

Центральноукраїнський національний технічний університет
Центр заочної та дистанційної освіти
Кафедра “Електротехнічні системи та енергетичний менеджмент”

“Допущено до захисту ”
Зав. кафедрою ЕТС та ЕМ
к.т.н., професор
_____Петро ПЛЕШКОВ
“ ____ ” _____2021р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
за другим (магістерським) рівнем вищої
освіти
на тему
“Дослідження можливостей використання гармонік
миттєвої потужності для ідентифікації параметрів
двигунів змінного струму”

Виконав здобувач вищої освіти
2 курсу магістратури, групи ЕЕ-20МЗ
ОПП «Електротехнічні системи
електроспоживання»
спеціальності 141 «Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка»
_____Лукачченко А.І.
« ____ » _____2021 р.
Керівник роботи
к.т.н., професор
_____Петро ПЛЕШКОВ
« ____ » _____2021р.
Рецензент _____

Центральноукраїнський національний технічний університет

Факультет ЦЗДО

Кафедра електротехнічних систем та енергетичного менеджменту

Рівень вищої освіти другий (магістерський)

Галузь знань 14 Електрична інженерія

Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

Освітньо-професійна програма Електротехнічні системи електроспоживання

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Завідувач кафедри

Плешков П.Г.

«_____» _____ 2021 р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗА ДРУГИМ (МАГІСТЕРСЬКИМ) РІВНЕМ ВИЩОЇ ОСВІТИ ЗДОБУВАЧА ВИЩОЇ ОСВІТИ

Лукачченка Антона Ігоровича

(прізвище, ім'я, по-батькові)

1. Тема роботи (проекту) Дослідження можливостей використання гармонік миттєвої потужності для ідентифікації параметрів двигунів змінного струму.

Investigation of the possibilities of using instantaneous power harmonics to identify the parameters of AC motors, networks and development of methods and measures to reduce voltage asymmetry

2. Керівник роботи (проекту)

Плешков Петро Григорович, к.т.н., професор

(прізвище, ім'я, по-батькові, науковий ступінь, вчене звання)

3. Строк подання студентом роботи до захисту 3.12.2021 р.

4. Мета та завдання випускної кваліфікаційної роботи (проекту)

Вступ; Аналіз методів визначення параметрів двигунів змінного струму;

Ідентифікація електромагнітних параметрів двигунів змінного струму;

Розробка вимірювально-діагностичного комплексу визначення параметрів

двигуна змінного струму; Дослідження післяремонтного стану двигунів;

Техніко-економічне обґрунтування; Охорона праці; Висновки

5. Консультанти по роботі, із зазначенням розділів роботи

Розділ	Консультант	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
<i>Економічна частина</i>	<i>к.е.н., доц. Журило І.В.</i>		
<i>Охорона праці</i>	<i>к.т.н, доц. Савеленко І.В.</i>		

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів випускної кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	<i>Вступ</i>	4.10.21	
2	<i>Аналіз методів визначення параметрів двигунів змінного струму</i>	9.11.21	
3	<i>Ідентифікація електромагнітних параметрів двигунів змінного струму</i>	14.10.21	
4	<i>Розробка вимірювально-діагностичного комплексу визначення параметрів двигуна змінного струму</i>	21.10.21	
5	<i>Дослідження післяремонтного стану двигунів</i>	28.10.21	
6	<i>Техніко-економічне обґрунтування</i>	5.11.21	
7	<i>Охорона праці</i>	15.11.21	
8	<i>Висновки</i>	21.11.21	
9	<i>Оформлення пояснювальної записки КР</i>	25.11.21	
10	<i>Оформлення презентаційної частини КР</i>	29.11.21	

Дата видачі завдання

«___» _____ 2021 р.

Підпис керівника _____

Завдання прийнято до виконання

«___» _____ 2021 р.

Підпис здобувача _____

АНОТАЦІЯ

Лукашук А.І. Дослідження можливостей використання гармонік миттєвої потужності для ідентифікації параметрів двигунів змінного струму.
Investigation of the possibilities of using instantaneous power harmonics to identify the parameters of AC motors.

Спеціальність 141 - «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка». - ОПІ «Електротехнічні системи електроспоживання». - Центральноукраїнський національний технічний університет. - м.Кропивницький, 2021р.

У роботі досліджено методи ідентифікації електромагнітних параметрів і визначення втрат у двигунах змінного струму, обґрунтовано вимоги до діагностичного та випробувального устаткування. Обґрунтовано доцільність використання рівнянь балансу складових миттєвої потужності на джерелі та елементах схеми заміщення для визначення параметрів електричної машини при використанні полігармонійних тестових сигналів.

Для ефективної реалізації розроблених методів було використано джерело полігармонійної напруги у вигляді тиристорного регулятора напруги. При використанні тиристорного регулятора напруги стали очевидними його переваги по відношенню до джерел випробувального впливу.

Розроблені в роботі методи придатні для ідентифікації електромагнітних параметрів як АД так і СД.

Ключові слова: ДВИГУНИ ЗМІННОГО СТРУМУ, ПОЛІГАРМОНІЙНЕ ЖИВЛЕННЯ, ЕЛЕКТРОМАГНІТНІ ТА ЕНЕРГЕТИЧНІ ПАРАМЕТРИ, СКЛАДОВІ ГАРМОНІК МИТТЄВОЇ ПОТУЖНОСТІ, ВТРАТИ ПОТУЖНОСТІ.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	6
1 АНАЛІЗ МЕТОДІВ ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ДВИГУНІВ ЗМІННОГО СТРУМУ	9
1.1 Аналіз надійності та причин пошкоджень двигунів змінного струму	9
1.2 Мета та особливості післяремонтних випробувань.....	11
1.3 Огляд промислових методів ідентифікації електромагнітних параметрів синхронних двигунів	14
1.4 Аналіз методів визначення втрат потужності двигунів змінного струму.	17
2 ІДЕНТИФІКАЦІЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПАРАМЕТРІВ ДВИГУНІВ ЗМІННОГО СТРУМУ.....	21
2.1 Визначення електромагнітних параметрів по еквівалентних схемах заміщення	21
2.2 Визначення параметрів схем заміщення з використанням дослідів загасання струму в обмотці статора.....	30
2.3 Визначення еквівалентних індуктивних опорів.....	41
2.4 Визначення положення ротора синхронних двигунів.....	44
2.5 Визначення параметрів обмоток статора і ротора синхронних двигунів	48
3 РОЗРОБКА ВИМІРЮВАЛЬНО-ДІАГНОСТИЧНОГО КОМПЛЕКСУ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ДВИГУНА ЗМІННОГО СТРУМУ.....	51
3.1 Обґрунтування застосування тиристорного регулятора напруги в якості джерела полігармонійного живлення.....	51
3.2 Структура вимірювально-діагностичного комплексу для визначення параметрів двигунів змінного струму	55
3.3 Склад обладнання комплексу визначення параметрів двигунів змінного струму	61
4 ДОСЛІДЖЕННЯ ПІСЛЯРЕМОНТНОГО СТАНУ ДВИГУНІВ.....	65

4.1. Аналіз післяремонтних дефектів асинхронних двигунів.....	65
4.2. Зміна параметрів електричних машин при старінні.....	72
4.3. Електромагнітні властивості електротехнічної сталі і вплив на них температури. Втрати від вихрових струмів.....	76
4.4. Аналіз втрат, що становлять, на гістерезис та вихрові струми в сталі АД.....	79
4.5. Доцільність сертифікації електродвигунів на стадії ремонту.....	89
5 ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ	92
5.1 Економічна ефективність	92
5.2 Техніко-економічні показники.....	94
ВИСНОВКИ.....	107
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	108
ДОДАТОК А. ОХОРОНА ПРАЦІ.....	98
ДОДАТОК Б. Звіт подібності.....	110

ВСТУП

Електричні двигуни (ЕД) енергетичного та промислового комплексу в більшості своїй використовуються на протязі багатьох років. Збільшення строку служби та ефективної роботи електрообладнання можливе за умови моніторингу його характеристик або покращення експлуатаційного ресурсу.

Ця задача вирішується за рахунок використання систем моніторингу ресурсу роботи і теорії енергозбереження, а також показників якості енергії, використання складових споживаної потужності та експлуатаційного стану механічних, електричних та магнітних складових установок електромеханічного обладнання, а саме електричних двигунів постійного та змінного струму.

Здійснення моніторингу та діагностики дає можливість визначити ресурс і працездатність двигунів, що знаходяться в роботі або в процесі технічного огляду чи ремонту. Розробка та використання такого обладнання дає змогу реалізовувати задачі енергозбереження. Це дозволяє перейти до вирішення задачі щодо створення енергоресурсозберігаючого устаткування, оскільки дозволить реалізовувати задачі енергозбереження. Впровадження даного обладнання призведе до збільшення ефективності експлуатації електричних машин та до зменшення витрат на проведення ремонтів шляхом виведення обладнання з електротехнологічного процесу згідно фактичного стану.

Ця задача пов'язана з необхідністю рішення задачі ідентифікації параметрів електромагнітних складових схеми заміщення-перетворення енергії. При цьому важливим є метод аналізу електричних кіл, що полягає в розв'язанні системи рівнянь балансу складових миттєвої потужності. Керування перетворенням енергії у колах електричної системи потребує ідентифікації втрат потужності у вузлах і визначення технічного стану вузлів системи. Це дозволяє здійснювати зменшення впливів несиметрії електричної системи, пошкоджень окремих елементів, що веде за собою появу змінних складових в

потужності та в електромагнітному моменті електричних двигунів. Невід'ємними елементами випробувань машин змінного струму є дослідження короткого замикання та холостого ходу. Використання результатів зазначених дослідів дозволяє сформувати новий паспорт електричних машин, що пройшли ремонт.

Визначення нових паспортних даних відремонтованих двигунів дасть можливість оцінити якість ремонту і сформулювати рекомендації щодо експлуатації, адекватної її реальному технічному стану. Тому визначення втрат потужності у вузлах випробуваної машини в умовах електроремонтних цехів і мобільних систем моніторингу є важливою і актуальною задачею. Більшість поширених існуючих методів визначення електромагнітних параметрів, незалежно від способу випробувального режиму і способу обробки дослідних даних, базуються на аналізі перехідних процесів, що виникають в результаті зміни електромагнітного стану електричної машини. Майже всі методи дають змогу визначити тільки частку електромагнітних параметрів і лише у вигляді інтегральних величин, не визначаючи параметри окремо по кожній фазі.

Однією з вирішальних особливостей застосування методів визначення електричних параметрів двигунів змінного струму є використання компактного і технологічного випробувального устаткування, що дозволяє проводити всі необхідні випробування для оцінки технічного стану електродвигунів. Аналіз методів оцінювання електричних параметрів двигунів змінного струму вказує на необхідність визначення принципово нових науково-технічних рішень, які не схожі на відомі рішення простотою і можливістю часткової або повної автоматизації.

Дослідження електромеханічних процесів, що мають місце в двигунах змінного струму, важливо для нормальних і аварійних режимів. Одним з найбільш прогресивних шляхів слід визнати використання для досліджень

математичних моделей, вони адекватно відтворюють реальні фізичні процеси. Правильне рішення питань вибору і розрахунку пристроїв захисту і автоматики машин змінного струму можливо тільки при наявності інформації про реальні параметри і технічні можливості електричних машин. Експлуатаційні характеристики, включаючи пускові, якість реалізації і настройки систем безперервного моніторингу, частотного і векторного регулювання швидкості обертання, компенсації реактивної потужності і т.д., залежать від наявності адекватної інформації про параметри електричної машини і її реальної здатності навантаження. Тому завдання визначення електромагнітних та енергетичних параметрів має велике значення для побудови електромеханічних систем на базі двигунів змінного струму, особливо тих, що пройшли ремонт.

1 АНАЛІЗ МЕТОДІВ ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ДВИГУНІВ ЗМІННОГО СТРУМУ

1.1 Аналіз надійності та причин пошкоджень двигунів змінного струму

Більшість електричних машин (ЕМ), що експлуатуються в даний час на підприємствах були впроваджені у виробництво вже досить давно і неодноразово проходили процедури різного виду ремонтів, що, безумовно, зіграло роль у погіршенні їх технічних характеристик. Ситуацію посилюють також і інші фактори (неадекватна експлуатація та технічне обслуговування, недосконалість керуючої і захисної апаратури, знос вузлів робочих механізмів і т.д.), що знижують ресурс роботи.

Проблема надійності і довговічності експлуатації електромеханічного обладнання гостро стоїть сьогодні перед усіма промисловими підприємствами країни, особливо перед тими, на яких електричні двигуни приводять в дію відповідальні механізми і є ключовими факторами технологічного процесу. На сьогоднішній день, і в найближчому майбутньому, масове оновлення електромеханічного обладнання, як електричних машин, так і сучасних перетворювальних пристроїв, не представляється можливим через відсутність у підприємств матеріальних засобів і достатньої кількості кваліфікованого персоналу.

Для визначення показників надійності електрична машина розбивається на блоки, потім визначається надійність по кожному блоку і загальна надійність усієї системи. Зазвичай розглядають ті блоки, в яких надійність в даних умови мінімальна (метод «слабких ланок»). У зв'язку з цим розглядаємо чинники, що впливають на надійність вузлів основних типів електричних машин змінного струму.

Асинхронні двигуни (АД). У більшості випадків (85–95%) відмови

відбуваються через пошкодження обмоток (міжвиткове замикання, пробой міжфазної ізоляції, пробой пазової ізоляції). У 5–8% випадків відмови припадають на підшипниковий вузол. Рідше зустрічаються розтріскування чавунного корпусу і підшипникових щитів.

Синхронні двигуни (СД). Однією з особливостей експлуатації синхронних машин є порівняно висока якість обслуговування. Відмови, викликані помилками експлуатації зазвичай порівнянні з кількістю відмов, пов'язаних із заводськими дефектами. Однією з найбільш поширених причин відмов СД є пошкодження обмотки статора, що відбуваються, в основному, в результаті пробоею ізоляції обмотки. Іншою причиною відмов СД є пошкодження активної сталі, пов'язані, в основному, з ослабленням її запресовування. Для СД 70% відмов припадають на пробой ізоляції і обрив стрижнів демпферних обмоток. Також відмови відбуваються з причин механічних пошкоджень роторів, що призводить до тяжких аварій. Значна кількість таких пошкоджень припадає на бандажні вузол, а найбільш важкі пов'язані з руйнуванням роторних валів. Часто зустрічаються пошкодження і несправності підшипників і підп'ятників.

Основні причини виникнення пошкоджень і зниження надійності, загальні для всіх ЕМ – механічні та електродинамічні зусилля під час перехідних процесів, перевантаження по струму, перенапруги, попадання в ЕД сторонніх тіл. Важливим фактором, що призводить до різного роду пошкоджень ЕМ, є підвищена вібрація. Вона часто пов'язана з наявністю недоліків конструкції, дефектами виготовлення машини і її складання, може свідчити про виникнення пошкоджень. З іншого боку, сама вібрація може бути джерелом серйозних пошкоджень і аварій. Варто зазначити, що на ресурс ЕМ можуть вплинути і фактори навколишнього середовища. Так, знижена температура сприяє загустінню змазки підшипників, що обумовлює підвищений момент рушання при пуску. Підвищена вологість може привести до пробоею ізоляції. У ряді випадків до відмов призводить невідповідність виконання ЕД та умов їх

експлуатації. Через вимушеної зміни параметрів технологічного процесу, інтенсивної експлуатації ЕМ, впливу несприятливих факторів навколишнього середовища ресурс роботи машини може не відповідати закладеному при проектуванні. Особливо слід виділити кількість і інтенсивність пусків в одиницю часу. До факторів, що безпосередньо впливає на ресурс ЕМ, можна віднести недосконалість керуючої і захисної апаратури.

Враховуючи значний термін служби електричних машин, стає очевидним, що щорічно ремонтується в кілька разів більше електричних машин, ніж випускається знову електромеханічної промисловістю. Таким чином, одним із шляхів поповнення парку електричних машин та підвищення їх надійності є проведення якісного ремонту з наступною адекватною експлуатацією.

1.2. Мета та особливості післяремонтних випробувань.

Випробування – це заключна частина ремонту електричних двигунів, яке проводиться для перевірки придатності їх до використання. Невід'ємними елементами випробувань після машин змінного струму є досліді короткого замикання, холостого ходу. Використання результатів зазначених дослідів дозволяє сформувати новий паспорт електричних машин, що пройшли ремонт. Визначення нових паспортних даних відремонтованих двигунів дасть можливість оцінити якість ремонту і сформулювати рекомендації щодо експлуатації, адекватної її реальному технічному стану. Тому визначення втрат потужності у вузлах випробуваної машини в умовах електроремонтних цехів і мобільних систем моніторингу є важливою і актуальною задачею.

Широкий спектр конструктивних виконань, а також великий діапазон потужностей ремонтіваних двигунів гостро ставить питання створення методу, працездатного в зазначених умовах і дозволяє створення для цих цілей універсального і максимально автоматизованого обладнання. Тому для проведення випробувань необхідно, щоб апаратура і обладнання, за допомогою

яких проводяться випробування, задовольняли б необхідної точності та меж вимірювань.

В процесі ремонту окремих деталей і вузлів електричної машини принципово виникають відхилення від розрахункових значень (допуски) і режимів. Таким чином, ключовою особливістю післяремонтних випробувань є відмінність електромагнітних параметрів і навантажувальної здатності відремонтованого двигуна від середньосерійних для даного типу машин.

В процесі приймально-здавальних випробувань встановлюється значення відхилення параметрів від номінальних значень, ступінь електричної, магнітної та механічної симетрії відремонтованої електричної машини, що надалі, спільно з результатами випробувань під навантаженням дає необхідну інформацію для оцінки якості ремонту в цілому. Проте проведення навантажувальних випробувань викликає ряд труднощів через необхідність агрегування валів випробуваної і допоміжної ЕМ.

Одним із шляхів підвищення ефективності проведення випробувань в умовах ремонтних цехів та підприємств є визначення паспортних параметрів ЕД розрахунковим шляхом за результатами визначення електромагнітних параметрів (ЕМП) схем заміщення (СЗ) і втрат в вузлах. Для з'ясування ступеня застосовності існуючих методів знаходження електромагнітних та енергетичних параметрів електродвигунів змінного струму до умови ремонтних цехів і підприємств необхідно висунути критерії оцінки.

Широкий спектр конструктивних виконань, а також великий діапазон потужностей ремонтваних ЕД змінного струму гостро ставить питання створення методу, працездатного в зазначених умовах і дозволяє створення для цих цілей універсального і максимально автоматизованого обладнання. В цих умовах питання складності підготовки до експерименту, його проведення та обробки результатів грають першорядну роль. При цьому для можливості застосування методу в післяремонтних випробуваннях, очевидно, виключаються

методи, що включають операції розбирання ЕМ, установки датчиків в розточення статора, з'єднання валів випробуваної машини і приводного двигуна (ПД).

Критерій 1. Високий ступінь автоматизується проведення експерименту.

Іншою особливістю післяремонтних випробувань є відмінність ЕМП відремонтованого ЕД від середньосерійних для даного типу машин, а також відміну параметрів по фазах. Тому непридатними є методи, що визначають параметри як інтегральні для всього двигуна і не дозволяють судити і ступеня конструктивної несиметрії ЕМ.

Критерій 2. Диференціальне визначення параметрів по фазах.

Важливим фактором придатності методу є визначення всіх ЕМП ЕД, а також відсутність необхідності проведення додаткових дослідів для визначення відсутніх параметрів. Додаткові досліді допускається проводити на тому ж випробувальному обладнанні без зміни його структури.

Критерій 3. Повнота визначення параметрів.

Характер вхідних даних методу (інтегральні параметри режиму випробувань, тимчасові залежності, частотні характеристики (ЧХ)), а також засіб аналізу (подання ЕМ у вигляді ЧХ, схем заміщення, операторних рівнянь, векторних діаграм і т.д.) для визначення параметрів визначають складність обробки дослідних даних і точність одержуваних результатів. При цьому в якості вхідних даних методу краще використовувати тимчасові залежності або ЧХ, а для аналізу – застосовувати схеми заміщення або операторні рівняння.

Критерій 4. Простота обробки експериментальних даних.

Наступним критерієм придатності застосування методу для післяремонтний ідентифікації параметрів слід виділити характер вхідного впливу, тому що цей аспект зачіпає важливе питання застосування спеціалізованих силових джерел та комутаційних апаратів, які формують тестовий вплив. Так, ряд впливів (випадковий процес, білий шум, імпульс) є не інформативним, деякі (ступінчаста функція) вимагають силових джерел постійної напруги, а при використанні

гармонійних впливів потрібно силове джерело з регульованою амплітудою, фазою або частотою синусоїдального сигналу. При цьому слід враховувати вплив режимів випробувань на живильну мережу ремонтного підприємства.

Критерій 5. Простота джерела тестових сигналів.

Окремим пунктом можна виділити можливість пошкодження випробуваного ЕД в процесі проведення дослідів.

Критерій 6. Відсутність пошкоджень в процесі проведення експерименту.

До додаткових вимог, що пред'являються до методів визначення, можна віднести ступінь деталізації математичного подання електричної машини (використання Г-подібних, Т-образних, уточнених схем заміщення, облік втрат в сталі), та визначення нелінійностей машини. Цей критерій дозволяє коректно визначити розподіл втрат ЕД змінного струму.

Критерій 7. Високий ступінь деталізації математичного подання ЕД.

В кінцевому підсумку відповідності факторів методів ідентифікації висунутим критеріям складають технологічність випробувань і визначають техніко-економічну обґрунтованість застосування методу в зазначених умовах.

1.3 Огляд промислових методів ідентифікації електромагнітних параметрів синхронних двигунів.

Розглянемо ряд стандартних методів визначення деяких параметрів у статичному режимі при обертовому роторі без зміни електромагнітного стану електричної машини. Характерною особливістю цих методів є наявність приводного двигуна (звичайно синхронного), вимірювання діючих значень режимних величин з отриманням інтегральних значень шуканих параметрів.

Таблиця 1.1 – Таблиця відповідності методів висунутим критеріям та повнота визначення параметрів

№ методу	Найменування методу	Найменування критерію						
		автоматизується	диференц. визн. параметрів	повнота визначення параметрів	простота обробки	простота джерела	відсутність пошкоджень	деталізація мат. опису
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	Метод малого ковзання	—	—	—	+	+	+	—
2	Метод повороту фази живлення	—	—	—	+	—	+	—
3	Метод негативного збудження	+	—	—	+	+	—	—
4	Метод Беккі	—	—	—	+	—	—	—
5	Метод обратнвісінхронного обертання	—	—	—	+	+	+	—
6-7	Методи визначення опорів нульової послідовності x_0 і r_0	—	—	—	+	+	+	—
8-9	Методи знаходження індуктивних опорів x_D і x_q з допомогою векторних діаграм	—	—	—	+	+	+	—
10	Метод знаходження синхронних індуктивних опорів x_D і x_q в робочих умовах.	—	—	—	—	+	+	—
11.1	Визначення параметрів за результатами обробки осцилограм струмів статора в режимі ВКЗ (метод перетворення координат)	+	—	—	—	+	—	—
11.2	Визначення параметрів за результатами обробки частотних характеристик (залежностей провідностей від ковзання)	+	—	—	+	+	—	+
12	Визначення параметрів з дослідів відновлення напруги при відключенні КЗ	—	—	—	+	+	+	—
13	Визначення параметрів з дослідів відключення збудженому машини від джерела живлення	+	—	—	+	+	+	—
14	Визначення параметрів методом багаторазового повороту ротора	—	—	—	+	+	+	—
15	Визначення індуктивного опору розсіювання статора при віддаленому індукторі	—	+	—	+	+	—	—
16-17	Визначення постійних часу з дослідів гасіння поля і ударного збудження	+	—	—	+	—	+	—

1	2	3	4	5	6	7	8	9
18	Визначення параметрів по частотним характеристикам (залежностям провідностей від частоти живлячої напруги)	–	–	–	–	–	+	–
19	Визначення параметрів з досліду загасання постійного струму в обмотці статора	–	+	–	+	+	+	–
20	Визначення електромагнітних параметрів з досліду компенсації магнітного потоку в зазорі	–	+	+	+	–	–	–
21	Розрахунок параметрів за каталожними даними	+	–	+	+	+	+	–
22	Метод визначення параметрів на основі польових розрахунків	+	+	+	–	+	+	+
23	Визначення параметрів у схемах полігармонічного живлення	+	+	+	+	+	+	+
24	Метод визначення параметрів по безперервній функції струму статора з використанням операторних рівнянь	+	+	+	+	+	+	–

При класифікації описаних методів доцільно буде розділити процес ідентифікації електромагнітних параметрів у синхронному двигуні на експериментальну (проведення досліду) і розрахункову (обробка даних) частини, тому що дані різних досліджень можна використовувати для обробки за допомогою одного математичного апарату і навпаки.

Одним з результатів проведеного аналізу визначення параметрів синхронних машин є відсутність методики, яка виконувала б вимоги процесу випробування, так і реальних функцій електроприводу. Більшість знайомих методів випробування є не технологічними. Загалом майже всі методи дають змогу визначити тільки частину ЕМП двигунів і тільки за допомогою інтегральних величин, що не дає можливості знаходження параметрів окремо по кожній фазі. Але, при цьому можна відмітити, що часто знаходять не параметри схем заміщення, а похідні від них значення (синхронні, перехідні, надперехідні величини параметрів).

Наведені переваги методик з використанням схем полігармонійного живлення роблять процедури проведення досліду і обробки експериментальних

даних легко автоматизованими. Розроблене обладнання для випробування дозволяє проводити досліди, не виробляючи будь-яких перемикачів і змінень структури обладнання. Слід зазначити, що застосування вентильних схем а також полігармонійних тестових сигналів відкриває значні можливості в створенні легко автоматизованих і відтворюваних засобів ідентифікації ЕМП та діагностики стану електричних двигунів.

