

НУБІП України

МАДІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА  
НУБІП України

2023.10.31.

НУБІП України  
Артистка Максима Петровича

2023 р.

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ

# НУБІП України

ПОГОДЖЕНО

ДОПУСКАЄТЬСЯ ДО ЗАХИСТУ

Директор ННІ енергетики,  
автоматики і енергозбереження

Завідувач кафедри  
електротехніки,  
електромеханіки та  
електротехнологій

д.т.н., проф. /КАПЛУН В.В./

проф., д.т.н. / / /

вчене звання, науковий ступінь

підпис

вчене звання, науковий ступінь

підпис

НУБІП України

2023 р. 2023

## МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему: «Підвищення ефективності технічного сервісу двигунів  
потужністю до 20 кВт»

Спеціальність 141 – «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

(код і назва)

Освітня програма «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

(назва)

Орієнтація освітньої програми

освітньо-професійна

(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Гарант освітньої програми

д.т.н., професор

(науковий ступінь та вчене звання)

(підпис)

(ПІБ)

НУБІП України

Керівник магістерської роботи

К.Т.Н., доцент Окушко О.В.

(науковий ступінь та вчене звання)

(підпис)

(ПІБ)

Виконав

Артисюк М.П.

(підпис)

(ПІБ)

НУБІП України

КИЇВ – 2023

Вступ.....	5
ОСОБЛИВОСТІ ПОБУДОВИ СИСТЕМ МОНІТОРИНГУ У СИСТЕМ ЕЛЕКТРОПРИВОДА.....	7
1.1 Аналіз стану електромеханічних перетворювачів енергії в системах електроприводів.....	7
1.2 Проблеми та особливості процесу моніторингу параметрів електричних приводів.....	12
1.3 Обґрунтування вимог до показників моніторингу електромеханічного обладнання.....	14
1.4 Промислові системи контролю стану асинхронних двигунів.....	16
1.5 Оцінка стану, моніторинг і діагностика - поняття, цілі та завдання.....	25
2 МЕТОДИ ДІАГНОСТИКИ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ З АСИНХРОННИМИ ДВИГУНАМИ.....	32
2.1 Класифікація методів визначення параметрів.....	32
2.2 Аналіз методів ідентифікації електроприводів з АД.....	36
2.3 Характеристика експрес-методів діагностики асинхронних двигунів.....	39
3 ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ СИСТЕМ ЕЛЕКТРОПРИВОДА З АСИНХРОННИМИ ДВИГУНАМИ.....	50
3.1 Визначення еквівалентних параметрів асинхронної машини під час пуску за фазовим портретом сигналів струму та напруги.....	50
3.2 Визначення активного опору обмотки статора в пускових режимах.....	55
4 Розробка системи керування та контролю.....	63
4.1 Розробка і реалізація систем керування та контролю для електроприводів з асинхронними двигунами.....	63
4.2 Векторне керування, та їх вплив на ефективність роботи системи.....	64
5 Оптимізація робочих параметрів.....	67
5.1 Діагностування електродвигунів.....	67
5.2 Оптимізації робочих параметрів системи електроприводу з асинхронними двигунами.....	69

5.3 Вплив параметрів, таких як напруга, частота, струм тощо, на роботу двигуна та

системи в цілому

Література

74

76

Висновок

77

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

## ВСТУП

Незважаючи на широке впровадження сучасних типів електроприводів (ЕП) на вітчизняних підприємствах гірничо-видобувної та металургійної промисловості, ефективність їх роботи продовжує залишатися актуальною проблемою.

Проблема надійності електроприводів є однією з ключових частин вирішення цього питання. Щорічно до 30% парку електричних двигунів (ЕД), використовуваних в промисловості, і до 70% тих, що використовуються в транспорті, виходить з ладу та потребує ремонту. Після ремонту, електричні двигуни повертаються на підприємства і продовжують використовуватися, але їхні експлуатаційні показники часто значно нижчі, ніж заводські характеристики. Крім того, імпульсний характер напруги живлення, який є типовим для сучасних перетворювачів, також сприяє виходу з ладу електричних двигунів.

При розгляді шляхів підвищення надійності ЕД, важливо враховувати взаємовплив різних факторів, які можуть призводити до виходу з ладу. Наприклад, аналіз електромагнітних впливів, механічних вібрацій та інших чинників може бути корисним для оцінки надійності ЕД.

Зазвичай, аналіз надійності ЕД розглядається з точки зору енергетичних процесів, але важливо також розглядати старіння ЕД та його вплив на їхню надійність у вигляді зміни характеристик елементів в процесі експлуатації та експлуатаційних відмов.

Відомо, що показники надійності електродвигунів (ЕД) є результатом методів та підходів, які застосовуються в електротехнічних підрозділах та ділянках. На жаль, насиченість парку електричних машин тими, які пройшли ремонт, часто не враховується при аналізі та оцінці показників надійності електромеханічних систем (ЕМС).

