів, будова асинхронних двигунів, статорні обмотки, аварійні ситуації, діагностика двигунів, руйнування ізоляції, теплове навантаження, електричне навантаження, схеми заміщення, параметри схем заміщення, математична модель, тепловий режим ізоляції, виткові замикання, вплив параметрів схеми заміщення, температурний стан ізоляції.

ЗМІСТ

| | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| ВСТУП..... | 7 |
| РОЗДІЛ 1. ОСНОВНІ ВІДОМОСТІ ПРО ЕЛЕКТРОДВИГУНИ | 9 |
| 1.1 Огляд асинхронних електродвигунів та їх характеристики | 9 |
| 1.2 Будова асинхронних електродвигунів з короткозамкненим ротором | 11 |
| 1.3 Види та будова статорних обмоток асинхронних електродвигунів ... | 15 |
| Висновок до розділу 1 | 16 |
| | |
| РОЗДІЛ 2. АНАЛІЗ ФАКТОРІВ ЩО ПРИЗВОДЯТЬ ДО АВАРІЙНИХ СИТУАЦІЙ В ЕЛЕКТРОДВИГУНАХ | 17 |
| 2.1 Причини аварій у асинхронних двигунах та діагностика | 17 |
| 2.2 Проблема руйнування ізоляції..... | 20 |
| 2.3 Вплив теплового і електричного навантаження на обмотки статора .. | 21 |
| Висновок до розділу 2 | 22 |
| | |
| РОЗДІЛ 3. МЕТОДИ І ХАРАКТЕРИСТИКИ СХЕМ ЗАМІЩЕННЯ АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ | 23 |
| 3.1 Визначення і класифікація схем заміщення (П-схема, Г-схема та інші) | 23 |
| 3.2 Переваги та недоліки різних типів схем заміщення | 25 |
| 3.3 Параметри схем заміщення: методи визначення і порівняння | 27 |
| 3.4 Використання схем заміщення для аналізу і діагностики асинхронних двигунів..... | 31 |
| Висновок до розділу 3 | 33 |
| | |
| РОЗДІЛ 4. ДОСЛІДЖЕННЯ ПРИЧИН ПОЯВИ ВИТКОВИХ ЗАМИКАНЬ У СТАТОРНИХ ОБМОТКАХ АД | 35 |
| 4.1 Математична модель теплового режиму ізоляції обмотки статора асинхронного двигуна за умов несиметрії активних опорів статорної обмотки | 35 |

| | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 4.2 Математична модель температурного стану ізоляції асинхронного двигуна за наявності виткових замикань і несиметрії мережі живлення..... | 42 |
| 4.3 Вплив розбігу параметрів схеми заміщення асинхронного двигуна на точність виявлення виткового замикання в обмотці статора | 53 |
| Висновок до розділу 4 | 64 |
| ВИСНОВОК | 66 |
| СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ | 67 |

ВСТУП

Асинхронні електродвигуни (АД) широко застосовуються в промисловості завдяки своїй надійності, простоті конструкції та відносно невеликій вартості обслуговування. Проте, одним із найпоширеніших видів пошкоджень є виткові замикання у статорних обмотках, які призводять до зниження ефективності, перегріву, зниження строку служби електродвигуна, а в окремих випадках — до аварійних зупинок обладнання. Враховуючи це, актуальним є дослідження причин виникнення виткових замикань і розробка методів діагностики та запобігання їм.

Водночас важливим є вибір і порівняння схем заміщення, що дозволяють більш точно моделювати роботу асинхронних двигунів, підвищуючи точність їх аналізу та діагностики. Крім того, асинхронні електродвигуни часто працюють у складних умовах, таких як нестабільні мережеві параметри, перевантаження, високі температури та підвищена вологість, що також сприяє виникненню пошкоджень у статорних обмотках. Виткові замикання можуть бути викликані як зовнішніми факторами, так і внутрішніми дефектами, такими як зношування ізоляційного матеріалу, механічні вібрації, помилки монтажу та низька якість виготовлення. Така складність і різноманітність причин потребує комплексного підходу до дослідження, діагностики та прогнозування появи виткових замикань.

Схеми заміщення асинхронних двигунів є важливим інструментом для математичного моделювання та аналізу електромагнітних процесів у двигунах. Вибір відповідної схеми заміщення значно впливає на точність моделювання, особливо в умовах, де потрібно враховувати нелінійні процеси і зміни параметрів внаслідок ушкоджень. Відтак, порівняння параметрів різних схем заміщення є необхідним кроком для підвищення точності діагностування та прогнозування працездатності двигуна. Це дозволяє краще розуміти, як поведінка двигуна змінюється під впливом різних факторів, зокрема у разі виникнення виткових

замикань, що є важливим для своєчасної діагностики і технічного обслуговування.

Таким чином, дослідження, спрямовані на визначення оптимальної схеми заміщення для моделювання роботи асинхронного двигуна з урахуванням можливих виткових замикань, мають велике значення для підвищення надійності електроустаткування в промисловості. Це також сприяє мінімізації простоїв обладнання і зниженню витрат на ремонти, забезпечуючи стабільну і безпечну роботу промислових підприємств.

РОЗДІЛ 1

ОСНОВНІ ВІДОМОСТІ ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ

1.1 Огляд асинхронних електродвигунів та їх характеристики

Асинхронні електродвигуни (АД) є одними з найпоширеніших електричних машин, що використовуються у промисловості та побуті завдяки своїй простоті конструкції, високій надійності, ефективності та доступній вартості. Основний принцип роботи асинхронного двигуна базується на явищі електромагнітної індукції: обертове магнітне поле статора індукує струми у роторі, що створюють власне магнітне поле, яке взаємодіє з полем статора, спричиняючи обертання ротора.

Асинхронні двигуни поділяються на двигуни з короткозамкненим ротором та двигуни з фазним ротором. Двигуни з короткозамкненим ротором є більш популярними завдяки простоті конструкції ротора, що складається з замкненої обмотки, яка нагадує конструкцію «білячого колеса». Фазні роторні двигуни, на відміну від короткозамкнених, мають обмотку, яка підключена до додаткового резистора або іншого регульовального пристрою, що дозволяє змінювати характеристики двигуна під час запуску та в перехідних процесах.

Основні характеристики асинхронних двигунів включають:

Потужність – номінальна потужність, яку двигун може забезпечувати при роботі у встановлених умовах.

Коефіцієнт корисної дії (ККД) – відношення корисної потужності, яку двигун передає на вал, до споживаної електричної потужності.

Коефіцієнт потужності ($\cos \varphi$) – визначає фазовий зсув між напругою та струмом, що впливає на енергоефективність роботи двигуна.

Частота обертання – оберти ротора в хвилину, що залежать від частоти живлення і кількості пар полюсів статора.

Синхронна та асинхронна частота обертання – асинхронні двигуни завжди обертаються із частотою, дещо меншою за синхронну, що зумовлено різницею швидкості обертання магнітного поля статора та ротора.

Серед основних переваг асинхронних двигунів є простота обслуговування, здатність працювати в різних умовах навантаження і відсутність потреби в постійному технічному обслуговуванні. Водночас, певні недоліки, зокрема відносно низький пусковий момент і складність регулювання частоти обертання без додаткових пристроїв, обмежують їх застосування в деяких спеціалізованих областях.



Рис.1.1 Асинхронний двигун

Асинхронні електродвигуни відіграють важливу роль у промисловості завдяки своїм унікальним характеристикам, що роблять їх незамінними для приводу різноманітних механізмів, від насосів і вентиляторів до компресорів і конвеєрів. Їх принцип роботи ґрунтується на асинхронній взаємодії між обертовим магнітним полем статора та ротором, який завжди обертається повільніше, ніж синхронна швидкість магнітного поля. Цей різний темп обертання, відомий як ковзання, є ключовим для створення крутного моменту.

1.2 Будова асинхронних електродвигунів з короткозамкненим ротором

Основними компонентами асинхронного двигуна є (рис.1.2):

Статор – нерухома частина двигуна.

Ротор – рухома частина двигуна.

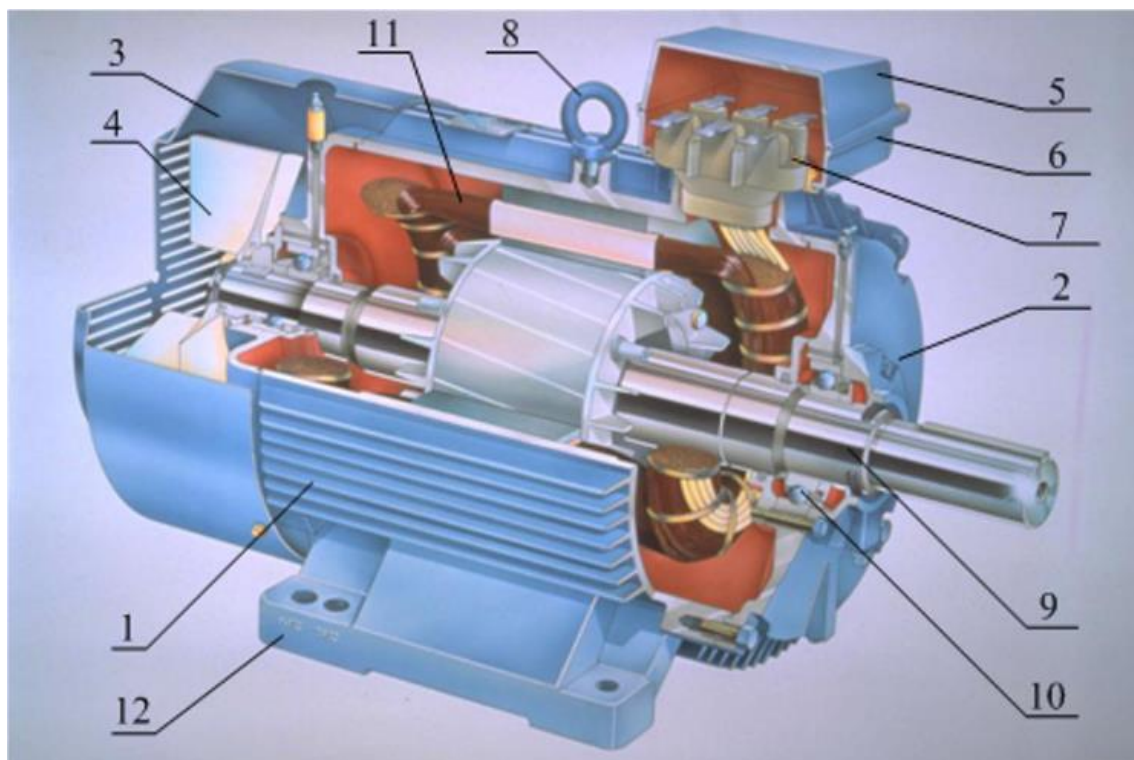


Рис.1.2 Будова трифазного асинхронного двигуна з короткозамкнутим ротором: 1 – статор; 2 – підшипниковий щит; 3 – кришка вентилятора; 4 – вентилятор; 5 – кришка; 6 – клемна коробка; 7 – клемна панель; 8 – рем-болт; 9 – ротор; 10 – підшипник; 11 – обмотка статора; 12 –лапи

Асинхронний двигун складається з корпусу, статора та ротора. Корпус виготовляється з алюмінієвого сплаву або чавуну методом лиття. Усередині корпусу розміщується статор, утворений із набору пластин із електротехнічної сталі, які оснащені обмотками з мідного дроту. Така конструкція зменшує втрати на вихрові струми та тепло, а також підвищує жорсткість усієї системи. Обмотки статора формують три фази, що можуть бути з'єднані в трикутник або зірку для підключення до мережі. Ротор, який теж складається з пластин електротехнічної сталі, може бути короткозамкненим або мати обмотки з мідного дроту. Між ротором і статором залишається повітряний зазор, де утворюється магнітне поле. Це поле генерується змінним струмом у статорних обмотках і відповідає за створення напруги та струму в обмотках ротора.

Короткозамкнений ротор виготовляється шляхом лиття з алюмінію, латуні або міді в прес-формах. Перетин стрижня білячої клітки залежить від методів зменшення пускових струмів. Ротори з мідною обмоткою мають вищий коефіцієнт корисної дії (ККД), забезпечують кращі можливості для керування, більшу щільність струму в обмотках та покращену тепловіддачу.

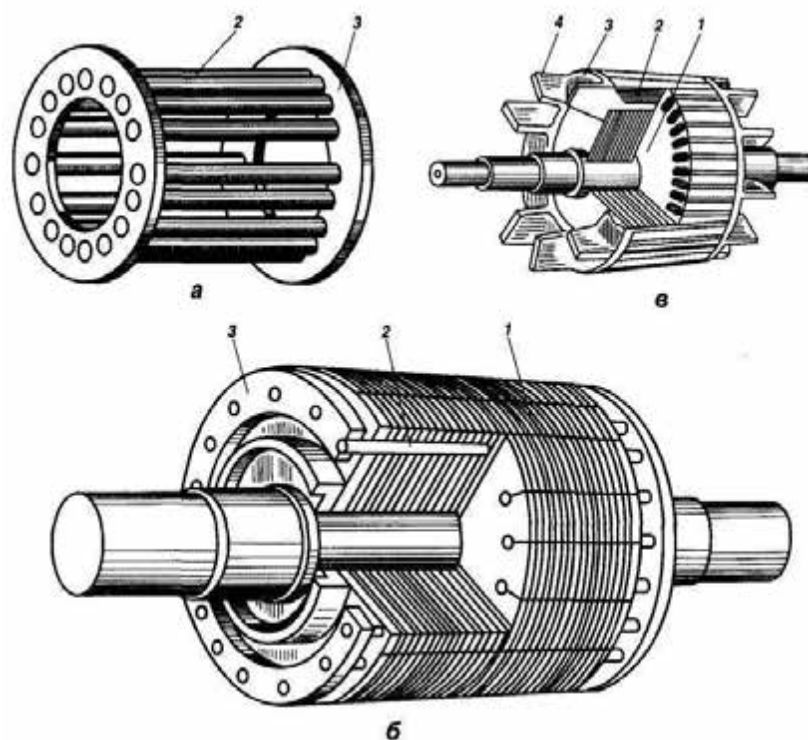


Рис.1.3 Конструкція короткозамкнутого ротора: а - біляча кліткаа; б - ротор з мідною стрижневою обмоткою; в - ротор з алюмінієвою литою обмоткою 1 - сердечник ротора; 2 - стрижні; 3 - замикаючі кільця; 4 - лопаті вентилятора

Трифазний струм, що подається на обмотки статора, генерує обертове магнітне поле, частота якого прямо пропорційна частоті живлення та обернено пропорційна числу пар полюсів асинхронного двигуна. Це обертове магнітне поле перетинає стрижні чи обмотки ротора, індукуючи в них електрорушійну силу (ЕРС). Напрямок ЕРС визначається за «правилом правої руки», коли магнітний потік обертається за годинниковою стрілкою. Внаслідок індукції ЕРС

у обмотці ротора виникають струми, які за фазою співпадають з індукованою ЕРС.

В обертовому роторі, що знаходиться в магнітному полі, створюється електромагнітний момент, який генерує крутний момент, що намагається обертати ротор. Частота обертання ротора, яка встановлюється в процесі роботи, залежить від співвідношення між крутним моментом і моментом опору. Відносна різниця між частотою обертання магнітного поля та ротора називається ковзанням.

1.3 Види та будова статорних обмоток асинхронних електродвигунів

Обмотки статора електродвигунів є одним із ключових компонентів, які забезпечують створення магнітного поля, необхідного для роботи двигуна. Види та конструкція обмоток статора залежать від типу двигуна, його призначення, а також вимог до надійності й ефективності.

Види обмоток статора

Одношарова обмотка:

Всі провідники розташовані в одному шарі по пазах статора. Така обмотка проста у виготовленні, має низьку вартість і використовується переважно в двигунах з невеликою потужністю.

Двошарова обмотка

Провідники розташовані у два шари в одному пази. Цей тип обмотки забезпечує кращий розподіл магнітного потоку, підвищує рівномірність електромагнітних процесів і зменшує втрати. Застосовується у двигунах середньої та високої потужності.

Хвильова обмотка

Провідники розташовані так, що вони утворюють хвилеподібну форму в межах кількох пазів. Цей тип забезпечує високу електромагнітну ефективність і застосовується у спеціальних двигунах.

Петльова обмотка

Провідники з'єднані у вигляді петель. Використовується для створення компактних і надійних конструкцій обмоток.

Сердечникова обмотка

Використовується в асинхронних двигунах для створення мінімальних магнітних втрат. Провідники вкладені у пази серцевини статора.

