

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
КРИВОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНИЙ ФАКУЛЬТЕТ
КАФЕДРА ЕЛЕКТРОМЕХАНІКИ

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

ДО КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ МАГІСТЕРСЬКОЇ РОБОТИ

студента другого (магістерського) рівня вищої освіти
за освітньо-професійною програмою

**«Електромеханічне обладнання енергоємних виробництв»
спеціальності**

141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

Тема роботи:

**«ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОТИ АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ ПРИ
ЗНАЧНИХ ВІДХИЛЕННЯХ ВІД НОМІНАЛЬНИХ РЕЖИМІВ»**

Виконав: магістрант групи ЕМО-23М

Андрій ЛЕБІДЬ

Керівник магістерської роботи

Станіслав ТОЛМАЧОВ

Нормоконтроль

Валерій ТИТЮК

Олег ДАНИЛЕЙКО

Завідувач кафедри

Станіслав ТОЛМАЧОВ

Кривий Ріг

2024 р.

ЗМІСТ

РЕФЕРАТ.....	.....
ВСТУП .....	.....
1 NESИМЕТРИЧНІ РЕЖИМИ РОБОТИ АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ	
1.1 Основні фактори впливу на несиметричні режими роботи АД.....	.....
1.1.1 Несиметрія лінійних напруг.....	.....
1.1.2 Несинусоїдальність напруги.....	.....
1.3 Коефіцієнт навантаження двигуна.....	.....
1.1.4 Внутрішні ушкодження обмотки статора (виткові замикання, пробій ізоляції на корпус тощо).....	.....
1.1.5 Умови роботи двигуна.....	.....
1.2 Математичне моделювання нестандартних режимів роботи АД.....	.....
1.3 Захист від несиметричних навантажень.....	.....
2 НЕПОВНОФАЗНІ РЕЖИМИ РОБОТИ АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ.....	.....
2.1 Види неповнофазних режимів, їх ознаки та умови виникнення .....	.....
2.2 Особливості повздовжніх неповнофазних режимів.....	.....
2.3 Особливості поперечних неповнофазних режимів.....	.....
2.4 Вплив опорів ізоляції фазних обмоток та кабелів живлення на виникнення неповнофазних режимів.....	.....
2.5 Вплив температури та вологості на опір ізоляції.....	.....
2.6 Математичне моделювання процесів роботи АД при значних відхиленнях від номінальних режимів за допомогою пакету прикладних програм MatLab.....	.....
ВИСНОВКИ .....	.....
ЛІТЕРАТУРА .....	.....

РЕФЕРАТ

36 с., 18 рис., 21 табл., 1 додаток, 15 інформаційних джерел.

Об'єктом дослідження кваліфікаційної магістерської роботи є дослідження процесу реагування асинхронного двигуна, на нестандартні режими роботи.

Предметом дослідження є математичне моделювання процесів роботи АД при значних відхиленнях від номінальних режимів, при повздожній та поперечній несиметрії.

Метою кваліфікаційної магістерської роботи є розробка математичної моделі асинхронного двигуна, симуляція роботи асинхронного двигуна при повздожній та поперечній несиметрії.

Наукова новизна кваліфікаційної магістерської роботи – дослідження роботи асинхронного двигуна при повздожніх, поперечних та комбінованих збуреннях методом математичного моделювання.

Галузь застосування – електромеханічне обладнання енергоємних виробництв.

Отримані результати: розроблена і досліджена модель АД у програмному середовищі Matlab при різних видах несиметрії.

АСИНХРОННИЙ ДВИГУН, МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ,
НЕПОВНОФАЗНИЙ РЕЖИМ РОБОТИ, ПОВЗДОВЖНЯ ТА ПОПЕРЕЧНА
НЕСИМЕТРІЇ

ВСТУП

Асинхронні двигуни є одними з найбільш розповсюджених електричних машин у промисловості завдяки їх простоті конструкції, надійності та економічності. Однак у реальних умовах експлуатації вони часто працюють за умов значних відхилень від номінальних режимів. Ці відхилення можуть виникати через коливання напруги в електричній мережі, несиметричні режими роботи або нестабільні умови навантаження. Тому дослідження впливу таких факторів на роботу асинхронних двигунів є вкрай актуальним завданням для підвищення їх ефективності, надійності та безпеки.

Сучасна енергетика та промисловість значною мірою залежать від електричних машин, і асинхронні двигуни займають в ній центральне місце. Через коливання напруги або обриви фаз, двигуни можуть працювати в умовах, що не відповідають їхнім проектним характеристикам. Відсутність належного контролю таких ситуацій може призвести до аварій, втрат енергії, зменшення продуктивності обладнання або навіть виходу з ладу двигунів. Це не тільки підвищує витрати на ремонт і заміну обладнання, але й негативно впливає на економіку підприємств.

Нестабільність напруги або інші відхилення можуть виникати через зовнішні фактори, такі як коливання в електромережі або внутрішні несправності. У таких умовах асинхронні двигуни зазнають змін у характеристиках моменту обертання, температурному режимі і споживанні електричної енергії. Тому важливо розробляти і впроваджувати ефективні методи захисту та оптимізації роботи двигунів при нестандартних режимах.

Основною метою даної роботи є дослідження поведінки асинхронних двигунів при значних відхиленнях від номінальних умов роботи. У роботі буде проведено аналіз впливу змін в параметрах живлення (напруга, частота) на робочі характеристики двигунів. Також буде розглянуто питання виникнення несиметричних та неповнофазних режимів, що часто є причиною аварійних зупинок обладнання. Крім того, дослідження зосереджене на математичному моделюванні та аналізі електромагнітних процесів в двигунах при цих умовах,

що дозволить запропонувати заходи для підвищення їхньої стійкості та надійності роботи.

Тема є важливою для сучасної електроенергетики, оскільки саме надійність і стабільність роботи електродвигунів впливають на роботу багатьох галузей промисловості. Застосування результатів дослідження сприятиме підвищенню ефективності роботи обладнання, а також зменшенню втрат енергії та витрат на обслуговування.

1 НЕСИМЕТРИЧНІ РЕЖИМИ РОБОТИ АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ

Асинхронні двигуни часто застосовують у промисловості через їхню простоту та надійність. Але під час роботи можуть виникати ситуації, коли напруга між фазами подається нерівномірно, що порушує нормальний режим функціонування. Такі несиметричні режими виникають через дисбаланс напруг і струмів у фазах. Це може бути спричинено нерівномірним живленням фаз, пошкодженнями у системі живлення або дефектами в обмотках двигуна.

Несиметричні режими можуть виникати з таких причин:

- Проблеми у лінії живлення – наприклад, обрив однієї фази чи нерівномірне подавання напруги;
- Пошкодження обмоток двигуна – поломки в обмотках статора чи ротора, які призводять до порушення магнітного поля;
- Зміни навантаження – нестабільне або змінне навантаження створює умови для виникнення несиметрії.

Робота двигуна в умовах несиметрії може спричинити такі наслідки:

- Перегрівання – нерівномірний струм у фазах може викликати локальний перегрів обмоток, що зменшує строк служби двигуна;
- Зменшення крутного моменту – ефективність двигуна падає, що позначається на продуктивності обладнання;
- Додаткові втрати – дисбаланс струмів збільшує електромагнітні втрати, погіршуючи енергоефективність;
- Посилення вібрацій і шуму – дисбаланс фазних напруг спричиняє підвищені вібрації та шум, що збільшує знос компонентів.

Щоб уникнути негативних наслідків, застосовують такі заходи:

- Релейний захист – автоматичні пристрої вимикають двигун при виявленні несиметрії;
- Перевірка обмоток – регулярні тести дозволяють завчасно знаходити несправності;
- Балансування навантаження – сучасні системи керування забезпечують рівномірний розподіл навантаження між фазами, знижуючи ризик асиметрії.

Науковці в галузі електротехніки приділяють значну увагу вивченню несиметричних режимів роботи асинхронних двигунів. Зокрема, у роботі Е. Фухса та М. Масума [2] досліджується, як якість електроживлення, зокрема несиметрія напруг, впливає на роботу таких двигунів. У дослідженні Васьковського Ю.М. та Гераскіна О.А. [1] аналізуються зміни температурних і механічних характеристик двигуна в умовах несиметрії. Автори зосереджуються на впливі таких режимів на перегрів і механічні напруження у роторі, що має вирішальне значення для забезпечення надійності двигуна при тривалій експлуатації.