1.4 Аналіз методів визначення втрат потужності у двигунах змінного струму.

Для дослідного знаходження втрат в сталі і механічних втрат використовують способи обертання ротора в режимі ненавантаженого двигуна, тарованого двигуна, самогальмування і калориметричний метод. Зазначені способи слід застосовувати при практично сталому тепловому стані частин випробуваної машини, зокрема опор частини що обертається.

Спосіб обертання в випадку, коли двигун ненавантажений, застосовується в машинах всіх видів, в яких допускається обертання в режимі холостого ходу при живленні від джерела напруги.

Випробувана машина обертається вхолосту з номінальною частотою при напрузі, змінюваній від значення, при якому здійснюється випробування ізоляції між витками на її електричну міцність, до самого меншого, що забезпечує стійке обертання з цією частотою.

Сталість частоти обертання під час дослідження досягається підтримкою незмінної частоти прикладеного напруження в двигунах змінного струму. Порушення СД при будь-якій системі збудження здійснюється від незалежного джерела. Для ЕД змінного струму заміряється прикладена напруга, а також наступні параметри: струм, частота обертання, частота в мережі та активна потужність.

Суму втрат в сталі і механічних втрат визначають вирахуванням з

вимірної потужності, що підводиться, основних втрат, створюваних в обмотках робочого ланцюга двигуна, і втрат перехідних контактів щіток. Загальні втрати обчислюють, визначивши опір обмоток відразу після закінчення досліду.

Основним недоліком є необхідність використання силового автотрансформатора, що має високі вартісні і масогабаритні показники.

Спосіб тарованого двигуна застосовується для машин постійного струму і синхронних двигунів [25].

Запускають в обертання в випробувану машину з номінальною частотою завантаженого двигуна і здійснюють збудження від незалежного джерела. Щоб визначити втрати в сталі і механічні втрати, змінюють напругу на виводах обмотки розімкнутого якоря випробуваної ЕМ та регулюють струм збудження від значення найбільшої напруги відповідного випробування міжвиткової ізоляції, до напруги, що відповідає залишковим намагнічуванням при розімкнутій обмотці збудження. При цьому вимірюють потужність, що підводиться до навантаженого двигуна і всі параметри, які враховуються для визначення втрат у двигуні.

Обчислюють разом механічні втрати і втрати в сталі випробуваної машини, віднімаючи з підведеної потужності втрати в навантаженому двигуні.

Розглянутий спосіб застосовується для визначення разом основних втрат в обмотці якоря, а також додаткових втрат синхронних двигунів з потужністю понад 100 кВА.

Недоліки: необхідність у другій електричній машині, або гальмовому пристрої; з'єднання валів випробуваного двигуна і навантажувального пристрою.

Спосіб самогальмування застосовується для ЕМ, що мають потужний момент інерції ротора. Для визначення втрат доводять частоту обертання випробуваної машини до значення трохи вище номінального, після чого джерело енергії відключають, причому при випробуваннях машин постійного

струму проводять два дослід: самогальмування без порушення та самогальмування в режимі холостого ходу і струмі збудження, відповідно якому є значення номінальної напруги на виводах розімкнутої обмотки якоря при номінальній частоті обертання.

Для СД потужністю понад 100 кВА додають третій дослід – самогальмування при симетричному короткому замиканні на виводах обмотки якоря і номінальному струмі в цій обмотці.

Діапазон зміни частоти обертання в досліді становить 110–90% від номінальної, а в деяких випадках може бути зменшено до 105–95%. При проведенні дослідження фіксується зміна частоти обертання протягом функції часу, а також здійснюється контроль показників електровимірювальних приладів (в ланцюзі якоря машини) в момент встановлення номінальної частоти обертання. Розрахунки втрат ведуться по осцилограмі $n(t)$ за допомогою формули

$$P = J \cdot n_n \cdot \frac{dn(t)}{dt},$$

де P – втрати в двигуні, що приводять до гальмування, Вт; J – момент інерції ротора (або кількох роторів у разі використання для розгону допоміжного двигуна) машини, кгм^2 , значення якого відомо; n_n – номінальна частота обертання машини, $1/\text{с}$; $\frac{dn(t)}{dt}$ – уповільнення ротора в точці $n(t)=n_n$, $1/\text{с}^2$.

Недоліки: необхідність в установці датчика частоти обертання; складність обробки даних. У разі застосування додаткового двигуна необхідно визначити його механічні втрати, а також момент інерції ротора.

В першому дослідженні визначають механічні втрати, в другому – суму механічних втрат і втрат в сталі, в третьому – разом механічні і додаткові втрати, і ще втрати обмотки якоря (втрати в сталі по причині незначної величини в режимі короткого замикання можна не враховувати).

Калориметричний метод більш трудоемкий, ніж метод самогальмування,

тому що він дає змогу отримати правильні результати при сталому тепловому процесі, на що витрачається досить значний час. Метод полягає у вимірюванні втрат, що виносяться з машини всіма охолоджуючими середовищами. Щоб визначити втрати, вимірюють витрату охолоджуючих середовищ і підвищення їх температури при проходженні через випробувану машину, що знаходиться в практично сталому тепловому стані, або порівнянням нагрівання охолоджуючих середовищ при проходженні через ЕМ і через пристрій, в якому виділяється відома потужність (якщо конструкція випробуваної машини не допускає вимір витрати охолоджуючих середовищ).

При використанні калориметричного способу проводиться три досліді при номінальній частоті обертання: з збудженою машиною – для визначення механічних втрат при розімкнутій обмотці якоря і номінальною напругою на ній, щоб визначити суму втрат в сталі, механічні втрати і втрати на порушення при струмі збудження холостого ходу; із замкнутою коротко обмоткою якоря при номінальному струмі якоря, щоб визначити суму механічних втрат, втрат в обмотці якоря, втрат на порушення при струмі збудження короткого замикання і додаткових втрат. Останній дослід проводиться для обрахування основних втрат в обмотці якоря і додаткових втрат в СД потужністю понад 100 кВА. До основного недоліку можна віднести високу трудомісткість проведення дослідів.

2 ІДЕНТИФІКАЦІЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПАРАМЕТРІВ ДВИГУНІВ ЗМІННОГО СТРУМУ

2.1 Визначення електромагнітних параметрів по еквівалентних схемах заміщення.

Схеми заміщення (СЗ) є зручним і широко поширеним засобом аналізу сталих режимів роботи синхронних і асинхронних машин. Досягнутий в теорії електричних машин рівень узагальнень дає можливість побудови для машин різного типу єдиної універсальної схеми заміщення. Для ЕД можлива, зокрема, уніфікація на базі схеми заміщення АД, виділення в якій активних і індуктивних параметрів статора, контуру, що намагнічує і ротора добре узгоджується із структурою схеми заміщення магнітного кола синхронного двигуна [4].

В уніфікованій схемі заміщення (додаток В), придатній для електродвигунів змінного струму, ротор представляється еквівалентними активними R_{21}, R_{22} і індуктивними X_{21}, X_{22} елементами, утворюючими два паралельні ланцюги. Для синхронного режиму СД опору одній з гілок визначаються наявністю збудження, а інший – лише його явнополюсністю. За відсутності збудження СД, а також для гістерезисних і асинхронних електродвигунів в схемах заміщення присутня лише одна гілка ротора з опорами R_2 і X_2 . Контур, що намагнічує, представлений в схемі заміщення індуктивним опором ланцюга намагнічення $X_\mu(\nu)$, а введення в нього відповідно до поняття комплексної магнітної проникності активного опору $R_\mu(\nu)$ дозволяє достатньо точно врахувати також і втрати в сталі статора, що при звичайному аналізі двигунів змінного струму викликає певні ускладнення. Конкретні вирази для опорів електричної схеми заміщення визначаються типом електродвигуна, залежать в загальному випадку від частоти живлення ν , а для ротора – і від характеристичного параметра навантаження ϑ . Як останнє для АД виступає ковзання s_ν , для СД і

синхронних реактивних двигунів – звичайно просторовий кут θ_1 між векторами е.р.с. в повітряному зазорі $\dot{E}_1$ і е.р.с. холостого ходу $\dot{E}_0$.

Індуктор явнополусної синхронної машини (СМ) має особливу властивість - магнітну несиметрію. Це пов'язано з тим, що існує значний міжполусний простір і магнітний опір потоку, що діє по напрямку вісі міжполусного простору, набагато більше магнітного опору потоку, що діє по подовжній вісі. Тому однакова по величині сила якоря при її дії по подовжній вісі, що намагнічує, створює більший магнітний потік чим при дії по поперечній вісі. Крім того, як ротор явнополусної, так і ротор неявнополусної машини мають також електричну несиметрію, оскільки їх обмотки збудження розташовані тільки по подовжній вісі d ; тобто створюють потік діючий по вісі d , і самі зчіплюються тільки з потоком якоря, діючим по цій же вісі. Електрична несиметрія індукторів СМ істотним чином виявляється при несиметричних і перехідних режимах їх роботи.

Зважаючи на несиметричний пристрій індуктора маємо розглядати реакцію якоря по обох осях окремо.

Засіб двох реакцій базується на принципі накладення, при якому магнітні потоки, діючі по поперечній вісі, не впливають на величину потоків, діючих по подовжній вісі, та навпаки. Враховуючи певну насиченість ділянок магнітного кола, це припущення не зовсім коректно. Проте облік впливу насичення дуже складений, а певні корективи можуть бути внесені додатково.

Якби ротор СМ володів магнітною і електричною симетрією, то робота цієї машини в асинхронному режимі без збудження нічим не відрізнялася б від роботи нормальної асинхронної машини. Замість однієї схеми заміщення для симетричної асинхронної машини (АМ), для СМ одержуємо дві схеми (додаток В) – одну для подовжньої і іншу для поперечної вісі. За наявності заспокійливої (або демпферної) обмотки в схемі для подовжньої вісі двофазної синхронної машини є два вторинні ланцюги, як при асинхронному

режимі у двохклітинного АД, а в схемі для поперечної вісі – один вторинний ланцюг [2, 8, 22].

В додатку В приведені наступні позначення:

R_1, X_1 – активний і індуктивний опори розсіювання обмотки статора;

X_{ad}, X_{aq} – індуктивні опори взаємоіндукції контурів по подовжній і поперечній осях;

R_f, X_f – активний опір і індуктивний опір розсіювання обмотки збудження;

R_{kd}, R_{kq} – активні опори демпферних контурів по подовжній і поперечній осях;

X_{kd}, X_{kq} – індуктивні опори розсіювання демпферних контурів по подовжній і поперечній осях.

Частотні методи визначення параметрів еквівалентних СЗ ЕД змінного струму різноманітні і використовуються в інженерній практиці достатньо широко [6, 25], хоча їх не можна віднести до повністю вивченим і застосовним в будь-яких умовах. Найбільше розповсюдження вони отримали при дослідженні крупних ЕМ, синхронних двигунів і генераторів, а також АД спеціальних конструкцій (глибокопазних з подвійною білячою кліткою і ін.). Для двигунів масових серій застосування згаданих методів утруднено на увазі обмеженого матеріалу, одержуваного при живленні ЕМ напругою з різними значеннями частоти.

Більшість найпоширеніших існуючих методів, не зважаючи на спосіб побудови випробувального режиму і спосіб обробки досліджених даних, базується, по суті, на аналізі перехідних процесів виникаючих в результаті зміни електромагнітного стану ЕМ [6, 25]. Як окремий клас можна виділити методи, які реалізовані при періодичних гармонійних або полігармонійних діях в обмотках машин та при аналізі частотних характеристик (залежності параметрів від частоти дії). Перші з вказаних методів здійснюються при дії в певний момент часу синусоїдальною напругою тільки однієї частоти і аналізі зміни опорів або провідностей при зміні частоти в певному діапазоні [9]. Розвиток і підвищення ефективності частотних методів оцінки параметрів

двигунів змінного струму може бути досягнутий шляхом аналізу схем заміщення при полігармонійному живленні обмоток статора. Такий підхід принципово відрізняється від різночастотного живлення обмоток машини.

При розгляді частотних методів, реалізованих при полігармонійному живленні, особливу увагу слід приділити залежності втрат в сталі і опору обмоток ротора від частоти дії. Коректність віддзеркалення загальноприйнятими СЗ процесів, що відбуваються в ЕД змінного струму, на сьогоднішній день викликає сумніви. При цьому, неврахування в цих СЗ деяких фізичних явищ (втрат в сталі, вихрових струмів і т.д.) спричиняє за собою перенесення ефектів, що викликаються цими чинниками, в інші елементи схеми заміщення, і, як наслідок, викликає значні погрішності при розрахунках.

Достатньо часто опором контуру намагнічення нехтують, хоча навіть в двигунах, що зійшли з конвеєра, вони доходять до 30÷40 % від загальних нагрівальних втрат. У двигунах, які пройшли ремонт традиційними способами видалення обмоток, втрати значно зростають, іноді в 2÷3 рази [7]. Зневага втратами в сталі, особливо для ЕМ після ремонту, є неприпустимою.

Загальні втрати в сталі можна представити як суму основних ($P_{c\hat{}}$) і додаткових ($P_{доб}$) втрат [8]:

$$P_c = P_{c.o} + P_{доб}. \quad (2.1)$$

Основні втрати складаються з втрат на гістерезис і вихрові струми [6]:

$$P_{c.o} = P_\Gamma + P_v.$$

Для втрат на гістерезис можна виділити наступні співвідношення.

Згідно дослідів Штейнметца:

$$P_\Gamma = \eta \cdot f \cdot B^{1,6},$$

де η – постійна величина для даного типу сталі; f – частота; B – максимальне значення індукції.

Кращий збіг з дійсністю дає формула Ріхтера для питомих втрат [Вт/кг]:

$$P_r = a \cdot f \cdot B + b \cdot f \cdot B^2, \quad (2.2)$$

де a і b – постійні коефіцієнти для даного типу сталі.

При великих значеннях індукції в співвідношенні (2.2) можна нехтувати першим членом і з достатньою точністю описати шукану величину виразом:

$$P_r = \sigma_r \cdot f \cdot B^2, \quad (2.3)$$

де σ_r – постійна матеріалу.

Втрати на вихрові струми викликаються струмами, індукованими при його перемагнічуванні. Найбільш об'єктивно відображає значення втрат на вихрові струми співвідношення, представлене в [7] і виведене з урахуванням фізики процесу виникнення вихрових струмів. Згідно цьому співвідношенню, питомі втрати на вихрові струми (Вт/м³) рівні:

$$P_v = \sigma_v \cdot f^2 \cdot B^2. \quad (2.4)$$

На практиці часто користуються повним значенням втрат в сталі, не розділяючи його на складові, оскільки інформації про величину загальних втрат достатньо для розрахунку більшості досліджуваних режимів роботи електродвигунів. Сумарні втрати в сталі даної частини машини при будь-якій частоті і будь-якому значенні індукції можуть бути виражений в наступному вигляді:

$$P_c = P_{[1/50]} \cdot \left(\frac{f}{50} \right)^\beta \cdot B^2 \cdot G_c, \quad (2.5)$$

де $P_{[1/50]}$ – питомі втрати при $B=1$ Тл, $f=50$ Гц; f – частота перемагнічування сталі; β – показник ступеня, рівний 1,5 для слаболегованих сталей, для високолегованих сталей $\beta=1,2 \div 1,3$; G_c – маса даної частини машини; B – розрахункова індукція в даній частині машини.

В найпростішому випадку схему заміщення можна представити у формі лінійного ланцюга, причому опір, еквівалентний втратам в сталі, також приймається постійним. Такий підхід не спрощує, а ускладнює аналіз, оскільки два лінійні ланцюги (контур намагнічення і вторинний ланцюг) розділити, тобто визначити значення опорів обох ланцюгів при $s=1.0$, практично неможливо.

Таким чином для розділення параметрів повинні бути введені відповідні лінійні опори в одному або обох контурах. Причому параметри цих опорів повинні залежати від частоти протікаючих через них струмів. Тому при аналізі еквівалентних схем заміщення облік втрат в сталі може бути здійснений шляхом переходу залежності втрат від індукції в зазорі до залежності від струму намагнічення:

$$B^2 \sim \frac{H^2}{\mu^2} \sim \frac{F^2}{\mu^2} \sim \frac{I_\mu^2}{\mu^2}$$

Якщо припустити, що робота випробовуваного двигуна змінного струму в режимі короткого замикання і холостого ходу здійснюється на лінійній ділянці кривої намагнічення, тобто $\mu = \text{const}$, то втрати в сталі можна представити залежністю:

$$P_c(\nu) = R_\mu(\nu) \cdot I_{\mu\nu}^2, \quad (2.6)$$

а опір контура намагнічення – залежністю:

$$R_\mu(\nu) = R_\mu \cdot \nu^\alpha, \quad (2.7)$$

де R_μ – опір втрат при номінальній частоті; ν – відносна частота; $\alpha=1,5-2,0$ – постійний коефіцієнт, залежний від стану пакету сталі.

При роботі електричних машин змінного струму від статичних перетворювачів істотний вплив на режими роботи надає ефект витіснення струму в обмотках ротора. В літературі звичайно приводяться відомості від залежності опору ротора від ковзання в глибокопазних двигунах [8]. При аналізі роботи АД і СД загальнопромислового застосування від

перетворювачів частоти це питання звичайно ігнорується [1]. Зневага ефектом витіснення струму в обмотках ротора при ідентифікації параметрів ЕД змінного струму з використанням полігармонічної дії на обмотки статора викликає значні погрішності.

Результат аналітичного [1, 21] і експериментального (додаток Д) аналізу ефекту витіснення струму в обмотках ротора показав, що збільшення приведенного значення опору обмоток ротора на аналізованих гармоніках (1, 3...21) для двигунів практично всіх діапазонів потужностей спрощений виражається квадратичною залежністю від частоти струму ротора:

$$R_2(\nu) = R_{20} \cdot (1 + \beta \cdot \nu^2), \quad (2.8)$$

де R_{20} – опір при частоті рівної нулю; β – коефіцієнт, що визначає вплив ефекту витіснення.

Вказана залежність справедлива для двигунів зі всією обмоткою статора і відкритими або напівзакритими пазами на роторі прямокутної, круглої, трапецеїдальної і т.д. форм.

Результати математичного моделювання еквівалентних схем заміщення показують, що ефект витіснення струму в роторі з похибкою, що не перевищує 11% для двигунів загальнопромислового застосування, може бути визначений експериментально при $s=1.0$ шляхом апроксимації різниці речовинної частини повного комплексного опору на затисках двигуна і активного опору обмотки статора $R_{\Sigma\nu} - R_1$, залежністю (2.8). Залежність

похибки визначення ефекту витіснення струму в роторі $\delta = 1 - \frac{R_{\Sigma\nu} - R_1}{R_{20} \cdot (1 + \beta \cdot \nu^2)}$

(рис 2.1, 2.2) від номера гармоніки будувалася застосуванням математичної моделі для схем заміщення при різних коефіцієнтах α . При цьому для двигуна 4АП1004, в діапазоні від 1 до 25 гармоніки мережної частоти, погрішність не перевищувала 4% (рис.2.1), а для модельних АД з типовими співвідношеннями параметрів схеми заміщення – 11% (рис.2.2) при варіації співвідношень між параметрами.

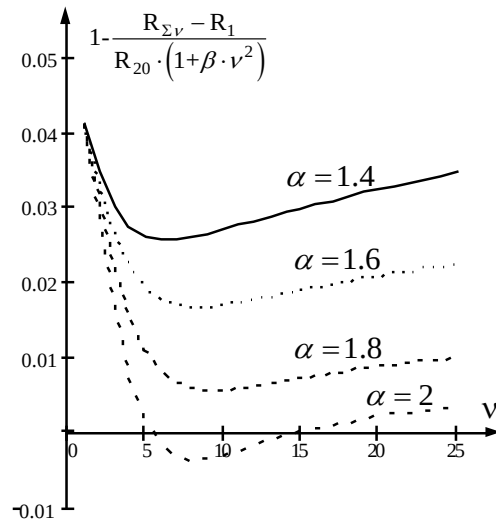


Рисунок 2.1. Графіки погрішності визначення ефекту витіснення струму в обмотках ротора двигуна 4АП1004 ($P_n=4$ кВт, $I_n=8,7$ А, $n_n=1420$ об/хв)

По усередненій кривій залежності збільшення опору обмотки ротора від частоти струму статора проводилася перевірка адекватності регресійної моделі (2.8). Модель $y(x) = \beta_0 + \beta_1 x^2$ лінійна по параметрах. Припускаючи, що залишки моделі мають, принаймні, асимптотично нормальний закон розподілу, то, через теорему Гауса-Маркова, як ефективні точкові оцінки коефіцієнтів $b_0 \approx \beta_0$, $b_1 \approx \beta_1$, доцільно узяти МНК - оцінки. Вектор МНК - оцінок в матричній формі матиме вигляд:

$$b = (X^T X)^{-1} X^T Y \quad (2.9)$$

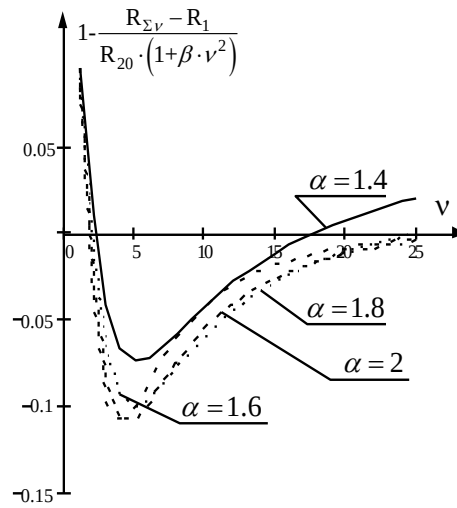


Рисунок 2.2. Графіки погрішності визначення ефекту витіснення струму в обмотках ротора модельного двигуна

Перевірка значущості оцінок коефіцієнтів проводиться шляхом побудови α -них інтервалів для кожного коефіцієнта:

$$b_i \pm \Delta b_i, \Delta b_i = t(1 - \frac{\alpha}{2}; n - p) \cdot s_i, \quad (2.10)$$

де, $\alpha = 1 - \gamma$, Δb_i – стандартна помилка i -го коефіцієнта; n – об'єм вибірки;

$p = 2$ – кількість коефіцієнтів моделі; $t(1 - \frac{\alpha}{2}; n - p)$ – квантиль розподілу

Стюдента; s_i – середньоквадратичне відхилення коефіцієнтів моделі.

Як оцінка s_i використовуються корені квадратні діагональних елементів матриці

$$\left(X^T \cdot X \right)^{-1} \cdot \left(Y^T \cdot Y - b^T \cdot X^T \cdot Y \right) \cdot \frac{1}{n - p}. \quad (2.11)$$

Для оцінки адекватності моделі розраховується коефіцієнт детермінації:

$$R^2 := \frac{\left(b^T \cdot X^T \cdot Y - \frac{\left(\sum Y \right)^2}{n} \right)}{\left(Y^T \cdot Y - \frac{\left(\sum Y \right)^2}{n} \right)}. \quad (2.12)$$

Результати розрахунків по формулах (2.9)–(2.12) дали наступні результати.

Рівняння моделі має вигляд: $y = 2,15427 + 0,180972 \cdot x^2$.

Коефіцієнт $R^2 = 99,0391\%$ ($p = 0.0000$)

Матриця дисперсій оцінок коефіцієнтів:

$$\left(X^T X \right)^{-1} \left(Y^T Y - b^T X^T Y \right) \frac{1}{n - p} = \begin{pmatrix} 0.128306 & -1.624123 \times 10^{-3} \\ -1.624123 \times 10^{-3} & 3.530702 \times 10^{-5} \end{pmatrix}$$

Часто ефект витіснення струму в роторі враховують введенням в схему заміщення додаткових контурів, включених паралельно основному робочому контуру ротора [18]. При ідентифікації параметрів такий спосіб обліку залежності опору ротора від частоти володіє низькою інформативністю і ускладнює визначення електромагнітних параметрів.

Таким чином, підвищення точності ідентифікації параметрів при полігармонійному живленні може бути досягнутий шляхом введення коефіцієнтів і показників, що враховують залежність втрат в сталі від частоти і ефекту витіснення струму в роторному ланцюзі (додаток Д).

2.2 Визначення параметрів схем заміщення з використанням дослідів загасання струму в обмотці статора.

Існує метод визначення параметрів АД по кривій загасання напруги статора, викликаного затухаючими струмами ротора, при відключенні обмотки статора від мережі у момент переходу струму статора через нуль (рис.2.3). При цьому відключення обмотки статора здійснюється за допомогою вентиля однофазного тиристорного регулятора напруги. До недоліків даного методу можна віднести: необхідність в регульованому джерелі змінної напруги; визначення індуктивності розсіяння статора здійснюється методом видаленого ротора; низький рівень затухаючої напруги, який практично не залежить від величини струму статора. Це спричиняє за собою великі погрішності при апроксимації кривої експоненціальним рядом унаслідок зашумленості сигналу (при

багатоконтурному роторі цей недолік в більшій мірі відноситься до основного робочого контуру).