Очевидно, що для досягнення значного підвищення працездатності електричних машин, як ключової складової електротехнічних систем, потрібно звертати увагу не тільки на очікувану надійність, яка є узагальненим параметром, але також на працездатність, виражену через фізичний параметр,

який можна контролювати. Цими параметрами можуть бути опір ізоляції, рівень вібрації, рівень шуму тощо. Розглядаючи працездатність як параметр, який відображає надійність, слід зауважити, що цей параметр є змінним і зменшується з часом роботи агрегату до очікуваного виходу з ладу внаслідок аварії. Він залежить як від характеристик електромеханічного агрегату, так і від якості енергії живлення та якості її перетворення.

Поза іншими об'єктивними факторами в цій проблемі, слід відзначити, що для електроприводу як електромеханічної системи, важливо постійно контролювати параметри та їхні коливання, взаємодію різних складових системи "перетворювач - електричний двигун - робочий механізм" під час експлуатації.

Аналіз методів оцінки параметрів електричних двигунів електроприводів вказує на необхідність пошуку нових науково-технічних рішень, які б відрізнялись простотою та можливістю часткової або повної автоматизації в складі електромеханічної системи

Зазначена проблема може бути вирішена шляхом обладнання електроприводу системою моніторингу, яка виявляє зміни характеристик і приймає рішення щодо виведення з експлуатації електричних двигунів, якщо параметри електромеханічних систем (EMC) змінюються настільки інтенсивно, що може виникнути аварійна ситуація до запланованого технічного обслуговування. Для досягнення цієї мети необхідно розробити математичний інструментарій, який дозволить визначати параметри електродвигунів та ймовірності їх безвідмовної роботи на основі інформації про доступні миттєві значення змінних стану під час експлуатації.

Рішення даної проблеми в розглядається саме в такому контексті і представлено в цьому посібнику. Матеріал цього посібника складається з елементів лекцій та практичних занять, які є частиною навчального курсу "Моделювання та діагностика електромеханічних об'єктів". Цей курс викладається авторами студентам-магістрантам спеціальності 141 - Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка в Кременчуцькому національному університеті імені Михайла Остроградського.

## РОЗДІЛ 1.

# ОСОБЛИВОСТІ ПОВБУДОВИ СИСТЕМ МОНІТОРИНГУ СИСТЕМ ЕЛЕКТРОПРИВОДА

### 1.1. Аналіз стану електромеханічних перетворювачів енергії в системах електроприводів

Аварійність електричних приводів на підприємствах України, особливо в гірничій промисловості, є дуже високою. Однією з основних причин є недостатня надійність роботи електричних двигунів, яка в окремих випадках в останні роки знизилася навіть на декілька десятків разів. При аналізі причин виходу з ладу електричних машин виділяються наступні фактори:

1. Некваліфіковане обслуговування електроустановками з боку персоналу підприємства, що призводить до порушення вимог експлуатації та, в кінцевому підсумку, виходу машин із ладу.

2. Відсутність в експлуатації уніфікованих пристроїв захисту, які б не лише виконували регламентовані вимоги до режимів роботи, але й усували технічні недоліки у роботі персоналу.

Перша причина пов'язана з некваліфікованим обслуговуванням, а друга - з недотриманням правил і норм експлуатації. У парку електричних машин зустрічаються різні типи і конструкції електродвигунів, більшість з яких були в ремонті неодноразово. Висока аварійність таких машин зазвичай виникає не через поганий якісний ремонт, а через відсутність технічної документації та інформації, за якою можна було б судити про навантажувальну спроможність електричної машини, яка була відремонтована. Електричні машини, які виходять з ремонту, мають інші паспортні дані порівняно із заводськими номіналами.

Різноманітність і складність технології ремонту залежать від виду електрообладнання. У складних системах електроприводу, оснащених, наприклад, тиристорними перетворювачами, багато робіт з ремонту виконуються на місці. Наприклад, у випадку виходу з ладу тиристорних перетворювачів вони замінюються відповідними службами, логічні та релейно-контакторні системи піддаються ремонту або заміні.

Оскільки термін служби електричних машин досить значний, щорічно ремонтується набагато більше машин, ніж випускається на електромашинобудівних підприємствах. Тому потужність електричних машин, їх тип, умови експлуатації та інші фактори впливають на різноманітність показників надійності систем електроприводів.

На більш як 80% електроремонтних підприємств і цехів України, більшість з яких входить до складу електромеханічної галузі промисловості, технічний рівень зазвичай нижчий, ніж у електромашинобудівних заводах. Це пояснюється кількома причинами: в системі підприємств електромеханічної галузі електроремонтні підприємства не є основними, і їм виділяється менше уваги; в інших галузях промисловості не існує реальних можливостей створити умови, що відповідають умовам електромашинобудівних заводів.

Один із показників надійності електричних машин - це інтенсивність відмов. Теорія надійності виділяє три характерні типи відмов, які є властивими машинам та виникають незалежно від обслуговуючого персоналу. Ці типи відмов включають:

1. Відмови, які відбуваються протягом раннього періоду експлуатації машини.

Вони називаються прироботочними відмовами і в основному виникають через низьку якість виробництва і контролю деталей під час виготовлення і збирання.