Несиметричні режими роботи асинхронних двигунів є однією з основних проблем, яка може призвести до серйозних наслідків, включаючи втрати енергії, пошкодження обладнання та зменшення ефективності. Тому важливо впроваджувати захисні заходи, регулярну діагностику та підтримувати стабільність електропостачання для запобігання таким ситуаціям.

1.1 Основні фактори впливу на несиметричні режими роботи АД

Показники якості електричної енергії в точках приєднання повинні відповідати вимогам стандарту [3]. Згідно з цим стандартом, встановлено два рівні норм якості електроенергії: нормально допустимі та гранично допустимі. Крім того, у стандарті [4] визначено вимоги до гармонійного складу напруги та струму для забезпечення відповідності енергетичних систем встановленим нормам.

Найважливішими показниками, які характеризують якість електроенергії, є:

1. Відхилення напруги на виводах приймачів:

- Нормально допустимі: $\pm 5\%$;
- Гранично допустимі: $\pm 10\%$.

2. Несинусоїдальність напруги, яка оцінюється двома параметрами:

- Коефіцієнтом гармонійного спотворення напруги, що згідно з [3] для напруги $U_{\text{ном}} = 0,38$ кВ має нормально допустиме значення 8% та гранично допустиме 12%. Для вищих напруг ці значення знижуються;

- Коефіцієнтами гармонічних складових окремих порядків: залежно від напруги та порядку гармоніки, допустимі значення коефіцієнтів складають до 6% (нормально допустимі), а гранично допустимі – на 50% вищі. У стандарті [4] додатково встановлені вимоги до зменшення впливу гармонік в системах енергопостачання.

3. Несиметрія напруг, яка характеризується:

- Коефіцієнтом несиметрії напруги за зворотною послідовністю. Для точок загального приєднання значення коефіцієнта становлять 2,0% (нормально допустимі) і 4,0% (гранично допустимі);

- Коефіцієнтом несиметрії напруги за нульовою послідовністю. Для чотирьохпроводних мереж із номінальною напругою $U_{\text{ном}} = 0,38$ кВ ці значення також становлять 2,0% і 4,0%.

4. Відхилення частоти:

- Нормально допустимі: $\pm 0,2$ Гц;

- Гранично допустимі: $\pm 0,4$ Гц.

Таким чином, стандарти [3, 4] встановлюють чіткі межі допустимих відхилень якості електроенергії, що є важливим для забезпечення стабільної роботи обладнання, включаючи асинхронні двигуни. Впровадження цих вимог у системах електропостачання сприяє підвищенню надійності та енергоефективності роботи електричних пристроїв.

1.1.1 Несиметрії лінійних напруг. Згідно з дослідженням [5], коли напруга на асинхронних двигунах знижується, це призводить до зменшення швидкості обертання ротора, підвищення струму, перегріву, збільшення втрат та погіршення ізоляції, що скорочує термін служби двигуна. Несиметричні режими мають великий вплив на надійність роботи двигунів. Коли в напрузі з'являються гармоніки, ізоляція старіє швидше, ніж при синусоїдальній напрузі. Наприклад, якщо коефіцієнт несинусоїдальності складає 5%, то через два роки експлуатації

втрати в конденсаторах збільшуються в два рази. Несиметрія напруги також погіршує роботу асинхронних двигунів і скорочує їх термін служби. Наприклад, якщо несиметрія напруги досягає 1%, струми в обмотках стають дуже нерівними (до 9%), що викликає додатковий нагрів статора і ротора. Це прискорює старіння ізоляції і зменшує потужність двигуна. Якщо несиметрія напруги становить 4%, термін служби двигуна при нормальному навантаженні скорочується вдвічі. При несиметрії 5% потужність двигуна зменшується на 5-10%.

1.1.2 Несинусоїдальність напруги. При наявності несинусоїдальності в напрузі та струмі призводить до додаткових втрат і перегріву, а також прискорює старіння ізоляції в електродвигунах, трансформаторах та іншому електрообладнанні, як зазначатися у дослідженнях [6]. Це також негативно впливає на роботу релейного захисту, автоматики, телемеханіки та зв'язку. Вплив на різні види обладнання залежить від амплітудного спектра напруги (струму), параметрів електричних мереж та інших чинників. Основними показниками несинусоїдальності є коефіцієнт викривлення синусоїди напруги: та коефіцієнт кратності вищих гармонік, що визначається як:

де $U(n)$ — напруга n -ї гармоніки, а $U_{\text{ном}}$ — номінальна напруга мережі.

Згідно зі стандартом [3], допустиме значення K_U не повинно перевищувати 5% з ймовірністю 95% за час вимірювання, визначений у стандарті. Останній номер гармоніки, яку враховують, не зазначений. В останні роки в розвинутих країнах були введені стандарти з жорсткими вимогами до якості електроенергії.

Неспотворена напруга викликає збільшення опору для струмів вищих гармонік, що призводить до додаткових втрат потужності та нагріву електрообладнання. Якщо спотворення синусоїдальності напруги збільшується на 10%, то втрати ростуть на 15%. Якщо амплітуди 5-ї і 7-ї гармонік складають 20% і 15% від амплітуди основної гармоніки, коефіцієнт потужності обладнання знижується на 2,6%. Як пишеться у наукових дослідженнях [7,8], велике споживання реактивної потужності асинхронними двигунами погіршує ситуацію з втратами в мережі. Наприклад, на деяких підприємствах гірничої галузі питомі реактивні навантаження досягають 1,4-1,6 квар/кВт, що майже вдвічі більше за

норму. Більшу частину реактивної потужності в асинхронних двигунах займає потужність холостого ходу, яка може становити до 60% від загальної реактивної потужності при максимальному навантаженні.

1.1.3 Коефіцієнт навантаження двигуна. Коефіцієнт навантаження асинхронного двигуна є важливим показником, що визначає ефективність його роботи. Він показує, як фактична потужність, яку споживає двигун, співвідноситься з його номінальною потужністю. Значення коефіцієнта коливається від 0 до 1: 0 означає відсутність навантаження, а 1 вказує на максимальну роботу двигуна в номінальних умовах.

Цей параметр дозволяє оцінити, наскільки раціонально використовується електродвигун. Якщо двигун працює з низьким коефіцієнтом навантаження, це може свідчити про недостатнє завантаження або неправильний підбір обладнання. З іншого боку, підвищене навантаження здатне викликати перегрів обмоток, зниження строку служби двигуна та загальну втрату його ефективності.

Дослідження показують [10], що під час роботи асинхронних двигунів при відхиленнях від номінальних режимів коефіцієнт навантаження може знижуватися до 40% від номінального. Це впливає на ефективність та надійність системи в цілому. Контроль коефіцієнта навантаження є необхідним для підтримки стабільної роботи двигуна. Для цього використовують системи моніторингу, які відстежують показники струму та напруги, а також автоматичні захисні пристрої, що реагують на критичні зміни у режимах роботи. Завдяки впровадженню сучасних технологій моніторингу та захисту можна забезпечити оптимальну експлуатацію двигунів і уникнути небажаних наслідків, пов'язаних із перевантаженням або неефективною роботою.

Для контролю коефіцієнта навантаження використовують різноманітні методи, такі як:

- Системи моніторингу: Вони дозволяють в режимі реального часу стежити за значеннями струму і напруги у фазах;

- Автоматичні системи захисту: Вони реагують на аномальні значення коефіцієнта навантаження і можуть автоматично вимикати двигун при досягненні критичних рівнів.

Коефіцієнт навантаження є ключовим параметром у роботі асинхронних двигунів, тому його контроль і підтримка на оптимальному рівні дозволяють зберегти їхню ефективність і продовжити термін служби.

1.1.4 Внутрішні ушкодження обмотки статора (виткові замикання, пробій ізоляції на корпус тощо). Виткові замикання в обмотках статора асинхронних двигунів є поширеною проблемою. Якщо замкнеться 3–5% витків в одній фазі, це може викликати перегрів, який руйнує ізоляцію. Виткові замикання можуть бути різними: однофазними, двофазними або трифазними, а також симетричними чи несиметричними. Причиною таких замикань часто є зниження якості ізоляції через високі температури, старіння матеріалів або потрапляння вологи та мастила.

Як підтверджується у дослідженні [7, 13], коли витки замкнені, через них проходять струми, що значно перевищують номінальні. Це призводить до нагріву обмоток і сердечника, що ще більше пошкоджує ізоляцію. Якщо не відключити двигун вчасно, це може спричинити більш серйозні аварії, такі як повнофазне коротке замикання.