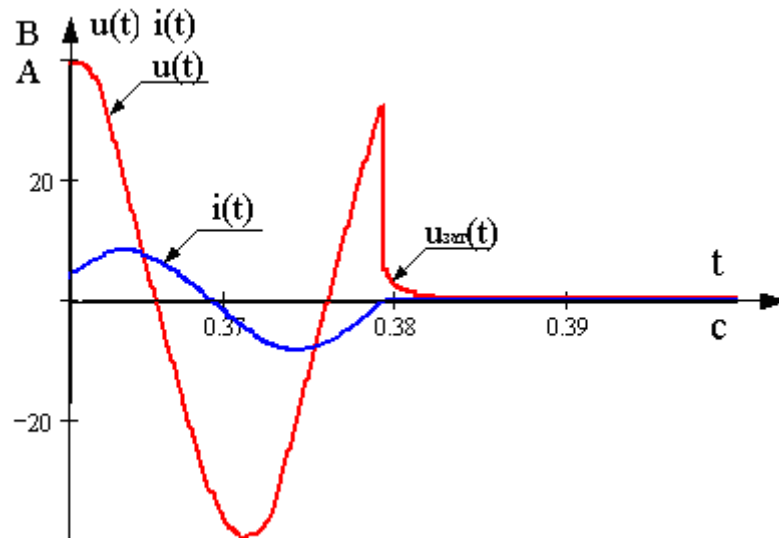


Рисунок 2.3. Осцилограми дослідження загасання напруги при відключенні обмотки статора від мережі

Дослід загасання наведеної напруги практично можна використовувати для визначення постійних часу контурів багатоконтурного ротора (крім основного). На рис. 2.4 показані експериментальна і апроксимаційні криві затухаючої напруги в безструмову паузу при роботі однофазного ТРН ($\alpha=100^\circ$) на фазну обмотку асинхронного двигуна 4АП1004 ($P_H=4$ кВт, $U_H=380$ В, $I_H=8,7$ А, $n_H=1420$ об/хв). В цілях виключення внесення спотворень в криву загасання напруги RC-ланцюга, захищаючи тиристори від перенапружень, повинні бути відключені. Експериментальна крива апроксимується сумою двох експонент $A_{21} \cdot e^{-t/\tau_{21}}$ і $A_{22} \cdot e^{-t/\tau_{22}}$ при цьому були знайдені постійні часу контурів ротора: з

$$\tau_{21} = \frac{L_{21} + L_\mu}{R_{21}} = 7,75 \cdot 10^{-4} \text{ с}; \quad \tau_{22} = \frac{L_{22} + L_\mu}{R_{22}} = 9,95 \cdot 10^{-5} \text{ с},$$

де, L_{21} , R_{21} , L_{22} , R_{22} – індуктивності розсіювання і активні опори контурів багатоконтурного ротора (приведені значення);

L_μ – індуктивність контуру намагнічення.

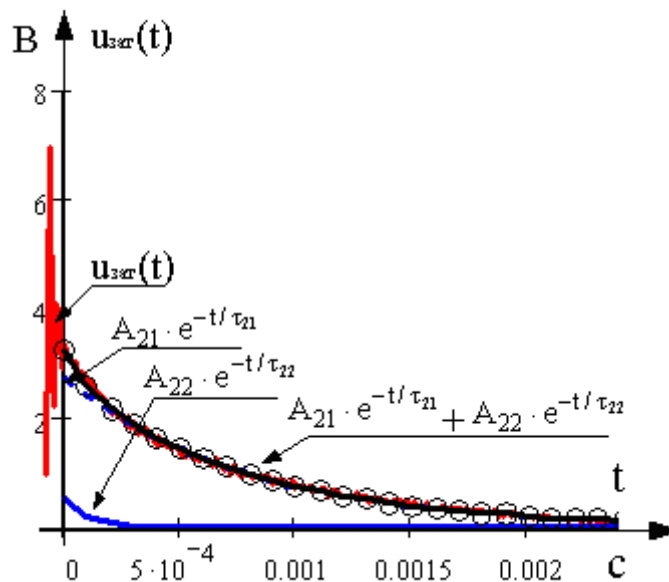


Рисунок 2.4. Експериментальна і криві загасання апроксимацій напруги в безструмову паузу роботи ТРН

Недоліків, властивих описаним методам, позбавлений пропонований метод визначення постійних часу і параметрів машин змінного струму по кривій загасання струму в обмотках. Схема проведення експерименту показана на рис. 2.5. При проведенні дослідів тиристор VS2 відключений, VS3 – працює в режимі діода, VS1 працює з нульовим кутом управління (при використанні зниженої напруги захисні RC-ланцюжки можуть бути відключені) або з кутом управління, який забезпечує необхідне струмове завантаження обмоток $I_{\phi} \leq I_n$.

На рис. 2.6 показані тимчасові діаграми роботи наведеної схеми. Після відключення схеми від джерела живлення тиристором VS1 струм обмотки статора замикається через шунтуючий тиристор VS3, і затухає по кривій яку можна апроксимувати сумою двох експонент:

$$i_1(t) = \frac{U}{R_1} \cdot \left[1 + A_1 \cdot e^{-t/T_1} - A_2 \cdot e^{-t/T_2} \right], \quad (2.13)$$

де U – напруга на затисках обмотки (падіння напруги на тиристорі VS3 і датчику струму);

R_1 – активний опір обмотки статора, для вказаного двигуна, заміряне методом амперметра-вольтметра на постійному струмі $R_1=1,35$ Ом;

T_1, T_2 – постійні часу загасання струму:

$$\frac{1}{T_{1,2}} = \frac{1}{2} \left(\frac{R_1(L_\mu + L_2) + R_2(L_1 + L_\mu)}{L_1 \cdot L_2 + L_1 \cdot L_\mu + L_\mu \cdot L_2} \right) \mp \frac{1}{2} \left(\frac{\sqrt{[R_1(L_\mu + L_2) + R_2(L_1 + L_\mu)]^2 + 4L_\mu R_1 R_2}}{L_1 \cdot L_2 + L_1 \cdot L_\mu + L_\mu \cdot L_2} \right), \quad (2.14)$$

A_1, A_2 – коефіцієнти при експонентах, визначаються з початкових умов процесу загасання струму.

Для випадку здійснення режиму загасання струмів при живленні від тиристорного перетворювача початковими умовами даного перехідного процесу виступають кінцеві умови перехідних процесів струмів при синусоїдальній напрузі живлення. При цьому вирази для коефіцієнтів при експонентах містять тригонометричні функції і будуть дуже громіздкими, що робить скрутним застосування цих виразів для визначення параметрів схем заміщення. Крім того проведений аналіз впливу частоти дискретизації сигналу струму статора на точність отримання коефіцієнтів апроксимацій виразу оригіналу струму статора показав що коефіцієнти при експонентах визначаються із значними погрішностями навіть при апроксимації сигналів, отриманих на математичній моделі. Тому використання коефіцієнтів при експонентах A_1 і A_2 для визначення параметрів не рекомендується.

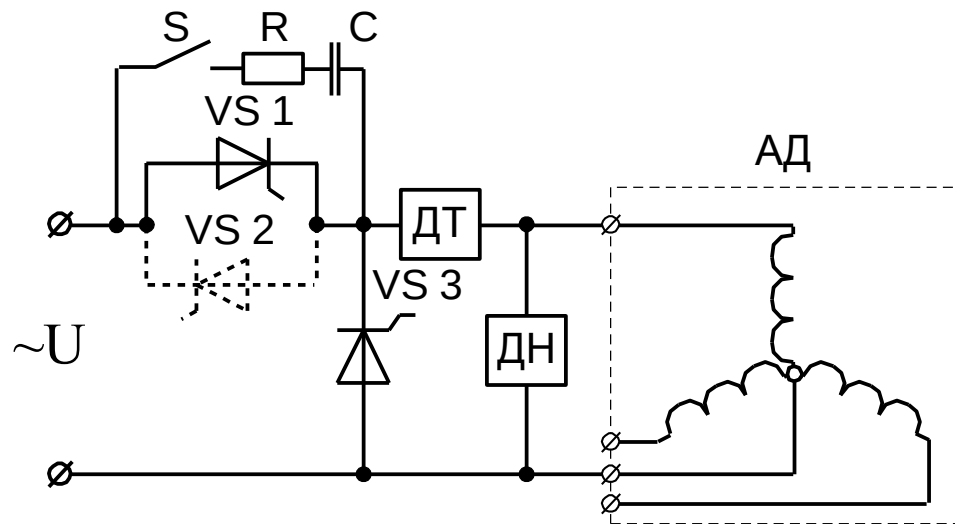


Рисунок 2.5. Схема проведення експерименту загасання струму в обмотці статора

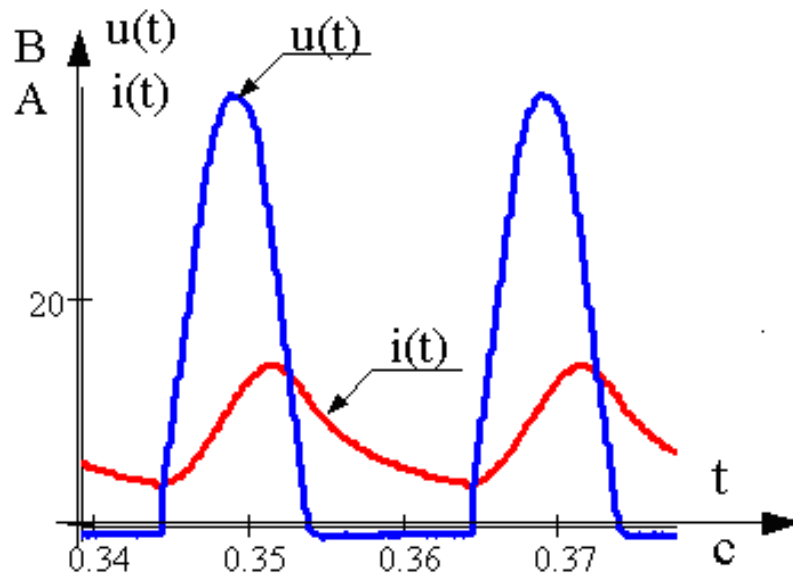


Рисунок 2.6. Осцилограми роботи схеми проведення експерименту

Для двигуна 4АП1004 шляхом апроксимації експериментальної кривої загасання струму в обмотці статора були знайдені коефіцієнти: $T_1=0,12643$, $T_2=0,005666$, $A_1=2,386$, $A_2=8,07$.

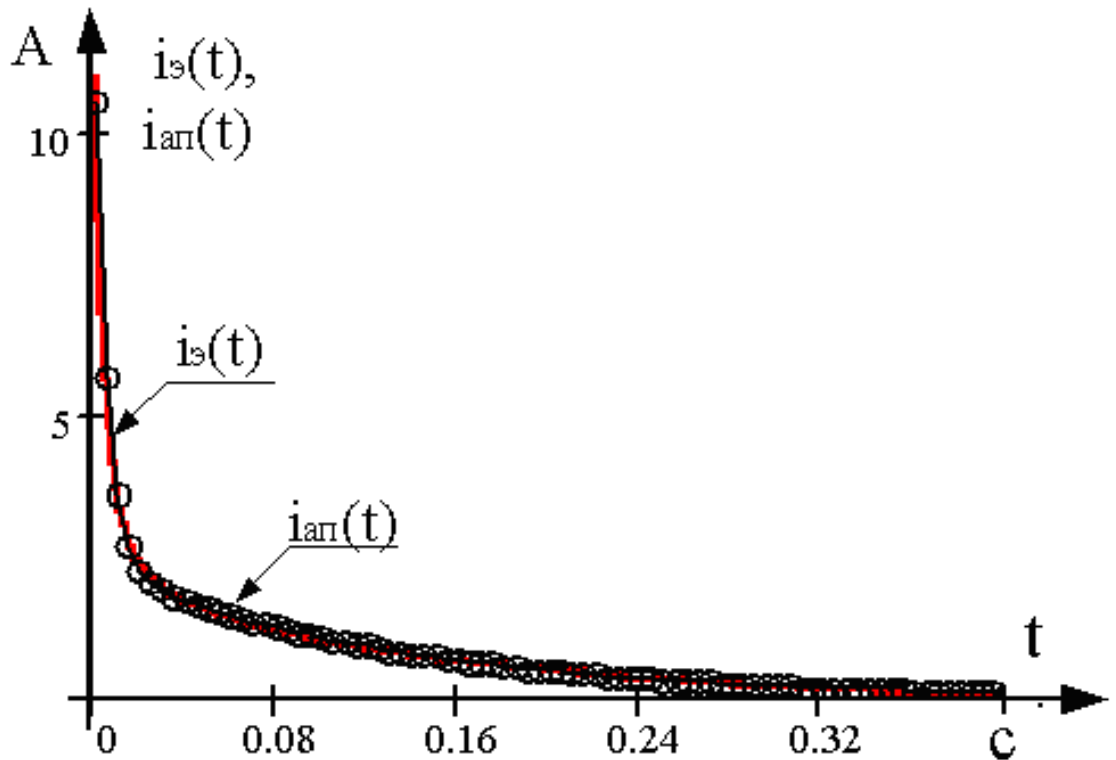


Рисунок 2.7. Експериментальне і апроксимація криві загасання струму в обмотці статора

Використання вентильних схем з шунтувальним діодом отримує розвиток при аналізі перехідних процесів струмів і напруг за середнім значенням за період повторюваності (рис. 2.8–2.9). При цьому в квазісталому режимі середнє значення струму намагнічування за період дорівнюватиме постійної складової (середнього значення) струму статора. Якщо аналізувати не миттєві значення струму і напруги, а зміну середніх значень за період, то крива зміни середнього значення струму статора за період буде описуватися відомим виразом для впливу на обмотку статора ступінчастою напругою (рис. 2.9) [28]:

$$i_{1cp}(t) = \frac{U_{cp}}{r_1} \left(\frac{R_1/L_{\Sigma} + p_2}{p_1 - p_2} e^{p_1 t} - \frac{R_1/L_{\Sigma} + p_1}{p_1 - p_2} e^{p_2 t} + 1 \right), \quad (2.15)$$

де $L_{\Sigma} = L_1 + \frac{L_2 \cdot L_{\mu}}{L_2 + L_{\mu}}$ – еквівалентна індуктивність, для синхронних машин – перехідна індуктивність;

$$\tau_1 = \frac{L_1 + L_\mu}{R_1}, \quad \tau_2 = \frac{L_2 + L_\mu}{R_2}, \quad L_K = \frac{L_\mu}{\sqrt{(L_1 + L_\mu) \cdot (L_2 + L_\mu)}};$$

$$p_{1,2} = \frac{-1}{2 \cdot [1 - L_K^2]} \cdot \left[\left[\frac{1}{\tau_1} + \frac{1}{\tau_2} \right] \pm \sqrt{\left[\frac{1}{\tau_1} + \frac{1}{\tau_2} \right]^2 - \frac{4 \cdot [1 - L_K^2]}{\tau_1 \cdot \tau_2}} \right] \quad \text{— корі}$$

характеристичного рівняння.

Істотною перевагою зазначеного підходу є простота джерела тестових впливів, тому що відпадає необхідність у джерелі постійної напруги.

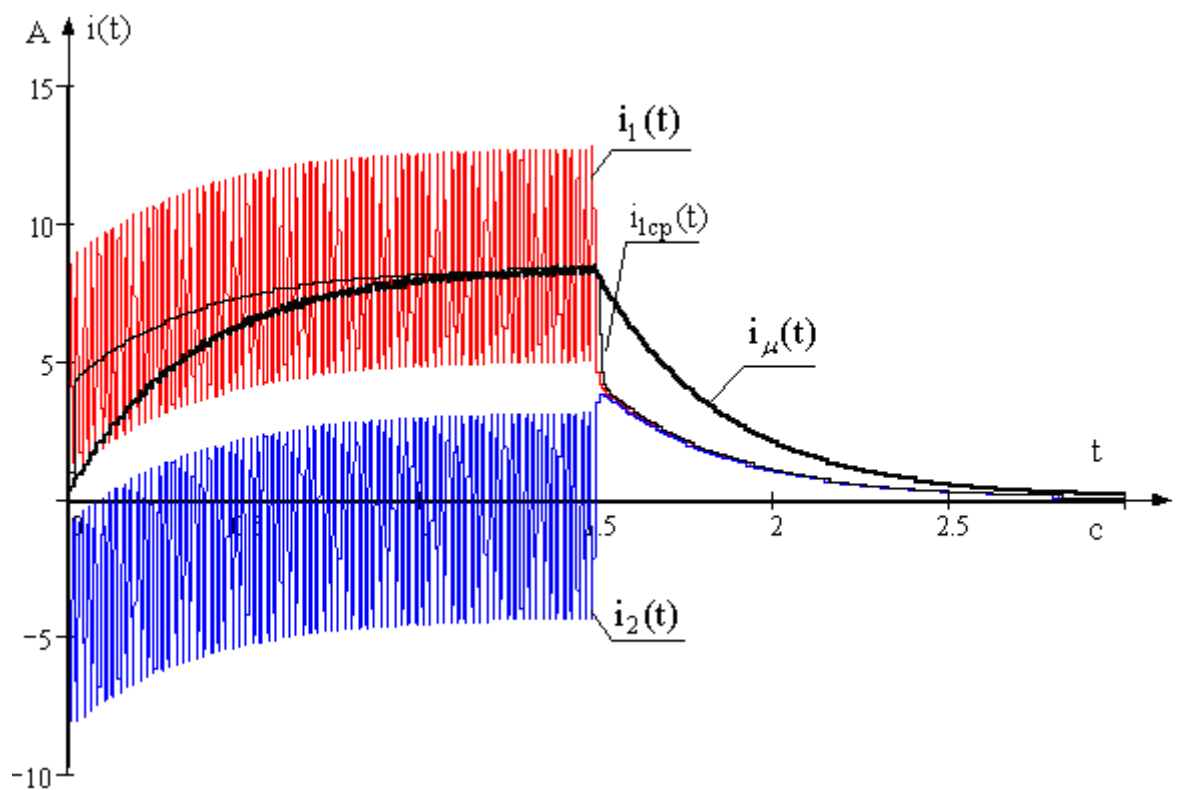


Рисунок 2.8. Осцилограми струмів статора, ротора і контуру намагнічування

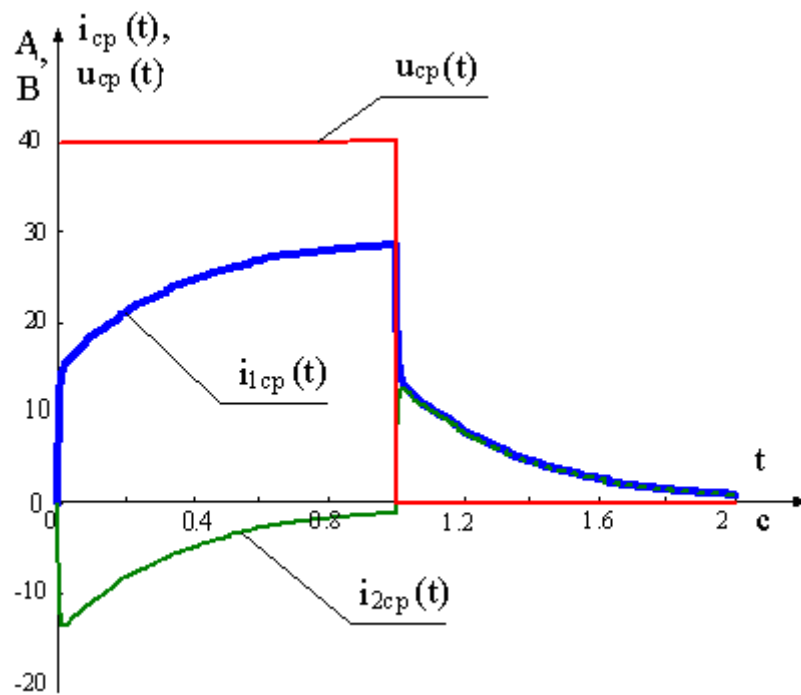


Рисунок 2.9. Середні за період значення напруги, струмів статора і ротора

При однакових параметрах контурів статора і ротора струм намагнічування після загасання експоненціальної ділянки кривої струму з малою постійною часу (проміжок часу $t_{\text{заг}} \approx 2$ (рис.2.10)) буде рівний подвійному значенню струму статора. У разі відмінності параметрів обмоток статора і ротора, при відомому струмі статора і параметрах контурів, можливо визначення струму ротора як $i_2(t) = \frac{Z_1}{Z_2} \cdot i_1(t)$. Відмінність постійної

часу загасання струму ротора можна не враховувати, оскільки вона в основному визначається параметрами контуру намагнічування. Для двигуна 4АП1004 з параметрами схеми заміщення, приведеними в (табл. 2.1), на математичній моделі струм намагнічування визначався як $i_{\mu}(t) = 2 \cdot i_1(t)$ з погрешністю 1,5%.

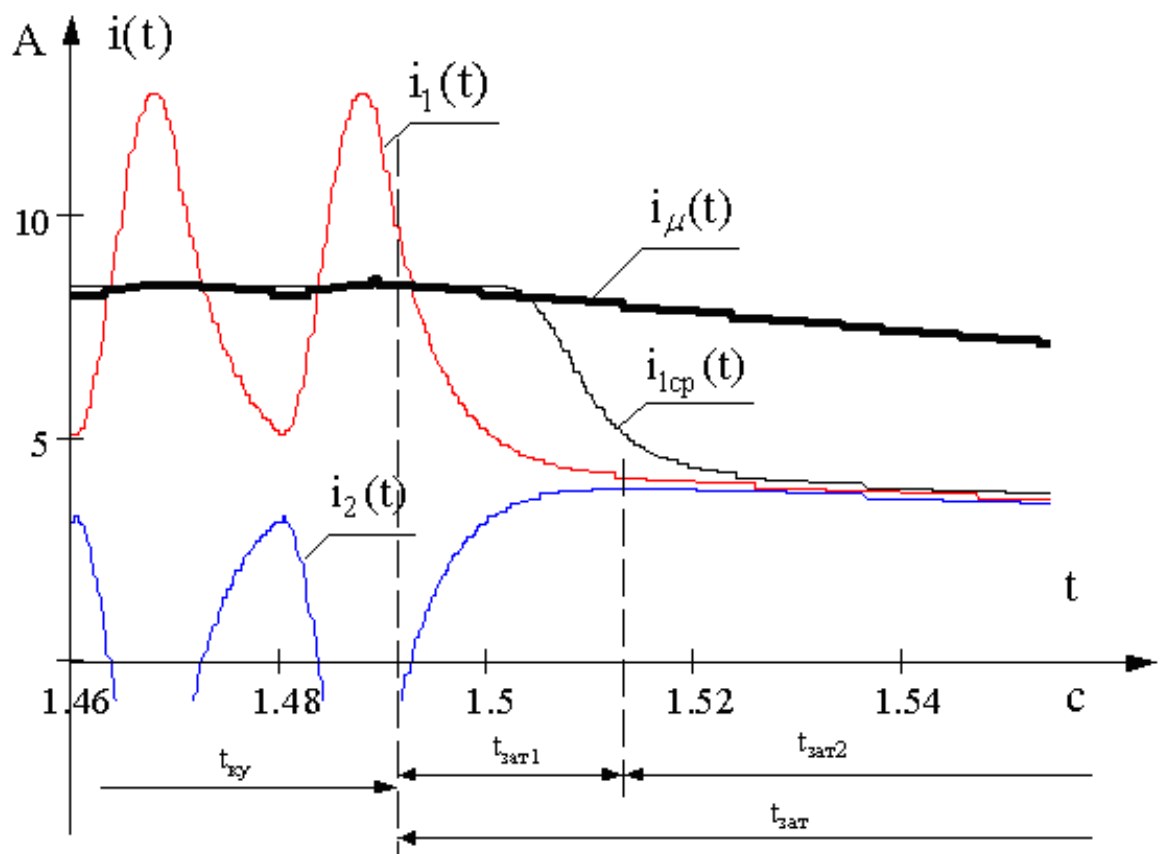


Рисунок 2.10. Осцилограми струмів статора, ротора і контуру намагнічування на початковій ділянці загасання струмів

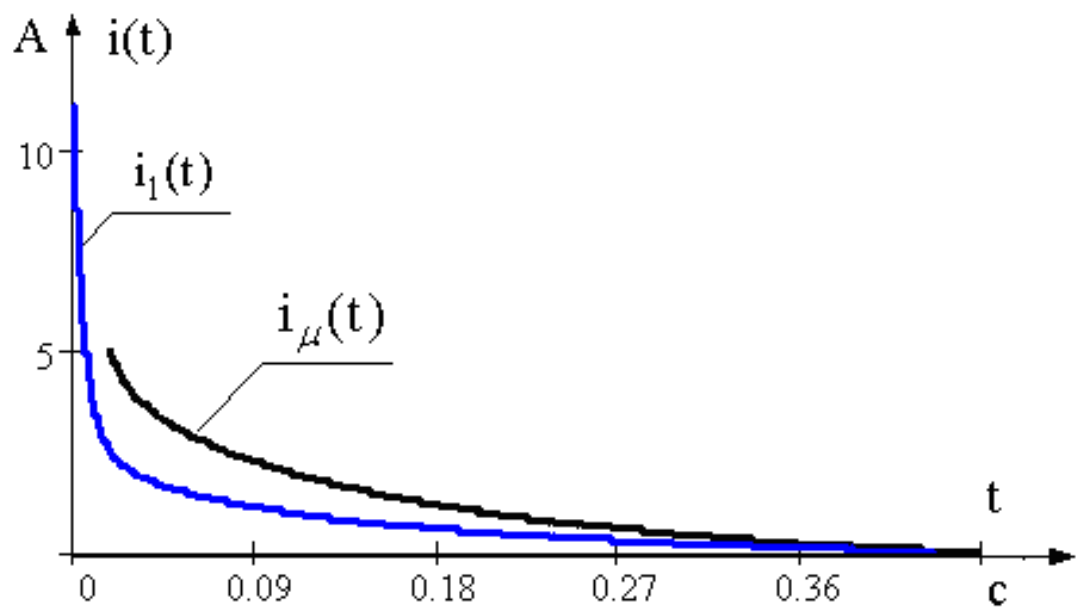


Рисунок 2.11. До експериментального визначення струму намагнічення в досліді загасання струму статора

Визначення струму намагнічування робить можливим визначення впливу насичення магнітної системи по шляху протікання основного магнітного потоку. Зміна магнітної проникності сталі при зміні струму намагнічування в досліді загасання струмів показана на (рис.2.12).