Будова обмоток статора

Обмотки статора складаються з наступних елементів:

Провідники

Основний матеріал для провідників — мідь або алюміній. Вони забезпечують передачу електричного струму та утворення магнітного поля.

Ізоляційний шар

Використовується для ізоляції витків один від одного та від корпусу статора. Матеріалом для ізоляції є лак, компаунд або спеціальні плівки.

Схема укладання

Обмотка укладається в пази статора згідно з певною схемою, яка залежить від типу обмотки (одношарова, двошарова, тощо).

З'єднання витків

Витки обмотки з'єднуються у зірку, трикутник або іншу схему, залежно від вимог до електродвигуна.

Класифікація за конструктивними особливостями

Концентрична обмотка — усі витки кожної фази укладаються концентрично в певному наборі пазів.

Розподілена обмотка — витки розподілені рівномірно по пазах статора, що забезпечує кращу синусоїдальність магнітного поля.

Обмотки статора проектується з урахуванням оптимізації електромагнітних процесів, зменшення втрат енергії та забезпечення тривалої роботи двигуна.

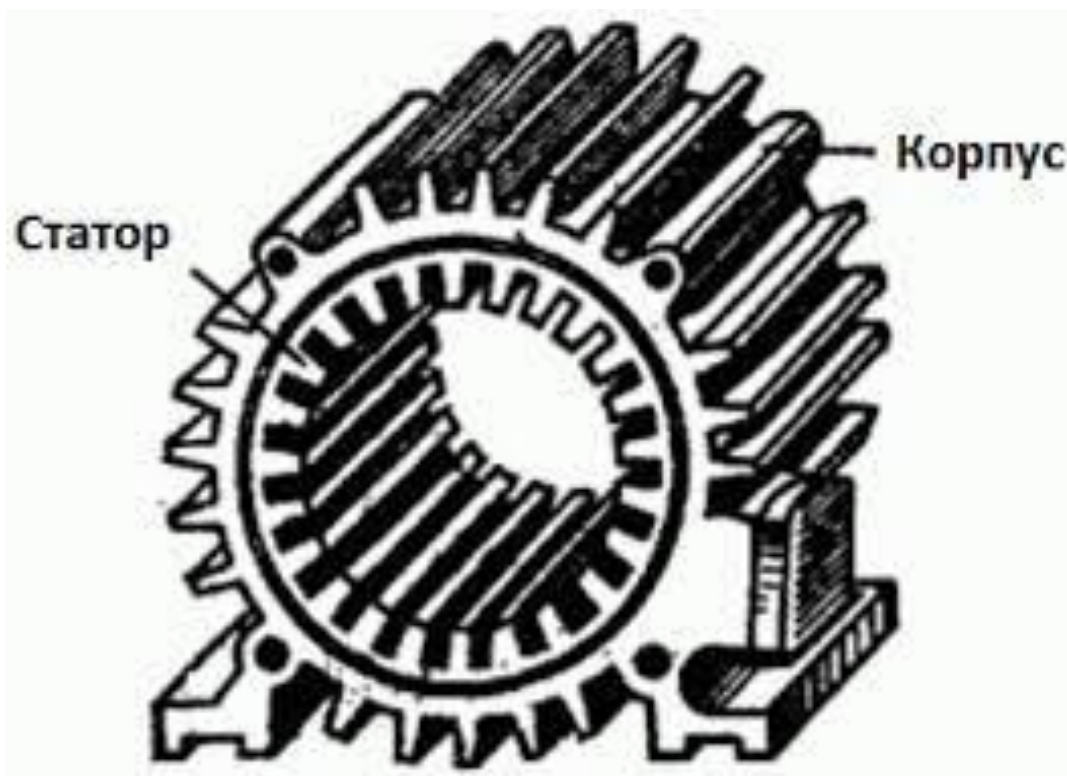


Рис 1.4 Статор асинхронного двигуна

Висновок до розділу 1

У першому розділі було розглянуто основні відомості про асинхронні електродвигуни, їх характеристики, будову та види обмоток. Асинхронні електродвигуни, як один із найпоширеніших типів електричних машин, вирізняються надійністю, простотою конструкції та економічністю.

Особливу увагу було приділено асинхронним електродвигунам з короткозамкненим ротором, які широко використовуються в промисловості завдяки їх простоті, надійності в роботі та низьким витратам на обслуговування. Детально було описано будову статорних обмоток, які відіграють ключову роль у створенні обертового магнітного поля, що забезпечує роботу двигуна.

Таким чином, у розділі було закладено фундаментальні знання для подальшого вивчення принципів роботи, методів регулювання та особливостей застосування асинхронних електродвигунів.

РОЗДІЛ 2.

АНАЛІЗ ФАКТОРІВ ЩО ПРИЗВОДЯТЬ ДО АВАРІЙНИХ СИТУАЦІЙ В ЕЛЕКТРОДВИГУНАХ

2.1 Причини аварій у асинхронних двигунах та діагностика

Однією з головних задач в експлуатації асинхронних двигунів є розробка діагностичних методів, що дозволяють розпізнавати та класифікувати несправності. Різні фактори, такі як низька якість напруги в мережі живлення, висока запиленість робочого середовища, а також технічні й аварійні навантаження на вал двигуна, можуть спричинити непередбачувані пошкодження. Щорічно збитки від таких поломок можуть сягати 20-25% від загальної кількості встановлених асинхронних двигунів на підприємствах. У сучасних економічних умовах підприємства часто змушені скорочувати обсяги технічного обслуговування, а через обмежені фінанси на обслуговування обладнання багато підприємств неодноразово ремонтують вийшли з ладу двигуни .

В умовах промислових підприємств середній термін служби асинхронного двигуна становить від 2 до 3 років. Така обмежена тривалість роботи обумовлена механічними, хімічними та електричними навантаженнями, що впливають на ізоляцію під час експлуатації. За закордонними даними , несправності асинхронних двигунів класифікують наступним чином:

- пошкодження обмоток статора становлять 45–60%;
- знос підшипників – 25-40%;
- механічні пошкодження ротора – 8–10%;
- інші види пошкоджень – 10–15%.

Основними причинами виникнення пошкоджень асинхронних двигунів є:

- перегрузка або перегрів статора електродвигуна – 31%;
- міжвиткове замикання – 15%;
- пошкодження підшипників – 12%;

- пошкодження обмоток статора або ізоляції – 11%;
- нерівномірний повітряний зазор між статором і ротором – 9%;
- робота двигуна на двох фазах – 8%;
- обрив або ослаблення кріплення стержнів у білячій клітці – 5%;
- ослаблення кріплення обмоток статора – 4%;
- дисбаланс ротора електродвигуна – 3%;
- несоосність валів – 2%.

Пошкодження обмоток статора класифікуються за типом несправностей на такі основні види: міжвиткове коротке замикання (85%), міжфазний пробій ізоляції (11%) і пробій корпусної ізоляції (4%). Більшість випадків міжвиткового замикання (до 95%) припадають на передній кінець обмотки. Якщо більше 40% витків у пазу обмотки замкнені накоротко, виникає асиметрія струму, що може бути виявлено за допомогою різних методів захисту від несиметричного режиму, після чого АД можна відключити від мережі. У випадку замикання 2-15% витків спотворення фазного струму не є значними, і двигун може продовжувати працювати в нормальному режимі. Однак у місці короткого замикання утворюється замкнутий виток, що може призвести до додаткового нагріву неушкоджених витків. При тривалому тепловому впливі ізоляція витків старіє швидше, що з часом може призвести до серйозних аварійних ситуацій, зокрема міжфазних або корпусних замикань. Як показано в роботі, якщо в пазу обмотки статора замкнено до 15% витків, перехід до міжфазного замикання або замикання на корпус відбувається через 3-6 місяців. У випадку дугового замикання цей час скорочується до кількох секунд. Дослідження показують, що при міжвиткових замиканнях у статорі АД втрачає до 30-50% витків протягом 200-300 годин експлуатації, що призводить до аварійного виходу з ладу

Типи пошкодження та методи діагностування

Таблиця. 2.1

| Тип пошкодження | Причина | Наслідок | Метод діагностування |
|-------------------------------|------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|
| Механічні пошкодження | Удари, падіння, вібрація, тертя | Ослаблення ізоляції, розриви, тріщини | Огляд |
| Термічні пошкодження | Перегрів, перевантаження, перенапруження | Оплавлення, обвуглювання, почервоніння ізоляції | Огляд, вимірювання опору ізоляції |
| Хімічні пошкодження | Вплив агресивних середовищ, окиснення, корозія | Потемніння, пожовтіння, позеленіння ізоляції | Огляд |
| Біологічні пошкодження | Вплив мікроорганізмів, комах | Потемніння, пожовтіння, позеленіння ізоляції | Огляд |
| Забруднення ізоляції | Засмічування пилом, брудом, вологою | Зниження опору ізоляції | Вимірювання опору ізоляції |
| Несправність підшипників | Знос, поломка, корозія | Збільшені шуми, вібрація, перегрів | Огляд, вимірювання струму холостого ходу |
| Несправність ротора | Знос, поломка, корозія | Збільшені шуми, вібрація, перегрів | Огляд, вимірювання струму холостого ходу |
| Несправність статора | Знос, поломка, корозія | Збільшені шуми, вібрація, перегрів | Огляд, вимірювання струму холостого ходу |
| Несправність обмоток | Короткозамкнені витки, обриви, протікання струму на корпус | Зниження потужності, ККД, збільшення споживання електроенергії | Вимірювання опору ізоляції, вимірювання електричних параметрів |
| Несправність пускової обмотки | Короткозамкнені витки, обриви, протікання струму на корпус | Неможливість запуску двигуна | Вимірювання опору ізоляції, вимірювання електричних параметрів |

2.2 Проблема руйнування ізоляції

Однією з основних причин виходу асинхронних двигунів з ладу є руйнування ізоляції, що веде до короткого замикання. Лакове покриття може тріскатися через механічні та теплові навантаження. Тривалість служби ізоляції електродвигунів безпосередньо залежить від якості ізоляційних матеріалів та робочої температури. Згідно з практичними даними, наприклад, бавовняна волокниста ізоляція, занурена в мінеральне масло, при температурі близько 90°C може надійно працювати протягом 15-20 років.

Проте з часом ізоляція поступово зношується, знижується її механічна міцність, еластичність та інші властивості, що є необхідними для нормальної роботи. Підвищення робочої температури всього на 8-10°C скорочує строк служби такої ізоляції до 8-10 років (майже вдвічі), а при температурі 150°C ізоляція втрачає свої властивості вже через 1,5 місяця. Робота при температурі близько 200°C може призвести до її виходу з ладу за кілька годин.

Допустиме нагрівання електродвигуна визначається найбільш термостійкими матеріалами його конструкції, і таким матеріалом є ізоляція його обмотки.

При однаковій навантаженості електродвигуна нагрівання буде різним залежно від температури навколишнього середовища. Розрахункова температура t_0 навколишнього середовища становить 40°C, при якій визначають номінальні значення потужності електродвигунів. Підвищення температури електродвигуна над температурою навколишнього середовища називається перегрівом.

Зростає використання синтетичних ізоляцій, зокрема кремнійорганічні ізоляції забезпечують високу надійність електричних машин при експлуатації в тропічних умовах. Тепло, яке виділяється в різних частинах електродвигуна, по-різному впливає на нагрів ізоляції. Окрім того, між окремими частинами електродвигуна відбувається теплообмін, характер якого змінюється в залежності від умов навантаження.

Різний нагрів окремих частин електродвигуна і теплообмін між ними ускладнюють аналітичне дослідження процесу. Тому для спрощення припускають, що електродвигун є однорідним в тепловому відношенні і безкінечно теплопровідним тілом. Зазвичай вважається, що тепло, яке електродвигун віддає в навколишнє середовище, пропорційно перегріву. При цьому теплообмін через випромінювання тепла не враховується, оскільки абсолютні температури нагрівання двигунів є невеликими.

2.3 Вплив теплового і електричного навантаження на обмотки статора

Теплове і електричне навантаження значно впливають на обмотки статора асинхронного двигуна, визначаючи його робочий ресурс і стійкість до пошкоджень. Основна проблема, яку спричиняють ці навантаження, — деградація ізоляції, що є ключовим компонентом для забезпечення надійності двигуна. Під впливом електричних і теплових навантажень ізоляція обмоток старіє, знижується її міцність і здатність протистояти механічним та електричним напруженням. Це може призвести до виткових замикань, міжфазних пробіїв і коротких замикань, які викликають вихід двигуна з ладу.

Електричне навантаження, зокрема високі струми, які проходять через обмотки статора, створює електромагнітне поле, що індукуює ЕРС (електрорушійну силу) у витках. Коли двигун працює на підвищеній напрузі або частоті, це може призвести до збільшення струмів у обмотках, підвищуючи ризик нагріву. Інтенсивний струмопровід підвищує температуру витків, яка також може бути нерівномірною, залежно від якості охолодження.

Теплові навантаження, в основному спричинені перегрівом, можуть виникати через недостатнє охолодження, роботу у важких умовах або при несиметричному живленні. Зокрема, перегрів викликає прискорене старіння ізоляційного матеріалу обмоток, що суттєво скорочує строк служби двигуна. Під впливом високих температур змінюються фізико-хімічні властивості ізоляції: втрачається еластичність, міцність і знижується термостійкість. Якщо

температура робочого середовища перевищує допустимі межі, це може викликати термічні тріщини та злам лакового покриття, що призводить до порушення електричної ізоляції і може спричинити вихід з ладу навіть нових двигунів.

Загалом, для запобігання впливу надмірних теплових і електричних навантажень рекомендується застосовувати діагностичні методи та моніторинг робочих параметрів обмоток, що дозволяє своєчасно виявляти і усувати потенційні несправності, забезпечуючи стабільну і безпечну роботу асинхронного двигуна.

Висновок до розділу 2

У другому розділі було проаналізовано ключові фактори, що спричиняють аварійні ситуації в асинхронних електродвигунах, а також розглянуто методи їх діагностики. Особливу увагу приділено руйнуванню ізоляції та впливу теплових і електричних навантажень на обмотки статора.

Розглянуто основні причини аварій, серед яких виділено перегрів, перенавантаження, коливання напруги та вплив зовнішніх факторів. Було підкреслено важливість своєчасної діагностики для запобігання пошкодженням, а також методи оцінки стану двигуна, які дозволяють виявляти приховані дефекти.

Аналіз показав, що руйнування ізоляції є однією з головних причин виходу двигуна з ладу. Це явище спричиняється впливом теплових перевантажень, електричних розрядів та процесів старіння матеріалів. Також відзначено значний вплив теплового та електричного навантаження на довговічність обмоток статора, що підкреслює необхідність оптимізації режимів роботи та забезпечення надійної системи охолодження.

РОЗДІЛ 3.

МЕТОДИ І ХАРАКТЕРИСТИКИ СХЕМ ЗАМІЩЕННЯ АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ

3.1 Визначення і класифікація схем заміщення (П-схема, Г-схема та інші)

Схеми заміщення є важливими математичними моделями для аналізу роботи асинхронних двигунів (АД). Вони дозволяють моделювати електричні, магнітні, та теплові процеси, що відбуваються в двигуні, і спрощують розрахунки параметрів для оцінки ефективності й надійності двигуна. Найпоширенішими серед таких моделей є П-схема та Г-схема заміщення.

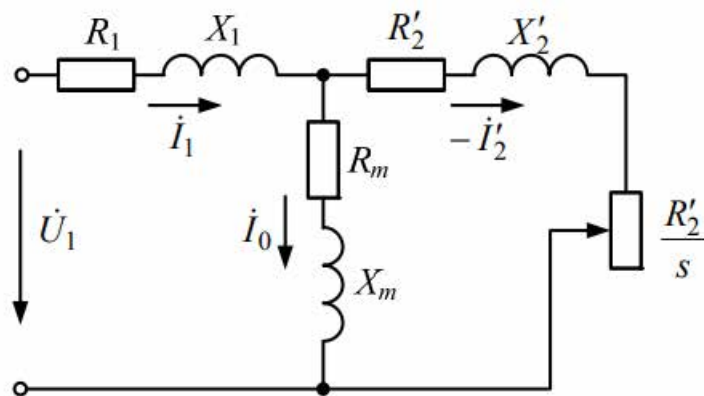


Рис 3.1 П-схема заміщення

П-схема (або π -схема) заміщення є однією з найбільш використовуваних схем для аналізу асинхронних двигунів. Вона представляє двигун як систему з трьох гілок, які зображають основні параметри: активний опір і індуктивний опір статора, індуктивний опір ротора, та магнітне розсіювання між обмотками. Така схема дозволяє точно моделювати електромагнітні процеси, що відбуваються у двигуні, та є зручною для розрахунків крутного моменту, струмів у статорі й роторі, а також споживаної потужності.