Виткові замикання викликають спотворення струмів і напруг в нормальному режимі роботи, а також зменшують обертальний момент двигуна. Наскільки сильно зменшиться момент, залежить від потужності самого двигуна і мережі, кількості замкнутих витків і наявності перехідних опорів у місці замикання. Чим потужніша мережа, тим менше буде зниження обертального моменту. Якщо опір мережі дуже малий, то потужність зворотної послідовності двигуна буде невеликою. У найгіршому випадку, при нескінченно великій потужності мережі, струми двигуна міститимуть лише складові прямої і нульової послідовності, і гальмівний момент від струмів зворотної послідовності відсутній.

Рисунок 1.1 – Схема й векторні діаграми струмів при замиканні всіх витків фази А

Якщо потужність живильної мережі та споживачів подібні, виткові замикання призводять до значного зниження крутного моменту і перегріву двигунів. Тому в разі виткових замикань двигуни повинні бути негайно відключені. Зниження крутного моменту і спотворення струмів в обмотках при виткових замиканнях характеризуються коефіцієнтом асиметрії по струму.

Незважаючи на те, що струм прямої послідовності різко зростає при виткових замиканнях, струм зворотної послідовності залишається незмінним. Тому коефіцієнт асиметрії по струму може змінюватися в залежності від кількості замкнутих витків і варіюється в широких межах. При однаковій кількості замкнутих витків у режимі холостого ходу коефіцієнт асиметрії по струму буде значно більшим, ніж при нерухомому роторі (рис. 1.2).

Рисунок 1.2 – Графіки залежності коефіцієнта асиметрії по струму від кількості витків, що замкнулися: 1 – нерухомий ротор; 2 – холостий хід; 3 – узагальнена залежність.

1.1.5 Умови роботи двигуна. Оптимальна робота та стан запчастин асинхронних двигунів значною мірою залежать від умов їх експлуатації. Під умовами експлуатації маються на увазі різні фактори, які можуть впливати на роботу електропривода. До таких факторів відносять температуру навколишнього середовища, вологість, тиск, вібрації, механічні ушкодження тощо. Механічний резонанс, зокрема, може призвести до пошкодження конструкції двигуна. В результаті цього можливі такі дефекти, як руйнування окремих елементів, порушення контактів, замикання проводів з пошкодженою ізоляцією, а також самовідгвинчування болтів і гайок.

1.2 Математичне моделювання нестандартних режимів роботи АД

Математичне моделювання нестандартних режимів роботи асинхронних двигунів є важливою частиною дослідження їх функціонування, зокрема, в

умовах асиметричних напруг, неповнофазних режимів, перевантажень та інших відхилень від нормальних умов. В основі цих моделей лежить детальний аналіз фізичних процесів, що відбуваються в електричних машинах під час нестандартних режимів.

Основні аспекти моделювання АД в нестандартних режимах базуються на рівняннях електромагнітного поля, які описують взаємодію між магнітним потоком, струмами обмоток статора і ротора та моментом двигуна. Одним із ключових рівнянь є рівняння балансу потужності, яке відображає зв'язок між активною та реактивною потужностями, що споживаються двигуном під час роботи. Як вказують дослідники [2], під час роботи в несиметричних умовах зміна потужності може бути суттєвою, і саме це треба враховувати при моделюванні. Окрім рівнянь електромагнітного поля, використовуються системи диференціальних рівнянь для опису динаміки двигуна, особливо в умовах швидкозмінних зовнішніх збурень, таких як короткочасні зміни напруги або обрив фази. Для моделювання асинхронних двигунів у несиметричних режимах широко застосовується метод симетричних складових, що дозволяє розкласти систему напруг та струмів на симетричні компоненти — пряму, зворотну та нульову послідовності. Це полегшує аналіз впливу асиметрії на роботу двигуна. Зокрема, як зазначено у роботі дослідників [1], асиметрія напруги призводить до збільшення втрат в роторі і статора, а також до зниження коефіцієнта корисної дії (ККД) двигуна.

Одним із ключових завдань при моделюванні нестандартних режимів роботи є врахування термічних процесів в обмотках статора та ротора. У разі роботи двигуна в неповнофазному чи асиметричному режимі нагрівання обмоток відбувається нерівномірно, що підвищує ризик їх пошкодження. Дослідники [1] проводили дослідження температурного поля ротора і стверджують, що в умовах неповнофазної роботи температура в окремих точках ротора може перевищувати допустимі значення, що прискорює деградацію ізоляції.

У випадку аварійних режимів, таких як обрив фази або коротке замикання, моделі АД повинні враховувати швидку зміну струмів і моменту двигуна. Для цього застосовуються часові моделі, які дозволяють оцінити реакцію двигуна на такі зміни. Наприклад, використовуючи метод кінцевих елементів, дослідники моделюють поведінку двигуна під час таких режимів, що дозволяє передбачити критичні моменти для його експлуатації.

Основною перевагою математичного моделювання є можливість дослідження широкого спектру режимів роботи АД без необхідності проведення дорогих експериментів. Це дозволяє оптимізувати конструкцію двигунів, покращити системи управління та захисту, а також забезпечити безпечну експлуатацію обладнання в умовах нестандартних режимів.

1.3 Захист від несиметричних навантажень

За правилами улаштування електроустановок (ПУЕ) у системах електропостачання захист АД від несиметричних навантажень не передбачений як обов'язкова вимога. Основна увага в ПУЕ зосереджена на забезпеченні загальної електробезпеки, дотриманні норм якості електроенергії та належному рівні ізоляції обладнання, що має зменшити ймовірність виникнення таких режимів.

Проте в реальності несиметричні режими роботи можуть виникати через порушення балансу напруг у трифазній мережі. Це призводить до виникнення струмів прямої, зворотної та нульової послідовності, які викликають нерівномірний розподіл навантаження між фазами, перегрів обмоток і зниження ефективності двигуна.

Оскільки ПУЕ прямо не регламентує захист від несиметрії, для таких випадків на практиці використовуються додаткові пристрої, наприклад:

- Реле контролю фаз та напруги. Вони аналізують напругу в мережі і вимикають двигун при виявленні значної асиметрії;
- Автоматичні вимикачі із функцією моніторингу. Захищають двигун при порушеннях, пов'язаних із несиметричними режимами;

- Моніторинг симетричних складових. Деякі сучасні системи використовують метод симетричних складових для виявлення зворотної та нульової послідовності.

Щоб проаналізувати роботу електрообладнання в несиметричних умовах, використовують метод симетричних складових. Він полягає в тому, що складна несиметрична система поділяється на три простіші: пряму, зворотну і нульову складові (рис. 1.3). Цей метод часто застосовується для розрахунків у трифазних мережах, наприклад, при коротких замиканнях.

Рисунок 1.3 – Вектори прямої, зворотної та нульової послідовності.

Пряма послідовність включає три вектори: \bar{A}_1 , \bar{B}_1 і \bar{C}_1 . Вони мають однакову довжину і розташовані під кутами 120° один до одного. При цьому вектор \bar{A}_1 випереджає \bar{B}_1 , а \bar{B}_1 випереджає \bar{C}_1 . Зворотна послідовність також складається з трьох векторів: \bar{A}_2 , \bar{B}_2 і \bar{C}_2 , які мають однакову величину і зміщені один від одного на 120° . У цьому випадку \bar{C}_2 випереджає \bar{B}_2 , а \bar{B}_2 випереджає \bar{A}_2 . Нульова послідовність представлена трьома векторами: \bar{A}_0 , \bar{B}_0 і \bar{C}_0 . Вони рівні за довжиною і спрямовані в один бік. Будь-яка несиметрична система може бути подана як сума трьох таких симетричних систем. Тобто:

Ввівши оператор α , рівний:

отримуємо систему рівнянь з невідомими векторами симетричних складових \bar{A}_1 , \bar{A}_2 і \bar{A}_0 :

Таким чином, утворюється система з трьох рівнянь з трьома невідомими, яка має єдине правильне рішення. Для значень векторів у складових симетричних системах отримуємо наступне:

Ці співвідношення застосовуються до будь-якої системи, включаючи симетричну. У такому випадку:

Під час роботи асинхронного двигуна можуть виникати різні ситуації, які приводять до аварійних режимів [10].

2 НЕПОВНОФАЗНІ РЕЖИМИ РОБОТИ АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ

Неповнофазні режими роботи асинхронних двигунів виникають у випадку порушення нормального трифазного живлення, коли двигун продовжує працювати з двома фазами замість трьох. Цей стан є небезпечним і викликає численні негативні наслідки для двигуна, зокрема перегрів, зменшення моменту обертання, збільшення втрат енергії та зниження терміну служби.