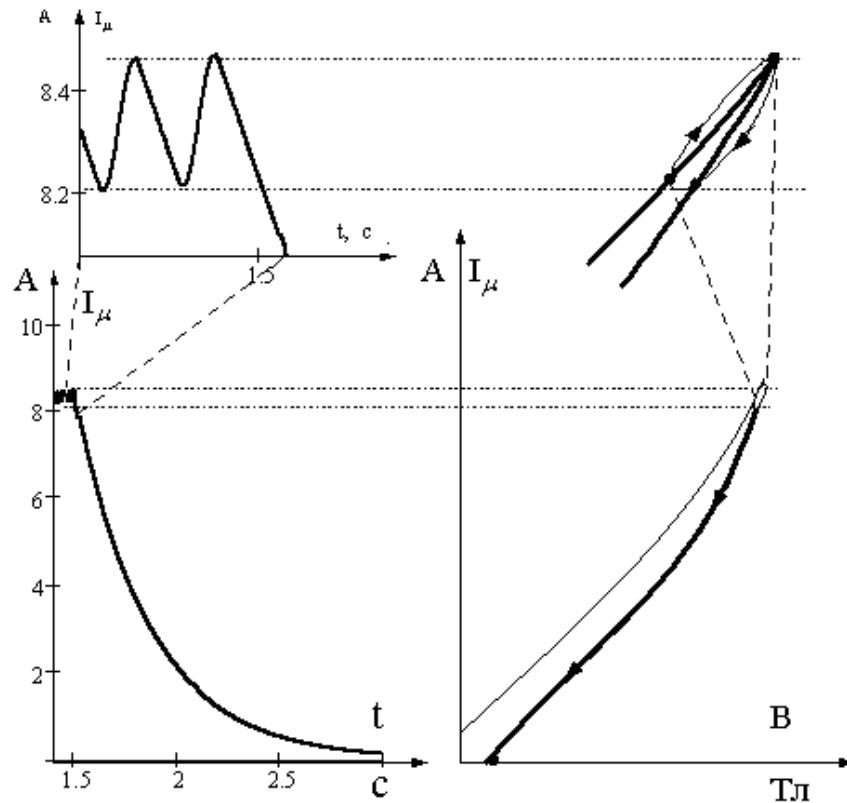


Рисунок 2.12. Зміна магнітної проникності сталі при зміні струму намагнічування

Використовуючи знайдену криву струму намагнічування можливо визначення кривої намагнічування $\psi_\mu = f(I_\mu)$ (рис.2.13) шляхом знаходження потокозчеплення контуру намагнічування, яке визначається у вигляді безперервної функції або в дискретному вигляді як:

$$\psi_\mu(t) = L_\mu(I_\mu) \cdot i_\mu(t) = \int (u_1(t) - i_1(t) \cdot R_1) dt - L_1 i_{1n}, \quad (2.16)$$

$$\psi_{\mu n} = \sum_{j=0}^n \frac{1}{j} (u_{1j} - i_{1j} \cdot R_1) - L_1 i_{1n}.$$

Залежність індуктивності контуру взаємоіндукції від струму намагнічування визначається по наступному виразу:

$$L_{\mu}(I_{\mu}) = \frac{\psi_{\mu}(t)}{i_{\mu}(t)}. \quad (2.17)$$

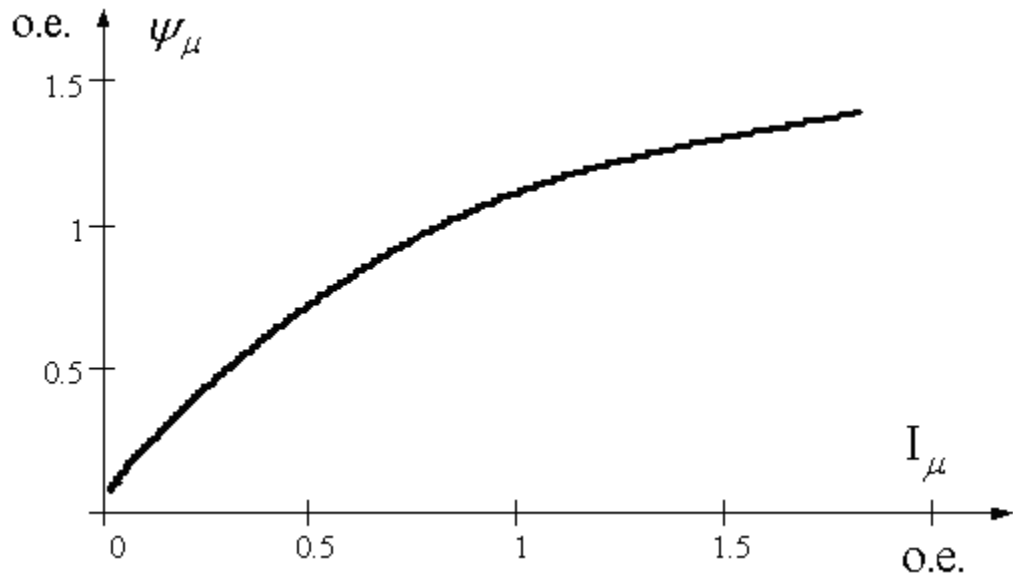


Рисунок 2.13. Ділянка експериментальної кривої намагнічення АД 4АП1004

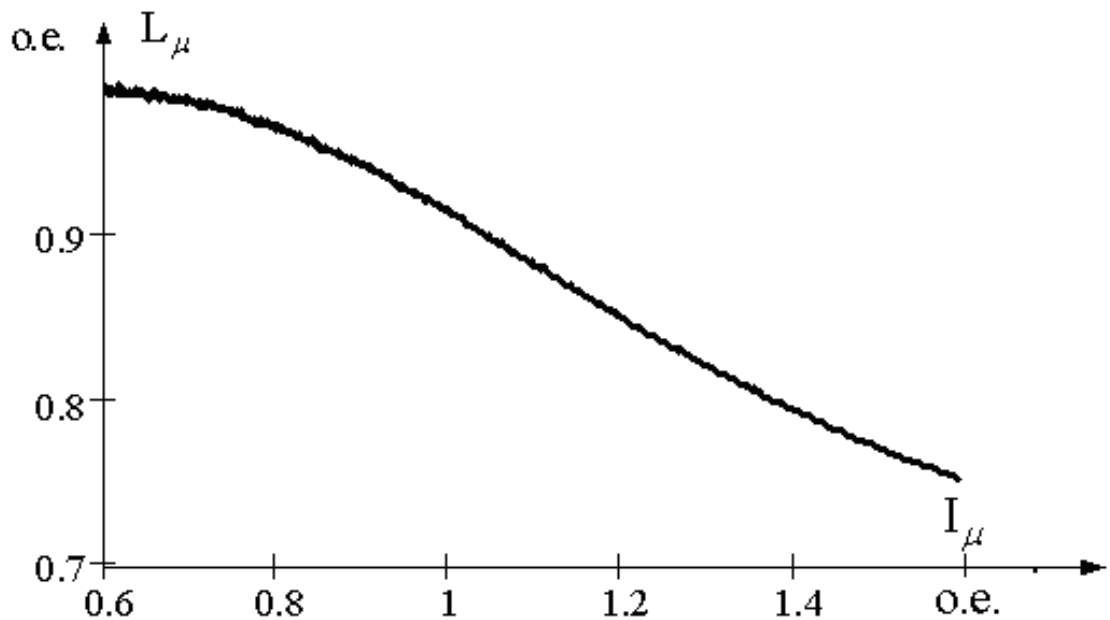


Рисунок 2.14. Експериментальна крива зміни індуктивності контура намагнічення при насиченні двигуна 4АП1004

Слід вказати, що методи визначення параметрів машин змінного струму, що розробляються, вимагають можливості роботи тиристорних регуляторів як в симетричних, так і в неповнофазних режимах роботи (почергова робота тиристорів тільки який-небудь однієї з фаз, робота тиристорів двох фаз від одного джерела синусоїдальної напруги, поперемінна робота тиристорів однієї фази) що легко може бути реалізований при використуванні систем управління на базі мікропроцесорної техніки.

2.3 Визначення еквівалентних індуктивних опорів.

Аналіз ділянок полігармонійних кривих струму і напруги дозволяє отримати додаткові інформативні рівняння для ідентифікації електромагнітних параметрів а також уточнити результати розкладання в гармонійний ряд шляхом визначення реальних фронтів напруги.

Розглянемо процес замикання тиристора. В режимі короткого замикання при нерухомому роторі процеси в одній фазі двигуна описується такими ж диференціальними рівняннями, що і в двообмотувальному трансформаторі [28]:

$$u_1(t) = i_1(t) \cdot R_1 + (L_1 + L_\mu) \frac{di_1(t)}{dt} + L_\mu \frac{di_2(t)}{dt}, \quad (2.18)$$

$$0 = i_2(t) \cdot R_2 + (L_2 + L_\mu) \frac{di_2(t)}{dt} + L_\mu \frac{di_1(t)}{dt}. \quad (2.19)$$

У момент замикання тиристора на затисках фази фіксується стрибок напруги ΔU , викликаний тим, що похідні струмів $i_1(t)$ і $i_2(t)$ у цей момент також зазнають стрибок (рис.2.15). Оскільки можливість фіксації струму $i_2(t)$

, а, отже похідної $\frac{di_2(t)}{dt}$ відсутній, то слід виразити її з рівняння (2.19) і підставити в (2.18), при цьому отримаємо наступну залежність:

$$u_1(t) = i_1(t) \cdot R_1 + L_\Sigma \frac{di_1(t)}{dt} + e(t), \quad (2.20)$$

де: L_Σ – еквівалентна індуктивність схеми заміщення:

$$L_{\Sigma} = L_1 + \frac{L_{\mu} \cdot L_2}{L_{\mu} + L_2}, \quad (2.21)$$

$e(t)$ – е.р.с., наведена струмом вторинного контуру в первинному, що фіксується на затисках фази:

$$e(t) = -\frac{1}{\tau} L_{\mu} i_2(t), \quad (2.22)$$

де: $i_2(t) = I_{\text{нач}} e^{-t/\tau}$ – струм у вторинному контурі після замикання тиристора;

$\tau = \frac{L_{\mu} + L_2}{R_2}$ – постійна часу загасання струму у вторинному контурі.

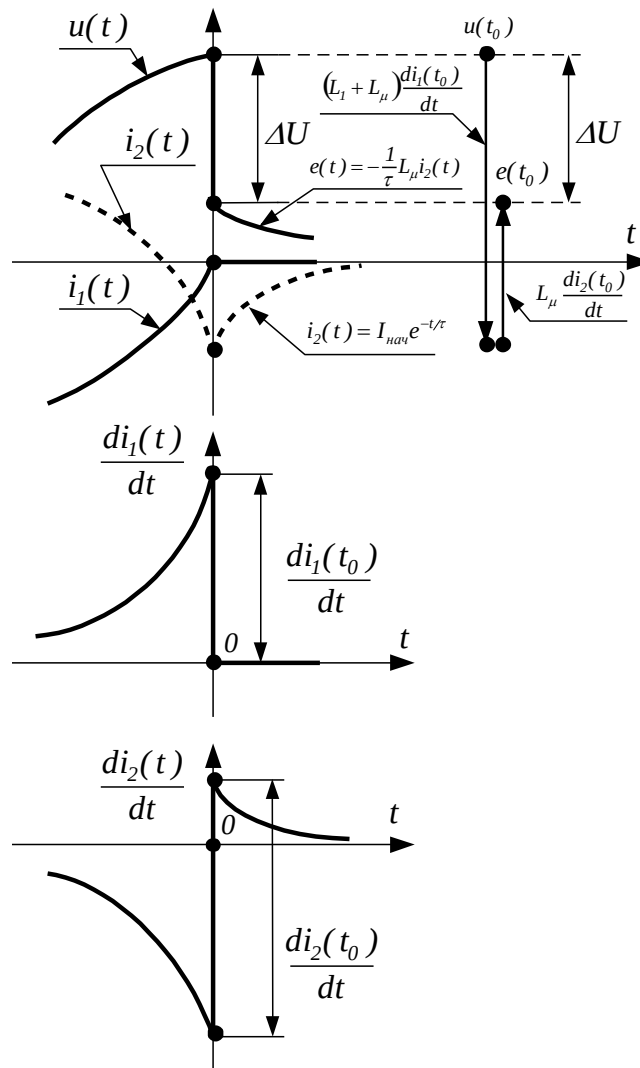


Рисунок 2.15. Криві напруги, струмів і похідних струмів у момент замикання тиристора

Оскільки у момент часу t_0 струм $i_1(t_0)=0$, але є похідна струму $\frac{di_1(t_0)}{dt_0}$, то еквівалентну індуктивність можна визначити з виразу:

$$L_{\Theta} = \frac{u_1(t_0) - e(t_0)}{\frac{di_1(t_0)}{dt_0}}. \quad (2.23)$$

Слід вказати, що реальний момент замикання тиристора визначався з урахуванням дискретності сигналів по моменту переходу кривої струму через 0. При цьому криві на ділянці відключення тиристора апроксимувалися різною залежністю: $i_1(t)$ – синусоїдою або статечним поліномом (4), $u_1(t)$ – синусоїдою (3), $e(t)$ – експонентою (5) (рис.2.16). В крапці, де функція апроксимації струму рівна нулю, визначаються значення $u_1(t_0)$ і $e(t_0)$.

Похідна струму $\frac{di_1(t_0)}{dt_0}$ в крапці t_0 визначається як похідна в цій точці функції апроксимації струму. За наслідками аналізу кривих, отриманих шляхом математичного моделювання, значення визначалося з точністю $\pm 0,1\%$.

При цьому кращі результати дає визначення еквівалентній індуктивності по моменту відмикання тиристора. Для двигуна 4АП1004 певна еквівалентна індуктивність $L_{\Theta}=0,01178$ Гн. Аналіз кривої миттєвих значень струму статора в схемі з шунтуючим вентилем по середніх значеннях дозволяє визначити еквівалентну індуктивність як початкове значення кривої:

$$L_{\hat{Y}} + \frac{2}{i_1^2} \int_0^t e \cdot i_1 dt = \frac{2}{i_1^2} \left[\int_0^t u_1 \cdot i_1 dt - \int_0^t i_1^2 \cdot R_1 dt \right]. \quad (2.24)$$

При цьому еквівалентна індуктивність визначається з більшою точністю, оскільки рівняння не містить похідних сигналів.

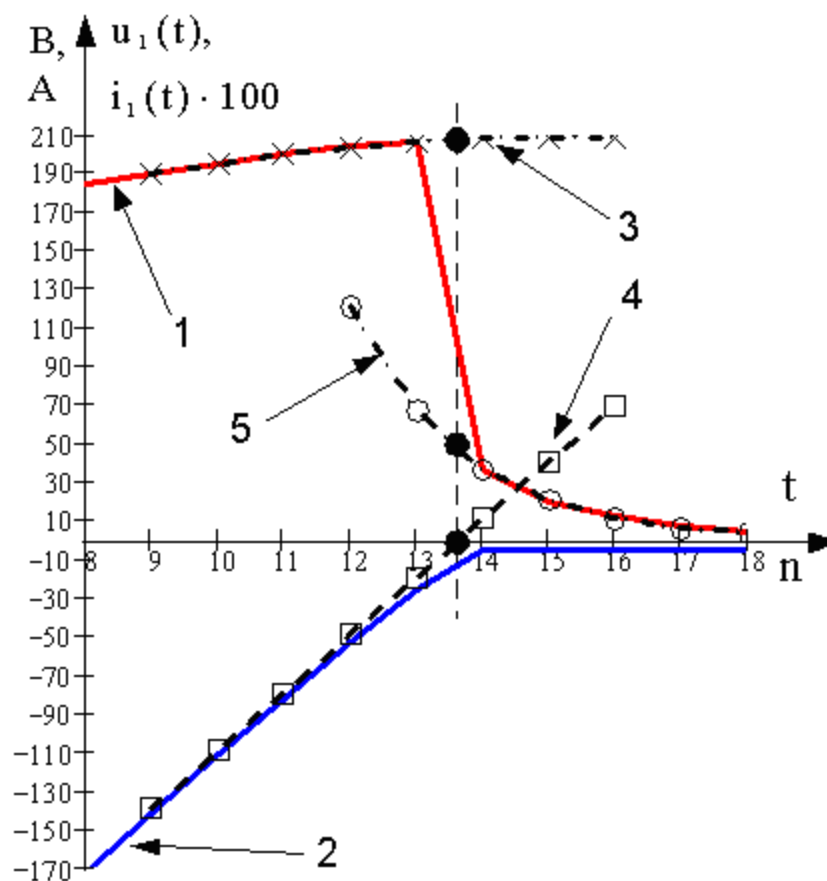


Рисунок 2.16. Визначення моменту замикання тиристора (1, 2 – реальні криві напруги і струму, 3,4 і 5 – апроксимовані криві напруги, струму і наведеного е.р.с.)

Рішення системи повних рівнянь складових миттєвої потужності чисельним методом для асинхронного двигуна 4АП1004 дозволило отримати результати, приведені в таблиці 2.1 де також приведені результати визначення параметрів того ж двигуна по методу, регламентованому в ДЕСТ 7217–87.

2.4 Визначення положення ротора синхронних двигунів.

Основним недоліком, властивим більшості способів визначення параметрів СД при нерухомому роторі, є попереднє точне встановлення ротора в положення, відповідні збігу і взаємно перпендикулярному положенню подовжньої вісі ротора і м.р.с. системи обмоток статора.

Визначення положення осей ротора щодо системи обмоток статора дозволяє скоротити витрати праці і часу на здійснення ідентифікації.

Для цього на обмотку збудження здійснюється дія підвищеною змінною синусоїдальною напругою номінальної частоти, і здійснюється контроль миттєвих значень напруги на обмотках статора (рис.2.17).

При розімкнених обмотках статора рівняння для фазних напруг мають вигляд:

$$u_a = d\psi_a/dt, \quad u_b = d\psi_b/dt, \quad u_c = d\psi_c/dt. \quad (2.25)$$

Оскільки при дії з боку ротора змінною напругою $u_f(t) = U_{f \max} \cdot \sin(\omega t - \alpha)$, (α – кут зсуву фаз між напругою і струмом обмотки збудження) з аналізу випадає схема заміщення по поперечній вісі то рівняння для потокозчеплення фаз статора матимуть вигляд (при розімкнених обмотках статора):

$$\begin{aligned} \psi_a &= I_d \cdot \cos(\varphi_k); \\ \psi_b &= I_d \cdot \cos(\varphi_k + 2\pi/3); \\ \psi_c &= I_d \cdot \cos(\varphi_k + 4\pi/3), \end{aligned} \quad (2.26)$$

де φ_k – кут між напрямом м.р.с. обмотки фази А і подовжньою віссю обмотки збудження; I_d – струм синхронного двигуна по подовжній вісі:

$$I_d = k_{\pi} \cdot I_{f \max} \cdot \sin(\omega t), \quad (2.27)$$

де k_{π} – коефіцієнт приведення обмотки збудження до обмоткам статора.

З урахуванням вищесказаного:

$$\begin{aligned} u_a &= U_m \cdot \cos(\varphi_k) \cdot \cos(\omega t); \\ u_b &= U_m \cdot \cos(\varphi_k + 2\pi/3) \cdot \cos(\omega t); \\ u_c &= U_m \cdot \cos(\varphi_k + 4\pi/3) \cdot \cos(\omega t). \end{aligned} \quad (2.28)$$

де U_m – максимальна напруга на обмотці статора при збігу напрямку її м.р.с. з подовжньою віссю ротора.

$$U_m = k_{\pi} \cdot \omega \cdot I_{f \max}. \quad (2.29)$$

На рис.2.17 представлені обмотки статорів, обмотка ротора, кут φ_k .
 Діаграми напруг (рис.2.18) демонструють, що амплітуди напруг U_a , U_b , U_c ,
 що індукуються в обмотках фаз статора, є різними і залежними від
 положення ротора.

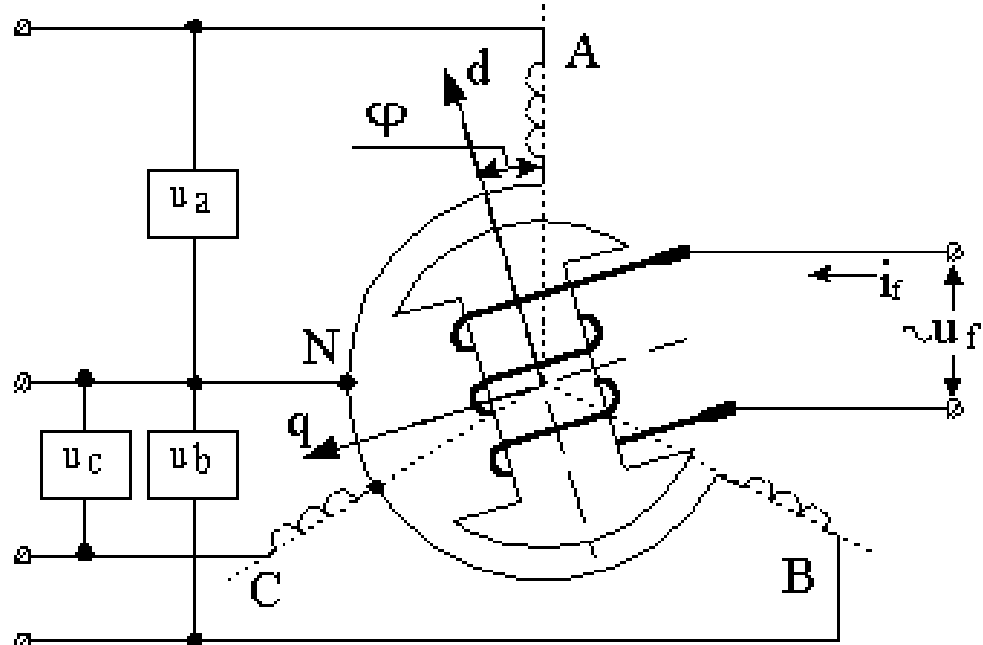


Рисунок 2.17. Схема включення датчиків напруги при визначенні
 положення ротора

$$U_a = U_m \cdot \cos(\varphi_k); \quad (2.30)$$

$$U_b = U_m \cdot \cos(\varphi_k + 2\pi/3);$$

$$U_c = U_m \cdot \cos(\varphi_k + 4\pi/3).$$

З цієї системи визначається кут φ_k :

$$\varphi_k = \arctg\left(\frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \frac{U_c - U_b}{U_a}\right) \quad (2.31)$$

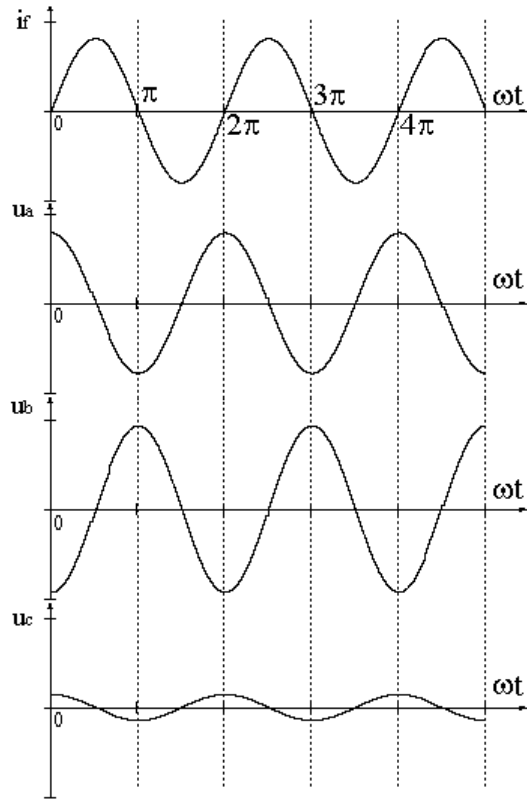


Рисунок 2.18. Криві струму ротора і напруг статора при визначенні положення ротора щодо обмоток статора

Визначення положення вісей ротора щодо системи обмоток статора робить можливим знаходження повних комплексних опорів по подовжній і поперечній осях (рис.2.19):

$$\dot{Z}_{\Sigma}(\nu) = \frac{\dot{U}(\nu)}{\dot{I}(\nu)} = \frac{U_m(\nu)}{I_m(\nu)} e^{j\varphi} = Z_m(\nu) e^{j\varphi}, \quad (2.32)$$

$$\dot{Z}_{\Sigma d}(\nu) = Z_m(\nu) \cos(\varphi_k) e^{j\varphi + \varphi_k}, \quad (2.33)$$

$$\dot{Z}_{\Sigma q}(\nu) = Z_m(\nu) \sin(\varphi_k) e^{j\pi/2 - \varphi - \varphi_k}.$$

$$R_{\Sigma d}(\nu) = \operatorname{Re} \dot{Z}_{\Sigma d}(\nu) = Z_{\Sigma d}(\nu) \cos(\varphi_k) \cos(\varphi_k + \varphi), \quad (2.34)$$

$$X_{\Sigma d}(\nu) = \operatorname{Im} \dot{Z}_{\Sigma d}(\nu) = Z_{\Sigma d}(\nu) \cos(\varphi_k) \sin(\varphi_k + \varphi),$$

$$R_{\Sigma q}(\nu) = \operatorname{Re} \dot{Z}_{\Sigma q}(\nu) = Z_{\Sigma q}(\nu) \sin(\varphi_k) \sin(\varphi_k + \varphi),$$

$$X_{\Sigma q}(\nu) = \operatorname{Im} \dot{Z}_{\Sigma q}(\nu) = Z_{\Sigma q}(\nu) \sin(\varphi_k) \cos(\varphi_k + \varphi).$$

напруга на виводах обмотки ротора, що розімкнена, є так званою електрорушійною силою опорів обмотки статора по подовжній вісі – $E_{\delta d}(v)$ (рис.2.20). При цьому можна визначити спад напруги на опорах обмотки статора:

$$\begin{aligned}\dot{U}_{1d}(v) &= \dot{U}_{ad}(v) - \dot{E}'_{\delta d}(v), \\ \dot{U}_{1d}(v) &= \dot{U}_{1Rd}(v) + \dot{U}_{1Xd}(v),\end{aligned}\quad (2.37)$$

де $\dot{E}'_{\delta d}(v)$ – приведенне значення е.р.с. за опорами обмотки статора, $\dot{U}_{1Rd}(v)$, $\dot{U}_{1Xd}(v)$ – спад напруг на активному і індуктивному опорі розсіювання обмотки статора.