Основні переваги П-схеми:

Висока точність при розрахунках перехідних процесів;

Можливість обліку магнітних втрат;

Використовується для оцінки роботи двигуна при часткових навантаженнях.

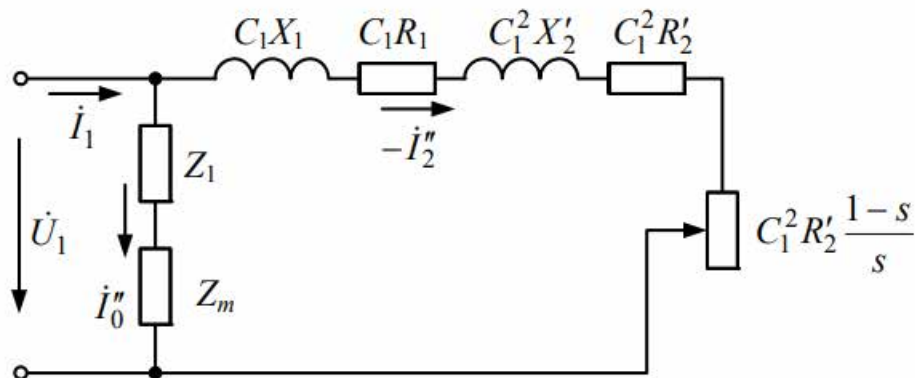


Рис. 3.2 Г-схема заміщення

Г-схема (або Т-схема) є спрощеним варіантом П-схеми. У ній враховується тільки одна індуктивна гілка замість двох, що знижує точність моделювання, але спрощує розрахунки. Ця схема використовується переважно в умовах, коли точність моделі не є критичною, наприклад, для приблизних розрахунків у системах з великим числом двигунів.

Основні переваги Г-схеми:

Простота побудови та розрахунків;

Менша кількість параметрів, що підлягають визначенню;

Використовується в умовах, де важлива швидкість розрахунків, а не висока точність.

Інші схеми заміщення

Окрім П- та Г-схем, існують й інші модифікації, які використовуються для конкретних умов моделювання:

Одноконтурна схема — ще більш спрощена модель, застосовувана для орієнтовних розрахунків і аналізу спрощених характеристик двигуна.

Схема з розподіленим параметром — включає додаткові елементи для обліку нестандартних умов роботи, наприклад, коливання напруги або частоти, що може бути корисним у випадках нестабільного навантаження.

Призначення та застосування

Схеми заміщення застосовуються для аналізу характеристик АД, оцінки їх ефективності, діагностики технічного стану, а також для прогнозування надійності. Завдяки використанню цих схем можна отримати точні дані для вибору оптимального режиму роботи двигуна та запобігання аварійним ситуаціям.

Таким чином, вибір схеми заміщення залежить від конкретної задачі аналізу: для детальних розрахунків застосовують П-схему, тоді як для швидких орієнтовних розрахунків часто використовують Г-схему або спрощені варіанти.

3.2 Переваги та недоліки різних типів схем заміщення

Розглянемо переваги та недоліки різних типів схем заміщення, які використовують для моделювання асинхронних електродвигунів. Основні типи схем включають П-схему та Т-схему (або Г-схему). Кожна з них має свої особливості, що впливають на точність моделювання, зручність у розрахунках та надійність результатів.

1. Переваги та недоліки П-схеми

Переваги:

Точність: П-схема забезпечує вищу точність, особливо при моделюванні електромагнітних процесів, що виникають в обмотках статора і ротора, завдяки тому, що враховує явища розсіювання.

Гнучкість: Завдяки деталізованій структурі, П-схема добре підходить для розрахунків динамічних процесів, таких як пускові струми, зміни навантаження та інші нестационарні стани.

Підтримка складних розрахунків: П-схема дозволяє проводити складніші розрахунки, такі як аналіз режимів з насиченням магнітного кола.

Недоліки:

Складність моделі: Велика кількість елементів у схемі робить розрахунки трудомісткими та часозатратними.

Необхідність детальних параметрів: Для роботи з П-схемою необхідно мати точні значення параметрів обмоток і магнітного кола, що не завжди можливо отримати в стандартних умовах.

2. Переваги та недоліки Т-схеми

Переваги:

Спрощення розрахунків: Т-схема має простішу структуру, що зменшує обсяг обчислень і робить її зручною для використання при швидкому аналізі у стаціонарних режимах.

Широке застосування у практичних розрахунках: Т-схема широко використовується в промислових розрахунках, коли необхідно отримати основні характеристики без високої точності.

Придатність для загальних розрахунків: Завдяки простоті, Т-схема є зручною для обчислення базових параметрів, таких як споживання струму, коефіцієнт потужності та втрати потужності.

Недоліки:

Обмежена точність: Т-схема не враховує повною мірою електромагнітні процеси, особливо при високих швидкостях і частотах, що робить її менш придатною для детального аналізу.

Невідповідність для складних режимів: Для аналізу складних режимів, таких як коротке замикання або аварійні ситуації, Т-схема може бути недостатньо точною і не надає необхідної деталізації.

Вибір схеми заміщення

Вибір між П- та Т-схемами залежить від мети дослідження та вимог до точності. П-схема більш придатна для досліджень, що вимагають глибокого аналізу і моделювання перехідних процесів, тоді як Т-схема доцільна для загального аналізу робочих характеристик і спрощених інженерних розрахунків.

3.3 Параметри схем заміщення: методи визначення і порівняння

Для аналізу параметрів схем заміщення асинхронних двигунів важливо мати чітке розуміння методів їх визначення та порівняння. Схеми заміщення дозволяють моделювати внутрішні процеси електродвигуна, відтворюючи реальні параметри, такі як опір і індуктивність обмоток, а також втрати потужності. Серед найпоширеніших методів визначення параметрів схем заміщення виділяються експериментальні, розрахункові та методи моделювання.

1. Експериментальні методи визначення параметрів

Експериментальні методи використовують для отримання параметрів заміщення через лабораторні випробування. Основні випробування, які застосовуються для цих цілей, включають:

Метод холостого ходу — дозволяє визначити параметри, пов'язані з магнітним колом, зокрема активний та реактивний опір магнітного кола.

Метод короткого замикання — використовується для розрахунку параметрів ротора і зниження впливу магнітного кола.

Випробування при номінальному навантаженні — дозволяють визначити загальні втрати та коефіцієнт корисної дії (ККД), який допомагає у подальшому коригуванні параметрів.

Ці експериментальні методи є найточнішими для визначення параметрів, однак вони вимагають доступу до обладнання і умов, що можуть не завжди бути доступними.

2. Розрахункові методи

Розрахункові методи дозволяють визначати параметри без проведення експериментів, що є зручним в умовах, де практичні випробування неможливі. До них належать:

Метод номінальних параметрів — передбачає обчислення параметрів, використовуючи відомі номінальні дані двигуна, такі як потужність, струм, напруга, частота обертання.

Аналітичні формули — засновані на фізичних моделях та залежностях між електричними параметрами, що дозволяє приблизно розрахувати основні параметри для схем заміщення (зокрема, опір ротора і статора).

3. Моделювання та чисельні методи

Моделювання включає використання спеціалізованого програмного забезпечення, такого як MATLAB або ANSYS, для чисельного визначення параметрів на основі відомих властивостей матеріалів та характеристик двигуна. Зокрема, метод скінченних елементів дозволяє створювати моделі, які враховують деталі конструкції двигуна, такі як розміщення обмоток, геометрія ротора і статора, що допомагає точно відтворювати електромагнітні процеси та теплові втрати.

4. Порівняння параметрів різних схем заміщення

При порівнянні параметрів між схемами, такими як П-схема і Т-схема, варто звернути увагу на такі аспекти:

Точність: П-схема забезпечує точніше моделювання за рахунок врахування паралельних контурів, що відображають витрати потужності в обмотках. Т-схема, в свою чергу, є спрощеною і надає лише загальні характеристики.

Придатність для різних режимів: Т-схема добре підходить для усталених режимів, тоді як П-схема — для динамічних режимів, коли важливі швидкі зміни навантаження та частоти.

Складність обчислень: П-схема потребує більше ресурсів для розрахунків і додаткових даних для визначення точних параметрів, тоді як Т-схема значно простіша у використанні.

Вибір методу визначення параметрів і схеми заміщення залежить від необхідної точності, доступності обладнання для експериментів і специфіки досліджуваних режимів. Використання моделювання стає більш доцільним у сучасних умовах, оскільки воно дозволяє зменшити витрати на експерименти та підвищити гнучкість досліджень.

3.4 Використання схем заміщення для аналізу і діагностики асинхронних двигунів

Схеми заміщення асинхронних двигунів широко використовуються для аналізу та діагностики цих машин, оскільки вони дозволяють моделювати основні електромагнітні та енергетичні процеси, що відбуваються в електродвигунах. Завдяки цьому схеми заміщення сприяють розумінню поведінки двигуна у різних робочих режимах та допомагають виявити ознаки можливих несправностей.

1. Використання для аналізу робочих характеристик

Схеми заміщення, як П-схема або Т-схема, дозволяють визначати робочі параметри двигуна, такі як споживання струму, втрати потужності, коефіцієнт корисної дії (ККД) та момент на валу, що важливо для оцінки ефективності роботи. У процесі аналізу ці схеми можуть бути використані для моделювання режимів запуску, номінальної роботи та перевантажень, що допомагає налаштовувати двигуни під специфічні виробничі потреби.

2. Діагностика несправностей

Схеми заміщення дозволяють імітувати несправності, що виникають у двигунах, такі як виткові замикання в обмотках статора або короткі замикання в роторах. Це стає можливим завдяки розрахунку зміни параметрів схеми (опору, індуктивності) в умовах аномальної роботи. Діагностика за допомогою схем заміщення може включати моніторинг змін у струмі, частоті чи напрузі, що сигналізує про відхилення у роботі двигуна. Так, наприклад, збільшення опору ротора або статора може вказувати на перегрів чи механічне пошкодження.

3. Методи діагностики з використанням схем заміщення

Одним із методів діагностики є аналіз ковзання двигуна, який може бути змодельований через змінні параметри схеми заміщення. При підвищеному ковзанні зазвичай спостерігаються підвищені втрати потужності та нестабільність моменту, що може бути наслідком механічних дефектів або проблем з ротором.

Інший метод включає порівняння реальних показників двигуна з результатами, отриманими в процесі моделювання. При цьому відхилення в результатах можуть вказувати на наявність несправностей. Сучасні комп'ютерні програми, такі як MATLAB або ANSYS, дозволяють автоматизувати цей процес і отримувати дані про стан двигуна в реальному часі.

4. Переваги використання схем заміщення в діагностиці

Схеми заміщення дозволяють не тільки отримувати дані про поточний стан двигуна, але й проводити прогнозування його залишкового ресурсу, що важливо для планування обслуговування та попередження аварійних ситуацій. Застосування таких схем значно скорочує витрати на непередбачені ремонти і простої, підвищуючи загальну надійність роботи обладнання.

Таким чином, схеми заміщення є важливим інструментом як для оптимізації робочих режимів асинхронних двигунів, так і для діагностики та своєчасного виявлення несправностей, забезпечуючи стабільність і ефективність виробничих процесів.

3.5 Методи дослідження режимів холостого ходу і короткого замикання асинхронних електродвигунів

На практиці кругову діаграму будують за даними дослідів холостого ходу та КЗ, під час яких для деякого потрібного значення напруги U_1 визначають струми холостого ходу та КЗ. В більшості випадків $U_1 = U_{1ном}$.

Дослід холостого ходу

Режим роботи АД, при якому відсутнє навантаження на його валові ($M_c = 0$ і $P_2 = 0$), називають режимом холостого ходу. Для дослідження цього режиму необхідно мати регульоване джерело живлення з можливістю регулювання напруги в межах $(0,6 \div 1,15)U_{1ном}$. При цьому вимірюють потужність холостого ходу P_0 , струм холостого ходу I_0 та напругу U_1 , за якими знаходять

$$\cos \varphi_0 = \frac{P_0}{m_1 U_1 I_0}$$

Характеристики холостого ходу I_0 , P_0 , $\cos \varphi_0 = f(U_1)$ подані на рис. 3.3.

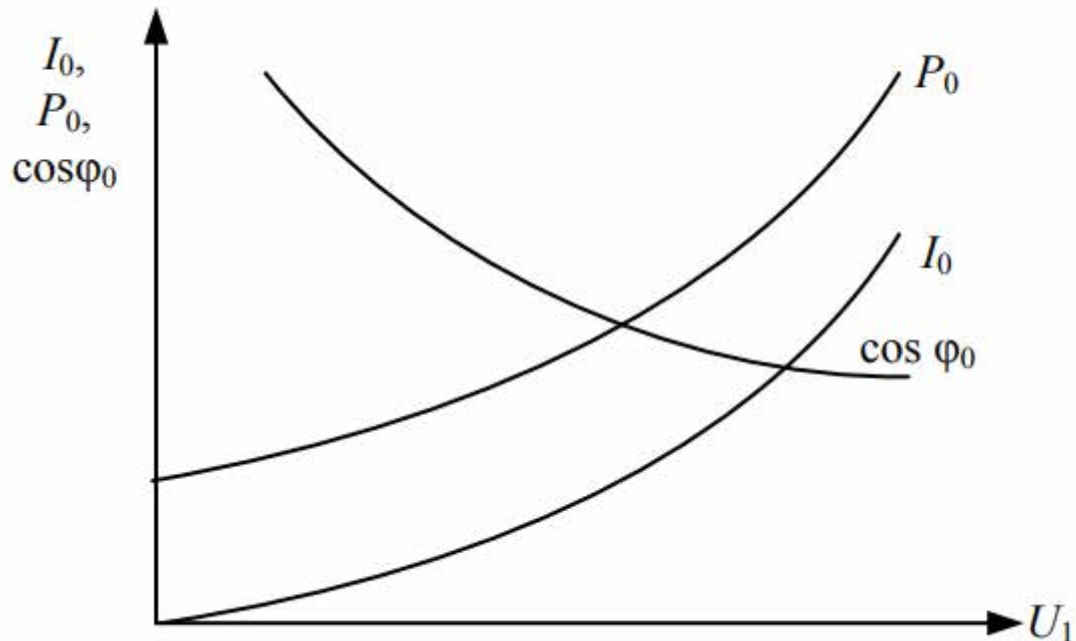


Рис. 3.3 Характеристики холостого ходу АД

Дослід короткого замикання

Режим роботи АД, при якому його ротор загальмований ($n = 0$), а вторинна обмотка замкнена накоротко, називається режимом короткого замикання. Для виключення можливості недопустимого перегрівання обмоток від великих струмів КЗ дослід проводять при зниженій напрузі, щоб $I_{1к} \leq 1,2I_{1ном}$. Дослід проводять, змінюючи напругу короткого замикання $U_{1к}$ від нуля до значення, при якому струм КЗ не перевищувати значення $1,2I_{1ном}$. За даними досліду, під час якого вимірюють потужність короткого замикання $P_{1к}$, струм короткого замикання $I_{1к}$ та напругу короткого замикання $U_{1к}$, визначають :

коефіцієнт потужності:

$$\cos \varphi_k = \frac{P_{1к}}{m_1 U_{к1} I_{1к}}$$

повний опір короткого замикання :

$$Z_{\kappa} = \frac{U_{1\kappa}}{I_{1\kappa}};$$

активний опір короткого замикання:

$$R_{\kappa} \approx \frac{P_{\kappa}}{m_1 I_{1\kappa}^2};$$

індуктивний опір короткого замикання:

$$X_{\kappa} \approx \sqrt{Z_{\kappa}^2 - R_{\kappa}^2}.$$

З деякою незначною похибкою можна вважати, що

$$\begin{cases} Z_1 \approx Z_2' \approx \frac{Z_{\kappa}}{2}; \\ R_1 \approx R_2' \approx \frac{R_{\kappa}}{2}; \\ X_1 \approx X_2' \approx \frac{X_{\kappa}}{2}. \end{cases}$$

Для побудови кругової діаграми визначають струм КЗ і його фазу при номінальній напрузі $U_1 = U_{1ном}$:

$$I_{1\kappa ном} = \frac{U_{1ном}}{Z_{\kappa}},$$

$$\cos \varphi_{\kappa} = \frac{R_{\kappa}}{Z_{\kappa}}.$$

Залежності $P_{1\kappa}$, $I_{1\kappa}$, $\cos \varphi_{1\kappa} = f(U_{1\kappa})$ називають характеристиками короткого замикання (рис. 3.4).