Неповнофазні режими часто виникають внаслідок обриву однієї з фаз в електричній мережі. Це може бути спричинено різними факторами, такими як механічне пошкодження кабелів, несправність у системах комутації або природні явища (наприклад, блискавка, замикання). В такому режимі двигун може продовжувати працювати, але вже з двома фазами, що суттєво змінює його робочі характеристики. Двигун перестає отримувати рівномірну живильну напругу, що призводить до порушення симетрії магнітного поля всередині машини.

Основним наслідком неповнофазної роботи є нерівномірне навантаження на залишені фази. Це означає, що струми в двох фазах значно зростають порівняно з нормальним режимом роботи, що призводить до перегріву двигуна і може спричинити пошкодження обмоток або підшипників. Інші наслідки включають зниження обертального моменту, збільшення втрат потужності і неефективність перетворення електричної енергії в механічну роботу. Неповнофазні режими можна поділити на повздовжні та поперечні.

Повздовжні режими виникають, коли одна з фаз повністю обривається, і двигун працює на двох фазах. Такий режим є особливо небезпечним для асинхронного двигуна, оскільки підвищує струм у залишених фазах. Обертальний момент знижується, а двигун може швидко перегрітися, особливо якщо тривалий час працює в цьому режимі без належного захисту. Повздовжні неповнофазні режими зазвичай виникають у результаті механічних пошкоджень кабелів, неправильного монтажу електричних з'єднань або несправності захисних пристроїв. У таких випадках двигун здатен продовжувати роботу, але його продуктивність та ефективність суттєво знижуються.

Ознаки:

- Перегрів корпусу двигуна;
- Збільшені втрати потужності;
- Зниження обертового моменту та продуктивності.

Поперечні неповнофазні режими виникають внаслідок короткого замикання або втрати фази без повного обриву, що призводить до нерівномірного розподілу струмів між фазами. В таких умовах струми у фазах зростають, а двигун працює з вібраціями та сильними механічними навантаженнями. Поперечні неповнофазні режими можуть призвести до серйозних пошкоджень, якщо не буде вжито відповідних заходів. У цьому випадку виникає значне збільшення струмів у фазах, які залишилися під напругою, і можливий перегрів обмоток. Вплив цього режиму значною мірою залежить від тривалості роботи двигуна в неповнофазному режимі та від інтенсивності навантаження.

Ознаки:

- Поява вібрацій через нерівномірне обертання ротора;
- Нестабільна робота двигуна;
- Можливість аварійної зупинки через механічні пошкодження.

Неповнофазні режими є однією з найбільш поширених причин виходу з ладу асинхронних двигунів. Через нерівномірне розподілення струмів обмотки двигуна перегріваються, що знижує їхню електричну стійкість і може призвести до короткого замикання. Перегрів також сприяє деградації ізоляції, що підвищує ризик виникнення аварійної ситуації. Також через втрату фази значно знижується обертовий момент двигуна, що унеможлиблює його ефективну роботу. Особливо це помітно на виробництвах, де двигуни працюють із постійними високими навантаженнями.

Щоб запобігти пошкодженню двигунів, використовують різноманітні системи захисту. Одним із основних засобів є встановлення реле фазного контролю, яке відключає двигун у разі виявлення неповнофазного режиму. Цей захисний пристрій реагує на дисбаланс струмів у фазах і забезпечує автоматичне

вимкнення двигуна для уникнення перегріву та механічних пошкоджень. Також у сучасних системах використовуються спеціалізовані автоматичні вимикачі з функцією контролю за фазами, які запобігають роботі двигуна в неповнофазному режимі.

2.1 Види неповнофазних режимів, їх ознаки та умови виникнення

Неповнофазні режими роботи асинхронних двигунів є важливим аспектом в експлуатації електричних машин, адже будь-яка втрата або зниження напруги в одній з фаз може серйозно вплинути на роботу всього електродвигуна. Такі режими виникають, коли відбувається порушення симетрії фаз, що особливо актуально в промислових умовах, де двигуни часто зазнають високих навантажень та працюють в екстремальних умовах. Порушення в одній з фаз може відбутися через пошкодження кабелів, несправності контактів, або через збої в мережі живлення, що особливо небезпечно для двигунів старого типу або для обладнання, яке працює без належного технічного обслуговування.

Неповнофазні режими можуть бути поділені на два основні види: повздовжні та поперечні. Повздовжні неповнофазні режими виникають у випадках, коли відбувається зниження або повне зникнення напруги в одній із фаз. Це призводить до виникнення нерівномірного електромагнітного поля вздовж осі обертання двигуна. Такий стан спричиняє появу додаткових струмів у фазах, які ще працюють, що підвищує їх навантаження і може призвести до перегріву обмоток, зниження строку служби двигуна, а в окремих випадках — навіть до його виходу з ладу. Нерівномірний розподіл електромагнітного поля створює умови, за яких частини двигуна можуть працювати з підвищеним тертям, викликаючи швидший знос механічних частин. Поперечні неповнофазні режими, характеризуються асиметрією фаз не вздовж осі обертання, а поперек неї. Такий режим може бути викликаний механічними дефектами, наприклад, невідповідністю осей валу, або збоями у фазах живлення. Це спричиняє пульсації моменту, а також додаткові вібрації, які негативно впливають на стабільність роботи двигуна, призводять до зниження його ефективності та підвищеного

енергоспоживання. В умовах промислового застосування ці фактори стають критичними, оскільки додаткові вібрації можуть впливати на решту обладнання і навіть викликати пошкодження суміжних механізмів.

Неповнофазний режим роботи загалом призводить до того, що асинхронний двигун втрачає значну частину своєї потужності та обертового моменту. Наприклад, у випадках, коли трифазний двигун живиться від однофазної мережі, створюється лише пульсуюче магнітне поле замість постійного обертового. Це значно зменшує початковий момент, ускладнює запуск і робить двигун менш надійним в умовах важких навантажень. Таке зниження обертового моменту означає, що двигун може не впоратися з початковим запуском або не зможе утримувати постійну швидкість при змінному навантаженні. У промислових умовах, де стабільність і безперервність роботи мають вирішальне значення, такі неполадки можуть призвести до значних фінансових втрат через зупинки виробництва.

Ще один важливий аспект неповнофазного режиму — це зниження коефіцієнта потужності двигуна. Асиметрія фаз зумовлює нерівномірне споживання енергії та перевантаження в окремих фазах, що знижує загальну ефективність двигуна і підвищує витрати на електроенергію. У крайніх випадках, коли навантаження на двигун перевищує допустимі межі, це може навіть призвести до аварійної зупинки двигуна, особливо якщо двигун не має належного захисту від перевантаження та перегріву. Для захисту від подібних збоїв часто використовуються реле захисту по фазах, які можуть відключити двигун при виявленні надмірного навантаження чи асиметрії.

Проблеми неповнофазних режимів є особливо актуальними для старих або погано обслуговуваних двигунів, адже їх обмотки та кабелі з часом втрачають свої первісні властивості, що збільшує ризик виходу з ладу при роботі в умовах підвищених навантажень або тривалої експлуатації. Для підвищення надійності роботи двигунів рекомендується регулярна діагностика стану обмоток, з'єднань та ізоляції, а також забезпечення правильного підключення і дотримання режимів експлуатації.

2.2 Особливості повздовжніх неповнофазних режимів.

Повздовжні неповнофазні режими виникають, коли зникає або значно знижується напруга на одній із фаз двигуна. Це може бути спричинено проблемами з ізоляцією, з'єднанням або зовнішніми впливами, такими як пошкодження кабелів живлення. При цьому, двигун продовжує працювати на двох фазах замість трьох, що викликає асиметричне навантаження на обмотки і збільшення втрат енергії внаслідок зростання струмів у фазах, що залишилися активними.

Основні ознаки повздовжнього неповнофазного режиму:

- Нерівномірний розподіл навантаження, що призводить до перегріву активних обмоток;
- Значне зниження ефективності роботи, оскільки двигун не може забезпечити нормальний крутний момент;
- Підвищений рівень вібрації, що впливає на знос підшипників та інших механічних елементів двигуна.

При тривалому повздовжньому неповнофазному режимі двигун зазнає значного перегріву, що знижує термін його експлуатації. Це спричиняє збільшене теплове навантаження на обмотки, що особливо небезпечно при роботі в умовах підвищеної температури або недостатньої вентиляції. Джерела підтверджують, що для уникнення повздовжніх неповнофазних режимів використовують реле захисту та інші методи автоматичного відключення двигуна у разі зникнення однієї з фаз.