Визначити параметри обмотки статора для першої гармоніки напруг і струму можна по формулах:

$$R_1 = \frac{U_{1Rd}}{I_{ad}}, \quad X_1 = \frac{U_{1Xd}}{I_{ad}}, \quad (2.38)$$

де I_{ad} – проекція струму статора на вісь d: $I_{ad} = I_a \cdot \cos(\varphi_k + \varphi)$

$$\begin{aligned}U_{1Rd} &= U_{1d} \cdot \cos(\varphi - \beta), \\ U_{1Xd} &= U_{1d} \cdot \sin(\varphi - \beta),\end{aligned}\quad (2.39)$$

де U_{1d} – спад напруги на повному опорі обмотки:

$$U_{1d} = \frac{E'_{\delta d} \cdot \sin(\gamma)}{\sin(\beta)}, \quad (2.40)$$

де γ – кут між кривими перших гармонік U_{ad} і $E'_{\delta d}$, β – кут між U_{ad} і U_{1d} :

$$\beta = \arctg \left(\frac{E'_{\delta d} \cdot \sin(\gamma)}{U_{ad} - E'_{\delta d} \cdot \cos(\gamma)} \right), \quad (2.41)$$

$$E'_{\delta d} = \frac{E_{\delta d}}{k_{\pi}}, \quad U_{ad} = U_a \cdot \cos(\varphi_k).$$

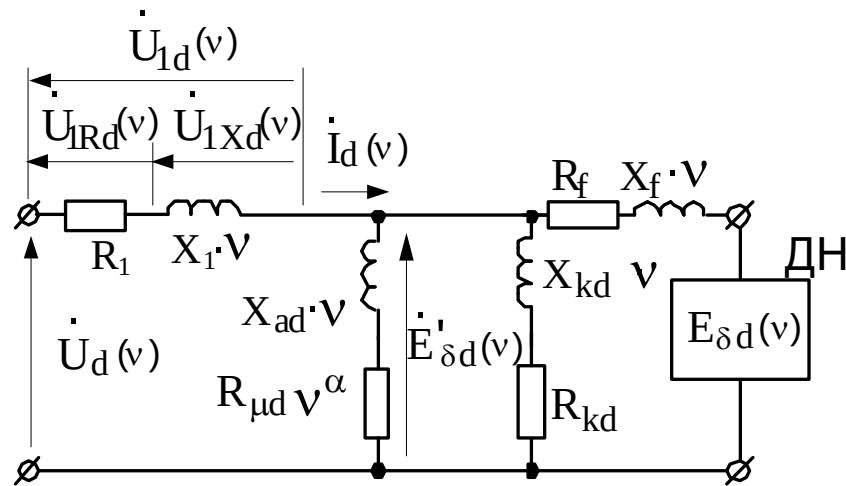


Рисунок 2.20. Т-образна схема заміщення синхронного двигуна по подовжній вісі при підключеному датчику напруги (ДН) до висновків обмотки ротора.

Параметри обмотки збудження вираховуються аналогічно вище наведеному способу визначення параметрів обмотки статора. При цьому параметри визначаються по кривих струму і напруги обмотки збудження і кривої напруги одній з фаз статора, заміряним під час проведення дослідження визначення положення ротора.

Поділ електромагнітних параметрів синхронного двигуна на параметри по подовжній і поперечній осях досягається за допомогою визначення просторового положення ротора щодо системи обмоток статора шляхом впливу змінним синусоїдальним напругою з боку обмотки збудження при нерухомому роторі.

Параметри обмоток статора і обмотки збудження СД доцільно визначати при впливі випробувальним напругою на одну з обмоток і використанні іншої в якості датчика напруги при нерухомому роторі.

3 РОЗРОБКА ВИМІРЮВАЛЬНО-ДІАГНОСТИЧНОГО КОМПЛЕКСУ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ДВИГУНА ЗМІННОГО СТРУМУ

3.1 Обґрунтування застосування тиристорного регулятора напруги в якості джерела полігармонійного живлення.

Для ефективної реалізації розроблених методів визначення електромагнітних та енергетичних параметрів необхідно, щоб джерело полігармонійної напруги відповідало наступним вимогам:

- отримання рівних або близьких за значенням амплітуд необхідних гармонік струму і напруги. З метою мінімізації похибок при визначенні параметрів слід використовувати найближчі до першої непарні гармоніки (1, 3, 5, і т.д.);
- забезпечення струмового завантаження обмоток машини змінного струму в режимі короткого замикання в межах (50-100%) I_n для роботи на лінійній ділянці кривої намагнічування;
- можливість роботи джерела в неповнофазних режимах (почергова робота вентилів тільки якоюсь однією з фаз, робота вентилів двох фаз від одного джерела синусоїдальної напруги, поперемінна робота вентилів однієї фази і т.д.);
- можливість створення різноманітних випробувальних режимів як в режимі короткого замикання, так і в режимі холостого ходу;
- можливість усунення похибок, що вносяться системами аналого-цифрового перетворення, за рахунок аналізу електромагнітних процесів при комутації вентилів;
- простота і низька вартість.

У традиційних перетворювальних системах коефіцієнт гармонік, для підвищення якості вихідної напруги, прагнуть зробити мінімальним. З цієї причини застосування традиційних пристроїв і алгоритмів управління не

дозволяє отримати необхідні режими для визначення параметрів двигунів змінного струму.

Джерела полігармонійної напруги можуть представляти тиристорні регулятори напруги або перетворювачі частоти зі складними законами управління.

Тиристорний регулятор напруги (ТРН) з фізики роботи є джерелом полігармонійної напруги. При використанні тиристорного регулятора напруги в якості джерела полігармонійного живлення стають очевидними його переваги по відношенню до джерел випробувального впливу, виконаним за схемами автономних інверторів напруги: порівняно низька вартість, простота системи управління, надійність і доступність елементів силових ланцюгів; забезпечення потрібного гармонійного складу напруги і струму (при кутах управління в діапазоні $130\div 160^\circ$) при одномоментному створенні струмового навантаження обмоток машини при заданому рівні з метою отримання ненасичених значень індуктивних опорів, якщо живлення відбувається від промислової мережі без трансформаторного обладнання; можливість отримання додаткової діагностичної інформації за результатами обробки моментів включення і відключення тиристорів; можливість мінімізації похибки дискретизації при визначенні моментів включення і відключення тиристорів з моменту переходу струму тиристора через нуль; можливість використання ТРН при інших операціях післяремонтних випробувань (дослід загасання струму, розгін двигуна, обкатка на холостому ході), а також можливість перемикання силової частини в схему Ларіонова (тиристорний керований випрямляч), що створюють передумови для створення універсального випробувального обладнання як для машин постійного, так і для машин змінного струму.

Регулювання вихідної напруги ТРН здійснюється за рахунок запізнювання їх відкривання для кожної напівхвилі фазної напруги мережі. Кут провідності залежить від кута управління та кута навантаження, і може бути чисельно визначений з трансцендентного рівняння [13]:

$$\sin(\alpha + \lambda - \varphi) - \sin(\alpha - \varphi) \cdot e^{-\lambda / \operatorname{tg} \varphi} = 0. \quad (3.1)$$

Визначаючи на підставі (3.1) величину λ для значень α і φ , можна розрахувати амплітуду першої гармоніки напруги навантаження (U_{m1}) за допомогою виразів (3.3) як функцію двох змінних α і φ .

За виразами (3.1) і (3.2) були побудовані графіки залежностей $\beta(\alpha) = \lambda + \alpha$, а також залежність амплітуди першої непарних гармонік від кута управління при різних кутах [13]:

$$u(t) = \sqrt{2}U \sum_{g=0}^{\infty} [H_{2g+1} \cdot \cos((2g+1)\omega t - \varphi_{H_{2g+1}})],$$

$$H_{2g+1} = \sqrt{\tilde{N}_{2g+1}^2 + S_{2g+1}^2}, \quad \operatorname{tg} \varphi_{H_{2g+1}} = \frac{\tilde{N}_{2g+1}}{S_{2g+1}}, \quad (3.2)$$

$$\tilde{N}_{2g+1} = \frac{1}{\pi} \left\{ \frac{\cos(2g\beta) - \cos(2g\alpha)}{2g} - \frac{\cos(2(g+1)\beta) - \cos(2(g+1)\alpha)}{2(g+1)} \right\},$$

$$S_{2g+1} = \frac{1}{\pi} \left\{ \frac{\sin(2g\beta) - \sin(2g\alpha)}{2g} - \frac{\sin(2(g+1)\beta) - \sin(2(g+1)\alpha)}{2(g+1)} \right\},$$

де g – номер гармоніки, H – амплітуда напруги, C – косинусна складова амплітуди, S – синусна складова.

Для знаходження синусної і косинусної складових амплітуди першої гармоніки формула представлена нижче:

$$C_1 = -\frac{\cos(2\beta) - \cos(2\alpha)}{2\pi}, \quad S_1 = \frac{\beta - \alpha}{\pi} - \frac{\sin(2\beta) - \sin(2\alpha)}{2\pi}. \quad (3.3)$$

З отриманих графіків залежностей амплітуд напруги і струму від кута управління тиристорами видно, що при різних значеннях кутів навантаження необхідний гармонійний склад напруги та струму буде забезпечуватися при кутах управління, що знаходяться в діапазоні 130÷160 ел. Градусів, якщо живлення відбувається від промислової мережі без трансформаторного обладнання. При цьому забезпечуються струмова завантаження обмоток на рівні $(0,5-1)I_{1H}$ і приблизно однаковий рівень перших трьох непарних гармонік струму і напруги.

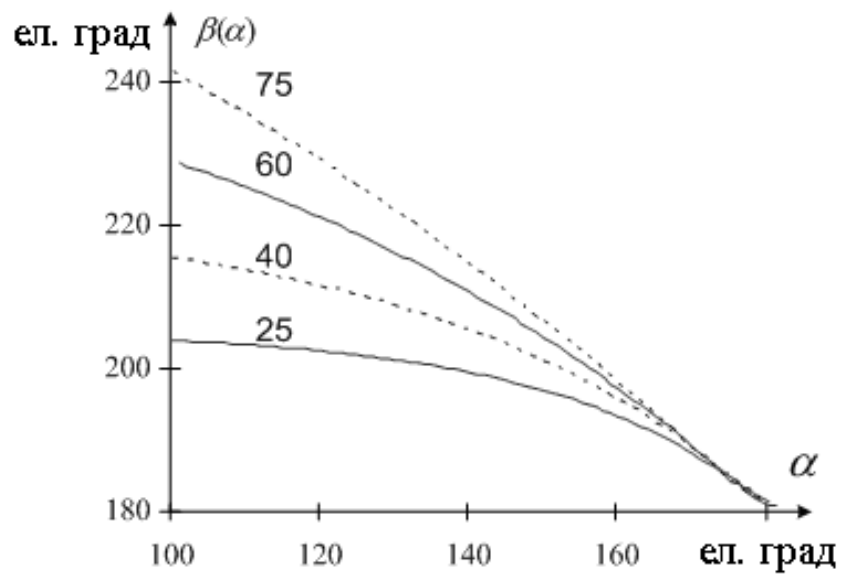


Рисунок 3.1. Розрахункові залежності $\beta(\alpha) = \lambda + \alpha$ для різних кутів навантаження

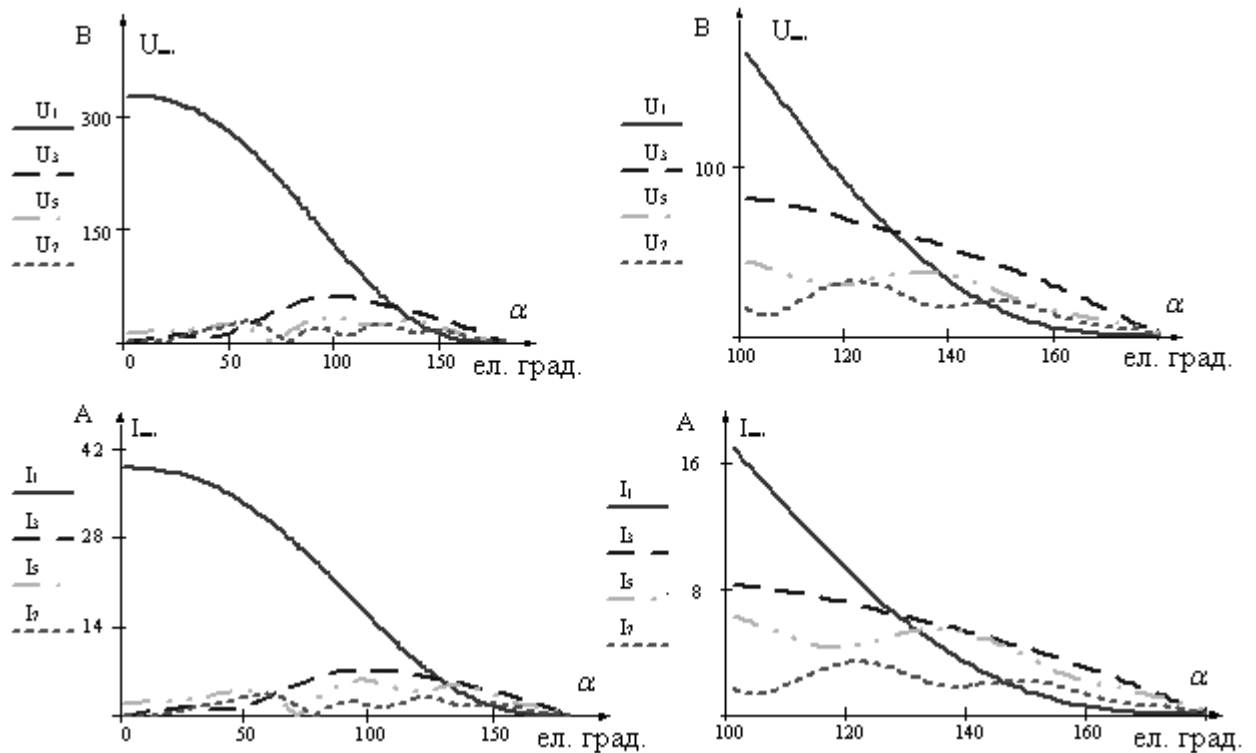


Рисунок 3.2. Розрахункові залежності амплітудних значень гармонік струму і напруги від кута управління тиристорами для RL-навантаження

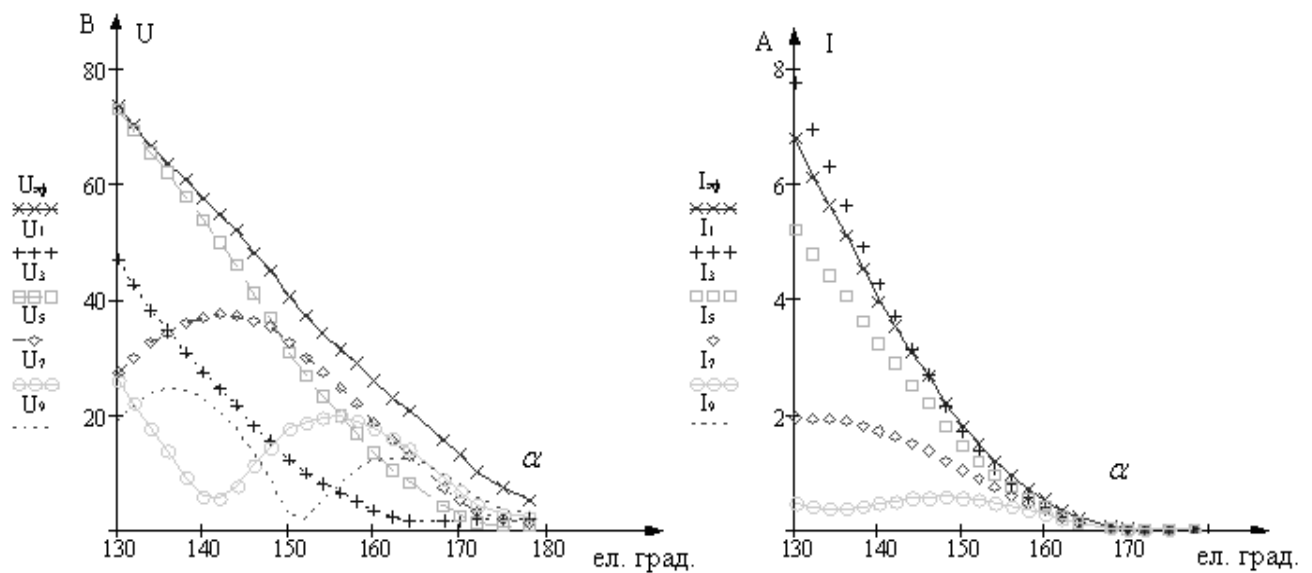


Рисунок 3.3. Експериментальні залежності амплітудних значень гармонік струму і напруги від кута управління тиристорами для АД 4АП1004

З отриманих графіків залежностей амплітуд напруги і струму від кута управління тиристорами видно, що при різних значеннях кутів навантаження необхідний гармонійний склад напруги та струму буде забезпечуватися при кутах управління, що знаходяться в діапазоні 130 - 160 ел. Градусів, якщо живлення відбувається від промислової мережі без трансформаторного обладнання. При цьому забезпечуються струмова завантаження обмоток на рівні $(0,5-1)I_{1н}$ і приблизно однаковий рівень перших трьох непарних гармонік струму і напруги.

3.2 Структура вимірювально-діагностичного комплексу для визначення параметрів двигунів змінного струму.

Необхідний обсяг інформації про досліджуваний об'єкт може бути отриманий при використанні комп'ютеризованих вимірювальних комплексів і вимірі електричних характеристик двигуна – його струму і напруги.

Включення ЕОМ до складу випробувальних комплексів дозволяє проводити складні розрахунки з високою точністю і швидкістю, забезпечити автоматизацію випробувань – автоматичне проведення

вимірювань, математичної обробки вимірних величин, автоматичне зміна режимів роботи і структури силової частини випробувального комплексу.

Багаторівнева організація мікропроцесорних систем дозволяє забезпечити паралельне виконання декількох завдань в реальному часі. До таких завдань можна віднести формування складних законів управління тиристорними перетворювачами, опитування датчиків струму і напруги, забезпечення захисту перетворювального устаткування та двигуна від аварійних і ненормальних режимів роботи.

Аналогові сигнали з датчиків струму і напруги через аналого-цифровий перетворювач надходять в ЕОМ, де відбувається їх цифрова обробка у відповідності з методом визначення параметрів.

Сигнали з датчиків струму також надходять на контролер захистів, який представляє собою мікропроцесорну систему нижнього рівня. Перед подачею напруги на двигун від ЕОМ в контролер захистів надходять сигнали уставок захистів. Випробуванням піддаються двигуни широкого діапазону потужностей і струмів, тому всі види захистів, що реалізуються контролером, повинні бути перенастраюваними. Контролер захистів виробляє циклічний опитування датчиків струму протягом всієї процедури випробувань. При ненормальною роботі системи контролер формує сигнал відключення відповідного автоматичного вимикача, сигнал блокування СИФУ та припинення роботи комплексу.

Функції формування складних законів управління тиристорним регулятором напруги покладені на мікропроцесорну систему управління ТРН. Цифрова СИФУ забезпечує роботу двигуна в однофазних режимах живлення при проведенні досліду короткого замикання АД з обмотками, включеними за схемою «зірка з нулем», і в двофазних – при з'єднанні обмоток АД за схемою «зірка без нуля».

Тиристорний регулятор напруги служить в якості джерела полігармонічної напруги для реалізації розробленого методу визначення параметрів двигунів змінного струму. Напівпровідникові перетворювальні

пристрої мають високі регульовальні характеристики та енергетичні показники, а також мають малі габарити і невелику масу, в процесі експлуатації прості та надійні, забезпечують безконтактну комутацію струмів і напруги.

Управління парами тиристорів кожної фази в ТРН (VS1) повинно здійснюватися незалежно для забезпечення наступних режимів роботи по фазах: трифазний, двофазний і однофазний режими.

Сигнал на зміну режиму роботи ТРН формується ЕОМ відповідно до алгоритму проведення випробувань і надходить безпосередньо на систему управління ТРН.

Всі комутації, пов'язані з конструктивними особливостями двигунів і забезпеченням необхідних відповідно до технології випробувань режимів живлення АТ, здійснюються автоматично під керуванням контролера комутаційної апаратури, що представляє собою мікропроцесорну систему нижнього рівня.

Розглянемо функції системи управління джерелом полігармонійної напруги.

Інформаційні функції: введення апріорної інформації про об'єкт випробувань; автоматичне проведення випробувань відповідно до обраного регламентом; візуалізація процесу випробувань; контроль режимів випробувань; вимір і аналіз режимних параметрів на предмет виникнення аварійних ситуацій; фіксація миттєвих значень вимірюваних параметрів; здійснення обчислювальних операцій відповідно до математичним забезпеченням; формування протоколу випробувань і нового паспорта електричної машини.

Керуючі функції: видача керуючих сигналів на перемикання силового комутаційного обладнання; видача керуючих сигналів на силовий тиристорний перетворювач напруги (СТПР), що забезпечує: плавний запуск випробуваного двигуна; симетричні (трифазний режим) і неповнофазних (одно- або двофазні) режими роботи СТПН як в досліді короткого замикання,

так і холостого ходу; аварійну блокування СТПН при надходженні сигналу аварійного режиму від контролера захистів; запуск режиму вимірювань сигналів від блоку датчиків.

Грунтуючись на вимогах створення необхідних режимів випробувань і фіксації миттєвих значень величин, необхідних для здійснення операцій діагностики, була розроблена функціональна схема (рис. 3.2) комплексу для випробування АД і СД. На наведеній функціональній схемі прийняті наступні позначення: СД – синхронний двигун; ТРН – тиристорний регулятор напруги; БДТ, БДН – блоки датчиків струму і напруги в обмотках статора; ДТов, Днов – датчики струму і напруги в обмотці збудження; ТВ – тиристорний збудник; ЦСІФУ 1, 2 – цифрові системи імпульсно-фазового управління ТРН і ТВ, ККА – контролер комутаційної апаратури; КЗ – контролер захистів. Опір R_{fo} в ланцюзі збудження необхідно в режимі пуску синхронного двигуна. Підключаючи ємності $C_1 \div C_n$ в ланцюг обмотки збудження, і налаштовуючи їх в резонанс з індуктивністю обмотки, знижуються масогабаритні показники тиристорного збудника ТВ.

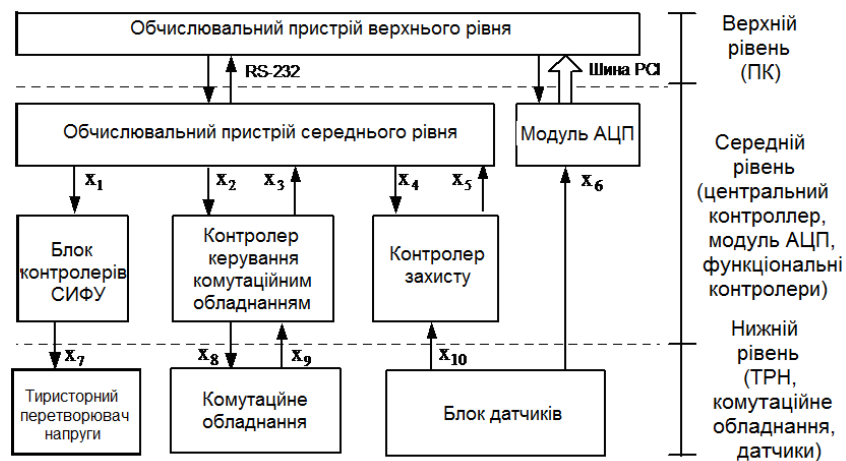


Рисунок 3.2. Загальна структура комплексу для випробування двигунів змінного струму

Послідовність роботи комплексу:

– включається автоматичний вимикач 8, при цьому замикаються його блок – контакти і цей сигнал надходить на блок захисту і контролер нижнього рівня;

- за допомогою блоку введення оператор вводить первинні дані асинхронного двигуна, які вказані в паспорті підприємства виробника;
- на підставі введених даних розраховуються параметри для блоку захисту і діапазон зміни струму і напруги для блоків датчиків;
- програмується контролер блоку захисту та діапазони вимірювання для блоків датчиків;
- видається команда на розблокування СІФУ від блоку захисту;
- подається напруга низького рівня від ТРН на двигун і контролюється коректність введених оператором даних про параметри машини;
- подальша послідовність роботи задається регламентом діагностики.

Діагностика завершується виведенням на екран і, якщо необхідно, на принтер її результатів.

Комплекс, побудований за цими принципами, дозволяє визначити достовірні параметри схеми заміщення для кожної з фаз двигуна змінного струму. На підставі параметрів СЗ, а також втрат у вузлах машини розраховуються паспортні дані двигуна.



3.3 Склад обладнання комплексу визначення параметрів двигунів змінного струму.