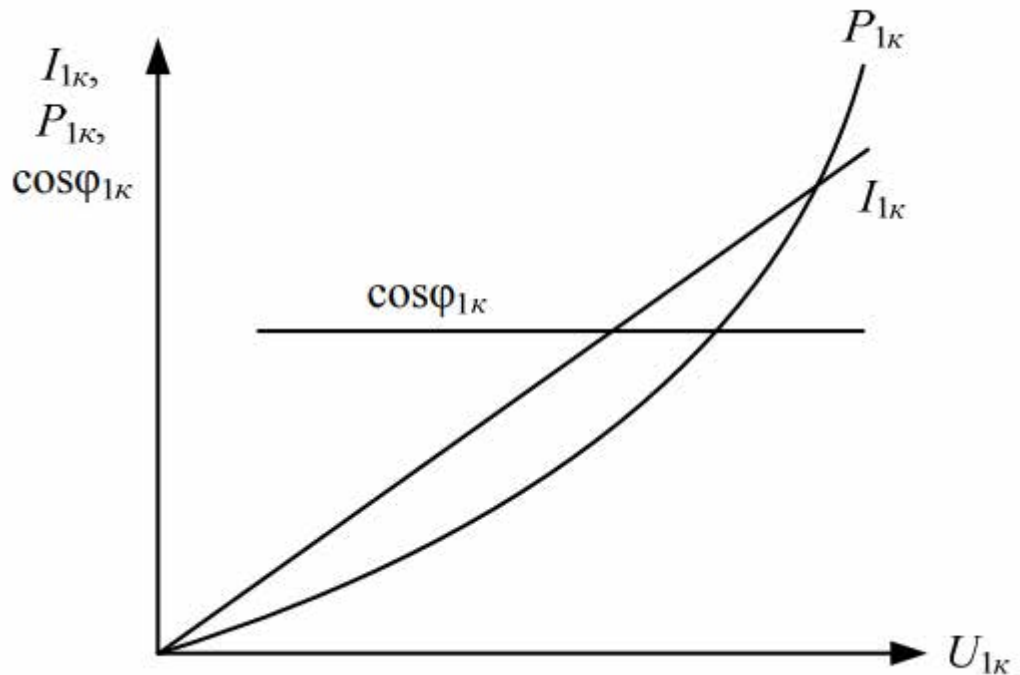


Рисунок 3.4 – Характеристики короткого замикання

Висновок до розділу 3

У третьому розділі було детально розглянуто методи та характеристики схем заміщення асинхронних двигунів, що є важливим інструментом для аналізу, діагностики та оптимізації їх роботи.

У розділі представлено основні типи схем заміщення, такі як П-схема, Г-схема та інші, які використовуються для моделювання та аналізу різних режимів роботи асинхронних двигунів. Кожна схема має свої особливості та сферу застосування, що дозволяє обирати оптимальний підхід залежно від завдання.

Було виконано порівняльний аналіз різних схем, що дозволило виділити їх переваги (зокрема, простота моделювання або висока точність опису фізичних процесів) та недоліки (наприклад, складність визначення параметрів або обмеження у застосуванні для специфічних режимів).

Розглянуто методи визначення параметрів схем заміщення, такі як аналітичні, експериментальні та комбіновані підходи. Проведено порівняння цих методів з точки зору точності, витрат часу та практичної реалізації.

Розділ підкреслив значення схем заміщення для аналізу та діагностики асинхронних двигунів. Використання схем дозволяє прогнозувати роботу двигуна, виявляти потенційні несправності та розробляти заходи для їх запобігання.

У підсумку, у цьому розділі було сформовано комплексний підхід до використання схем заміщення для забезпечення ефективної роботи асинхронних двигунів.

РОЗДІЛ 4

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРИЧИН ПОЯВИ ВИТКОВИХ ЗАМИКАНЬ У СТАТОРНИХ ОБМОТКАХ АД

4.1 Математична модель теплового режиму ізоляції обмотки статора асинхронного двигуна за умов несиметрії активних опорів статорної обмотки

Відхилення значень активних опорів обмоток статора можуть виникати через такі фактори, як: 1) неякісний ремонт асинхронного двигуна (АД), 2) замикання або обрив одного чи декількох паралельних провідників у фазній котушці статора. У випадку обриву одного або декількох провідників котушки фази двигун не зупиняється відразу, а продовжує працювати, поступово руйнуючи ізоляцію сусідніх провідників, що згодом може призвести до аварії, наприклад, міжфазного або корпусного замикання.

На підприємствах гірничодобувної, металургійної галузей та у портах при капітальному ремонті АД у 85% випадків проводиться заміна обмоток статора. Проте досвід експлуатації показує, що термін служби відремонтованих двигунів зазвичай у 3-4 рази коротший, ніж у нових двигунів. Це спричинено рядом чинників: частковою заміною матеріалів обмотувального дроту, порушенням ремонтних технологій, скороченням обсягу робіт, а також браком досвіду та кваліфікації обслуговуючого персоналу. Як наслідок, двигун вводять в експлуатацію з розкидом значень активних опорів по фазах, що перевищує норму. Робота двигуна з несиметричними опорами спричиняє додаткове нагрівання однієї з фаз, що знижує його надійність і збільшує ризик пошкоджень.

У ремонтних цехах металургійних підприємств для визначення відносного коефіцієнта розкиду активних опорів після заміни обмотки статора використовується спеціальний розрахунковий вираз.

$$r_{\delta c} = \frac{R_{max} - R_{min}}{R_{min}} \cdot 100\% \quad (4.1)$$

Тут R_{max} , R_{min} позначають, відповідно, найбільше і найменше значення активного опору обмоток статора, отримані під час вимірювань.

Відносна величина активного опору обмотки статора щодо довідкового значення розраховується за формулою:

$$\Delta r = 1 - \frac{r_1'}{r_{1ном}} \quad (4.2)$$

де $r_{1ном}$ – довідкове значення величини активного опору фазної обмотки статора;
 r_1' – фактично виміряне значення активного опору.

Нерівність активної компоненти опору статорної обмотки призводить до різниці у фазових кутах між фазними струмами та напругами. На рисунку 4.1 зображено векторну діаграму струмів і напруг статорних обмоток асинхронного двигуна при відхиленні активного опору у фазі А статора, за умови, що індуктивна складова опору залишається сталою. На рис. 3.1 позначено φ_a , φ_b і φ_c – фазові кути між струмами і напругами симетрії.

Наявність відхилення активного опору в фазі А викличе додатковий зсув фазового кута на величину $\Delta\varphi_a$, яка визначається виразом:

$$\Delta\varphi_a = \varphi_a - \varphi_a' \quad (4.3)$$

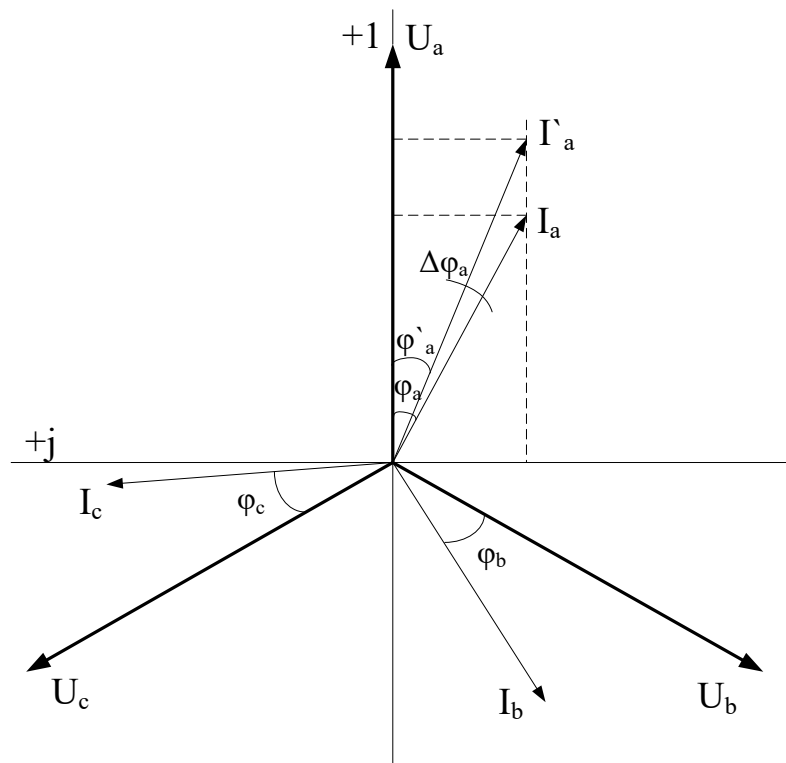


Рис. 4.1 Векторна діаграма струмів і напруг обмотки АД при відхиленні активного опору фази А обмотки статора

Фазові кути визначаються:

$$\varphi_a = \operatorname{arctg} \frac{x_a}{r_a}, \quad (4.4)$$

$$\varphi'_a = \operatorname{arctg} \frac{x_a}{r'_a}, \quad (4.5)$$

де x_a – індуктивна складова повного опору фази А; r_a – активна складова повного опору фази А; r'_a – активна складова повного опору фази А при відхиленні активного опору від довідкового.

Розрахунок активної r_a та індуктивної x_a складових повного опору АД проводиться за схемою заміщення, представленою на рис. 4.2 а).

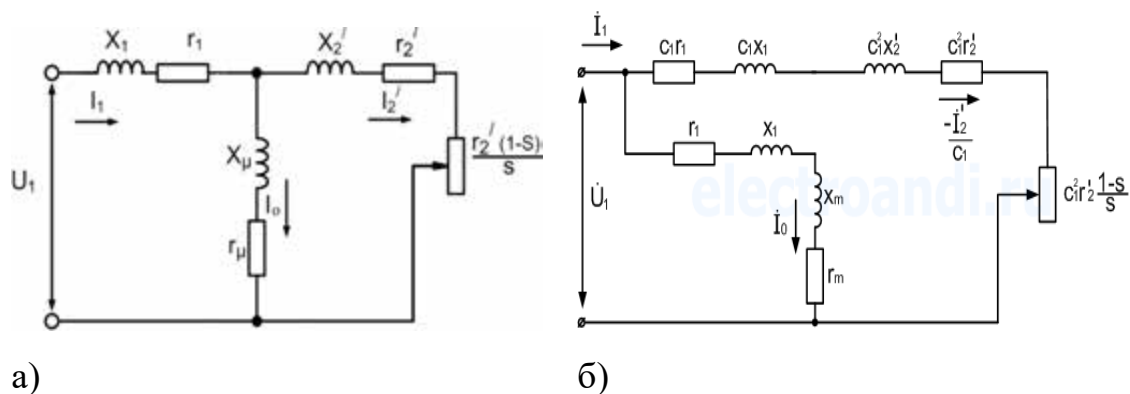


Рис. 4.2 Схеми заміщення АД: а) Т-образна схема, б) Г-образна

На рис. 4.2 позначені: r_1, x_1 – активний опір і індуктивний опір розсіювання обмотки статора; r_2', x_2' – приведені до обмотки статора активний опір і індуктивний опір розсіювання роторної обмотки; r_μ, x_μ – активний та індуктивний опори намагнічуючого контуру; c_1 – коефіцієнт приведення Т-подібної схеми заміщення до Г-образної схеми заміщення.

Складові опорів – r_a, r_a' та x_a визначаються виразами:

$$x_a = x_1 + \frac{x_2' \cdot Z_\mu^2 + x_\mu \cdot Z_2'^2}{Z_\mu^2 + Z_2'^2 + 2 \cdot \left(\frac{r_2' \cdot r_\mu}{s} + x_2' \cdot x_\mu \right)} \quad (4.6)$$

$$r_a = r_1 + \frac{\frac{r_2'}{s} \cdot Z_\mu^2 + r_\mu \cdot Z_2'^2}{Z_\mu^2 + Z_2'^2 + 2 \cdot \left(\frac{r_2' \cdot r_\mu}{s} + x_2' \cdot x_\mu \right)} \quad (4.7)$$

$$r_a' = r_1' + \frac{\frac{r_2'}{s} \cdot Z_\mu^2 + r_\mu \cdot Z_2'^2}{Z_\mu^2 + Z_2'^2 + 2 \cdot \left(\frac{r_2' \cdot r_\mu}{s} + x_2' \cdot x_\mu \right)} \quad (4.8)$$

де $Z_2' = \sqrt{\left(\frac{r_2'}{s}\right)^2 + (x_2')^2}$ – повний опір ротора; $Z_\mu = \sqrt{(r_\mu)^2 + (x_\mu)^2}$ – повний

опір намагнічуючого контуру; r_1' – змінений на величину Δr , відповідно до (4.2), активний опір фази А статора.

Виникнення додаткового кута зсуву $\Delta\varphi_a$ між напругою і струмом спричиняє зміну фазного струму в статорній обмотці (див. рис. 4.1) та збільшення втрат потужності в ній. Вплив активного опору статорних обмоток стає більш значним зі зменшенням потужності асинхронного двигуна.

Оцінка впливу відхилення активного опору в обмотках фази статора асинхронного двигуна, коли його значення змінюється на 10 %, розглядається за умов, за яких кількість витків у фазах статорних обмоток залишається однаковою і постійною, навантаження на валу двигуна не змінюється, напруга живильної мережі є симетричною і незмінною, а частота мережі відповідає номінальному значенню. Після підстановки (4.4) і (4.5) в (4.3) $\Delta\varphi_a$ визначиться за виразом:

$$\Delta\varphi_a = \arctg \frac{x_a \cdot (r_a - r'_a)}{r_a \cdot r'_a + x_a^2}. \quad (4.9)$$

При $r'_1 = r_{ном} \cdot (1 - \Delta r)$, після відповідних перетворень, рівняння (4.9) набуде вигляду:

$$\Delta\varphi_a = \arctg \frac{x_{a.ном} \cdot r_{1.ном} \cdot \Delta r}{r_{a.ном} \cdot r'_a + x_{a.ном}^2}. \quad (4.10)$$

Результати зміни значення $\Delta\varphi_a$, при наявності відхилення активного опору в одній обмотці статора для АД різної потужності представлені в табл. 4.1.

Таблиця 4.1

Значення кута $\Delta\varphi_a$ для різних діапазонів потужностей АД при наявності відхиленні активного опору в одній обмотці АД від 2 до 10 %

| Діапазон потужностей, кВт | Відхилення опору Δr , % | | | | |
|---------------------------|---------------------------------|-------|-------|-------|-------|
| | 2 | 4 | 6 | 8 | 10 |
| 0,5 – 1,5 | 0,180 | 0,353 | 0,537 | 0,711 | 0,891 |
| 2,2 – 7,5 | 0,039 | 0,079 | 0,121 | 0,161 | 0,200 |
| 11 – 55 | 0,024 | 0,042 | 0,066 | 0,083 | 0,107 |
| 75 – 110 | 0,011 | 0,023 | 0,034 | 0,046 | 0,057 |

Графічні залежності зміни кута зсуву $\Delta\varphi_a$ від величини відхилення активного опору фазної обмотки статора наведені на рис. 4.3. Для двигунів потужністю 0,5–1,5 кВт відхилення активного опору в межах 4–8 % спричиняє зміну кута $\Delta\varphi_a$ в межах від $0,4^\circ$ до $0,9^\circ$ і незначне збільшення або зменшення фазного струму до 1 %.

Для двигунів з потужністю 2–7,5 кВт при зміні активного опору в межах 2–10 % фазовий кут змінюється від $0,04^\circ$ до $0,17^\circ$, що викликає зміну струму в фазі не більше 0,5 %. Для асинхронних двигунів потужністю 11–55 кВт зміна активного опору в тих самих межах призводить до зміни фазового кута від $0,02^\circ$ до $0,1^\circ$ і змінює фазний струм на 0,2 %.

Нарешті, для двигунів потужністю 75–110 кВт відхилення активного опору від 2 до 10 % призводить до зміни фазового кута в межах $0,01^\circ$ – $0,06^\circ$, що викликає зміну фазного струму приблизно на 0,1 %.