2.2. Особливості поперечних неповнофазних режимів.

Поперечний неповнофазний режим виникає у випадках, коли порушується симетрія напруг у фазах, але всі три фази залишаються активними. Це призводить до появи так званого «поперечного» струму, який спрямований у напрямку, протилежному нормальному струму. Причинами цього режиму можуть бути:

- Нерівномірне навантаження на фази двигуна;

- Неправильне підключення обмоток або пошкодження кабелів живлення, що спричиняють асиметрію напруги.

Ознаки поперечного неповнофазного режиму включають:

- Зростання температури обмоток, хоча не настільки виражене, як у випадку повздовжнього режиму;
- Деяке зменшення крутного моменту двигуна та його загальної ефективності;
- Підвищений рівень втрат енергії, що може призвести до перевантаження інших компонентів електричної системи, до якої підключено двигун.

У поперечних неповнофазних режимах важливо контролювати рівень напруг у всіх фазах, оскільки навіть незначне зниження напруги однієї з фаз може призвести до асиметрії, що значно вплине на стабільність роботи двигуна.

2.3 Вплив опорів ізоляції фазних обмоток та кабелів живлення на виникнення неповнофазних режимів

Вплив опорів ізоляції фазних обмоток та кабелів живлення на виникнення неповнофазних режимів в асинхронних двигунах є важливою темою, оскільки від якості ізоляції залежить надійність роботи двигуна, його енергоефективність та стійкість до аварійних режимів. У випадках, коли опір ізоляції обмоток чи кабелів значно змінюється під впливом зовнішніх умов, наприклад, вологості чи високої температури, це може призвести до появи несиметрії фаз і, як наслідок, до неповнофазних режимів роботи.

Опір ізоляції обмоток асинхронного двигуна визначає здатність матеріалу протидіяти електричному пробою. Зниження опору ізоляції під впливом зовнішніх факторів, таких як вологість або температурні коливання, може призвести до витoku струму та зміни умов струмопровідності в кожній з фаз. Така несиметрія опорів обмоток призводить до зміни магнітного поля, що генерується в двигуні, що, своєю чергою, викликає виникнення несиметричних струмів у роторі. Це явище може спричинити перегрів обмоток і призвести до небезпечних теплових навантажень, які прискорюють знос ізоляційних матеріалів.

За дослідженнями які вивчають вплив температурного поля та вологості на роботу асинхронних двигунів [1], тривале перебування двигуна у вологому середовищі значно знижує опір ізоляції, що є одним із ключових факторів для розвитку неповнофазних режимів. Це також може спричинити коротке замикання або пробій обмоток на корпус, що в свою чергу, сприяє збільшенню струмів у несправних фазах і може спричинити повну втрату працездатності двигуна.

Окрім опору ізоляції обмоток двигуна, значний вплив на симетричність фаз має опір кабелів живлення. Пошкодження кабелів або їх ізоляції може призвести до появи паразитних струмів та несиметрії фазного струму, що є частою причиною аварійних режимів у промислових електродвигунах. Як зазначено в роботі Фухса та М. Масума [2], через порушення в ізоляції кабелів живлення можуть виникати неконтрольовані витоки струму. Це особливо актуально для великих електродвигунів, що працюють в умовах промислових підприємств із підвищеною вологістю та температурою.

Таким чином, для забезпечення стабільної та надійної роботи асинхронного двигуна важливо дотримуватися необхідних умов експлуатації, враховувати фактори, які можуть знижувати опір ізоляції фазних обмоток та кабелів, а також своєчасно проводити діагностику та обслуговування ізоляційних матеріалів.

2.4 Вплив температури та вологості на опір ізоляції

Температура та вологість навколишнього середовища є ключовими факторами, що впливають на стан ізоляції асинхронних двигунів. Опір ізоляції залежить від матеріалу, з якого виготовлена ізоляція, а також від умов, у яких працює електродвигун.

Температура має прямий вплив на опір ізоляції. Підвищення температури зазвичай знижує опір ізоляції, оскільки молекулярна структура ізоляційних матеріалів стає менш стабільною, що сприяє підвищенню струму витоку. Наприклад:

- При підвищенні температури на кожні 10 °C опір ізоляції може знижуватися вдвічі;

- Перегрів, викликаний тривалим пуском чи високим навантаженням, також може прискорити старіння ізоляції, що зменшує її довговічність і стійкість до електричних пробоїв.

Вологість впливає на ізоляцію через проникнення вологи до її структури, що зменшує електричну міцність матеріалів:

- При високій вологості вода конденсується на поверхні або проникає в мікротріщини ізоляції, сприяючи зростанню струмів витоку;

- Особливо критичні умови виникають у поєднанні низьких температур із високою вологістю, що може призводити до утворення конденсату, зменшуючи опір ізоляції до небезпечних значень.

Зниження опору ізоляції призводить до наступних проблем:

- Підвищений ризик короткого замикання;
- Збільшення втрат електроенергії через струми витоку;
- Зменшення терміну служби двигуна.

Для забезпечення належного стану ізоляції застосовуються такі підходи:

- Регулярний моніторинг – використання мегомметрів для перевірки опору ізоляції;

- Дотримання умов зберігання та експлуатації – уникнення роботи двигуна у вологих чи запилених середовищах;

- Просушка ізоляції – використання спеціальних сушильних камер або обігрівачів для видалення вологи з ізоляційних матеріалів.

Дослідження свідчать [15], що контроль температури та вологості дозволяє значно збільшити термін служби двигуна, підвищуючи його надійність та ефективність.

2.5 Математичне моделювання процесів роботи АД при значних відхиленнях від номінальних режимів за допомогою пакету прикладних програм MatLab

Розрахунок струмів в обмотках статора асинхронного двигуна при несиметрії живлячої напруги традиційно здійснюється методом симетричних складових, однак для розрахунку динамічних режимів доцільно використовувати математичне моделювання за допомогою програмного пакету Matlab Simulink. У програмному пакеті SimPowerSystems асинхронна машина представлена у вигляді блоку Asynchronous Machine SI Units (рис 2.1).

У цій моделі на вихідному порту m формується векторний сигнал, який складається з 21 елемента: струмів, потоків напруг ротора та статора у нерухомій і обертовій системах координат, електромагнітного моменту, швидкості обертання валу, а також його кутового положення.

Для моделювання використовується параметри короткозамкненого АД загальнопромислового використання AIP315S4 [14].

Таблиця 2.1 Параметри AIP315S4

Потужність на валу, кВт	160
Частота обертання, об/хв	1500
Ккд, %	94,9
Номінальний струм, А	288
Номінальний крутний момент, Нм	1027,572
Момент інерції, кг·м ²	2,7
Швидкість обертання валу, об/хв	1480
Напруга живлення, В	380/660
Відношення струмів I_{Π}/I_{H}	6,9
Співвідношення крутних моментів M_{Π}/M_{H}	2,1

Співвідношення максимального моменту M_{\max}/M_{Π}	2,2
---	-----

Рисунок 2.1 – Математична модель для дослідження несиметричних режимів роботи короткозамкненого електродвигуна

Збурення несиметричних режимів роботи АД реалізується набором двох пар елементів: для повздовжніх збурень ключ Step 1 і перемикач Breaker 1, а для поперечних – аналогічними елементами Step 2 і Breaker 2. Повздовжнє збурення асиметричної роботи АД забезпечується введенням в один із проводів лінії (в роботі обрано провід c) додаткового опору R_s , який може змінюватися в широких межах – від незначних локальних змін (наприклад, при зменшенні перетину провідника за рахунок механічних факторів, локального нагрівання за рахунок недосконалого контакту тощо), до найбільш потужного збурення – фізичного обриву проводу. Час виникнення події задано в Step 1 і може бути довільним. Прийнято, що початковий стан ключа Step 1 дорівнює 1, тобто ключ замкнений, а його опір R_{0n} є незначним числом, відмінним від 0.

Причиною поперечного збурення може бути погіршення ізоляції кабельної лінії за рахунок зовнішніх факторів (підвищений струм у проводі лінії живлення i , як наслідок, підвищення температури провідника й ізоляції, підвищена вологість навколишнього середовища, старіння ізоляції тощо). Поступове зменшення опору ізоляції R_{iz} , тобто опору між проводом лінії і землею, призводить до збільшення циркуляційного струму в колі «провід c – опір R_{iz} – земля – фаза c трансформатор» і при наближенні до режиму короткого замикання проводу на землю струм у вказаному контурі може досягати аварійно великих значень. Характерно, що цей режим безпосередньо не впливає на струм в лінійному проводі c електродвигуна. Але він приводить до порушення симетрії напруг живлення, що запускає механізм появи в електродвигуні зворотного поля напруг і струмів, рівень небезпечності яких залежить від інтенсивності фактору, що збурює процес.