Вимірювально-діагностичні комплекси системи випробування до свого складу включають:

- обчислювальний пристрій (промислова ЕОМ);
- пристрої введення інформації, її виведення та відображення (клавіатура управління, дисплеї, друкувальний устрій) та прилади зв'язку з об'єктом (а саме, перетворювачі аналогової інформації в зручну для використання в обчислювальному пристрої, перетворювачі цифрової інформації, що надходить від ЕОМ в ланцюзі управління);
- систему датчиків струму і напруги статора, струму і напруги обмотки збудження (для СД).

Контролер нижнього рівня (блок 3) (рис. 3.5) – це пристрій на основі мікроконтролера, яким управляє обчислювальний блок верхнього рівня в командному режимі.

За допомогою цього блоку здійснюється програмування коефіцієнтів підсилення датчиків (це блоки 5 та 7) за допомогою цифрового каналу зв'язку.

Система управління електроустаткуванням середнього рівня виконана на базі програмованих мікроконтролерів фірми MICROCHIP PIC16F877 (центральний контролер, контролер захистів і контролер управління комутаційним обладнанням) і PIC16F876 (ЦСІФУ).

Блок 4 – цифрова система імпульсно-фазового управління тиристорним регулятором напруги. Управління ТРН здійснюється за допомогою цифрової шини, на яку передаються команди для зміни кута управління всіх тиристорів, пари тиристорів або окремого тиристора. Імпульси управління синхронізуються з напругою в мережі за допомогою блоку синхронізації.



Рисунок 3.4. Алгоритм проведення випробувань двигунів змінного струму

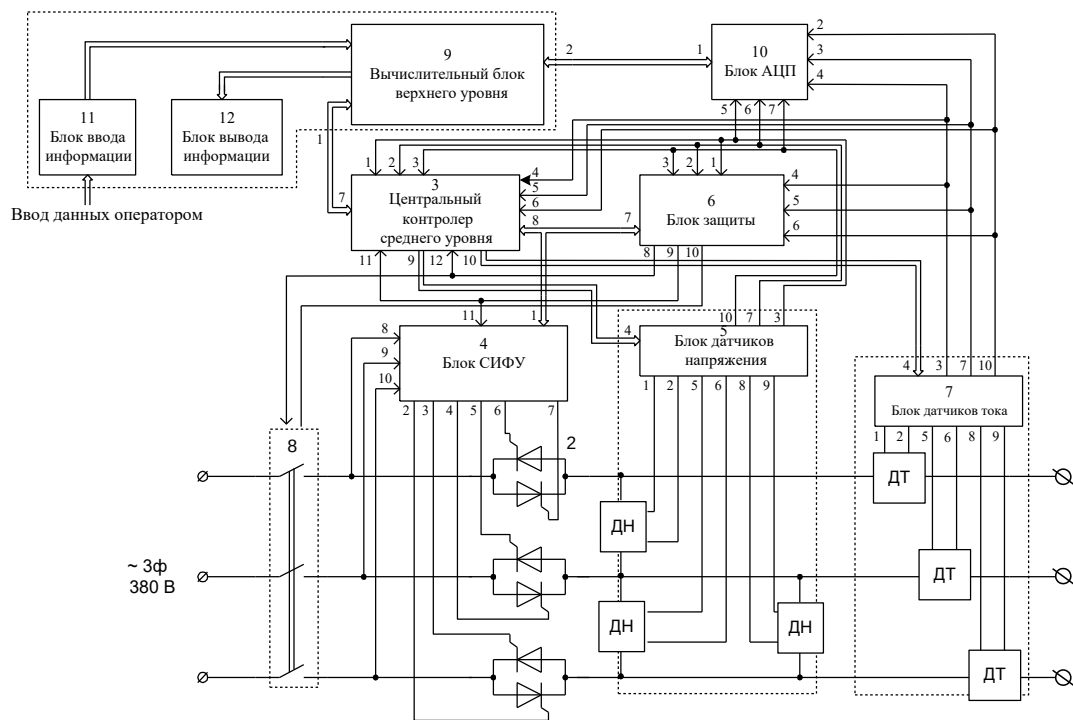


Рисунок 3.5. Структурна схема системи управління комплексом визначення параметрів

Блок 5 складається з датчиків трьох фаз напруги із змінними коефіцієнтами посилення. Управління коефіцієнтом передачі здійснюється по цифровому каналу. Блок 7 аналогічний за структурою блоку 5.

В системі визначення параметрів застосовані датчики напруги LV 25–P (10÷500 В, точність вимірювань $\pm 0,8\%$, лінійність 0,2%, час реакції 40 мкс) і датчики струму LA 305–S/SP1 (500 А, діапазон вимірювання $\pm 800\text{А}$, точність вимірювань $\pm 0,8\%$, лінійність $\pm 0,1\%$, частотний діапазон 0÷100 кГц), робота яких заснована на ефекті Холла.

Блок 6 виконує функції захисту випробуваного двигуна і силового тиристорного перетворювача: теплову, максимально-струмовий, контроль зникнення фаз і їх послідовності і т.п.

Після програмування уставок захистів на основі введених оператором апріорних даних за допомогою блоку 11 по цифровій лінії 7 проводиться розблокування пристрою. При цьому по лінії 9 знімається блокування ЦСІФУ і починає виконуватися основний цикл контролера пристрої блоку

захисту.

Блок захисту може бути налаштований по цифровій шині 7 на роботу в однофазному, двофазному або трифазному режимах. В однофазному режимі відбувається контроль струму і напруги тільки однієї заданої фази, в двофазному – двох зазначених фаз, в трифазний – всіх трьох фаз напруги живлення.

Обчислювальний блок верхнього рівня (блок 9) – це промислова ЕОМ, яка за допомогою інтерфейсу RS-232 через центральний контролер середнього рівня (блок 3) управляє всією системою, а також, на підставі змінених сигналів струму і напруги з блоку 10, проводить розрахунок параметрів випробовуваного двигуна. В якості мікропроцесорної системи може бути використаний IBM спільний комп'ютер промислового або офісного виконання. Обчислювальний блок верхнього рівня складається з блоків для введення і виведення інформації. Блок введення інформації дозволяє оператору вводити початкові дані асинхронного двигуна, які потрібні для розрахунку кінцевих параметрів блоком 9, і впливати на роботу системи під час випробувань. Блок виводу інформації призначається для того, щоб відображувати поточні дані та кінцевий результат здійснення роботи обчислювального блоку на верхньому рівні.

Блок 10 – стандартна плата АЦП, що дає змогу опитувати вхідні аналогові сигнали, що мають надходити від блоків 5 і 7, та перетворювати їх у вигляд цифрової форми і передавати на блок 9. Всі процеси вимірювання синхронізуються у часі за допомогою таймера, який вбудований в блок 10.

Плати АЦП L-780 (16 диференціальних каналів або 32 канали із загальною землею, максимальна частота перетворення в 14-ти бітному режимі – 400 кГц) представляють собою сучасні, швидкодіючі та надійні пристрої, що базуються на високопродуктивній шині PCI для вводу, виводу та обробки аналогової та цифрової інформації на цифрових носіях.

4 ДОСЛІДЖЕННЯ ПІСЛЯРЕМОНТНОГО СТАНУ ДВИГУНІВ

4.2. Аналіз післяремонтних дефектів асинхронних двигунів.

Тенденція, що розвивається нині, до широкого застосування регульованих приводів, що дозволяє вносити глибокий внесок до проблеми енергозбереження, висуває як актуальну і перспективну проблему застосування регульованих асинхронних електроприводів (ЕП). Відомо, що асинхронні двигуни (АД) переважають в загальному об'ємі електричних машин, що випускаються, а якщо врахувати, що серед них двигуни з потужністю менше 30 кВт складають більше 90% [1], то стає ясным, що перехід до повністю регульованого асинхронного ЕП дозволить істотно скоротити енергоспоживання як промислових установок і пристроїв, що включають в свій склад даний електродвигун змінного струму, так і промислових підприємств в цілому.

Асинхронний ЕП в порівнянні з приводом постійного струму має низку переваг: він простіший, надійніший і відносно дешевший, має хороші масогабаритні показники, що зумовило процес поступового витіснення приводу постійного струму навіть із сфер його традиційного застосування.

Аналізуючи надійність сучасного асинхронного електроприводу, можна прийти до висновку, що в більшості випадків його вихід з ладу обумовлений відмовою самого АД.

Як правило, причиною відмови може бути погана технологія виробництва, експлуатації, знос деяких частин електричної машини, а також стрибкоподібна зміна її характеристик або параметрів під впливом зовнішніх перевантажень (стрибкоподібна зміна навантаження) або характеристик живлячої мережі (зниження або зростання напруги живлення, несинусоїдальність напруги живлення).

В середньому по Україні протягом року піддається ремонту близько 20% встановлених АД.

Збитки обумовлені не тільки значними затратами на ремонт (наприклад, перемотування асинхронного двигуна, який має потужність 5-75

кВт залежно від модифікації і виконання обходиться від 20 до 40 у.о./кВт), але і затратами від простою устаткування при відмовах ЕД.

Результати аналізу статистики відмов АД показали, що в період 2015-2016 р.р. в середньому протягом року піддавалося ремонту близько 25% встановлених АД. У 2017 році ця цифра склала близько 30%. Зростання числа відмов обумовлене насамперед станом енергомереж, режимом роботи підприємств і тим фактором, що більшість встановлених на підприємствах АД вже практично відпрацювали свій ресурс.

В більшості випадків (85-90%) відмова АД відбувається із-за пошкодження обмотки статора, що для більшості двигунів вимагає повного перемотування або, як прийнято вважати, капітального ремонту; 2,5% відмов пов'язано з пошкодженням підшипникових вузлів.

Відомо, що для електродвигунів, які ще не проходили стадію ремонту, 35% відмов спостерігається із-за недостатньо доброї якості виготовлення, близько 50% припадає на недоліки експлуатаційного характеру (головним чином відсутність всіх необхідних видів захисту АД), 15% відмов викликано причинами конструктивного характеру.

Після ремонту АД напруження на відмову, як правило, істотно зменшується. Це пояснюють поганою якістю ремонту, та, згідно приведеному аналізу, низький рівень проведення ремонтних робіт є причиною виходу з ладу лише в 9-15% випадків. В той же час є всі підстави вважати, що скорочення терміну служби відремонтованої машини прямо пов'язане із змінами, що відбуваються в ході ремонту в її конструктивних частинах.

Найчастіше ремонт тих, що вийшли з ладу АД проводять не на спеціалізованих підприємствах, а в електроремонтних цехах підприємств, що експлуатують електричні машини. Технологія ремонту в таких випадках відрізняється від технології на спеціалізованих підприємствах [5].

Найбільш значні зміни робочих параметрів, служби відремонтованої машини, що призводять до зниження терміну, спостерігаються при капітальному ремонті.

В ході аналізу процесу проведення ремонту АД, було встановлено, що найбільші зміни в магнітопроводних частинах електричної машини відбуваються на дефектаційно – підготовчій ділянці.

У переважній більшості випадків для АД характерна повна заміна обмоток. В процесі витягання обмотки її піддають термічній обробці разом з пакетом сталі, відпалюючи в печі, що руйнує і розм'якшує ізоляцію, після чого обмотку обрубують і протягають волоком.

Такий процес витягання обмотки не регламентований, та іншого для більшості двигунів немає (в двигунів малої потужності обмотка обрубуються без відпалу). При термічній обробці пакету сталі ізоляція між листами руйнується частково або повністю. Частина листів при виконанні механічних операцій (виїмка обмотки, чіплення пакету ротора за пакет статора при розбиранні машини і в ході її роботи із-за просідання в підшипникових вузлах) опиняється коротко замкнутою, змінюються і властивості самої сталі при нагріві, внаслідок того, що умови відпалу жорстко не регламентовані - час його проведення і температура в відпалювальній печі змінюються в широких межах. Виникаючі зміни в сталі приводять до зростання втрат, погіршення робочих параметрів електричної машини і створення додаткового джерела нагріву АД від пакету сталі, що підвищує робочу температуру машини і визначає її швидший вихід з ладу.

На обмотувальну ділянку надходить оброблений пакет сталі і документація з технологічного відділу про обмотувальні дані двигуна. Слід зазначити, що в у цілому ряді випадків ремонт машини супроводжується її модернізацією, коли змінюються обмотувальні дані, клас ізоляції тощо. Перед виконанням перемотки статора і ротора двигуна доцільно визначити якісні характеристики електротехнічної сталі, зокрема, втрати в ній, що особливо важливе для пакетів сталі, що піддаються термічній обробці при видаленні ізоляції, а також в разі виплавляння ділянок сталі в результаті міжфазних коротких замикань тощо.

Після перемотки на складальній ділянці відбувається збирання двигуна. Відремонтовані двигуни проходять випробування на випробувальній станції, яка входить до складу обладнання будь-якого електроремонтного цеху. Слід

зазначити, що електричні машини різного класу мають свій регламент випробувань, який в будь-якому разі не можна вважати за вичерпний. Якнайповніші післяремонтні випробування відносяться до категорії приймально-здавальних випробувань, яким піддається весь потік відремонтованих машин і характерні для електроремонтних цехів судноремонтних заводів і електроремонтних цехів відповідного міністерства.

У перелік необхідних випробувань асинхронного двигуна входять:

- а) вимір опору обмотки відносно до корпусу машини, а також між обмотками;
- б) вимірювання опору обмоток при проходженні постійного струму в холодному стані;
- в) знаходження коефіцієнта трансформації (маються на увазі двигуни з фазним ротором);
- г) проведення випробувань ізоляції обмоток відносно корпусу електромашини, а також ізоляції між обмотками на електричну міцність;
- д) випробування ізоляції на електричну міцність між витками обмотки;
- е) знаходження струму і втрат холостого ходу;
- ж) знаходження струму і втрат короткого замикання.

Вказується, що пункти а, б і ж допускається проводити вибірково.

Реальні приймально-здавальні випробування, яким піддаються відремонтовані АД при їх потоковому ремонті як в умовах спеціалізованих ремонтних підприємств і цехів, так і в умовах допоміжних підрозділів, як правило, складаються з трьох завдань:

- вимірювання опору обмоток;
- випробування ізоляції обмоток відносно корпусу машини, а також між обмотками;
- обкатка - випробування двигуна на холостому ходу.

Причому обкатка проводиться незначний проміжок часу і лише для того, щоб переконатися, що струм холостого ходу знаходиться на допустимому рівні, і в роботі АД немає особливих дефектів (заклинювання робочих підшипників, чіплення ротора об пакет статора тощо).

Надійність відремонтованих АД переконливо характеризують статистичні дані, отримані в умовах ВАТ Гідросила (Рис. 4.1), згідно з яким за рік аналізу в середньому повторному ремонту піддається близько 24,7% АД.

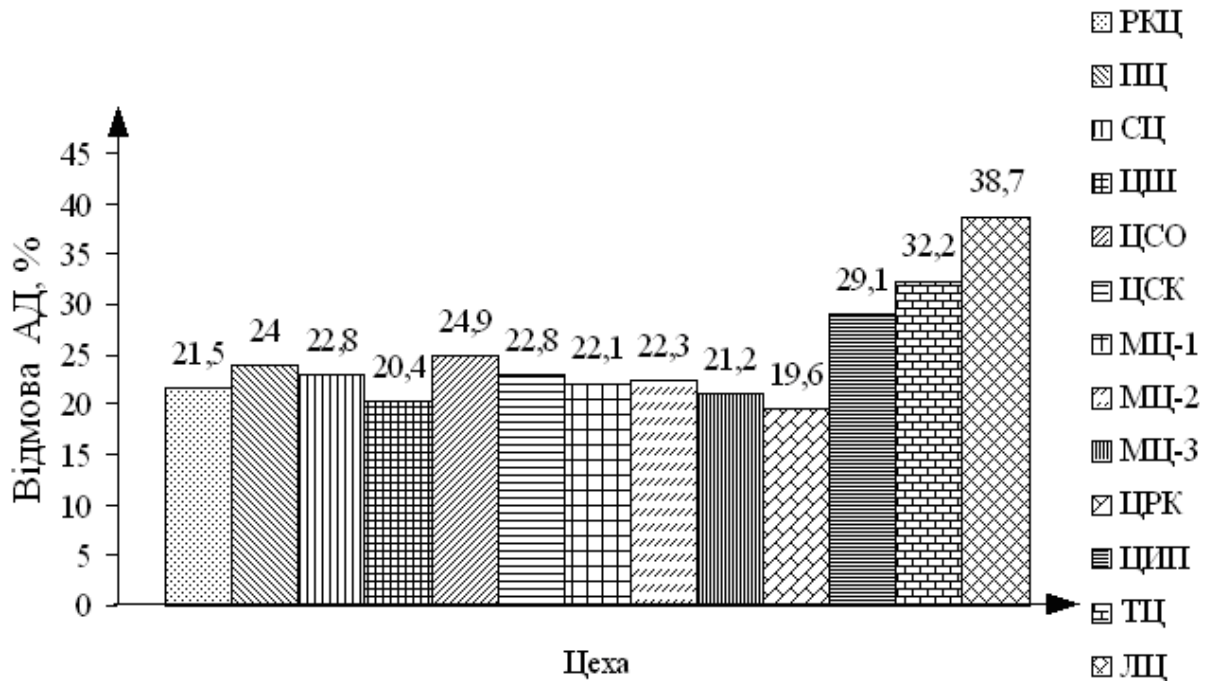


Рисунок. 4.1. Дані по повторних відмовах АД по цехах

Примітно, що всі двигуни, що проходили повторний ремонт, не відпрацьовують і одного року, а більш за третину з них – 37,3% - і трьох місяців (Рис.4.2).

Аналіз причин виходу з роботи підтверджує низьку надійність роботи обмотки (63,2% загального числа пошкоджень та відмов) статора, що показано на Рис.4.3. Дефектом підшипникових вузлів обумовлені 18,7% виходу з ладу двигунів, що в 5-10 разів вище за дані для нових машин і пояснюється наявністю електромагнітних вібрацій внаслідок виникнення магнітної несиметрії і нерівномірного розподілу якостей зубців сталі зубцевої зони пакету статора, 6,7% АД виходить з ладу із-за низької якості укладання корпусної ізоляції, це в 3-5 разів вище за аналогічний показник для нових машин.

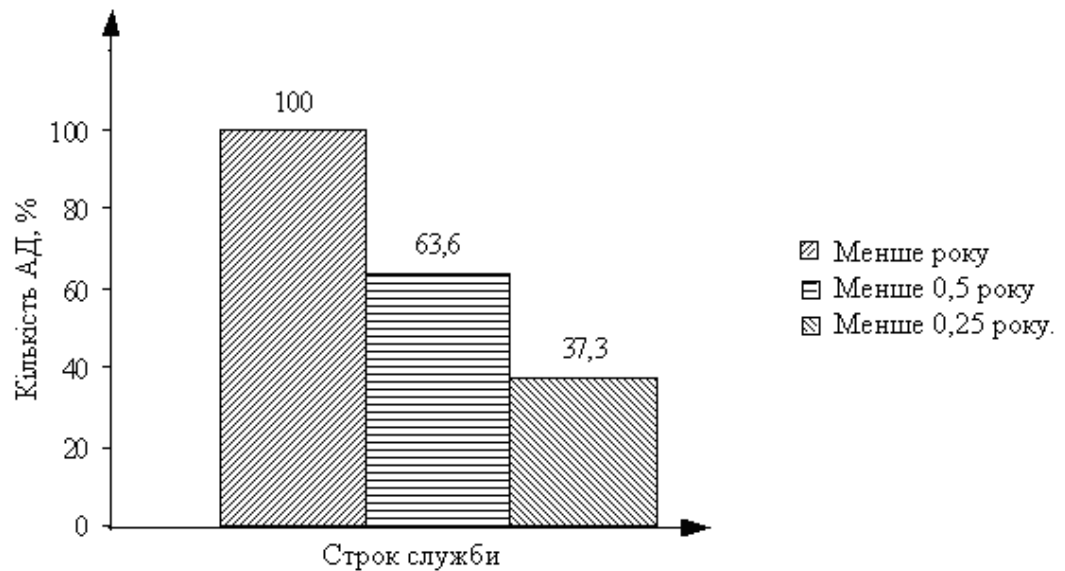


Рисунок 4.2. Терміни служби відремонтованих АД до наступного ремонту.

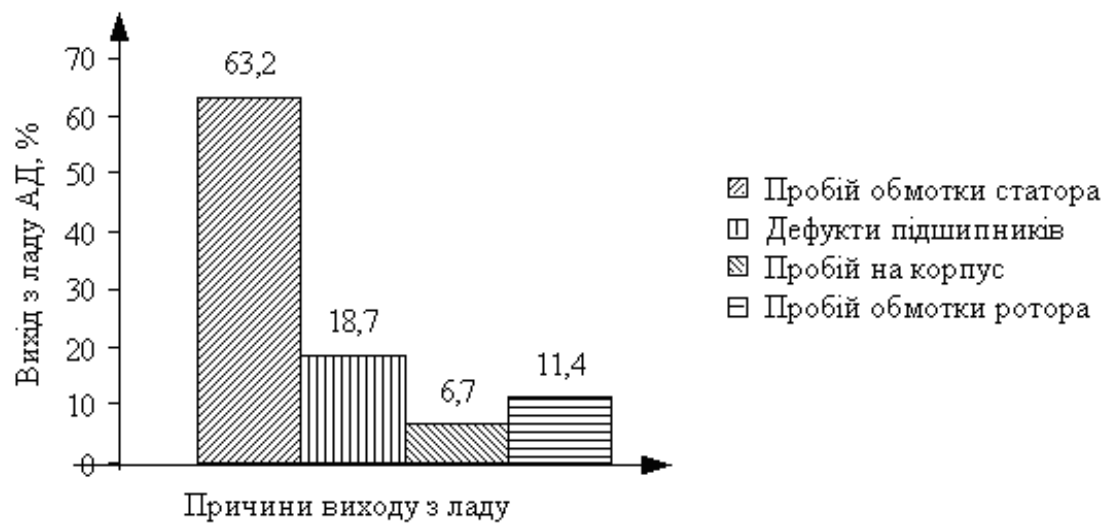


Рисунок 4.3. Можливі фактори виходу з ладу відремонтованих АД

Згідно проведеному аналізу, найчастіше виходять з ладу (65% випадків) двигуни потужністю до 30 кВт електроприводів верстатів і кранів вантажопідйомністю 5-10 т.

Представлені дані свідчать про різке збільшення втрат в сталі після ремонту. Характерне те, що близько чверті двигунів мала після ремонту втрати в сталі, більш ніж на 100% вище номінальних.

Слід зазначити, що часто механічні ушкодження пакету сталі, викликані причинами технологічного характеру і кваліфікацією ремонтного персоналу, приводять до виникнення локальних перегрівів пакету, які більш небезпечні, ніж загальне підвищення температури внаслідок значного зростання втрат в сталі. Фактично подібні дефекти неможливо виявити, досліджуючи тільки роботу двигуна на холостому ході. А в результаті цих змін відремонтовані АД, потрапляючи в доремонтні умови експлуатації, при колишньому робочому навантаженні перегріваються і виходять з ладу.

Іншим “больовим місцем” АД є підшипниковий вузол. Відсутність можливості перевірки роботи підшипників в робочому режимі двигуна, часті випадки неспіввісності ротора і розточування статора, неможливість виявити осьову несиметрію (дисбаланс) ротора, перекося в установці підшипників на посадочні місця приводять до укр. небажаних наслідків у вигляді вібрацій і биття, що в кращому разі підвищує шум при роботі машини, а в гіршому приводить до повного механічного руйнування експлуатованого АД.

Відомо, що якщо до фактору теплового старіння додається фактор вібрації, то середнє значення відмов АД зменшується приблизно в 4 рази, при додаванні до теплового старіння динамічних зусиль і частих перенапруг при реверсах середнє напрацювання на відмову зменшується в 2,5 рази, а, при одночасній дії всіх перерахованих факторів зменшується майже в 30 разів.

З вищесказаного можна зробити висновок, що не можна оцінювати всі зміни в електричній машині, що вносяться при її ремонті, знаючи лише опори обмоток, ізоляції і струм холостого ходу.

Факт придатності електричної машини для використання в умовах експлуатації може бути визначений тільки після виробництва випробувань в повному об'ємі, у тому числі випробувань під струмовим і механічним навантаженням.

Випробування повинні проводитися не тільки після збирання відремонтованої машини, але і на етапі перед її перемоткою, оскільки на практиці зустрічаються випадки, коли пакет сталі прийшов в повну непридатність і подальша перемотка недоцільна.

Вивід про можливість використання машини на колишньому місці експлуатації можна зробити, лише проаналізувавши режим її роботи з врахуванням параметрів, що змінилися. Всі вказані заходи дозволяють підвищити термін служби відремонтованої машини і дати обґрунтування процесам, що приводять до зміни параметрів АД в період експлуатації і ремонту.

4.2. Зміна параметрів електричних машин при старінні.

Зміна параметрів електродвигуна в процесі експлуатації обумовлена її старінням. Старіння по відношенню до електричних машин - це втрата основними конструкційними матеріалами і елементами частково або повністю своїх властивостей під впливом зовнішніх чинників, що з'являються в процесі експлуатації та ремонту з часом. Процес старіння найтісніше пов'язаний з надійністю, оскільки у міру старіння електричної машини зменшується час її напруженого функціонування на відмову.

Розглядаючи процес старіння, не можна обійти увагою ні механічні вузли (підшипники, вали і ін.) ні конструктивні магнітні матеріали, ні обмотувальні матеріали, оскільки зміна властивостей будь-якій частині електричної машини свідомо спричиняє за собою зміну робочих параметрів. Так, наприклад, знос підшипників спричиняє зсув валу, повітряний зазор між тією, що обертається і нерухомою частинами машини стає нерівномірним, що може, з одного боку, створювати биття при роботі, з іншого боку стати передумовою зносу магнітних матеріалів (чіпляння листів пакету частин, що обертається, за нерухомі).