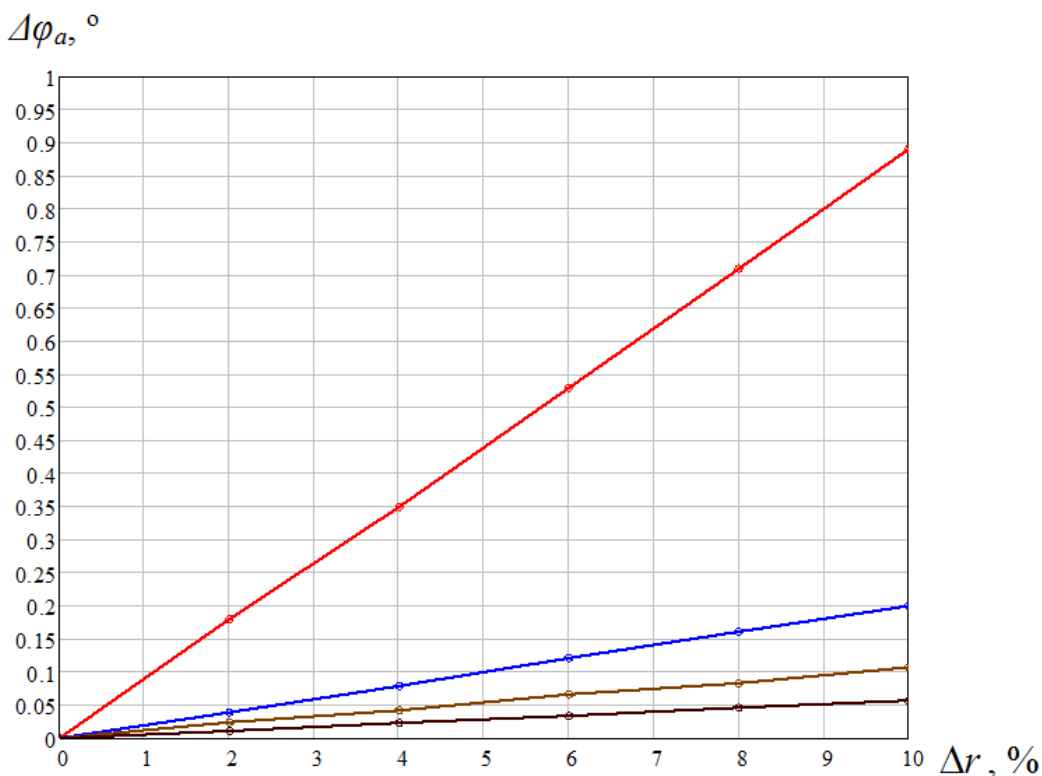




Рис. 4.3 Залежність кута зсуву між фазним струмом і номінальним від величини відхилення активного опору статора для АД різної потужності:

- – АД потужністю 0,5–1,5 кВт
- – АД потужністю 2,0–7,5 кВт

-  – АД потужністю 11–55 кВт
 – АД потужністю 75–110 кВт

Аналіз отриманих результатів дозволяє зробити такі висновки: для визначення параметрів схеми заміщення асинхронного двигуна з потужністю менше 2 кВт потрібно враховувати відхилення активного опору обмотки статора для точного розрахунку втрат потужності та температури обмоток. Для асинхронних двигунів потужністю понад 2 кВт похибка при визначенні параметрів схеми заміщення без врахування відхилення активного опору є меншою за 0,5 %. Це дозволяє не враховувати таке відхилення активного опору в обмотках статора під час теплових розрахунків двигуна.

Номінальні втрати потужності в обмотці статора, $\Delta P_{ном}$, та додаткові втрати потужності, ΔP , обумовлені відхиленнями активного опору, визначаються відповідними математичними виразами.

$$\Delta P_{ном} = \left| \frac{U_{ном}}{Z_{ном}} \cdot e^{j\varphi_a} \right|^2 \cdot r_{1ном} = I_{ном}^2 \cdot r_{1ном}, \quad (4.11)$$

$$\Delta P = \left| \frac{1}{T} \cdot \frac{U_{ном}}{Z_{ном}} \cdot e^{j\varphi_a - \Delta\varphi_a} \right|^2 \cdot r_{1ном} \cdot (1 - \Delta r), \quad (4.12)$$

де $U_{ном}$ – номінальна фазна напруга; $Z_{ном} = r_a + jx_a$ – номінальний комплексний опір АД; $T = \frac{Z}{Z_{ном}}$ – коефіцієнт зміни комплексного опору АД при наявності відхилення активного опору обмотки статора.

Приріст втрат потужності в обмотці статора дорівнює:

$$\Delta P_{\delta} = \Delta P - \Delta P_{ном} \quad (4.13)$$

У таблиці 4.2 представлені результати розрахунку додаткових втрат ΔP_{δ} активної потужності в обмотці статора, що виникають через відхилення активного опору для двигунів 4A71B6У3 потужністю 0,55 кВт та 4A80B4У3 потужністю 1,5 кВт.

Таблиця 4.2

**Додаткові втрати потужності в фазі АД при наявності відхилення
активного опору обмотки статора в одній фазі від 0 % до 10 % щодо
номінального значення**

| Потужність АД, кВт | $\Delta P_{ном}$, Вт | ΔP_{δ} при зміні Δr [%], Вт | | | | |
|-----------------------|--------------------------|--------------------------------------------------|------|------|------|------|
| | | 2 | 4 | 6 | 8 | 10 |
| 0,55 кВт | 55,77 | 0,91 | 1,80 | 2,73 | 3,63 | 4,58 |
| 1,5 кВт | 70,52 | 1,03 | 1,97 | 3,03 | 4,16 | 5,14 |

Отримані дані демонструють, що відсутність врахування відхилення активного опору обмотки статора для АД потужністю 0,5–1,5 кВт може призвести до значних похибок при визначенні втрат потужності. У таблиці 4.3 наведено значення відносної похибки ξ розрахунку втрат потужності внаслідок відхилення активного опору обмотки статора від номінального значення.

$$\xi = \frac{\Delta P_{\delta}}{\Delta P_{ном}} \cdot 100\% \quad (4.14)$$

Таблиця 4.3

**Похибка розрахунку втрат потужності при неврахуванні наявності
відхилень активних опорів обмотки статора АД**

| $P_{ном}$, кВт | Похибка розрахунку ξ при зміні Δr [%], % | | | | |
|-----------------|------------------------------------------------------|-----|-----|-----|-----|
| | 2 | 4 | 6 | 8 | 10 |
| 0,55 | 1,6 | 3,2 | 4,9 | 6,5 | 8,2 |
| 1,5 | 1,5 | 2,8 | 4,3 | 5,9 | 7,3 |

**4.2 Математична модель температурного стану ізоляції асинхронного
двигуна за наявності виткових замикань і несиметрії мережі живлення.**

Несиметрія напруг у мережі призводить до змін як величин, так і кутів фазних струмів у обмотках асинхронного двигуна порівняно з симетричною

системою напруг. Замикання 5–20 % витків спричиняє зміну активної (4.6) та індуктивної (4.7) складових повного опору двигуна. На рис. 4.4 зображено векторну діаграму струмів та напруг обмоток статора при наявності несиметрії в мережі живлення і виткових замикань.

На цьому рисунку показані: U_a, U_b, U_c – симетричні фазні напруги; $U/a, U/b, U/c$ – фазні напруги при несиметричній напрузі; I_a, I_b, I_c – фазні струми при несиметричних фазних напругах; $I/a, I/b, I/c$ – фазні струми при одночасній несиметрії напруг і виткових замиканнях; $\varphi_a, \varphi_b, \varphi_c$ – фазові кути між напругами $U/a, U/b, U/c$ і струмами I_a, I_b, I_c ; $\varphi/a, \varphi/b, \varphi/c$ – кути між напругами $U/a, U/b, U/c$ та струмами $I/a, I/b, I/c$.

Додатковий зсув фазового кута на величину $\Delta\varphi$, що виникає внаслідок змін активної та індуктивної складових у фазах двигуна, можна визначити за виразами:

$$\begin{aligned}\Delta\varphi_a &= \varphi_a - \varphi'_a \\ \Delta\varphi_b &= \varphi_b - \varphi'_b \\ \Delta\varphi_c &= \varphi_c - \varphi'_c\end{aligned}\tag{4.15}$$

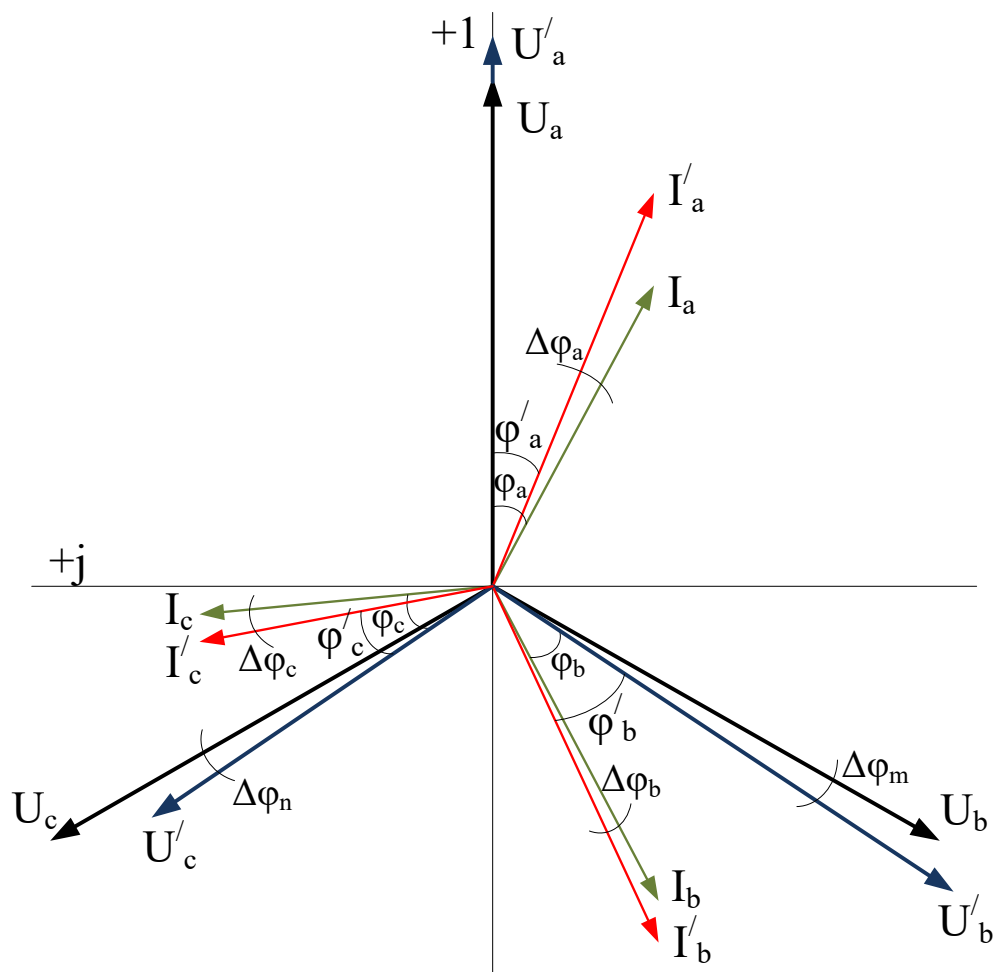


Рис. 4.4 Векторна діаграма струмів і напруг обмоток АД при несиметрії напруг і опорів статора

Величини фазових кутів визначаються за виразами (4.4) і (4.5).

Якщо подати систему симетричних фазових напруг через модуль номінальної напруги та розташувати систему координат так, щоб вона проходила через нульову точку (рис. 4.4), фазовий кут напруги фази А буде дорівнювати

$$\begin{aligned} \dot{U}_a &= |U_n|; \\ \text{нулю. } \dot{U}_b &= |U_n| \cdot a^2; \\ \dot{U}_c &= |U_n| \cdot a, \end{aligned} \tag{4.16}$$

де $a = -0,5 + j0.866$ – фазовий множник або оператор повороту.

Система фазових напруг (4.16) при наявності несиметрії і відхилень напруг:

$$\begin{aligned}\dot{U}_a &= D \cdot |U_H|; \\ \dot{U}_b &= M \cdot |U_H| \cdot a^2 \cdot e^{j\Delta\varphi_m}; \\ \dot{U}_c &= N \cdot |U_H| \cdot a \cdot e^{j\Delta\varphi_n},\end{aligned}\tag{4.17}$$

де D, M, N – коефіцієнти, що враховують кратність зміни фазних напруг; $\Delta\varphi_m, \Delta\varphi_n$ – додаткові фазові кути зсуву цих напруг за умови, що кут фази A дорівнює нулю:

$$\begin{aligned}\Delta\varphi_m &= \frac{2\pi}{3} - \arccos\left(\frac{|\dot{U}_a|^2 + |\dot{U}_b|^2 - |\dot{U}_{ab}|^2}{2 \cdot |\dot{U}_a| \cdot |\dot{U}_b|}\right); \\ \Delta\varphi_n &= \arccos\left(\frac{|\dot{U}_c|^2 + |\dot{U}_a|^2 - |\dot{U}_{ca}|^2}{2 \cdot |\dot{U}_c| \cdot |\dot{U}_a|}\right) - \frac{2\pi}{3}.\end{aligned}\tag{4.18}$$

U_{ab}, U_{ca} – лінійні напруги при несиметричній нарузі живлення.

Згідно з рівняннями (4.6) та (4.7), у разі виникнення виткових замикань відбувається зміна значень активних і індуктивних опорів. Введемо відповідні діагностичні критерії, що враховують дані несправності.

Коефіцієнт, який враховує наявність виткових замикань в обмотці статора:

$$k_w = 1 - \frac{w_k}{w_1},\tag{4.19}$$

де w_k – кількість короткозамкнутих витків обмотки статора.

Коефіцієнт, що враховує наявність виткових замикань в паралельних провідниках обмотки статора:

$$k_m = 1 + \frac{w_k}{w_1(m_1 - 1)}.\tag{4.20}$$

Коефіцієнт k_w можна використовувати для асинхронних двигунів з петльовими одношаровими котушковими або секційними обмотками, тоді як

коефіцієнт k_m підходить для двигунів з петльовими одно- та двошаровими котушковими або секційними обмотками.

Активний та індуктивний опори статора, а також індуктивний опір магнітного кола при наявності виткових замикань, з урахуванням (4.19), дорівнюють:

$$r_{1w} = k_w \cdot r_1, \quad (4.21)$$

$$x_{1w} = k_w^2 \cdot x_1, \quad (4.22)$$

$$x_{\mu w} = k_w^2 \cdot x_\mu, \quad (4.23)$$

При виткових замиканнях в обмотці статора величина активного і індуктивного опорів ротора, а також активна складова ланцюга намагнічування залишаються незмінними.

Повні опори статора і магнітного ланцюга з урахуванням (4.31)–(4.23):

$$Z_{1w} = k_w \cdot r_1 + jk_w^2 \cdot x_1, \quad (4.24)$$

$$Z_{\mu w} = r_\mu + jk_w^2 \cdot x_\mu. \quad (4.25)$$

Відповідно, повний опір АД буде:

$$Z_w = Z_{1w} + \frac{Z_2' \cdot Z_{\mu w}}{Z_2' + Z_{\mu w}}. \quad (4.26)$$

Активний опір статора при замиканнях витків в паралельних провідниках з урахуванням (4.20) визначається:

$$r_{1m} = \frac{r_1}{k_m}. \quad (4.27)$$

Інші параметри схеми заміщення не залежать від коефіцієнта k_m .

Повний опір статора з урахуванням (4.27) знаходиться з:

$$Z_{1m} = \frac{r_1}{k_m} + jx_1. \quad (4.28)$$

Відповідно, повний опір АД:

$$Z_m = Z_{1m} + \frac{Z_2' \cdot Z_\mu}{Z_2' + Z_\mu}. \quad (4.29)$$

Запишемо повні опори фаз АД при можливих несправностях через номінальні довідкові значення:

$$\begin{aligned}\dot{Z}_a &= T_a \cdot |Z_H| \cdot e^{j\varphi'_a} = T_a \cdot |Z_H| \cdot e^{j\varphi_a + \Delta\varphi_a}; \\ \dot{Z}_b &= T_b \cdot |Z_H| \cdot e^{j\varphi'_b} = T_b \cdot |Z_H| \cdot e^{j\varphi_b + \Delta\varphi_b}; \\ \dot{Z}_c &= T_c \cdot |Z_H| \cdot e^{j\varphi'_c} = T_c \cdot |Z_H| \cdot e^{j\varphi_c - \Delta\varphi_c};\end{aligned}\quad (4.30)$$

де $T_a = \frac{Z_{wa}(Z_{ma})}{Z_H}$ – коефіцієнт, що враховує зміну параметрів схеми

заміщення АД при виткових замиканнях в фазі А чи замиканні паралельних

провідників в котушці фази А; $T_b = \frac{Z_{wb}(Z_{mb})}{Z_H}$, $T_c = \frac{Z_{wc}(Z_{mc})}{Z_H}$ – аналогічно для фаз

В і С.