В математичній моделі описаний процес моделюється наступним чином: початковий стан ключа Step 2 дорівнює нулю (ключ розімкнений, опір R_s має порядок десятків кОм) і, таким чином, поперечне збурення відсутнє до моменту, заданого параметром Step time в Step 2. Замикання ключа формує замкнене через фазу трансформатора коло, струм якого обумовлює зміну лінійних напруг джерела живлення (трансформатора.)

Параметри перехідних процесів фіксуються осцилографами Scop, Scop1,..., Scop8. Для розрахунку симетричних складових напруги і струмів передбачена фіксація середньоквадратичних (діючих значень) цих функцій (RMS+Display).

По завершенні кожного варіанта розраховуються прямі та зворотні симетричні складові систем лінійних напруг і струмів. При цьому використовується спеціальна програма написана у Mathcad.

Рисунок 2.2 – Mathcad програма для розрахунку симетричних складових.

Перед початком дослідження несиметричних режимів виконаємо перевірку правильності роботи математичної моделі при наступному векторі вхідних даних: момент навантаження $T_m = 600 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$; тривалість процесу $T = 3 \text{ с}$; ключ Step 1: час вмикання Step time = 1,5 с, початкове значення Initial value = 1, кінцеве значення Final value = 0; Breaker 1: початковий стан Initial status = 1: опори $R_{0n} = 0,00005 \text{ Ом}$, $R_s = 0,00005 \text{ Ом}$; ключ Step 2: Step time = 5 с, Initial value = 0, кінцеве значення Final value = 1; Breaker 2: початковий стан Initial status = 0: опори $R_{0n} = 0,5 \text{ Ом}$, $R_s = 10000 \text{ Ом}$. Елементи збудження несиметрії налаштовані так, що Step 1 при спрацюванні не вводить додатковий опір в лінію, а Step2 (поперечне збудження) вмикається після завершення процесу (Step time > T).

Наведені нижче осцилограми підтверджують типовий характер перехідних процесів і його параметри при симетричному режимі пуску. У кінці пуску лінійні напруги $U_{ab} = U_{bc} = U_{ca} = 397,8 \text{ В}$ і струми $I_a = I_b = I_c = 172,5 \text{ А}$. Як наслідок $KU_2 = 0$ і $KI_2 = 0$.

а)

б)

Рисунок 2.3 – Симетричний режим пуску АД: а) – момент, б) – струми

2.1 Несиметричні режими роботи АД при повздовжніх збуреннях

Як було зазначено вище, повздовжна несиметрія виникає при введенні додаткового опору в лінійник провід. Розглянемо варіанти впливу опору R_s , який при розмиканні ключа вводиться в лінію.

Варіант 1_: $T_m = 600$; $T = 3$; Step 1: Step time = 1.5, Initial value = 1, Final value = 0; Breaker 1: Initial status = 1; $R_{0n} = 0,00005$, $R_s = 0,05$; Step 2: Step time = 5, Initial value = 0, Final value = 1; Breaker 2: Initial status = 0; $R_{0n} = 0,5$ Ом, $R_s = 10000$ Ом.

При розгляді процесу пуску спостерігається початок порушення симетрії: $U_{ab} = 397,8$ В, $U_{bc} = 390$ В, $U_{ca} = 392,8$, $I_a = 201,1$ А, $I_b = 158,6$ А, $I_c = 163,8$ А. Симетричні складові напруги: $U_1 = 393.52$ В, $U_2 = 4.57$ В і струму $I_1 = 173.29$ А, $I_2 = 27.93$ А, відповідно коефіцієнти асиметрії напруг $KU_2 = 1,16$ % і струмів $KI_2 = 16,1$ %. Це підтверджується і наведеними на рис. 2.4 осцилограмами. Звертає на себе увагу той факт, що поява навіть незначних значень зворотної послідовності напруг призводить до більш вираженої асиметрії струмів.

а)

б)

Рисунок 2.4 – Асиметричний режим пуску АД при $R_s = 0,05$ Ом:

а) – момент, б) – струми

Варіант 2_: Опір R_s збільшено до 0,1 Ом. Спостерігається очікуване збільшення асиметрії напруг і струмів: $U_{ab} = 397,8$ В, $U_{bc} = 383,7$ В, $U_{ca} = 386,8$ В, $I_a = 226,1$ А, $I_b = 156,8$ А, $I_c = 153,1$ А. Симетричні складові напруги: $U_1 = 389.4$ В, $U_2 = 8.6$ В і струму $I_1 = 51.9$ А, $I_2 = 174.23$ А, відповідно коефіцієнти асиметрії напруг $KU_2 = 2,02$ % і струмів $KI_2 = 29,8$ %. Це підтверджується і наведеними на рис. 2.5 осцилограмами.

а)

б)

Рисунок 2.5 – Асиметричний режим пуску АД при $R_s = 0,1$ Ом:

а) – момент, б) – струми

Варіант 3₌: Опір R_s збільшено до 0,2 Ом. Результати моделювання: $U_{ab} = 397.5$ В, $U_{bc} = 375.9$ В, $U_{ca} = 375.5$ В, $I_a = 262.6$ А, $I_b = 174.4$ А, $I_c = 130.4$ А. Симетричні складові напруги: $U_1 = 382.82$ В, $U_2 = 14.68$ В і струму $I_1 = 176$ А, $I_2 = 88.5$ А, відповідно коефіцієнти асиметрії напруг $KU_2 = 3.83$ % і струмів $KI_2 = 50.3$ %. Це підтверджується і наведеними на рис. 2.6 осцилограмами.

а)

б)

Рисунок 2.6 – Асиметричний режим пуску АД при $R_s = 0,2$ Ом:

а) – момент, б) – струми

Варіант 4₌: Опір R_s збільшено до 0,5 Ом. Результати моделювання: $U_{ab} = 396.6$ В, $U_{bc} = 372.3$ В, $U_{ca} = 357.7$ В, $I_a = 302.5$ А, $I_b = 234.4$ А, $I_c = 81.41$ А. Симетричні складові напруги: $U_1 = 375.2$ В, $U_2 = 22.86$ В і струму $I_1 = 179.85$ А, $I_2 = 136.7$ А і відповідно коефіцієнти асиметрії напруг $KU_2 = 6.09$ % і струмів $KI_2 = 76$ %. Це підтверджується і наведеними на рис. 2.7 осцилограмами.

а)

б)

Рисунок 2.7 – Асиметричний режим пуску АД при $R_s = 0,5$ Ом:

а) – момент, б) – струми

Варіант 5₌: Опір R_s збільшено до 1,0 Ом. Результати моделювання: $U_{ab} = 396.1$ В, $U_{bc} = 375.6$ В, $U_{ca} = 350.2$ В, $I_a = 312.5$ А, $I_b = 269.2$ А, $I_c = 47.16$ А. Симетричні складові напруги: $U_1 = 373.5$ В, $U_2 = 26.5$ В і струму $I_1 = 178.5$ А, $I_2 = 160$ А і відповідно коефіцієнти асиметрії напруг $KU_2 = 7.09$ % і струмів $KI_2 = 89.65$ %. Це підтверджується і наведеними на рис. 2.8 осцилограмами.

а)

б)

Рисунок 2.8 – Асиметричний режим пуску АД при $R_s = 1.0$ Ом:

а) – момент, б) – струми

Варіант 6₌: Опір R_s збільшено до 5,0 Ом. Результати моделювання: $U_{ab} = 395.6$ В, $U_{bc} = 382.3$ В, $U_{ca} = 346.3$ В, $I_a = 311.6$ А, $I_b = 301.7$ А, $I_c = 10.35$ А.

Симетричні складові напруги: $U_1= 374.18$ В, $U_2= 29.1$ В і струму $I_1= 178.6$ А, $I_2= 175.6$ А і відповідно коефіцієнти асиметрії напруг $KU_2= 7.78$ % і струмів $KI_2 = 98.3$ %. Це підтверджується і наведеними на рис. 2.9 осцилограмами.