Оцінити старіння всіх конструктивних частин машини - досить трудомістке завдання, та в цьому немає необхідності, тому що стосовно експлуатації поважно дати відповідь лише на декілька питань, зокрема, як підвищити час бездоганної роботи електричного двигуна після ремонту, і як змінюються робочі параметри електричної машини в процесі старіння і після ремонту.

Відповісти на ці питання можна, оцінивши процес старіння саме тих конструктивних частин і елементів електричної машини, виходом з ладу яких обумовлена основна частина відмов.

Проведемо такий аналіз для асинхронних двигунів. Згідно [8], 85-95% АД виходять з ладу із-за пошкодження обмотки статора. Відмови розподіляються таким чином: міжвиткові замкнення - 93%, пробій міжфазної ізоляції складає 2%. На неполадки підшипникового вузла припадає 5-8% відмов і малий відсоток випадає на такі причини, як розпайка вивідних наконечників, скручування валів, розривання стержнів ротора та ін.

З цього можна зробити вивід, що старіння машини обумовлене в основному старінням ізоляції і підшипникових вузлів. Розгледимо ці процеси докладніше.

Аналізуючи вплив всіх перерахованих вище факторів [8] на процес старіння ізоляції, можна виділити два основних: температурні і механічні дії.

У електричній машині, що проходила ремонт, ці два типи дій підсилюються через наступні особливості:

- часто при заміні обмоток машин відсутній необхідний тип ізоляції і міжшарову і пазову ізоляцію виконують з матеріалу, що є в наявності, що знижує нагрівостійкість машини;
- при заміні підшипників часто спостерігається ексцентриситет валу, що робить негативний вплив на рівень вібрації машини.

Старіння підшипникових вузлів необхідно розглядати в декількох ракурсах. По-перше, вихід з ладу електричного двигуна з цієї причини є другим за поширеністю; по-друге, старіння в підшипникових вузлах є причиною виникнення вібрацій в широкому діапазоні частот; по-третє, нерівномірність повітряного зазору, що виникає в процесі старіння, приводить до перегріву окремих частин обмотки статора АД.

Як вже наголошувалося вище, низькочастотна вібрація робить істотний вплив на вихід з ладу ізоляції електричної машини. Крім недосконалості підшипників кочення, порушення геометрії “шпилька-підшипник” причиною таких вібрацій є ексцентриситет і неврівноваженість мас, що обертаються. Ці джерела вібрації виникають під дією електромагнітних, аеродинамічних і

механічних сил. Електромагнітні сили залежать від співвідношення числа пазів ротора і статора, від параметрів магнітного ланцюга, нерівномірності повітряного зазору, несиметрії напруги живлення і ін.

Аеродинамічні сили виникають при роторі, що обертається, і визначаються конструкцією вентилятора і вентиляційних каналів.

Механічні залежать від якості виготовлення підшипників, точності обробки посадочних місць під підшипники і величини дисбалансу ротора. Дисбаланс ротора виникає при технологічних відхиленнях, прогині валу, деформації ротора при нагріві, неоднорідності частин, що обертаються. З вищесказаного можна зробити висновок, що електромагнітні і механічні сили в процесі природного старіння машини, і особливо в післяремонтний період, зростають із-за старіння конструктивних матеріалів машини і її вузлів.

Істотний вплив на старіння електричної машини надає старіння ЕТС, оскільки через ЕТС відбувається передача енергії від нерухомої частки машини до тієї, що обертається. Під коефіцієнтом старіння сталі розуміють процентний приріст питомих втрат $p_{1,0/50}$ (знятих при індукції 1Тл на частоті 50Гц) після 600 годинного нагріву пакету сталі ЕМ до 1000С. Відомо, що втрати змінюються при нагріві пакету листів сталі, між якими існує шар ізоляції. Цей шар в процесі нагріву може руйнуватися, створюючи таким чином короткозамкнуті контури між листами, що приводить до зростання втрат на вихрові струми. Впливає на зміну магнітних властивостей ЕТС і знос в підшипниках. При великому ступені зносу відбувається тертя ротора об статор, при цьому механічно зношується сталь обох пакетів. Механічна деформація сталі погіршує її магнітні властивості. Окрім цього, замикаються закоротко листи зубців пакету статора, що є найслабкішим місцем пакету внаслідок того, що саме через зубці відбувається передача основної частки енергії від статора до ротора. Погіршення магнітних властивостей зубців приводить до додаткового спотворення магнітного потоку, який проходить в повітряному зазорі, його ослабленню (вихрові струми створюють додаткові

потоки $\sum_{i=1}^n \Phi_{1i}$, що ослабляють дію основного потоку Φ_1 в разі їх протилежного напрямку), створює умови додаткового нагріву в області зубців

із-за збільшення енергії втрат, яка вже не може бути в повному об'ємі відведена з машини. Сукупність цих чинників приводить до таких негативних наслідків, як пробій ізоляції в областях, близьких до сталі зубців і погіршення робочих параметрів електричної машини (погіршення коефіцієнта корисної дії, обертає моменту, що розвивається, і ін.).

Слід зазначити, що в процесі нормальної роботи двигуна (до першого ремонту при напрузі живлення номінального значення і синусоїдальної форми) вплив описаних вище чинників неістотний - йде процес природного старіння машини. При виникненні в мережі перенапружень або несинусоїдальності форми напруги живлення процес старіння посилюється. Так, наприклад, при перенапруженні двигун працює в режимі насичення, що збільшує втрати в сталі, породжує несинусоїдальність споживаного від мережі струму, який створює несинусоїдальний магнітний потік. Підсумком є перенагрівання ізоляції із-за збільшення втрат в міді від первинного струму і втрат в сталі, зниження $\cos\phi$ і η працюючої машини.

Істотний вплив на процес старіння ЕМ надає її ремонт, але не через недосконалість технології, а тому, що в процесі ремонту відбуваються серйозні зміни в конструктивних елементах електродвигуна. Так, відомо, що після ремонту відремонтована машина починає споживати від мережі більший струм, це відбувається навіть у режимі холостого ходу. Величина струму збільшується на 20-40%. На підставі детального аналізу можна з повною упевненістю стверджувати, що основні зміни в ЕМ, які пов'язуються із змінами в ЕТС, тому що саме ЕТС піддається найбільш потужним тепловим (до 450-700С) і механічним (витягання обмотки з пакету статора) діям в процесі ремонту.

Зміна якості основних конструктивних матеріалів: класу нагрівостійкості ізоляції, ЕТС, а також неспіввісність в підшипниках приводить до суттєвих змін в самій ЕМ. Ці зміни необхідно визначати з високим ступенем точності, ретельно оцінювати і документувати з ціллю знаходження реальних параметрів АД в процесі їх старіння внаслідок

ремонту і експлуатації, що дасть змогу збільшити термін їх служби і знизити загальні затрати підприємства на ремонт.

4.3. Електромагнітні властивості електротехнічної сталі і вплив на них температури. Втрати від вихрових струмів.

Структура електротехнічної сталі є конгломератом феритових зерен, в розчині яких знаходяться інші, що входять в сталь, елементи. Оскільки електротехнічна сталь виходить шляхом плющення, то зерна її декілька витягуються у напрямі плющення і це створює неоднорідність (анізотропію) як механічних, таких магнітних і електричних властивостей.

Явище витягування зерен, що є наслідком холодного наклепання при плющенні, декілька погіршує магнітні характеристики і збільшує петлю гістерезису, що дає збільшення магнітних втрат. Одночасно наклепання збільшує і електричний опір, що призводить до незначного зменшення втрат на вихрові струми, але переважаючим фактором залишається збільшення площі петлі гістерезису. Вплив наклепання підсилюється при подальшій механічній обробці (різка, штампування і так далі), що також погіршує магнітні властивості матеріалу. Електротехнічна сталь після плющення для знищення впливу наклепання піддається відпалу, що сприяє укрупненню зерен і тим самим зменшенню втрат на гістерезис. Експериментально встановлено, що необхідний рівень магнітних властивостей досягається при температурах 800...900 (Зі швидкостях нагріву 10...50 К/с. В процесі відпалу окрім рекристалізації і зростання зерен, на поверхні листів утворюється щільна та тонка оксидна плівка з необхідними значеннями електроопору. Крім того, проведений аналіз процесу утворення електроізоляційного покриття на крем'янистих сталях в ході високотемпературного відпалу.

Як відомо, в сучасних видах електротехнічної сталі відбувається незначна присадка кремнію. Кремній має дві властивості. По-перше, він сприяє переведенню вуглецю, наявного в сталі, з цементиту в графіт, і це зменшує втрати на гістерезис, і, по-друге, він підвищує електричний опір в

сталі, а це знижує втрати на вихрові струми. Припускається, що благотворний вплив відпалу позначатиметься на електротехнічній сталі і після процесу штампування і різання на заводі електромашинобудування, що і практикується низкою фірм. Для уникнення явища різкого окислення відпал в цьому випадку проводиться в атмосфері водню.

З вищесказаного можна зробити вивід, що в процесі високотемпературного відпалу електричні та магнітні якості сталі фактично не погіршуються. Однак, розглядаючи процес зміни цих властивостей під час відпалу при видаленні обмотки статора, можна прийти до наступних висновків:

1) Оскільки відпал відбувається в повітряному середовищі, навіть при температурах 300С і вище здійснюється зміна внутрішньої структури сталі: зерна продовжують рости, в той же час в сталі утворюється значна кількість цементиту, що погіршує її магнітні властивості, оскільки із-за виникаючої внутрішньої напруги в цій середі деякі доменні області не повертаються під впливом зовнішнього магнітного поля. Всі ці процеси приводять до зміни основних магнітних характеристик сталі - зменшується значення індукції насичення $B_{нас}$, знижується найвища величина магнітної проникності μ_{max} і так далі.

2) Знижується питомий опір ρ в прилеглих до поверхні листа шарах сталі із-за зниження концентрації Si в цих областях унаслідок його участі в утворенні оксидної плівки [20]. Наслідком цього процесу є збільшення вихрових струмів, і, відповідно, втрат на вихрові струми.

3) Унаслідок відпалу і механічних пошкоджень, порушується ізоляція між листами пакету електротехнічної сталі. Проведені дослідження показують, що 15,83% зубців (у зубцях пакету статора відбуваються найбільші зміни властивостей сталі) мають місцеву відсутність ізоляції між листами, з них 2,125% розташовані по два поруч, а 0,985% по три поруч, що є прямою передумовою виникнення локального контуру. В пакеті після ремонту є до 8-12 локальних контурів, що виникають унаслідок термообробки, механічних пошкоджень пакету і коротких замикань на

ділянках ізоляції, прилеглих до пакету статора; які є місцями локального перегріву унаслідок збільшення вихрових струмів на цих ділянках. Слід зазначити, що ізоляція з SiO_2 на цих ділянках не відновлюється і не утворюється, як при відпалі сталі на етапі збірки пакету.

4) Біля всіх відремонтованих двигунів спостерігається розпушення крайніх листів сталі, при чому їх кількість істотно більше з боку витягання обпаленої обмотки. Кількість ослаблених листів в пакетах АД потужністю до 28 досягає 8-15, до 75кВт- 20-25. Як відомо, присадка кремнію негативно впливає на механічні властивості сталі. Якщо сталь марок 1211, 1212 (0,4-0,8% Si) завтовшки 0,5мм повинна витримати без пошкоджень 10 перегинів, то сталь марок 1511, 1512 та ж товщина може витримати тільки один перегин. Тому механічні пошкодження в процесі ремонту можуть привести до механічного руйнування зубців сталі, що підтверджується даними - біля двигуна потужністю до 75 кВт вибоїни в зубцях пакетів спостерігаються в 75% випадків. Крім того, механічна деформація призводить до зниження магнітних властивостей сталі, зокрема, індукції насичення, $B_{нас}$ хоча в процесі відпалу індукція насичення трохи підвищується.

5) Перед збиранням вирубувачів в пакет сталі на електромеханічних заводах для усунення замикань між листами їх ізолюють один від одного емалевим лаком. При теплових і механічних діях лак руйнується і створюється можливість замикання саме по краях листів, що не можна визначити дослідним шляхом, оскільки найбільш небезпечне місце контакту - краї контуру листів, що мають невеликі виступи після вирубування, - володіє малою площею. А контакт листів приводить до збільшення вихрових струмів.

Таким чином, одним з найзначніших чинників при зміні властивостей сталі є зростання втрат від вихрових струмів, тому що навіть істотні зміни магнітних властивостей при відпалі (при температурі нижче за точку Кюрі) не можуть привести до збільшення втрат в сталі на 239,4%.

Оцінимо зростання втрат від вихрових струмів.

При синусоїдальній індукції з врахуванням реактивного впливу вихрових струмів для повних втрат від вихрових струмів можна записати:

$$P'_e = \frac{4 \cdot K_\phi^2 \cdot \Delta_1^2}{3 \cdot \rho_1} \cdot f^2 \cdot B^2 \cdot f_F \cdot S_1 \cdot l, \quad (4.1)$$

де $\Delta=0,5$ мм – товщина листа сталі;

K_ϕ - коефіцієнт форми індукованої ЕДС ($K_\phi = \frac{\pi}{2 \cdot \sqrt{2}} \approx 1,11$);

ρ_1 - питомий опір сталі;

f - частота перемагнічування;

B - амплітуда змінної індукції, що становить [34];

$$f_F = \frac{3}{\xi} \cdot \frac{\operatorname{sh} \xi - \sin \xi}{\operatorname{ch} \xi - \cos \xi}. \quad (4.2)$$

де ξ - приведена товщина листа:

$$\xi = \alpha \cdot \Delta_1, \quad (4.3)$$

$$\alpha = 2 \cdot \pi \cdot \sqrt{\frac{\mu}{10^5} \cdot \frac{\tau}{\rho}}, \quad (4.4)$$

де μ - середня магнітна проникність заліза;

S_1 - середня площа зубця;

l - довжина зубця.

Аналізуючи вираз (4.1), можна зробити вивід про те, що із зростанням числа і розміру короткозамкнутих контурів вихрових струмів в пакеті сталі під час його відпалу, за умови значного зниження питомого опору сталі, втрати на вихрових на окремих локальних ділянках пакету статора зростають швидше, ніж просто при закорочуванні листів сталі.

4.4. Аналіз втрат, що становлять, на гістерезис та вихрові струми в сталі АД.

Загальні втрати в сталі можна представити як:

$$P_c = P_{c0} + P_{доб}, \quad (4.5)$$

де P_{c0} - значення основних втрати в сталі;

$P_{доб}$ - значення додаткових втрат в сталі.

Основні втрати в сталі складаються з втрат на гістерезис та втрат на вихрові струми.

$$P_{c0} = P_{\epsilon} + P_{\epsilon}. \quad (4.6)$$

Існує ще один тип втрат - втрати внаслідок магнітної в'язкості. Це явище пов'язане зі зміною меж доменів, виявляється при частотах порядку декілька сотень або тисяч кілогерц і в області частот, при яких працюють машини змінного струму, не враховується.

Розглядаючи детальніше складові втрат в (4.6), можна знайти величезну кількість співвідношень для обчислення втрат на гістерезис P_{ϵ} і втрат на вихрові струми P_{ϵ} . Пояснити це можна тим фактом, що, маючи математичний опис втрат, що становлять, можна створити просту методику проектування електричних машин.

Для втрат на гістерезис можна виділити такі співвідношення.

Кращий збіг з дійсністю дає формула Ріхтера [30] для питомих втрат [Вт/кг]:

$$P_{\epsilon} = a \cdot f \cdot B + b \cdot f \cdot B^2, \quad (4.8)$$

де f - частота;

B - максимальне значення індукції;

a і b - постійні для даного типа сталі.

При великих значеннях індукції в співвідношенні (1.8) можна нехтувати першим членом і з достатньою точністю записати

$$P_{\epsilon} = \sigma_{\epsilon} \cdot f \cdot B^2, \quad (4.9)$$

де σ_{ϵ} - постійна матеріалу.

Потужність, що витрачається на гістерезис:

$$P = \eta \cdot f \cdot B_{max}^n \cdot V, \quad (4.10)$$

де V - об'єм пакету сталі;

$n = 1,6 \div 2$.

Якщо товщина листів, що входять в пакет, більш 0,5мм, то виявляється реактивна дія вихрових струмів. З врахуванням цього, питомі втрати на гістерезис

$$P_{\sigma} = \sigma_{\sigma} \cdot f \cdot B^2 \cdot F_{\sigma}, \quad (4.11)$$

де F_{σ} - коефіцієнт реактивної дії вихрових струмів

$$F_{\sigma} = \frac{\xi}{2} \cdot \frac{\operatorname{sh} \xi + \sin \xi}{\operatorname{ch} \xi - \cos \xi}, \quad (4.12)$$

Для $\xi < 1,5$ $F_{\sigma} = 1$, для великих значень ξ F_{σ} швидко збільшується.

Згідно [17], питомі втрати на гістерезис

$$P_{\sigma} = \sigma_{\sigma} \cdot \left(\frac{f}{100} \right) \cdot B^2. \quad (4.13)$$

Оскільки, згідно [32], при визначенні втрат використовується співвідношення

$$U_1 \approx E = 4 \cdot f \cdot S \cdot \omega_2 \cdot B_{\max}, \quad (4.14)$$

де U_1 і E - середні значення відповідно напруги і ЕДС;

S - площа поперечного перерізу зразка;

ω_2 - кількість витків вимірювальної обмотки;

$B_{\max}$ - максимальне значення індукції

то представлені вище співвідношення наберуть вигляду

$$P_{\sigma} = f \cdot k \cdot U_1^2, \quad (4.15)$$

де k - коефіцієнт, постійний для певного пакету сталі.

Останнє співвідношення більшою мірою справедливо для трансформаторів, чим для асинхронних двигунів [27], хоча найчастіше використовується при аналізі втрат в сталі останніх.

Втрати на вихрові струми відбуваються від дії струмів, які індуктуються в залізі при його перемагнічуванні. Найоб'єктивніше відображає величину втрат на вихрові струми співвідношення, представлене в пункті 1.3, і виведене з урахуванням фізики процесу створення вихрових струмів, згідно якому питомі втрати від вихрових струмів (Вт/м³):

$$P_{\epsilon} = \frac{4}{3 \cdot \rho} \cdot \Delta^2 \cdot k_{\phi}^2 \cdot f^2 \cdot B^2, \quad (4.17)$$

де Δ - товщина листа;

k_{ϕ} - коефіцієнт форми кривої;

ρ - питомий опір сталі.

За умови синусоїдальності кривої ЕДС (робота в ненасиченій зоні), позначається

$$\sigma_{\epsilon} = \frac{4}{3 \cdot \rho} \cdot \Delta^2 \cdot k_{\phi}^2, \quad (4.18)$$

можна одержати співвідношення

$$P_{\epsilon} = \sigma_{\epsilon} \cdot f^2 \cdot B^2. \quad (4.19)$$

В разі дуже товстих листів сталі (що може мати місце при короткому замиканні окремих листів в пакеті) необхідно враховувати реактивну дію вихрових струмів.

Вираз для втрат, аналогічне (4.19), отримане в [33]:

$$P_{\epsilon} = \frac{B_{\phi}^2 \cdot \gamma \cdot f^2 \cdot \Delta^2}{6} \cdot F_{\epsilon}, \quad (4.20)$$

де

$$F_{\epsilon} = \frac{3}{\xi} \cdot \frac{\operatorname{sh} \xi - \sin \xi}{\operatorname{ch} \xi - \cos \xi}; \quad (4.21)$$

Δ - товщина листа;

γ - питома провідність сталі.

Вираз (4.20) отримане з рівнянь Максвелла для напруженості електричного та магнітного поля за умови синусоїдального магнітного потоку Φ і постійної магнітної проникності μ .

З (4.20) при малих ξ одержуємо, що втрати на віхрові струми є пропорційні другому ступеню товщини листа і другого ступеня частоти, а при великих втрати будуть функцією першого ступеня товщини листа і частоти в ступені 3/2.

Розділити втрати в сталі на складові частини від гістерезису і віхрових струмів при їх визначенні в разі пакету сталі можна за допомогою наступного методу.

Відповідно до сказаного вище, сумарні втрати в сталі на гістерезис і втрати на вихрові струми

$$P_{co} = k \cdot f \cdot U_1^2 + m \cdot f^2 \cdot U_1^2. \quad (4.22)$$

Таким чином, провівши визначення втрат при різних значеннях U_1 і f , можна визначити k і m і здійснити розділення втрат, після чого можна визначити втрати в сталі при заданих значеннях напруги U_{1H} і частоти f_H .

Для трансформаторів і досліджуваних зразків нескладної форми користуються однією з модифікацій вищеописаного методу [27, 32, 34, 35]:

- під час досліду холостого ходу одночасно із зміною напруги регулюють частоту так, щоб

$$\frac{U}{f} = \frac{U_H}{f_H} = const. \quad (4.23)$$

В цьому випадку

$$P_c = P_0 = P_z + P_\epsilon = C_z \cdot f + C_\epsilon \cdot f^2, \quad (4.24)$$

звідки

$$\frac{P_c}{f} = \frac{P_0}{f} = C_z + C_\epsilon \cdot f, \quad (4.25)$$

тобто залежність втрат в сталі, розрахованих за один період, від частоти є прямою лінією, яка не проходить через початок координат (див. Рис.4.5).

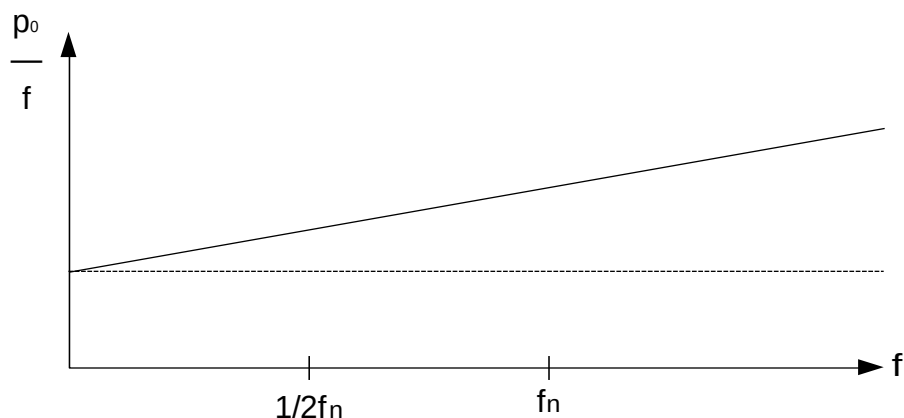


Рисунок 4.5. Графік залежності втрат в сталі від частоти

Побудувавши пряму $\frac{P_c}{f} = F(f)$ і продовживши її до перетину з віссю ординат, знайдемо C_c , після чого неважко підрахувати для даної частоти (частота $f=50 \text{ Гц}$) втрати на гістерезис

$$P_c = C_c \cdot f$$

і втрати на віхрові струми:

$$P_\epsilon = P_0 - P_c. \quad (4.26)$$

Слід зазначити, що приведені способи розділення мають місце в разі ненасиченої сталі, поки справедливі співвідношення (4.22) і (4.24).

На практиці часто користуються повним значенням втрат в сталі, не розділяючи його на складові, оскільки знання спільних P_c достатньо для розрахунку більшості досліджуваних режимів роботи електродвигунів. Тому існує лава співвідношень, що дозволяють оцінити спільні втрати в сталі.

Так, сумарні втрати в сталі представленої частини машини при будь-якій частоті і будь-якому значенні індукції можуть бути виражені у вигляді:

$$P_c = P_{[1/50]} \cdot \left(\frac{f}{50}\right)^\beta \cdot B^2 \cdot G_c, \quad (4.27)$$

де $P_{[1/50]}$ - питомі втрати при $B = 1 \text{ Т}$, $f = 50 \text{ Гц}$;

f - частота перемагнічування сталі;

β - показник ступеня, рівний 1,5 для слабологованих сталей, для високолегованих сталей $\beta=1,2 \div 1,3$;

G_c - маса даної частини машини;

B - значення розрахункової індукція в даній частині машини.

На підставі приведених методів розроблені методики розрахунку втрат в сталі [43, 44], згідно з яким

$$P_c = \frac{1}{\gamma} \cdot \pi \cdot f \cdot a \cdot B_m^{n+1} \cdot k_1 \cdot 10^{-3}, \text{ (Вт/кг)} \quad (4.28)$$

$$P_\epsilon = \frac{2 \cdot \pi^2 \cdot f^2 \cdot B_m^2 \cdot 10^{-3}}{R_c \cdot \gamma}, \text{ (Вт/кг)} \quad (4.29)$$

Тут $n = 0,4 \div 0,45$;

a - коефіцієнт, постійний для даного типу сталі.

Погрішність обчислення втрат в сталі згідно (4.28) і (4.29) для значень B_m в діапазоні $0,1 \div 0,2 T$ не перевищує 10 %.

У [45] для виразу сумарних втрат в сталі пропонується залежність виду

$$P_c = K_c \cdot \left(\frac{E_1}{U_{1f}} \right)^2 \left(\frac{f}{f_i} \right)^\beta, \quad (4.30)$$

де K_c - коефіцієнт, який відображає дефекти при обробці, марку сталі, масу магнітопроводу;

E_1 - поточне значення ЕДС двигуна;

U_{1f} - номінальна напруга фази статора;

f і f_i - відповідно поточна і номінальна частота живлячої мережі;

β - показник ступеня, залежний від марки сталі ($\beta = 1,3 \div 1,5$).

У [46] отримана залежність втрат в сталі для синусоїдальної зміни індукції

$$P_c = \frac{\omega}{2} B_m \cdot (H_{\omega} + H_0), \quad (4.31)$$

де H_{ω} - динамічна коерцитивна сила;

H_0 - деяка постійна для конкретної марки ЕТС величина, через певний коефіцієнт пов'язана із статичною коерцитивною силою, визначена в [46] для основних типів ЕТС.