Фазні струми в АД, при виткових замиканнях в обмотках і несиметрії напруг мережі, визначаються за виразами:

$$\dot{I}_a = \frac{\dot{U}_a}{\dot{Z}_a} = \frac{D \cdot |U_H|}{T_a \cdot |Z_H|} \cdot e^{-j(\varphi_a + \Delta\varphi_a)} = H \cdot |I_H| \cdot e^{-j(\varphi_a + \Delta\varphi_a)}; \quad (4.31)$$

$$\dot{I}_b = \frac{\dot{U}_b}{\dot{Z}_b} = \frac{M \cdot |U_H|}{T_b \cdot |Z_H|} \cdot a^2 \cdot e^{j(\Delta\varphi_m - \varphi_a - \Delta\varphi_b)} = L \cdot |I_H| \cdot a^2 \cdot e^{j(\Delta\varphi_m - \varphi_a - \Delta\varphi_b)}; \quad (4.32)$$

$$\dot{I}_c = \frac{\dot{U}_c}{\dot{Z}_c} = \frac{N \cdot |U_H|}{T_c \cdot |Z_H|} \cdot a \cdot e^{j(\Delta\varphi_n - \varphi_a + \Delta\varphi_c)} = J \cdot |I_H| \cdot a \cdot e^{j(\Delta\varphi_n - \varphi_a + \Delta\varphi_c)}, \quad (4.33)$$

де $H = \frac{D}{T_a}$; $L = \frac{M}{T_b}$; $J = \frac{N}{T_c}$ – коефіцієнти, що враховують кратність зміни

струму при несиметричних напружених і виткових замиканнях до номінальної величини; I_H – номінальний струм АД.

Струми прямої і зворотної послідовностей, згідно з методом симетричних складових, визначаються виразами:

$$\dot{I}_1 = \frac{\dot{I}_a + a\dot{I}_b + a^2\dot{I}_c}{3}; \quad (4.34)$$

$$\dot{I}_2 = \frac{\dot{I}_a + a^2 \dot{I}_b + a \dot{I}_c}{3}. \quad (4.35)$$

Підставляючи (4.31)–(4.33) в (4.34), (4.35) і виконуючи відповідні перетворення, отримаємо вирази для струмів I_1 та I_2 :

$$\dot{I}_1 = \frac{|I_H|}{3} \cdot V \cdot e^{j\varphi_V}; \quad (4.36)$$

$$\dot{I}_2 = \frac{|I_H|}{3} \cdot Q \cdot e^{j\varphi_Q}; \quad (4.37)$$

де V і Q – коефіцієнти, що враховують наявність несиметрії напруг і несиметрії опорів обмоток і визначаються за виразами:

$$V = \sqrt{H^2 + L^2 + J^2 + 2HL \cos(\Delta\varphi_m - \Delta\varphi_a + \Delta\varphi_b) + 2HJ \cdot \cos(\Delta\varphi_n - \Delta\varphi_a - \Delta\varphi_c)}; \\ + 2LJ \cos(\Delta\varphi_n - \Delta\varphi_m - \Delta\varphi_b - \Delta\varphi_c) \quad (4.38)$$

$$Q = \sqrt{H^2 + L^2 + J^2 + 2HL \cos(\Delta\varphi_m - \Delta\varphi_a + \Delta\varphi_b + \frac{2\pi}{3}) + 2HJ \cdot \cos(\Delta\varphi_n - \Delta\varphi_a - \Delta\varphi_c + \frac{4\pi}{3})}; \\ + 2LJ \cos(\Delta\varphi_n - \Delta\varphi_m - \Delta\varphi_b - \Delta\varphi_c - \frac{2\pi}{3}) \quad (4.39)$$

φ_V і φ_Q – аргументи струмів прямої і зворотної послідовностей, розраховані за виразами:

$$\varphi_V = \arctg \frac{H \sin(-\varphi_a - \Delta\varphi_a) + L \sin(\Delta\varphi_m - \varphi_a - \Delta\varphi_b) + J \sin(\Delta\varphi_n - \varphi_a + \Delta\varphi_c)}{H \cos(-\varphi_a - \Delta\varphi_a) + L \cos(\Delta\varphi_m - \varphi_a - \Delta\varphi_b) + J \cos(\Delta\varphi_n - \varphi_a + \Delta\varphi_c)}; \quad (4.40)$$

$$\varphi_Q = \arctg \frac{H \sin(-\varphi_a + \Delta\varphi_a) + L \sin(\Delta\varphi_m - \varphi_a - \Delta\varphi_b + \frac{2\pi}{3}) + J \sin(\Delta\varphi_n - \varphi_a + \Delta\varphi_c + \frac{4\pi}{3})}{H \cos(-\varphi_a + \Delta\varphi_a) + L \cos(\Delta\varphi_m - \varphi_a - \Delta\varphi_b + \frac{2\pi}{3}) + J \cos(\Delta\varphi_n - \varphi_a + \Delta\varphi_c + \frac{4\pi}{3})}. \quad (4.41)$$

Коефіцієнт несиметрії струмів визначиться як:

$$k_{2I} = \frac{|I_2|}{|I_1|} \cdot 100\% = \frac{Q}{V} \cdot 100\%. \quad (4.42)$$

Записуючи фазні струми через струми прямої (4.36) і зворотної (4.37) послідовностей, з урахуванням (4.38)–(4.41), отримаємо:

$$I_a = \frac{I_{ном} \cdot V}{3} \cdot (1 + 2 \cdot k_{2I} \cdot \cos(\varphi_V - \varphi_Q) + k_{2I}^2); \quad (4.43)$$

$$I_b = \frac{I_{ном} \cdot V}{3} \cdot \left(1 + 2 \cdot k_{2I} \cdot \cos\left(\varphi_V - \varphi_Q + \frac{2\pi}{3}\right) + k_{2I}^2 \right); \quad (4.44)$$

$$I_c = \frac{I_{ном} \cdot V}{3} \cdot \left(1 + 2 \cdot k_{2I} \cdot \cos\left(\varphi_V - \varphi_Q - \frac{2\pi}{3}\right) + k_{2I}^2 \right), \quad (4.45)$$

На підставі (4.43)–(4.45), втрати потужності в фазах АД визначаються за виразами:

$$\Delta P_a = \frac{\Delta P_{ном} \cdot V^2}{9} \cdot (1 - \Delta r) \cdot (1 + 2 \cdot k_{2I} \cdot \cos(\varphi_V - \varphi_Q) + k_{2I}^2); \quad (4.46)$$

$$\Delta P_b = \frac{\Delta P_{ном} \cdot V^2}{9} \cdot (1 - \Delta r) \cdot \left(1 + 2 \cdot k_{2I} \cdot \cos\left(\varphi_V - \varphi_Q + \frac{2\pi}{3}\right) + k_{2I}^2 \right); \quad (4.47)$$

$$\Delta P_c = \frac{\Delta P_{ном} \cdot V^2}{9} \cdot (1 - \Delta r) \cdot \left(1 + 2 \cdot k_{2I} \cdot \cos\left(\varphi_V - \varphi_Q - \frac{2\pi}{3}\right) + k_{2I}^2 \right), \quad (4.48)$$

де $\Delta P_{ном} = I_{ном}^2 \cdot r_{1ном}$ – втрати потужності в фазі АД при номінальному навантаженні, відсутності відхилень опорів АД і симетричній системі живильної мережі.

Уточнимо вираз (4.2), підставивши в нього (4.21) і (4.27):

$$\Delta r = 1 - \frac{k_w \cdot r_1}{r_1} = 1 - k_w, \quad (4.49)$$

$$\Delta r = 1 - \frac{r_1}{k_m \cdot r_1} = 1 - \frac{1}{k_m}. \quad (4.50)$$

Вирази (4.43)–(4.45) для струмів та (4.46)–(4.48) для втрат потужності дозволяють виявляти наявність виткових замикань при несиметрії та відхиленнях напруг. Дослідження впливу режимів роботи асинхронного двигуна на його температурне поле здійснюються за допомогою теплових моделей різного ступеня деталізації. Як уже зазначалося, моделі з трьома і більше джерелами тепла забезпечують нижчу похибку, але для їх застосування потрібні додаткові дані про теплопровідність і теплоємність окремих конструктивних

елементів двигуна, що важко визначити на діючих установках. Тому такі моделі зазвичай використовують лише на етапі проектування.

Найпростішою тепловою моделлю є модель, у якій асинхронний двигун розглядається як єдине однорідне тіло із загальною температурою.

У роботах підтверджено адекватність такої моделі для визначення температури в найбільш навантаженій обмотці. Використання цієї однотільної теплової моделі в умовах виткових замикань та змінних показників якості електроенергії можливе за умови врахування змін параметрів еквівалентної схеми двигуна в разі короткозамкнених витків.

Точність результатів буде залежати від правильного визначення параметрів схеми заміщення під час експлуатації та від урахування при розрахунках втрат потужності в обмотках, несиметричних режимах мережі та відхилень опорів у фазах.

При сталому режимі роботи, за номінальним навантаженням і симетричними напругами мережі, температура двигуна визначається так:

$$\Theta_{ном} = \Theta_{o.c.} + \frac{\Delta P_{ном}}{\alpha \cdot S_{нов}}, \quad (4.51)$$

де $\Theta_{o.c.}$ – температура оточуючого середовища; $S_{нов}$ – площа поверхні охолодження.

Згідно теплової моделі тепло, що виділяється в одиницю часу в обмотці, пропорційно потужності електричних втрат:

$$\Delta \Theta_{уст} = \Delta \Theta_{ном} \cdot \left(\frac{\Delta P}{\Delta P_{ном}} \right), \quad (4.52)$$

де $\Delta \Theta_{ном} = \Theta_{ном} - \Theta_{o.c.}$ – перевищення температури обмоток відповідно номінальному режиму; $\Delta P_{ном}$ – втрати потужності при номінальному режимі роботи АД; ΔP – втрати потужності, відповідні температурі $\Delta \Theta_{уст}$.

Відповідно, підставляючи втрати потужності згідно з (4.46)–(4.48), що враховують наявність відхилень напруг і відмінність опорів по фазах, рівняння (4.52) набуде вигляду

$$\Theta_a = \frac{\Theta_{ном} \cdot V^2}{9} \cdot (1 - \Delta r) \cdot \left(1 + 2 \cdot k_{2I} \cdot \cos(\varphi_V - \varphi_Q) + k_{2I}^2\right) \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{t_{ном}}}\right) \quad (4.53)$$

$$\Theta_b = \frac{\Theta_{ном} \cdot V^2}{9} \cdot (1 - \Delta r) \cdot \left(1 + 2 \cdot k_{2I} \cdot \cos\left(\varphi_V - \varphi_Q + \frac{2\pi}{3}\right) + k_{2I}^2\right) \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{t_{ном}}}\right) \quad (4.54)$$

$$\Theta_c = \frac{\Theta_{ном} \cdot V^2}{9} \cdot (1 - \Delta r) \cdot \left(1 + 2 \cdot k_{2I} \cdot \cos\left(\varphi_V - \varphi_Q - \frac{2\pi}{3}\right) + k_{2I}^2\right) \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{t_{ном}}}\right) \quad (4.55)$$

де – перевищення температури обмотки фази А за умов несиметрії напруг та відхилення активних опорів; t – час; $t_{ном}$ – стала часу нагрівання; та – аналогічно для фаз В і С.

Вирази (4.53)–(4.55) можна використовувати для оцінки теплового стану обмоток асинхронного двигуна при різних ступенях несиметрії опорів, зумовлених витковими замиканнями, відхиленнями активних опорів обмоток статора і динамічними змінами напруги.

Таблиця 4.4 містить теоретичні розрахунки зміни температури по фазах обмотки статора при відхиленні напруги в діапазоні $\pm 10\%$ і відхиленні активних опорів у межах від 4 до 8 % від номінального значення. Ці розрахунки були виконані в програмі Mathcad за виразами (4.53)–(4.55) для асинхронного двигуна типу МТ011-6 з параметрами: $P_n = 1,4$ кВт, $U = 380/220$ В, $n_n = 895$ об/хв, $\cos\varphi_n = 0,67$, $\eta_n = 0,73$, $\lambda = 2,7$, $k_n = 2,4$, $k_{пн} = 3$, а також параметрами схеми заміщення: $r_1 = 4,9$ Ом, $x_1 = 4,7$ Ом, $r_2 = 7,2$ Ом, $x_2 = 5,1$ Ом, $r_\mu = 2,04$ Ом, $x_\mu = 48,96$ Ом.

Таблиця 4.4

Температури фаз і їх зміни щодо робочої температури при відхиленнях напруги $\Delta U_a = +7$ В, $\Delta U_b = +2,1$ В, $\Delta U_c = -10,9$ В ($k_{2U} = 2,03$ %) і відхиленнях активних опорів

| Температура, °С | $\Delta r = +(4 \text{ та } 8) \%$ | | | | | | | | |
|----------------------------------------|------------------------------------|------|-------|------|------|------|------|------|-------|
| | А* | | | В* | | | С* | | |
| | 0 | 4 | 8 | 0 | 4 | 8 | 0 | 4 | 8 |
| Θ_a | 77,6 | 75,0 | 72,2 | 77,6 | 77,6 | 77,6 | 77,6 | 77,4 | 77,3 |
| Θ_b | 74,3 | 74,0 | 73,7 | 74,3 | 71,7 | 68,9 | 74,3 | 74,2 | 74,1 |
| Θ_c | 65,8 | 66,0 | 66,2 | 65,8 | 65,7 | 65,8 | 65,8 | 63,8 | 61,6 |
| $\Delta\Theta_a = \Theta_a - \Theta_n$ | +4,6 | +2,0 | -0,8 | +4,6 | +4,6 | +4,6 | +4,6 | +4,4 | +4,3 |
| $\Delta\Theta_b = \Theta_b - \Theta_n$ | +1,3 | +1,0 | +0,7 | +1,3 | -1,3 | -4,1 | +1,3 | +1,2 | +1,1 |
| $\Delta\Theta_c = \Theta_c - \Theta_n$ | -7,2 | -7,0 | -6,8 | -7,2 | -7,3 | -7,2 | -7,2 | -9,2 | -11,4 |
| | $\Delta r = -(4 \text{ та } 8) \%$ | | | | | | | | |
| | А* | | | В* | | | С* | | |
| | 0 | 4 | 8 | 0 | 4 | 8 | 0 | 4 | 8 |
| Θ_a | 77,6 | 81,0 | 84,3 | 77,6 | 77,6 | 77,5 | 77,6 | 77,8 | 78,0 |
| Θ_b | 74,3 | 74,6 | 74,9 | 74,3 | 77,7 | 81,0 | 74,3 | 74,4 | 74,6 |
| Θ_c | 65,8 | 65,6 | 65,3 | 65,8 | 65,8 | 65,9 | 65,8 | 68,4 | 71,0 |
| $\Delta\Theta_a = \Theta_a - \Theta_n$ | +4,6 | +8,0 | +11,3 | +4,6 | +4,6 | +4,5 | +4,6 | +4,8 | +5,0 |
| $\Delta\Theta_b = \Theta_b - \Theta_n$ | +1,3 | +1,6 | +1,9 | +1,3 | +4,7 | +8,0 | +1,3 | +1,4 | +1,6 |
| $\Delta\Theta_c = \Theta_c - \Theta_n$ | -7,2 | -7,4 | -7,7 | -7,2 | -7,2 | -7,1 | -7,2 | -4,6 | -2,0 |

Аналіз даних табл. 4.4 показав, що при відхиленнях напруги $\Delta U_a = +7$ В, $\Delta U_b = +2,1$ В, $\Delta U_c = -10,9$ В наявність відхилення активного опору в найбільш завантаженій фазі А $\Delta r = -4$ % призводить до додаткового підвищення температури на 8,0 °С, а наявність $\Delta r = -8$ % спричиняє додаткове підвищення температури на 11,3 °С.