а) б)

Рисунок 2.9 – Асиметричний режим пуску АД при $R_s = 5.0$ Ом:

а) – момент, б) – струми

Варіант 7=: Опір R_s збільшено до 10,0 Ом. Результати моделювання: $U_{ab}= 395.6$ В, $U_{bc}= 383.4$ В, $U_{ca}= 346.1$ В, $I_a= 310.3$ А, $I_b= 305.3$ А, $I_c = 5.215$ А. Симетричні складові напруги: $U_1= 374.5$ В, $U_2= 29.38$ В і струму $I_1= 178.5$ А, $I_2= 177$ А і відповідно коефіцієнти асиметрії напруг $KU_2= 7.85\%$ і струмів $KI_2 = 99.17$ %. Це підтверджується і наведеними на рис. 2.10 осцилограмами.

а) б)

Рисунок 2.10 – Асиметричний режим пуску АД при $R_s = 10.0$ Ом:

а) – момент, б) – струми

Варіант 8=: Опір R_s збільшено до 100 Ом. Результати моделювання: $U_{ab}= 395.6$ В, $U_{bc}= 383.4$ В, $U_{ca}= 346.1$ В, $I_a= 310.3$ А, $I_b= 305.3$ А, $I_c = 5.215$ А. Симетричні складові напруги: $U_1= 374.94$ В, $U_2= 29.53$ В і струму $I_1= 178.31$ А, $I_2= 178.21$ А і відповідно коефіцієнти асиметрії напруг $KU_2= 7.88$ % і струмів $KI_2 = 99.94$ %. Фактично значення опору лінійного проводу c $R_s \geq 100$ Ом можна вважати фізичним обривом цього проводу. Це підтверджується фактичною відсутністю струму у проводі c і протилежними знаками струмів у неушкоджених фазах (див. рис. 2.11 б). Очевидно останній режим є найбільш складним у порівнянні з іншими, розглянутими у варіантах 1 – 7.

а) б)

Рисунок 2.11 – Асиметричний режим пуску АД при $C = 100$ Ом:

а) – момент, б) – струми

Залежність коефіцієнтів асиметрії лінійних напруг KU_2 і струмів KI_2 від додаткового опору R_s в одному з проводів лінії (у даному випадку у проводі c) наведена в табл. 2.2.

Таблиця – 2.2. Залежність коефіцієнтів несиметрії KU_2 і KI_2 від опору R_s

R_s , Ом	0,05	0,1	0,2	0,5	1,0	5,0	10,0	100,0	∞
KU_2 , %	1,16	2,02	3,83	6,09	7,09	7,78	7,85	7,88	8,02
KI_2 , %	16,1	29,8	50,3	76,0	89,7	98,3	99,0	99,4	100,0

Як видно з наведених результатів, внесення навіть незначного додаткового опору в лінію є помітним збуренням симетричного режиму, особливо в системі лінійних струмів. Поява навіть незначних значень зворотної послідовності напруг призводить до більш вираженої асиметрії струмів: при $R_s = 0,05$ Ом $U_{ab} = 397,8$ В, $U_{bc} = 390$ В, $U_{ca} = 392,8$; $I_a = 201,1$ А, $I_b = 158,6$ А, $I_c = 163,8$ А.

2.2 Несиметричні режими роботи АД при поперечних збуреннях

Варіант 1_{||}. Для виключення із розгляду повздовжніх збурень в усіх подальших варіантах час для ключа Step1 Step time обрано за межами перехідного процесу: Step time = 5 > T = 3. Навпаки, для ключа Step2 Step time = 1.5 с. При цьому опір ізоляції між проводом c і землею стрибком суттєво зменшується до значень, достатніх для відчутного впливу на режим роботи системи. У даному варіанті розглянуто зменшення опору ізоляції від 10000 Ом до 10 Ом. Як видно із результатів моделювання таке збурення практично не вплинуло на симетрію системи: лінійні напруги $U_{ab} = 397,7$ В, $U_{bc} = 397,6$ В, $U_{ca} = 397,5$ В, лінійні струми $I_a = 173,3$ А, $I_b = 172,6$ А, $I_c = 172,1$ А. Симетричні складові напруги: $U_1 = 397.6$ В, $U_2 = 0.115$ В і струму $I_1 = 172,7$ А, $I_2 = 0,696$ А, відповідно коефіцієнти асиметрії напруг $KU_2 = 0,029$ % і струмів $KI_2 = 0,403$ %.

Варіант 2_{||}. Відрізняється від попереднього зменшенням опору ізоляції до 5 Ом. Як видно із результатів моделювання, спостерігається деяке незначне порушення симетрії, хоча воно і не є відчутним для режиму роботи

електродвигуна: лінійні напруги $U_{ab} = 397,7$ В, $U_{bc} = 397,4$ В, $U_{ca} = 397,3$ В, лінійні струми $I_a = 174$ А, $I_b = 172,4$ А, $I_c = 171,5$ А. Симетричні складові напруги: $U_1 = 397,5$ В, $U_2 = 0,24$ В і струму $I_1 = 172,6$ А, $I_2 = 1,464$ А, відповідно коефіцієнти асиметрії напруг $KU_2 = 0,06$ % і струмів $KI_2 = 0,848$ %.

Варіант 3_{||}. Опір ізоляції зменшено до 1 Ом. Результати моделювання: лінійні напруги $U_{ab} = 397,7$ В, $U_{bc} = 397,4$ В, $U_{ca} = 397,4$ В, лінійні струми $I_a = 173,9$ А, $I_b = 172,3$ А, $I_c = 171,4$ А. Симетричні складові напруги: $U_1 = 396,4$ В, $U_2 = 1,35$ В і струму $I_1 = 172,9$ А, $I_2 = 7,04$ А, відповідно коефіцієнти асиметрії напруг $KU_2 = 0,34$ % і струмів $KI_2 = 4,07$ %. Як і у випадку повздовжньої несиметрії навіть незначні порушення симетрії напруги приводять до помітних порушень системи струмів. Найбільш чутливий до збурення в момент комутації ключа є електромагнітний момент (рис. 2.12 а) коливання амплітуди якого на 10 % поступово зменшуються (рис. 2.12 б). Можна вважати, що для даної системи живлення АД опір ізоляції 1 Ом є граничним значенням, подальше зменшення якого стає відчутним фактором впливу.

а)

б)

Рисунок 2.12 – Коливання електромагнітного моменту в момент замикання ключа – а) і в кінці процесу – б) при опорі заземлення 1 Ом

Варіант 4_{||}. Опір ізоляції зменшено до 0,5 Ом. Результати моделювання: лінійні напруги $U_{ab} = 397,7$ В, $U_{bc} = 394,6$ В, $U_{ca} = 394,1$ В, лінійні струми $I_a = 185,8$ А, $I_b = 172,4$ А, $I_c = 162$ А. Симетричні складові напруги: $U_1 = 395,5$ В, $U_2 = 2,26$ В і струму $I_1 = 173,7$ А, $I_2 = 13,76$ А, відповідно коефіцієнти асиметрії напруг $KU_2 = 0,57$ % і струмів $KI_2 = 7,92$ %. Найбільш відчутним результатом є збільшення коливання електромагнітного моменту в момент комутації, а також струму в лінійному проводі a приблизно на 10 % при одночасному зменшенні струму i_c за рахунок протікання його частини через контур заземлення (рис. 2.13)

а)

б)

Рисунок 2.13 – Зміна електромагнітного моменту в момент замикаання ключа – а) і струмів в кінці процесу пуску – б) при опорі заземлення 0,5 Ом

Варіант 5_{||}. Опір ізоляції зменшено до 0,25 Ом. Результати моделювання: лінійні напруги $U_{ab} = 397.7$ В, $U_{bc} = 391,6$ В, $U_{ca} = 390.5$ В, лінійні струми $I_a = 1986$ А, $I_b = 172,4$ А, $I_c = 152,6$ А. Симетричні складові напруги: $U_1 = 393.3$ В, $U_2 = 4.49$ В і струму $I_1 = 173.3$ А, $I_2 = 26.7$ А, відповідно коефіцієнти асиметрії напруг $KU_2 = 1.14$ % і струмів $KI_2 = 15.4$ %. Відмічені в попередніх варіантах тенденції розвитку несиметричного режиму посилюються.