У [47] втрати в сталі розраховуються на основі співвідношення

$$P_c = \frac{1}{2} \omega \cdot X_m \cdot \Phi_m^2, \quad (4.32)$$

де X_m - складова магнітного опору, якою визначається потужність, що виділяється в сталі;

$\hat{O}_m$ - амплітуда магнітного потоку, яку можна визначити з виразу

$$\Phi_m = \frac{E}{4,44 \cdot f \cdot n_\lambda}, \quad (4.33)$$

де E - ЕДС вимірювального витка, встановленого в зубцевій зоні;

$$n_\lambda = \frac{k_c}{\Delta};$$

k_c - коефіцієнт заповнення сталі;

Δ - величина товщини листів сталі.

Підводячи підсумок вищесказаному, щодо втрат від змінного перемагнічування можна зробити вивід, що існуючі співвідношення для цих втрат, що становлять, справедливі при умові, що всі листи сталі добре ізольовані один від одного, магнітна проникність (сталі постійна, сталь не насичена, тобто для нового електродвигуна.

В разі визначення втрат у відремонтованій машині практично всі вищеописані співвідношення неприйнятні, оскільки має місце складніший процес розподілу втрат і квадратична залежність $P_c \sim U_1^2$ руйнується. У відремонтованій машині зі всього, що перераховане вище, можна в певних випадках користуватися лише співвідношенням (4.8) і те лише за умови незначного насичення і знання числа, розмірів і розміщення короткозамкнутих контурів.

Слід зазначити, що, оскільки втрати в сталі для АД зазвичай виділяють при проведенні дослідів холостого ходу, при якому споживана потужність P_0

$$P_0 = 3 \cdot I_{1\phi}^2 \cdot r_1 + P_c + P_{\text{мех}}, \quad (4.34)$$

де $I_{1\phi}$ - струм статора;

r_1 - активний опір статора;

$P_{\text{мех}}$ - механічні втрати

а розділення втрат відбувається за умови, що при $f_1 = \text{const}$, $P_{\text{мех}} \approx \text{const}$ на підставі наступного співвідношення

$$P_0' = P_{\text{мех}} + P_c = C_1 + C_2 \cdot U_1^2, \quad (4.35)$$

можна зробити вивід, що розділення втрат згідно (4.35) можна проводити тільки для слабо насичених машин. Відремонтована машина працює в зоні насичення, тому в (4.35) необхідно здійснювати істотні корективи з урахуванням нових умов роботи.

Всі формули, що розглядали вище, для втрат, що становлять, характерні для змінного перемагнічування.

Другий тип перемагнічування - обертальне перемагнічування - має місце в ярмі АД. Вважають, що при обертальному перемагнічуванні P_2 ростуть при збільшенні індукції приблизно до значення, а потім, при подальшому збільшенні індукції, починають різко падати. На рис. 4.6 крива 1 показує залежність $P_2 = f(B)$ для змінного перемагнічування, а крива 2 - для обертального.

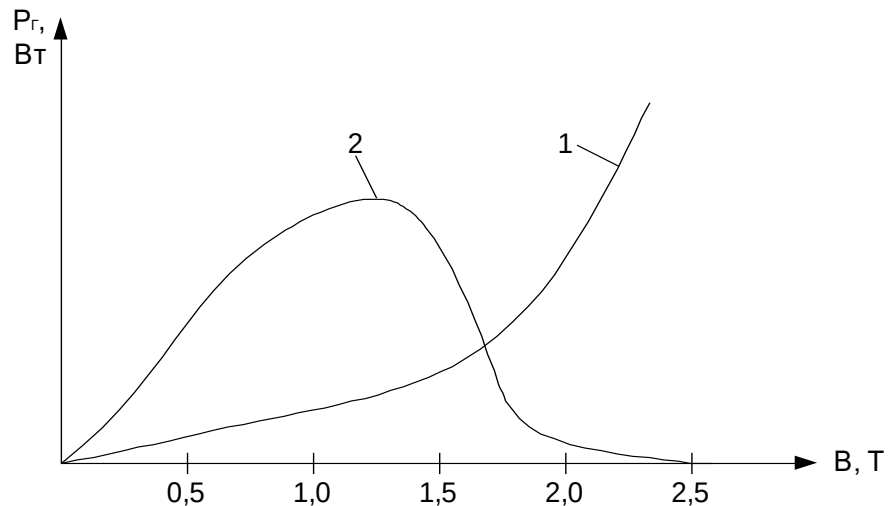


Рисунок 4.6. Зміна втрат на гістерезис для змінного 1 і обертального 2 перемагнічування

Якщо індукція в ярмі статорі АД менше 1,6 Т, то втрати P_2 при обертальному перемагнічуванні визначають, множачучи (4.7) на поправочний коефіцієнт, рівний в середньому 1,8.

Втрати на вихрові струми від обертального перемагнічування із-за нерівномірності індукції в ярмі і появи додаткових вихрових струмів буде теж вище за складову від змінного перемагнічування в 1,21,5 разів.

Слід зазначити, що, не дивлячись на характер намагнічування, втрати в сталі складаються з P_2 і P_6 .

Розглянемо другу складову співвідношення (4.5) - додаткові втрати $P_{доб}$. Основними складовими цих втрат є:

а) додаткові втрати в сталі після зміни структури листів сталі при їх механічній обробці;

- б) втрати в конструктивних деталях і корпусах;
- в) втрати в місцях закріплення листів в пакеті після нерівномірного розподілу магнітної індукції і зростання втрат на вихрові струми.

Цей вид втрат не піддається загальному розрахунку. Додаткові втрати приймають рівними 10-15% основних втрат

$$P_{доб} = P_{co} \cdot (1,15 \div 1,20). \quad (4.36)$$

Аналізуючи існуючі залежності для втрат в сталі, можна прийти до висновку, що вони одержані на підставі уявлень про зміну втрат в листовому залізі, в загальному випадку можуть бути приведені до співвідношень для листового заліза при змінному перемагнічуванні і справедливі лише для нових двигунів.

Для з'ясування аналітичних залежностей обчислення втрат в сталі відремонтованої машини необхідно перш за все провести дослідження, які допомогли б з'ясувати реальну залежність $P_c = f(f, U_1)$, враховували механізм виникнення короткозамкнутих контурів вихрових струмів в пакеті сталі і вносили поправки до методик, що розгледіли, відображаючи зміни, що відбуваються в електротехнічній сталі під час ремонту АД.

Аналізуючи розподіл втрат в сталі АД, що виникає в процесі ремонту двигуна, потрібно виділити два основні фактори, що впливають на величину складових від вихрових струмів і гістерезису:

- механічні пошкодження в пакеті, що виникають в процесі видалення ротора і обмотки статора;
- теплові пошкодження ізоляції листів пакету в процесі відпалу і перетворення магнітних властивостей в сталі в процесі відпалу.

Оскільки обидва чинники обумовлюють виникнення додаткових втрат від віхрових струмів, оцінимо місце розташування найбільш пошкоджених ділянок пакету статора.

Що стосується теплових пошкоджень, то, згідно з умовами охолодження і розподілу температури, максимальна температура при відпалі буде в частині пакету, прилеглій до корпусу двигуна (пакети відпалюють, не

випресовуючи з корпусу). Нерівномірність розподілу температури в об'ємі пакету при відпалі виявляється лише в двигунів великої потужності. В цьому випадку магнітні властивості сталі будуть різні по перетину і діаметру пакету. Аналіз змін можна здійснити на підставі досліджень, проведених при різних температурах відпалу. Тут треба відмітити, що магнітний потік не пронизує все ярмо пакету, тому описані вище зміни не можуть суттєво вплинути на характеристики відремонтованого АД.

Як вже наголошувалося раніше, найбільші механічні пошкодження відбуваються при видаленні обмотки методом протяжки в зубцях пакету (ділянка А на Рис. 4.7). При механічних пошкодженнях листи сталі можуть бути розпушені або закорочені, крім цього частково ушкоджується ізоляція між ними.

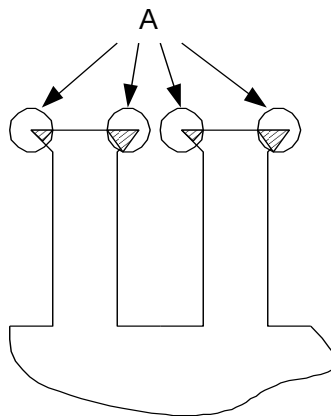


Рисунок 4.7. Зони пакету статора, що піддаються найбільшим механічним пошкодженням

Пошкодження в зубцях найбільш небезпечні, тому що в АД максимальна енергія зосереджена в повітряному зазорі і прилеглих до нього частинах зубців статора і ротора.

4.5. Доцільність сертифікації електродвигунів на стадії ремонту.

Як вже було відмічено вище, зміни, що відбуваються в електричній машині під час експлуатації і ремонту, приводять до зміни її робочих

параметрів. Тому після ремонту ми маємо абсолютно іншу електричну машину, ніж та, що поступила в ремонт.

Як правило, відремонтована машина повертається на своє місце, будь то привід верстата, один з механізмів мостового крана тощо. У результаті виходить наступна ситуація: режим роботи механізму не змінюється і навантаження на електродвигун залишається колишнім. В той же час встановлена ЕМ, що проходила ремонт, може не розвивати за колишніх робочих умов необхідний момент, що обертає, а в номінальному режимі вже перегрівається.

Якщо двигун вибраний з невеликим запасом по потужності (двигуни металорізальних верстатів), його практично не можна використовувати на колишньому місці роботи не тільки внаслідок перегріву, але і тому, що він не розвиватиме потужність, потрібну для нормального режиму роботи робочого механізму.

Слід зазначити, що проведення сертифікації найактуальніше для стадії перед початком перемотки, що дозволило б визначити її доцільність і висунути вимоги до обмотувальних матеріалів. Крім цього, необхідно провести аналіз потужності, що розвивається двигуном, з метою визначення його придатності для роботи на колишньому місці експлуатації і аналіз спотворень напруги живлення мережі, що виникають при роботі такого електродвигуна в зоні насичення, оскільки несинусоїдальність живлячої напруги може привести до виходу з ладу нормально працюючих двигунів на підприємстві або внести суттєві зміни до їх режиму роботи [53].

Постановка задачі досліджень

Ціль роботи полягає в розробці і дослідженні методики визначення робочих характеристик і допустимих експлуатаційних параметрів АД з метою їх сертифікації після ремонту на підставі даних про реальний стан ЕТС пакетів статорів, отриманих при її діагностиці, а також в розробці заходів з метою підвищення надійності ремонтів АД.

Для вирішення цієї задачі необхідно здійснити наступні кроки:

- визначити закономірності високої аварійності АД і з'ясувати їх зв'язок з причинами погіршення характеристик ЕТС пакетів сталі статорів;

- провести аналіз процесу старіння ЕТС пакетів статорів АД з вказівкою особливостей і вірогідних причин зміни її властивостей;
- розробити новий спосіб діагностики головних властивостей ЕТС пакетів статорів АД, що дозволяє точно визначати її реальне перебування і основні характеристики та систему автоматичної діагностики стану ЕТС пакетів статорів на основі цього способу;
- розробити математичне забезпечення, яке містить точні алгоритми обробки параметрів двигунів і параметри діагностики, а також програмне забезпечення вимірювального комплексу та системи паспортизації - сертифікації АД на етапі ремонту.

5 ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ

5.1. Економічна ефективність

Сучасні методики по визначенню економічної ефективності щодо нової техніки відносяться прогресивні засоби праці, а саме - устаткування, механізми, пристрої, машини, прилади, а також матеріали, паливо, електричну та теплову енергію. До сучасних методів економічної ефективності також відносять нові технології та організацію виробництва, виконання робіт та послуг, оновлену продукцію невиробничого вжитку, наприклад, продукцію для забезпечення потреб населення, охорони довколишнього середовища.

При цьому до поняття «оновлена» відноситься не тільки застосування реально нових видів і типів продукції, але й вдосконалення і модернізація продукції, яка випускалася раніше.

Засоби й матеріали праці та кінцева продукція – це матеріальна база поняття “оновлена техніка”. До показників цієї бази відносяться затрати на виробництво й обробку продукції, затрати й результати її застосування становлять основні елементи розрахункових формул для отримання економічного ефекту.

Під оновленою технікою розуміють результати науково-дослідних і прикладних робіт, які застосовуються у виробництві, винаходи, раціоналізаторські пропозиції та організаційно-технічних заходи, які забезпечують одержання економічного ефекту.

В економічних рекомендаціях, у методиках та на практиці, поняття “економічна ефективність” широко застосовується з поняттям “економічний ефект”. Показники економічного ефекту показують масову частку економії, а показники ефективності показують рівень віддачі ресурсів, які вкладені у застосування науково-технічної рекомендації. Таким чином, економічна ефективність представляє собою сукупність загалом всіх показників економічної оцінки оновленої техніки, тобто і економічного ефекту, і

показників економічної ефективності.

Так, економічний ефект – не показник, а економічна закономірність. В методиках та інструкціях містяться 24 терміни економічного ефекту нової техніки.

У цей час основним фактором економічної оцінки оновленої техніки є величина річного економічного ефекту. Величина річного економічного ефекту визначається на величину річного обсягу продукції невиробничого призначення або ж на величину річного обсягу застосування нової технології й нових способів організації виробництва. Відповідно до цієї методики, як розрахунковий рік приймається перший рік після закінчення планованого строку освоєння виробництвом оновленої техніки. Як правило, це другий або третій календарний рік серійного випуску нової продукції або використання нової технології виробництва.

Питання підвищення матеріального добробуту й культури людей є необхідною передумовою інтенсивного розвитку економіки. Техніко-економічні розрахунки можна робити на будь-якому етапі конструювання й виробництва нової техніки; з погляду раціонального використання засобів їх варто робити в ході всієї розробки, закінчуючи цю роботу при конструюванні нової техніки на досвідченому зразку, тобто до остаточного твердження технічного твердження технічних умов для виробництва.

У ході техніко-економічних розрахунків можна виявити різні способи задоволення вимог до виготовленої техніки, що забезпечує зниження витрат і економію часу. Ніж раніше використовуються результати техніко-економічних розрахунків, тим більшої може бути потенційна економія, тобто значну економію часу можна одержати за рахунок використання техніко-економічних розрахунків. Це напрямок при розробці й виробництві техніки одержало назву функціонального вартісного аналізу (ФВА).

У визначенні економічної ефективності різних видів нової техніки багато загального, але є й відмінності, обумовлені їхньою специфікою, функціями у виробництві, особливостями виробництва й експлуатації.

Сучасні машини – це системи, що мають настільки різнобічні й найчастіше суперечливі властивості, що, поліпшуючи одні параметри, можна погіршити інші або якість всієї системи в цілому.

При створенні нової техніки ми маємо у своєму розпорядженні дані про її технічні параметри, на підставі яких необхідно визначити, які будуть витрати на її виробництво й експлуатацію.

При аналізі ефекту впровадження оновленої техніки потрібно враховувати її технічні показники. Саме технічні показники по-різному впливають на витрати по її виробництву й експлуатації. Тому для оцінки техніко-економічної ефективності оновленої техніки потрібно розглядати систему її показників, а не один показник.

Під характеристикою економічної ефективності оновленої техніки слід розуміти її реальну об'єктивну оцінку та економічний аналіз для встановлення мінімальних вимог та запитів, які необхідні для розроблення й виробництва відмінно функціонуючої техніки при найменших витратах праці й при покращенні основних параметрів цієї техніки.

5.2 Техніко-економічні показники.

Промисловий зразок станції встановлення параметрів двигунів змінного струму дає змогу визначити електромагнітні та енергетичні параметри, що дає можливість впевнитись в готовності технічного стану електромашини в умовах заводів-виготовлювачів і електроремонтних цехів. Розглянемо переваги та особливості розробленої системи в порівнянні з існуючим випробувальним обладнанням.

Для встановлення параметрів схеми заміщення і поділу втрат АД в дослідах КЗ і ХХ на випробувальних ділянках електроремонтних цехів застосовують індукційні регулятори напруги [25]. При цьому похибки знаходження параметрів схеми заміщення можуть досягати 35% (табл. 2.1), а похибки визначення втрат – до 20%. Використання запропонованих методів з використанням вентильних джерел полі гармонійного живлення дає змогу

покращити точність встановлення електромагнітних параметрів до 3–9%, а точність розділення втрат – до 2–4%.

Індукційний регулятор напруги являє собою електричну машину, аналогічну асинхронному двигуну з фазним ротором. Регулювання напруги здійснюється зміною просторового положення вторинної обмотки ротора щодо первинної обмотки статора. Вартість індукційного регулятора IP34/40 (потужність 320 кВт, максимальний струм 900 А, діапазон зміни вихідного напруги 0–500 В), включаючи вимірювальну та комутаційну апаратуру, становить близько 130–160 тис. грн. Вартість комп'ютеризованої станції діагностики електричних машин (СДЕМ) на ту ж потужність склала близько 80 тис. грн. з урахуванням монтажних і пусконаладжувальних робіт. При цьому СДЕМ має на порядок більшу ступінь автоматизації, і забезпечує ряд додаткових функцій (захист устаткування, автоматичне формування протоколу випробувань, створення баз даних і т.д.).

Визначення втрат СД можливо при обертанні в режимі ненавантаженого двигуна і живленні обмоток статора від індукційного регулятора напруги. Проведення зазначеного дослідження стає проблематичним для високовольтних (6–10 кВ) СД.

Обладнання, що дозволяє реалізувати метод знаходження індуктивних опорів, а також постійних часу обмотки синхронної машини згідно рекомендаціям ДЕСТ 10169–77 по частотним характеристикам, повинно мати встановлену потужність до 10% від потужності випробуваної машини. Істотним недоліком, властивим вказаному методу, є потреба формування випробувальної напруги у синусоїдальній формі регульованої частоти, що вимагає використання складних пристроїв (генератор постійного струму, що порушується джерелом синусоїдальної напруги). При цьому попередньо ротор встановлюється в положення, відповідне збігом поздовжньої вісі ротора з напрямком м.р.с. статора, що для великих СД викликає певні труднощі. Вартість подібного обладнання для встановлення електромагнітних параметрів двигуна потужністю 0,75–1,8 МВА складає

близько 70 тис. грн. При цьому точність визначення електромагнітних параметрів графоаналітичним методом невисока.

Для випробувань СД по пропонованих методів СДЕМ доповнюється високовольтним силовим введенням з блоками високовольтних датчиків струму і напруги, а також статичним збудником. Визначення електромагнітних параметрів здійснюється в режимі КЗ при живленні від мережі 0,4 кВ через тиристорний регулятор напруги. Вартість нарощуваного обладнання для випробувань СД складає суму порядку 40 тис. грн. При цьому час визначення електромагнітних параметрів скорочується в 3–4 рази в основному за рахунок методу визначення положення ротора відносно обмоток статора.

Таблиця 5.1 Порівняння показників базової і нової системи з встановлення параметрів двигунів змінного струму (АД до 320 кВт, СД 6–10 кВ до 2 МВА)

№ п/п	Показники, одиниці виміру	Величина показника	
		Базовий об'єкт	Новий об'єкт
1	Точність встановлення електромагнітних параметрів АД, %	$\pm 10 \div 35$	$\pm 2 \div 9$
2	Капіталовкладення для створення системи визначення параметрів АД, тис. грн.	140	80
3	Точність встановлення електромагнітних параметрів СД, %	$\pm 5 \div 15$	$\pm 2 \div 9$
4	Капіталовкладення для створення системи визначення параметрів СД, тис. грн.	70	40
5	Час на встановлення електромагнітних параметрів одного СД, год	0,5	0,2
6	Точність визначення втрат АД і СД, %	до 20	до 4
7	Сумарні капітальні витрати на систему встановлення електромагнітних та енергетичних параметрів АД і СД, тис. грн.	210	120

Пропонована система дозволяє зменшити час на проведення випробувань СД, підвищити точність знаходження електромагнітних параметрів, скоротити кількість обслуговуючого персоналу, зменшити капіталовкладення на створення обладнання, автоматизувати процес випробувань та обробки експериментальних даних. Таким чином, основний

економічний ефект досягається за рахунок значного зниження капітальних витрат на побудову системи післяремонтних випробувань двигунів змінного струму.

ВИСНОВКИ

Аналіз підходів до оцінювання параметрів ЕД змінного струму показав відсутність обладнання та методів, адаптованих до умов ремонтних цехів і підприємств. Для реалізації більшості існуючих методів необхідно громіздке і дороге обладнання, при цьому вони дозволяють визначити тільки частину параметрів, і лише у вигляді інтегральних величин без розподілу за фазами.

Визначення та розподіл втрат в АД і СД найбільш просто здійснюється при роботі машин в асинхронному режимі холостого ходу та живлення статора полігармонійною напругою. Уточнення значень втрат в сталі досягається визначенням ковзання холостого ходу шляхом аналізу кривої напруги під час відключення двигуна від мережі живлення.

Аналіз втрат потужності СД в режимі компенсатора і режимі короткого замикання, визначення кута вибігу ротора на синхронній швидкості дозволяють здійснити розподіл втрат в сталі на втрати в сталі статора і втрати в сталі ротора.

Використання ТРН як джерела полігармонічної напруги має переваги щодо інших джерел тестових впливів. Отримання необхідного гармонійного складу напруги і струму при одночасному забезпеченні необхідного струмового завантаження обмоток при живленні від промислової мережі без використання трансформаторного устаткування досягається при кутах управління ТРН в діапазоні 130...155 ел. град.

Розроблено структуру обладнання для визначення електромагнітних та енергетичних параметрів двигунів змінного струму, що дозволяє реалізувати і автоматизувати запропоновані методи в умовах електроремонтних цехів і підприємств.

Впровадження розробленого математичного, програмного та апаратного забезпечення дозволяє майже вдвічі знизити капітальні витрати на побудову випробувального комплексу для визначення електромагнітних та енергетичних параметрів ЕД змінного струму.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. П.Г.Плешков, Ю.І.Казанцев, А.Ю.Орлович. Основи енергозбереження та енергозберігаючі режими в системах електропостачання промислових підприємств. – Кіровоград: РВЛ КНТУ 2007.
2. П.Г.Плешков, А.Ю.Орлович, Котиш А.І. Електропостачання промислових підприємств. Навчальний посібник. – Кіровоград: РВЛ КНТУ, 2007.
3. Методичні вказівки до виконання магістерських робіт на здобуття освітньо-кваліфікаційного рівня – магістр електротехніки за фахом 8.090603 «Електротехнічні системи електроспоживання». /Укл.: П.Г.Плешков, Н.Ю.Гарасьова – Кіровоград: КДТУ, 2002-44 с.
4. Яцун М. А. Электричные машины / М. А. Яцун. – Львів : Львівська політехніка, 2001. – 428 с.
5. Копылов И. П. Электрические машины. Учебник для вузов / И. П. Копылов. – М. : Высшая школа, 2004. – 607 с.
6. Иванов-Смоленский А. В. Электрические машины. Учебник для вузов / А. В. Иванов-Смоленский. – М. : Энергия, 1988. – 928 с. : ил.
7. Родькин Д.И., Черный А.П., Калинов А.П. Современные схемные решения для диагностики параметров синхронных двигателей // Вісник КДПУ. Наукові праці КДПУ. - Вип. 1 (18) .- Кременчук: КДПУ, 2003.- С. 120-126.
8. Калінов А.П., Родькін Д.Й. Апарат діагностики синхронних двигунів. Вісник КДПУ // Вісник КДПУ. Наукові праці КДПУ. - Вип. 2 (19). Том 1. - Кременчук: КДПУ, 2003. - С. 159-166.
9. Калинов А.П. Анализ методов идентификации электромагнитных параметров синхронных двигателей // Зб. наук. праць КНТУ. Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація. - Вип. 15. - Кіровоград: КНТУ, 2004. - С. 110-119.
10. Бабаев М.Б. Математическая модель и особенности расчета

параметров схемы замещения многофазного асинхронного двигателя с симметричной обмоткой / М.Б. Бабаев, А.Н. Голубев // Электротехника. – 1992. – № 6. – С. 7–12.

11. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники: Электрические цепи. Учебник для студентов электротехнических, энергетических и приборостроительных специальностей вузов – 7-е изд. перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 1978. – 528 с.

12. Гемке В.И. Неисправности электрических машин. – Л.: Энергоатомиздат, Ленингр. отд-ние, 1989. – 336 с.

13. Герасимьяк Р.П. Асинхронный электропривод с тиристорным управлением / Р.П. Герасимьяк, В.А. Лещев, Н.С. Путилин. – К.: Техника, 1983. – 146с.

14. Гольдберг О.Д., Абдулаев И.М., Абиев А.Н. Автоматизация контроля параметров и диагностика асинхронных двигателей. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 160 с.

15. Гольдберг О.Д. Испытания электрических машин. Учебн. для вузов. – 2-е изд. испр. – М.: Высш. шк., 2000. – 255 с.

16. Гольдберг О.Д. Качество и надежность асинхронных двигателей. – М.: Высш. шк., 1968. – 176 с.

17. Жежеленко И.В. Влияние отклонения и несимметрии напряжения питающей сети на работу асинхронных электродвигателей / И.В. Жежеленко, В.Е. Кривоносов // Известия ВУЗов, Энергетика. – 1990. – № 5. – С. 32–38.

18. Корнилов Г.П. Система векторного регулирования возбуждения синхронного двигателя / Г.П. Корнилов, Т.Р. Храмшин, Г.В. Шурыгина, А.С. Лазаренко // Электромеханика. – 2004. – №2. – С. 28–30.

19. Жерве Г.К. Промышленные испытания электрических машин. – Л.: Энергоатомиздат, 1984. – 408 с.

ДОДАТОК А. ОХОРОНА ПРАЦІ