4.3 Вплив розбігу параметрів схеми заміщення асинхронного двигуна на точність виявлення виткового замикання в обмотці статора

У практичних розрахунках механічних характеристик асинхронного двигуна його зазвичай моделюють за допомогою еквівалентної схеми заміщення, де електромагнітний зв'язок замінено електричним. Параметри роторного кола приводяться до параметрів кола статора. Найбільш повне відображення характеристик асинхронного двигуна та процесів, що відбуваються в ньому, забезпечує Т-подібна схема заміщення (рис. 4.2 а)), яка дозволяє отримати точні розрахункові формули для всіх величин, що характеризують електромагнітні процеси в двигуні. З метою спрощення розрахунків Т-подібну схему доцільно перетворити на еквівалентну Г-подібну схему заміщення (рис. 4.2 б), що призводить до незначного зниження точності розрахунку параметрів.

Існує багато методів обчислення параметрів схеми заміщення на основі каталожних даних. У дослідженні проведено порівняльний аналіз двох методів розрахунку параметрів схеми заміщення. Один із них базується на інженерних розрахунках для проектування машин, інший — на спрощеній методиці. Основні результати наведено в табл. 4.5.

Таблиця 4.5

Параметри схеми заміщення, розраховані різними способами

| Спосіб розрахунку | Параметри схеми заміщення | | | | |
|-------------------|---------------------------|------------|-------------|-------------|--------------|
| | r_1 , Ом | x_1 , Ом | r'_2 , Ом | x'_2 , Ом | x_μ , Ом |
| Методика 1 | 0.091 | 1.044 | 0.036 | 0.834 | 58.27 |
| Методика 2 | 0.036 | 0.305 | 0.020 | 0.305 | 19.00 |

Параметри спроектованого асинхронного двигуна, отримані за методом 12 і розраховані за методом 13, були порівняні за допомогою комп'ютерного моделювання. Результати показали, що метод 14 є більш детальним, оскільки

враховує безліч параметрів і факторів, але потребує значних розрахункових зусиль і не виключає можливих помилок. Метод 12 дозволяє швидше розрахувати параметри схеми заміщення, хоча і з меншою точністю.

У дослідженні 14 представлені експериментальні та аналітичні методи визначення параметрів схеми заміщення асинхронного двигуна. Експериментальний метод ґрунтується на вимірюваннях струмів, напруг і потужності у статорному колі при двох різних ковзаннях, з фіксацією одного з параметрів ротора, тоді як аналітичний метод зводиться до розв'язання системи нелінійних алгебраїчних рівнянь з одним заданим параметром ротора.

В роботі 15 параметри схеми заміщення визначаються для випадку несиметричного живлення статора при нерухомому роторі, що дозволяє скласти систему з трьох нелінійних рівнянь на основі рівності індуктивних опорів статора і ротора.

Автори дослідження 15 пропонують метод без ітерацій для визначення параметрів двигуна за каталожними даними. Вони відзначають, що ітераційні методи можуть бути складними у практичному застосуванні, і пропонують простий підхід із використанням спрощених аналітичних виразів. Однак у методі 15 є похибка через застосування спрощеного виразу для визначення струму холостого ходу, а також через значний діапазон коефіцієнта β . Використання стандартного значення струму часткового навантаження 0,25 або 0,5 для обчислення струму холостого ходу при потужності двигуна до 5 кВт може призвести до похибки до 20 %, оскільки для малих двигунів I_0 може сягати 80 %. Для двигунів потужністю від 5,5 до 45 кВт похибка в I_0 складе від 10 до 15 %, а для двигунів потужністю понад 45 кВт варіація β призводить до відхилень параметрів до 10 %. Відсутність розрахунку активного опору намагнічуючого контуру додає похибку до 4 %.

Робота 16 пропонує алгоритм для визначення параметрів схеми заміщення на основі каталожних даних, що скорочує обчислювальні витрати шляхом виключення ітерацій. Для двигунів потужністю понад 30 кВт точність методу 16 складає 10–15 %, що обумовлено завищеним значенням приведенного опору

ротора через припущення про допустимість лінійної апроксимації механічної характеристики в діапазоні $0 < s < s_n$ для сталих режимів роботи. Застосування цього методу для двигунів потужністю менше 30 кВт призводить до похибки понад 20 %, оскільки потребує іншого підходу до визначення струму I_0 . Відсутність розрахунку активного опору намагнічуючого контуру також додає похибку до 4 %.

У дослідженні запропоновано методику для визначення параметрів схеми заміщення асинхронного двигуна, яка дозволяє узгодити розрахункові координати механічної характеристики з довідковими даними. У цій методиці всі параметри представлені як функції коефіцієнта a , який можна визначити на основі критичного ковзання, хоча в довідковій літературі ця величина не вказується. Алгоритм, запропонований авторами, включає цикл з варіацією a з наступним вибором оптимального значення. Для розрахунку коефіцієнта c_1 вводиться ітераційний цикл з перериванням при збігу до сталого значення c_1 . Цей алгоритм використовує інтерполяцію механічної характеристики за двома точками, що викликає відхилення в параметрах схеми заміщення: до 20 % для двигунів потужністю менше 1,5 кВт і близько 10 % для двигунів більшої потужності, оскільки робоча частина механічної характеристики нелінійна. Відсутність розрахунку активного опору намагнічувальної гілки спричиняє відхилення загального опору двигуна до 4 %.

У методиці 13 представлений підхід до визначення параметрів схеми заміщення двигуна в сталому режимі, використовуючи каталожні дані як вхідні. Основні відхилення розрахункових параметрів виникають через варіативний вибір коефіцієнтів c_1 , β_0 та ξ у межах певного діапазону. У цій методиці розкид параметрів для двигунів потужністю від 0,5 до 250 кВт коливається від 3 до 15 %. Крім того, методика не враховує реактивний опір статора і ротора, що призводить до відхилень загального опору до 10 %.

Аналіз результатів, представлених у роботах 12,13,14,15, показав, що розкид параметрів при визначенні величин елементів схеми заміщення для асинхронних двигунів складає від 4 до 20 % залежно від типу і потужності

двигуна. Максимальні відхилення, до 15–20 %, спостерігаються для двигунів потужністю до 5 кВт.

Отримані дані дозволяють зробити висновок, що некоректне визначення параметрів схеми заміщення при їх використанні в теплових моделях може призвести до переоцінки або недооцінки температури статорних обмоток двигуна. Наведені методики також не підходять для систем діагностики, що потребують високої точності з максимальною похибкою 1,5 % для ефективного виявлення виткових замикань, адже розглянуті методи мають похибку до 20 %.

Нижче приведені алгоритми розрахунків і основні формули, застосовані в розглянутих методах для визначення параметрів схем заміщення. У методиці 13 використовуються наступні параметри: I_o – струм холостого ходу; I_{1p^*} – струм при частковому навантаженні для $p^* = 0,25$ або $0,5$; m – число фаз статора; c_1 – коефіцієнт для приведення Т-образної схеми до Г-образної; β – коефіцієнт співвідношення опорів статорної та роторної обмоток; s_n – номінальне ковзання; s_k – критичне ковзання; A_o, A_1, B, C – коефіцієнти; $\omega_1 = 2\pi f$ – синхронна частота поля статора; φ_o – кут між струмом I_o та напругою U ; γ – коефіцієнт; X_k – індуктивний опір короткого замикання.

Метод[3]

$$I_o = \sqrt{\frac{I_{1p^*}^2 - \left(\frac{p^*(1-s_n)}{(1-p^* \cdot s_n)} \cdot I_n\right)^2}{I - \left(\frac{p^*(1-s_n)}{(1-p^* \cdot s_n)} \cdot I_n\right)^2}} \quad I_n = \frac{P_n}{m \cdot U \cdot \eta_n \cdot \cos \varphi_n} \quad c_1 = 1 + \frac{x_1}{x_\mu} = 1 + \frac{I_o}{2 \cdot k_{ni} \cdot I_n} \quad \beta = 0.6 - 2.5$$

$$s_k = s_n \cdot \frac{\lambda + \sqrt{\lambda^2 - (2 \cdot s_n \cdot \beta \cdot (\lambda - 1))}}{1 - 2 \cdot s_n \cdot \beta \cdot (\lambda - 1)} \quad A_1 = \frac{m \cdot U^2 \cdot (1 - s_n)}{2 \cdot c_1 \cdot \lambda \cdot P_n \cdot \omega_1} \quad A_o = \frac{I_n \cdot \cos \varphi_n - I_o \cdot \cos \varphi_o}{U} \quad C = \frac{1}{s_k \cdot s_n} - A_o \cdot A_1 \cdot \left(\frac{1}{s_n^2} + \frac{1}{s_k^2}\right)$$

$$B = \frac{1}{s_n} + \frac{1}{s_k} - \frac{A_o \cdot A_1}{s_n} \quad \beta = -\frac{B}{2} + \sqrt{\frac{B^2}{4} - 4 \cdot C} \quad \gamma = \sqrt{\frac{1}{s_k^2} - \beta^2} \quad X_k = \gamma \cdot c_1 \cdot r_2 \quad r_1 = c_1 \cdot r_2 \cdot \beta \quad x_1 = 0.42 \cdot X_k$$

$$r_2 = \frac{A_1}{\left(\beta + \frac{1}{s_k}\right) \cdot c_1} \quad x_2 = 0.58 \cdot \frac{X_k}{c_1} \quad x_\mu = \frac{\sqrt{(U \cdot \cos \varphi_n - r_1 \cdot I_n)^2 + (U \cdot \sin \varphi_n + x_1 \cdot I_n)^2}}{I_o}$$

метод [4]

$$I_o = -1.161 \cdot 10^{-8} \cdot P_n^2 + 0.001194 \cdot P_n - 8.85 \text{ при } 30 \text{ кВт} \leq P_n \leq 45 \text{ кВт};$$

$$I_o = -1.459 \cdot 10^{-8} \cdot P_H^2 + 0.002663 \cdot P_H - 80.7 \text{ при } 55 \text{ кВт} \leq P_H \leq 90 \text{ кВт};$$

$$I_o = -6.688 \cdot 10^{-10} \cdot P_H^2 + 0.000426 \cdot P_H - 3.37 \text{ при } 110 \text{ кВт} \leq P_H \leq 315 \text{ кВт};$$

$$M_H = \frac{p \cdot P_H}{(1-s_H) \cdot \omega_1} c_1 = 1 + \frac{\sqrt{3} \cdot U \cdot \eta_H \cdot \cos \varphi_H \cdot I_o}{2 \cdot k_{ni} \cdot P_H} A = \frac{m_1 \cdot (1-s_H) \cdot U^2}{2 \cdot c_1 \cdot r_2 \cdot \lambda \cdot P_H} \beta = A - \frac{1-2 \cdot s_H \cdot (\lambda-1) \cdot A}{s_H \cdot (1+\sqrt{2 \cdot s_H \cdot (\lambda-1) \cdot A})}$$

$$s_k = s_H \frac{1+\sqrt{2 \cdot s_H \cdot (\lambda-1) \cdot A}}{1-2 \cdot s_H \cdot (\lambda-1) \cdot A} X_k = c_1 \cdot r_2 \cdot \sqrt{\frac{1}{s_k^2} - \beta^2} r_1 = c_1 \cdot r_2 \cdot \beta x_1 = 0.48 \cdot X_k r_2 = \frac{m_1 \cdot p \cdot U^2 \cdot s_H}{\omega_1 \cdot c_1 \cdot M_H}$$

$$x_2 = 0.52 \cdot \frac{X_k}{c_1} x_\mu = \frac{U \cdot I_H \cdot \sqrt{1-\cos \varphi_H} - U^2 \cdot \left(\frac{1}{s_k^2} - \beta^2\right)}{\left[\left(\frac{1}{s_H} + \beta\right)^2 + \left(\frac{1}{s_k^2} - \beta^2\right)\right]^{\frac{1}{2}} I_o^2}$$

метод [5]

Задаем значениями

$$a = 0.2 \div 3.2 c_1 = 1.02 \div 1.2 A = 1 - 2 \cdot a \cdot s_H \cdot (\lambda - 1) s_k = \frac{s_H}{A} \cdot (\lambda + \sqrt{\lambda^2 - A}) \Omega = \frac{2 \cdot \pi \cdot f}{p} M_H = \frac{p \cdot P_H}{\Omega \cdot (1-s_H)}$$

$$B = \frac{m_1 \cdot P_H}{2 \cdot \Omega \cdot c_1} X_k = \frac{r_1}{a \cdot s_k} \cdot \sqrt{1 - (a \cdot s_k)^2} b(s) = \frac{X_k}{c_1 \cdot \left[\left(r_1 + \frac{c_1 \cdot r_2}{s}\right)^2 + X_k^2\right]} r_1 = \frac{B}{\lambda \cdot M_H \cdot \left(1 + \frac{1}{a \cdot s_H}\right)}$$

$$x_1 = \frac{X_k}{1+c_1^2} r_2 = \frac{r_1}{c_1 \cdot a} x_2 = \frac{c_1 \cdot X_k}{1+c_1^2} x_\mu = \frac{1}{\frac{I_H \cdot \sqrt{1-\cos^2 \varphi_H}}{U} - b(s)} - x_1$$

метод [6]

Задаем значениями

$$c_1 = 1.02 \div 1.2 \xi = 1.02 \div 1.15 \beta_o = \sqrt{\frac{\Delta P_o}{\Delta P_{элл}}} = 0.7 \div 0.85 \alpha_o = \frac{1}{1+\beta_o^2} a = \frac{r_1}{r_2} = \frac{\alpha_o}{\xi} \cdot \frac{1-\eta_H}{\eta_H} \cdot \frac{1-s_H}{s_H} - 1$$

$$R_m = \frac{3 \cdot U^2 \cdot (1-s_H)}{2 \cdot P_H \cdot (\lambda + \xi - 1)} G = \frac{1}{s_H^2} + \frac{2 \cdot a}{s_H} + a^2 b = \frac{\lambda + \xi - 1}{\xi} X_k = \sqrt{R_m^2 - 2 \cdot R_m \cdot r_1} \Gamma_{2H} = \frac{U}{\sqrt{\left(r_1 + \frac{r_2}{s_H}\right)^2 + X_k^2}}$$

$$\varphi_{2H} = \arctg\left(\frac{X_k}{r_1 + \frac{r_2}{s_H}}\right) I_o = \sqrt{I_H^2 + \Gamma_{2H}^2 - 2 \cdot I_H \cdot \Gamma_{2H} \cdot \cos(\varphi_H - \varphi_{2H})} \cos \varphi_o = \frac{I_H \cdot \cos \varphi_H - \Gamma_{2H} \cdot \cos \varphi_{2H}}{I_o} z_o = \frac{U}{c_1 \cdot I_o}$$

$$r_1 = a \cdot r_2 r_2 = \frac{R_m}{G} \cdot \left(\frac{b}{s_H} + a + \sqrt{\left(\frac{b}{s_H} + a\right)^2 - G}\right) r_\mu = z_o \cdot \cos \varphi_o = \sqrt{z_o^2 - x_\mu^2} x_\mu = \sqrt{z_o^2 - r_\mu^2}$$

У методі 16, крім перерахованих вище, додатково використані: M_n – номінальний крутний момент АД; p – число пар полюсів; A, β – коефіцієнти, параметри яких визначаються напругою мережі, потужністю АД, кількістю фаз, коефіцієнтом c_1 , приведеним опором ротора.

У методі 15 додатково використані: Ω – швидкість ідеального холостого ходу; $b(s)$ – реактивна складова комплексної провідності.

У методі 13 додатково використані: ξ – коефіцієнт, що характеризує відношення суми механічних і додаткових втрат до номінальної потужності; β_o – коефіцієнт завантаження АД, для якого η максимальний; α_o, a, R_m, G, b – коефіцієнти, які залежать від ковзання, ККД, напруги живлення, потужності і т.д.; I_{2n} – номінальний струм в обмотці ротора, приведений до обмотки статора; φ_{2n} – кут між векторами струму I_{2n} і напруги U ; Z_o – повний опір гілки намагнічування.

У методиці 13 пропонується перевіряти отримані в результаті розрахунків значення опорів r_1, r_2 та X_k за формулами:

$$P_n = \frac{3 \cdot U^2 \cdot (1 - s_n) \cdot \frac{r_2}{s_n}}{\xi \cdot \left[\left(r_1 + \frac{r_2}{s_n} \right)^2 + X_k^2 \right]}, \quad (4.56)$$

$$\lambda = \frac{3 \cdot U^2}{2 \cdot P_n} \cdot \frac{1 - s_n}{r_1 + \sqrt{r_1^2 + X_k^2}} + 1 - \xi. \quad (4.57)$$

де P_n – номінальна потужність АД, U – фазна напруга; λ – відношення максимального крутного моменту до номінального; s_n – номінальне ковзання; ξ – коефіцієнт, що характеризує відношення механічних і додаткових втрат до номінальної потужності АД.