Варіант 6_{||}. Опір ізоляції зменшено до 0,1 Ом. Таке суттєве зменшення опору ізоляції призводить вже до відчутного порушення симетрії навіть лінійних напруг. Результати моделювання: лінійні напруги $U_{ab} = 397,4$ В, $U_{bc} = 383,5$ В, $U_{ca} = 380,5$ В, лінійні струми $I_a = 236,2$ А, $I_b = 178,4$ А, $I_c = 129,7$ А. Симетричні складові напруги: $U_1 = 387.1$ В, $U_2 = 10.48$ В і струму $I_1 = 174.9$ А, $I_2 = 64.8$ А, відповідно коефіцієнти асиметрії напруг $KU_2 = 2.7$ % і струмів $KI_2 = 37.1$ %. Такий результат свідчить про суттєве порушення симетрії і перехід фактично в аварійний режим роботи. Це підтверджується осцилограмами рис. 2.14.

а)

б)

Рисунок 2.14 – Зміна електромагнітного моменту в момент замикаання ключа – а) і струмів в кінці процесу пуску – б) при опорі заземлення 0,1 Ом

Варіант 7_{||}. Опір ізоляції зменшено до 0,01 Ом. Практично це глухе замикаання проводу c на землю. Наведені на рис. 2.15 осцилограми електромагнітного моменту – а), кутової частоти обертання б) і лінійних струмів – с) свідчать про неможливість роботи АД в такому режимі.

а)

б)

с)

Рисунок 2.15 – Перехідні процеси в АД при практичному замиканні проводу c на землю. Електромагнітний момент – а), кутова частота обертання б) і лінійні струми – с)

2.3 Несиметричні режими роботи АД при комплексному врахуванні повздовжніх та поперечних збурень

На практиці можливе виникнення ситуацій, що обумовлені одночасною дією як повздовжніх, так і поперечних збурень. Не виключено також, що повздовжня асиметрія може провокувати появу або розвиток поперечної аномалії і навпаки. Тому узагальнення розгляду несиметричних режимів роботи в такій постановці має теоретичний і практичний інтерес.

В досліджуваній математичній моделі АД (рис. 2.1) задамо наступний вектор вхідних параметрів: Step 1: Step time = 1.5 с, Initial value =1, Final value = 0; Breaker 1: Initial status = 1: $R_{0n} = 0,00005$ Ом, $R_s = 1$ Ом; Step 2: Step time = 2.5 с, Initial value =0, Final value = 1; Breaker 2: Initial status =0: $R_{0n} = 0,5$ Ом, $R_s = 10000$ Ом. Тривалість процесу $T = 3$ с.

Динаміка зміни лінійних струмів проілюстрована на рис. 2.16.

а)

б)

с)

Рисунок 2.16 – Динаміка зміни струмів при комплексному врахуванні збурень а) і більш детально при поздовжньому ($t = 1,5$ с) – б) і поперечному ($t = 2,5$ с) – с) збуреннях.

Діючі значення струмів при $t = T = 3$ с – $I_A = 556,5$ А, $I_B = 516,6$ А, $I_C = 234,4$ А, яким відповідає коефіцієнт асиметрії струмів $KI_2 = 45$ % при одночасному перевищенні більш ніж втричі струмів I_A та I_B відповідних значень струмів симетричного режиму – свідчить про аварійний режим роботи АД.

Цікаво, що зміна порядку комутації ключів практично не впливає на кінцевий стан системи.

Цікавий факт: при зміні порядку виникнення збурень при збереженості їх інтенсивності характер осцилограм суттєво відрізняється, але при цьому відповідні параметри перехідного процесу залишаються практично незмінними

Рисунок 2.17 – Динаміка зміни струмів при комплексному врахуванні збурень у проводі *C*: спочатку при поперечному ($t = 1,5$ с), потім при поздовжньому ($t = 2,5$ с) збуреннях

Для порівняння комплексного характеру збурень з їх розрізненою дією розглянемо окремо дію цих збурень. В результаті моделювання отримані наступні дані: при поздовжньому збуренні $I_A = 312,5$ А, $I_B = 269,2$ А, $I_C = 47,16$ А, $KI_2 = 89,6$ %; при поперечному збуренні $I_A = 185,8$ А, $I_B = 172,2$ А, $I_C = 162,1$ А, $KI_2 = 8$ %. Тут ми бачимо домінуючий вплив поздовжнього збурення, але при значно менших значеннях струмів.

Розглянемо варіант більш «м'яких» збурень – $R_s = 0,2$ Ом в Breaker 1 і $R_{on} = 0,5$ Ом в Breaker 2. В результаті моделювання отримані наступні результати: при поздовжньому збуренні $KU_2 = 0,48$ %, $KI_2 = 6,72$ %; при поперечному $KU_2 = 0,57$ %? $KI_2 = 7,92$ %. При комплексному врахуванні обох видів збурень отримано $KU_2 = 2,17$ %? $KI_2 = 29,3$ %. Таким чином, спостерігається своєрідний синергетичний ефект взаємного підсилення різних типів збурень.

Цікаво також відслідкувати варіант комплексного збурення в різних точках, наприклад, при поздовжньому збуренні в проводі *C* і поперечному в проводі *B*. Параметри моделі залишимо таким ж, як при комплексному врахуванні збурень в спільному проводі (див. рис. 2.17). Результати моделювання даного варіанта показані на рис. 2.18.

а)

б)

в)

Рисунок 2.18– Динаміка зміни струмів при комплексному врахуванні збурень у B і C проводах B і C – а) і більш детально при поздовжньому ($t = 1,5$ с) – б) і поперечному ($t = 2,5$ с) – в) збуреннях

Візуальне порівняння рис. 2.17 і рис. 2.18 свідчить про їх суттєву відмінність. Для більш чіткого співставлення цих варіантів зведемо основні їх числові характеристики у табл. 2.3.

Таблиця 2.3 – Порівняльні числові дані варіантів комплексного збурення

Повздовжнє збурення у проводі C + поперечне збурення у проводі C	Повздовжнє збурення у проводі C + поперечне збурення у проводі B
$I_A = 556,5$ А, $I_B = 516,6$ А, $I_C = 234,4$ А; $U_A = 393,3$ В, $U_B = 356,6$ В, $U_C = 273,2$ В $KI_2 = 45\%$, $KU_2 = 20,6\%$	$I_A = 316,3$ А, $I_B = 268,9$ А, $I_C = 50,8$ А; $U_A = 392,7$ В, $U_B = 371,4$ В, $U_C = 346,4$ В; $KI_2 = 89,95\%$, $KU_2 = 7,3\%$

Дослідження показує важливість комплексного врахування поздовжніх та поперечних збурень для оцінки аварійних режимів роботи АД. Цікаві спостереження, такі як синергетичний ефект і малий вплив порядку виникнення збурень на кінцеві параметри, підкреслюють складність та багатofакторність процесів. Отримані дані можуть бути використані для вдосконалення систем захисту та діагностики двигунів. Подальші дослідження могли б зосередитися на детальнішому аналізі впливу таких збурень на інші характеристики двигуна.

ВИСНОВКИ

В кваліфікаційній магістерській роботі було встановлено, що робота асинхронних двигунів при значних відхиленнях від номінальних режимів є серйозною технічною проблемою, яка потребує системного підходу. Такі режими, як несиметричні та неповнофазні, призводять до нерівномірного розподілу струмів і теплових перевантажень, які є причинами аварійного виходу двигуна з ладу. Це є актуальним для промислових підприємств, де асинхронні двигуни часто експлуатуються у важких умовах.

Розроблена математична модель асинхронного двигуна дозволила дослідити його роботу при різних типах відхилень від номінальних режимів. Зокрема, моделювання показало, що навіть незначні несиметрії напруг можуть спричинити суттєві втрати потужності та підвищити навантаження на обмотки.

У ході досліджень встановлено, що часткові неповнофазні режими, як повздовжні, так і поперечні, можуть викликати значні струмові і теплові перевантаження, які можуть призводити до пошкодження обмоток статора та ротора. Результати експериментального моделювання підтвердили необхідність додаткового захисту від таких режимів.

Практичними результатами моделювання проілюстровано, що при повздовжніх збуреннях додаткові опори в лінії порядку 10 Ом за результатами впливу практично еквівалентні неповнофазному режиму (обриву проводу лінії)

Встановлено, що комбіноване одночасне повздовжнє та поперечне збурення створюють більшу загрозу для двигуна, чим сумарний вплив окремих збурень. При цьому порядок збурень не впливає на кінцевий результат комбінованого збурення.

Для забезпечення надійної роботи асинхронних двигунів рекомендується впровадження сучасних систем моніторингу стану обмоток і напруг, проведення регулярної діагностики та встановлення захисних пристроїв таких як релейний захист, автоматичні вимикачі з контролем фаз та системи моніторингу. Результати досліджень можуть бути корисними для вдосконалення систем управління та захисту асинхронних двигунів на промислових підприємствах.