Для ряду АД потужністю від 1 до 100 кВт були взяті довідкові дані і проектні значення параметрів схеми заміщення і за виразами (4.56) і (4.57)

виконаний розрахунок потужності P_n і коефіцієнта λ . Результати представлені в табл. 4.7.

Розкид отриманих результатів параметрів елементів схеми заміщення, згідно з даними в табл. 4.7, не перевищив 5 %. Можна стверджувати, що перевірочний розрахунок за виразами (4.56) і (4.57) є критерієм збіжності результатів розрахунку параметрів схем заміщення.

Таблиця 4.7

Розрахунок потужності P_n і коефіцієнта λ за довідковими даними

| | | | | | | | | |
|----------------------------------|------------------|------|------|------|------|------|------|-------|
| Довідкові дані | P_n | 1,1 | 3,0 | 7,5 | 22 | 45 | 75 | 110 |
| | λ | 2,2 | 2,2 | 2,2 | 2,5 | 2,4 | 2,2 | 2 |
| Розрахунок за довідковими даними | P_n | 1,15 | 3,08 | 7,28 | 22,0 | 45,2 | 75,3 | 113,7 |
| | λ | 2,16 | 2,26 | 2,31 | 2,41 | 2,48 | 2,25 | 1,91 |
| Похибка | δ_{P_n} | 4,5 | 2,7 | 2,9 | 0 | 0,4 | 0,4 | 0,6 |
| | δ_λ | 1,8 | 2,7 | 5 | 3,6 | 3,3 | 2,3 | 4,5 |

У дослідженні вивчено динаміку зміни температури обмоток асинхронного двигуна (АД) на експериментальній моделі під час зміни ступеня несиметрії та коливань напруги в мережі. Крива нагрівання АД, отримана експериментально, показана на рис. 4.5 як крива 1. Графіки зміни температури обмоток АД при варіаціях параметрів схеми заміщення до 20 %, розрахованих за методами, відображені на рис. 4.5 як криві 2 і 3.

Аналіз даних на рис. 4.5 демонструє, що некоректне визначення параметрів схеми заміщення, які використовуються в теплових моделях, може спричинити відхилення розрахункової температури статорних обмоток АД до 40 %. Існуючі методики визначення параметрів схеми заміщення для обмоток АД, що застосовуються при розрахунку зон чутливості та порогів спрацювання пристроїв діагностики виткових замикань, мають допустиме відхилення розрахункових значень до 15–20 %, що є неприйнятним.

Для асинхронних двигунів потужністю до 5 кВт розроблено комплексну методику визначення параметрів схеми заміщення. Особливістю цієї методики є врахування активної складової опору обмотки, оскільки активний опір може бути порівнянний з індуктивним і варіюється від кількох Ом до десятків Ом. Значення активного опору в декілька Ом дозволяє точно виміряти його за допомогою контрольного обладнання.

Порівняльний аналіз точності визначення параметрів схеми заміщення виконано для АД типу МТ 011-6 за Т-подібною схемою заміщення.

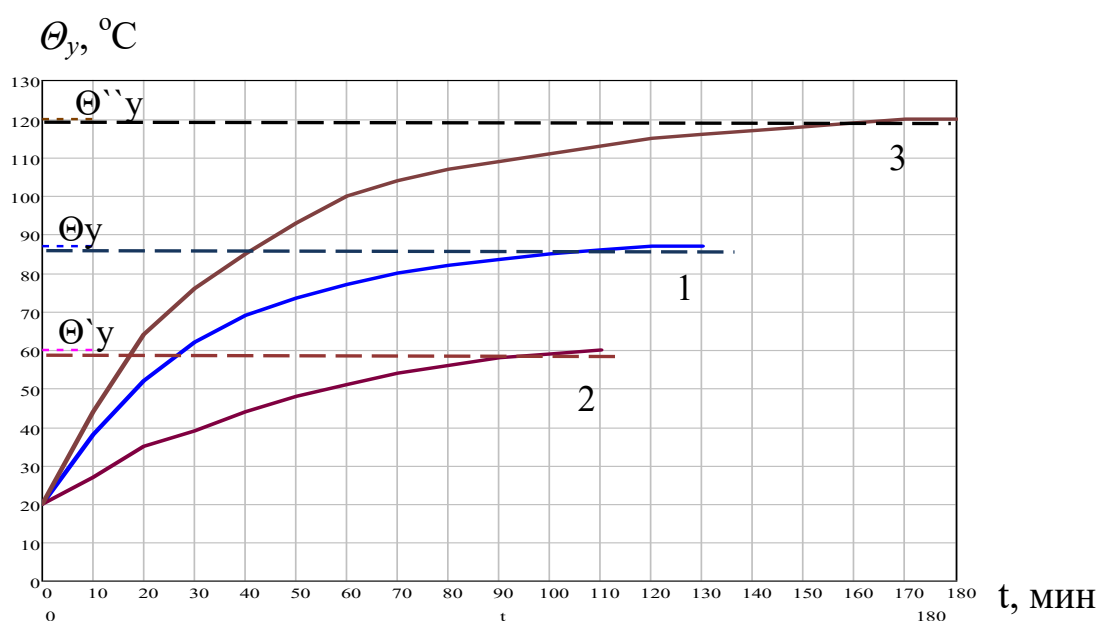


Рис. 4.5 Графіки зміни температури ізоляції обмотка статора:

крива 1 – експериментально отримана залежність,

θ_y – усталена температура обмоток АД, при номінальних параметрах схеми заміщення;

крива 2 – розрахункова залежність,

θ'_y – усталена температура обмоток АД при відхиленні параметрів схеми заміщення на +20 %;

крива 3 – розрахункова залежність,

θ''_y – теж саме при -20 %.

Збіжність теоретичного дослідження і практичного розрахунку параметрів схеми заміщення, досягається при виконанні наступного алгоритму, що визначає параметри схеми заміщення АД:

1. Здійснюється вимір активного опору обмотки статора. Прийнятним для вимірювань є вимірювальний міст P_{333} , що має клас точності 0,5 з межею вимірювань від 1 до 99990 Ом, і міліомметри МИКО-9А. Мультимедійні вимірювальні прилади в залежності від типу мають похибка від 5 до 15 %, що є неприйнятним.

2. Виконуються дослід холостого ходу і короткого замикання. Результати дослідів холостого ходу, короткого замикання і виміру активного опору обмотки статора наведені в табл. 4.8. За результатами дослідів проводиться розрахунок параметрів АД.

Повний опір АД при короткому замиканні:

$$Z_k = \frac{U_k}{I_k} \quad (4.58)$$

Активний опір АД при короткому замиканні:

$$r_k = \frac{P_k}{3 \cdot I_k^2} \quad (4.59)$$

Таблиця 4.8

**Результати випробування короткого замикання і холостого ходу АД
МТ 011-6**

| | Дослід холостого ходу | | | Дослід короткого замикання | | | Замір опору |
|----------|-----------------------|-----------|------------|----------------------------|-----------|------------|-------------|
| | U_x , В | I_x , А | P_x , Вт | U_k , В | I_k , А | P_k , Вт | r_l , Ом |
| МТ 011-6 | 220 | 4,1 | 350 | 70 | 4,5 | 735 | 4,9 |

Активний опір АД при короткому замиканні:

$$r_k = \frac{P_k}{3 \cdot I_k^2} \quad (4.60)$$

Індуктивний опір АД при короткому замиканні:

$$X_k = \sqrt{Z_k^2 - r_k^2} \quad (4.61)$$

Приведений опір ротора:

$$r_2' = r_k - r_1 \quad (4.62)$$

Повний опір АД при холостому ході:

$$Z_x = \frac{U_x}{I_x} \quad (4.63)$$

Активний опір АД при холостому ході:

$$r_x = \frac{P_x}{3 \cdot I_x^2} \quad (4.64)$$

Індуктивний опір АД при холостому ході:

$$X_x = \sqrt{Z_x^2 - r_x^2} \quad (4.65)$$

Активний опір намагнічуючого контуру:

$$r_\mu = r_x - r_1 \quad (4.66)$$

3. Визначаються відсутні параметри схеми заміщення з використанням виразів з перерахованих вище методик, які дозволяють найбільш точно розрахувати ці параметри.

Індуктивний опір обмотки статора:

$$x_1 = 0.48 \cdot X_k \quad (4.67)$$

Індуктивний опір ротора, приведений до статора:

$$x_2' = X_k - x_1 \quad (4.68)$$

Індуктивний опір намагнічуючого контуру

$$x_\mu = X_x - x_1 \quad (4.69)$$

У табл. 4.9 наведені результати визначення параметрів схеми заміщення для досліджуваного АД, отримані за відомими методиками і вдосконаленому алгоритму.

Розкид величин елементів схеми заміщення АД відомими методами і запропонованою методикою зведені в табл. 4.10.

Таблиця 4.9

**Параметри схем заміщення АД, отримані різними методами
розрахунку**

| | 1-й метод | 2-й метод | 3-й метод | 4-й метод | Розробле- ний метод |
|-----------|-------------------------|-----------|-----------|-----------|------------------------|
| $r1$ | 5,17 | 5,44 | 4,99 | 4,9 | 4,9 |
| $x1$ | 3,73 | 5,00 | 4,1 | | 4,7 |
| $r`2$ | 6,25 | 6,79 | 6,43 | 7,55 | 7,2 |
| $x`2$ | 3,97 | 5,29 | 4,68 | | 5,08 |
| $r\mu$ | | | | 3,43 | 2,04 |
| $x\mu$ | 47,09 | 50,00 | 60,77 | 47,68 | 48,96 |
| | Перевірочний розрахунок | | | | |
| R_n | 1641 | 1507 | 1602 | 1481 | 1449 |
| λ | 3,15 | 2,65 | 2,91 | 2,76 | 2,75 |

Таблиця 4.10

Результати розкиду величин елементів схеми заміщення

| | 1-й метод | 2-й метод | 3-й метод | 4-й метод | Розроблений метод |
|----------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|----------------------|
| Розкид параметрів | 4-22 % | 1,7-11 % | 2-22 % | 0-5 % | 0-1,4 % |

Ґрунтуючись на даних, представлених в табл. 4.9 і 4.10, можна зробити висновок, що параметри схеми заміщення АД, отримані за розробленою методикою, можна застосовувати в системах діагностики і захисту АД потужністю до 5 кВт, де необхідна висока точність і достовірність визначення параметрів елементів схем заміщення АД.

Висновок до розділу 4

У четвертому розділі було проведено глибоке дослідження причин виникнення виткових замикань у статорних обмотках асинхронних двигунів, зокрема через вплив теплових та електричних факторів. Основні результати можна підсумувати так:

Було побудовано математичну модель теплового стану ізоляції обмотки статора в умовах несиметрії активних опорів. Встановлено, що несиметрія призводить до локальних теплових перевантажень, що прискорює деградацію ізоляції та створює передумови для виткових замикань.

Розроблено модель, яка дозволяє оцінювати температуру ізоляції обмотки статора за умов виткових замикань і несиметрії мережі живлення. Доведено, що такі фактори значно підвищують ризик аварійних ситуацій, зокрема через швидке прогрівання ізоляції в зоні замикання.

Було встановлено, що розбіжності в параметрах схеми заміщення впливають на точність діагностики виткових замикань. Точне визначення параметрів є критичним для коректної ідентифікації місць потенційних несправностей, а також для розробки заходів з їх усунення.

Узагальнюючи, результати розділу підкреслюють важливість урахування теплових та електричних процесів у статорних обмотках для запобігання витковим замиканням. Запропоновані математичні моделі можуть стати основою для вдосконалення методів діагностики, що дозволить підвищити надійність і довговічність асинхронних двигунів.

ВИСНОВОВКИ

У ході роботи було проведено порівняння різних методик визначення параметрів схем заміщення асинхронних двигунів (АД). Основна увага була приділена аналізу точності розрахункових параметрів, що суттєво впливають на можливість використання цих методик у системах діагностики та захисту.

Результати дослідження показали, що запропонована методика забезпечує високу точність і достовірність визначення параметрів елементів схем заміщення для АД потужністю до 5 кВт. Це дозволяє застосовувати отримані дані у системах раннього виявлення дефектів, таких як виткові замикання, а також у пристроях теплового захисту. Висока точність розрахунків (відхилення не перевищують 1,5%) робить методику особливо ефективною для задач, де невеликі помилки можуть призводити до суттєвих відхилень у роботі обладнання.

Також було розглянуто проблему зносу ізоляції обмоток, яка залишається одним із ключових факторів деградації АД. Було встановлено, що некоректне визначення параметрів схем заміщення може призводити до значної переоцінки або недооцінки температури обмоток, що, у свою чергу, прискорює процес старіння ізоляції. Це підкреслює важливість використання точних і перевірених методик у теплових моделях та системах захисту.

Отримані результати сприяють підвищенню надійності та ефективності експлуатації АД, особливо у випадках, коли критично важлива висока точність визначення параметрів для діагностичних цілей.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Zhezhelenko I.V., Kryvonosov V.E., Vasilenko S.V.
Criteria for detecting turn-To-Turn short circuit in stator windings using vector analysis of electric motor phase currents
Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations. 2021. 64(3). pp. 202–218
2. Krivonosov V.E., Vasilenko S.V. Comparative analysis of methods for calculating the parameters of asynchronous engines for reference data.
ÖsterreichischesMultiscience Journal. 2019. Vol. 1, № 18. P. 36–42.
3. Krivonosov, V.E.
Diagnostic of the insulation state of the asynchronous motor and the power supply cable under conditions of local compensation
Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations. 2017. 60(6). pp. 536–543
4. Абрамович, Є. М. Методи аналізу схем заміщення асинхронних двигунів. – К.: Наукова думка, 2005. 242 с.
Білоконь В. І., Ляшенко А. А. *Електричні машини: навчальний посібник*. Київ: Вища школа, 2018. 352 с.
6. Шидловський А. К., Трифонов Ю. Б. *Електромеханіка: основи теорії електричних машин*. Харків: ХНУРЕ, 2017. 280 с.
7. Руденко В. С., Соколовський В. М. *Дослідження та аналіз параметрів асинхронних двигунів: монографія*. Львів: Техніка, 2015. 265 с.
8. Шаповаленко А. А., Пономаренко О. В. *Методи оцінки характеристик електричних машин*. Одеса: ОНПУ, 2016. 230 с.
9. Семенов Ю. М., Кравець Д. В. *Теоретичні основи електротехніки. Частина 3: Електричні машини*. Київ: Політехніка, 2019. 340 с.

10. Іванченко П. В., Яременко О. П. *Практичний аналіз схем заміщення асинхронних двигунів: посібник для студентів технічних спеціальностей*. Дніпро: УДХТУ, 2020. 198 с.
11. Гладкий В. П., Мороз О. М. *Енергозберігаючі технології в електромеханічних системах*. Вінниця: Універсум, 2018. 290 с.
12. Кириченко О. І., Олексієнко В. Г. *Моделювання електромеханічних систем на основі схем заміщення*. Харків: ХНАДУ, 2019. 275 с.
13. Савчук І. О., Палій В. С. *Випробування та діагностика асинхронних електродвигунів*. Київ: Наукова думка, 2017. 310 с.
14. Мельник М. І., Бойко А. А. *Методика визначення параметрів асинхронних двигунів на основі експериментальних даних*. Тернопіль: ТНТУ, 2021. 215 с.
15. Гончарук І. М., Коробко С. О. *Електричні машини та трансформатори: теорія, моделювання та дослідження*. Київ: НТУУ "КПІ", 2016. 348 с.
16. Малюк О. В., Лещенко І. І. *Основи теорії асинхронних двигунів: навчальний посібник*. Харків: Фоліо, 2018. 270 с.
17. Коваленко П. П., Степаненко І. Г. *Методи розрахунку та оптимізації параметрів асинхронних двигунів*. Чернігів: ЧНТУ, 2019. 220 с.
18. Дяченко В. Л., Воробей В. М. *Параметрична діагностика електричних машин на основі схем заміщення*. Житомир: Вид-во ЖДТУ, 2020. 235 с.
19. Кулик М. В., Губанов О. С. *Математичне моделювання електричних машин у схемах заміщення*. Рівне: НУВГП, 2017. 245 с.
20. Шевченко Г. С., Клименко С. В. *Дослідження енергетичних показників асинхронних двигунів методом еквівалентних схем*. Запоріжжя: ЗНТУ, 2018. 300 с.
21. Павленко С. І., Тимошук А. Г. *Експериментальні методи визначення характеристик електродвигунів*. Ужгород: Вид-во УжНУ, 2021. 210 с.