2. Відмови, спричинені зношенням окремих частин машини. Вони є результатом старіння машини. У багатьох випадках ці відмови можуть бути усунуті шляхом заміни зношених деталей під час ремонту машини.

3. Раптові відмови в період нормальної експлуатації машини, спричинені стрибкоподібними змінами характеристик або параметрів машини під впливом раптових перевантажень або інших факторів. Ці випадкові відмови підпорядковані загальним закономірностям, і їх інтенсивність залишається стабільною протягом тривалого періоду експлуатації машини. Незважаючи на технологічні покращення виробництва та ремонту, показники надійності електроустаткування залишаються в цілому сталими. Більшість пошкоджень виникає в ізоляції обмоток та підшипникових вузлах.



Загалом, причинами аварій є різноманітні фактори, такі як недостатнє профілактичне обслуговування, пробій ізоляції, перерив і механічні пошкодження. Ситуація ускладнена тим, що парк електричних машин та електрообладнання поступово старіє, і виробництво нових електричних машин значно скоротилося.

Процес приватизації промислових підприємств і їх перетворення у "відкриті акціонерні товариства," "закриті акціонерні товариства" та інші форми власності не сприяє оновленню електрообладнання.

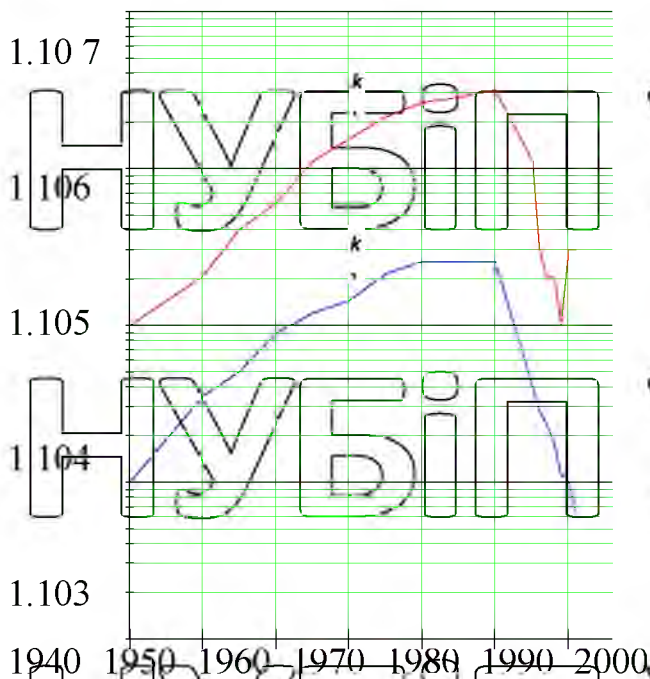


Рисунок 1.1 – Статистичні дані з випуску електричних двигунів:  $k_1$  - електромашини, включаючи заглибні електродвигуни,  $k_2$  - вибухобезпечні електродвигуни

Більшість підприємств намагаються створювати власні ремонтні цехи, що призводить до зниження надійності електрообладнання через недостатню кваліфікацію ремонтного персоналу, відсутність необхідного випробувального та діагностичного обладнання, порушення технології відновлення і ремонту, тощо. Ця ситуація призводить до зниження загальної надійності всіх вузлів і елементів електромеханічного обладнання, таких як магнітна система, обмотки статора і ротора, підшипники, колектор або контактні кільця і щітковий пристрій. Виходячи з цього, важливо розробити стратегії для підвищення надійності, зокрема, покращення якості вихідних матеріалів, точність виготовлення деталей та вдосконалення технологій ремонту та зборки. Також важливо підвищити якість і теплостійкість ізоляції

обмотувальних провідів та підшипникових вузлів машин. У процесі експлуатації електричних машин можуть виникати випадкові несправності та вимушені зупинки. Зі статистичних даних та використанням методів математичної статистики можна визначити середній час безвідмовної роботи машини між двома випадковими несправностями, який є важливим показником експлуатаційної надійності.

У більшості випадків, дослідження щодо експлуатаційної надійності електричних систем електроприводу для двигунів постійного струму не має сенсу, оскільки результати таких досліджень вже відомі та дублюють інші відомі результати.

Найбільше відмов у машинах постійного струму спостерігається в колекторно-щітковому вузлі та підшипниках. У системах електрифікованого транспорту, ці відмови становлять 44-66%, а в екскаваторних приводах - понад 60%. Пошкодження колектора часто включає в себе зміну його форми через нерівномірний знос, підпал та плавлення пластин колектора внаслідок несприятливої комутації.

Пошкодження корпусної ізоляції, хоча менш об'ємні, можуть мати більш серйозні наслідки. Зазвичай це включає в себе порушення ізоляції між провідниками секції, розпаювання з'єднувальних півників з колекторними пластинами та руйнування бандажів, які утримують обмотку якоря. Важкість наслідків таких пошкоджень пояснюється тим, що обладнання не завжди може бути негайно відключено через відсутність ефективних захистів та інерційні властивості обертових частин.

Пошкодження обмотки збудження, додаткових полюсів і компенсаційних обмоток, в основному, пов'язані з пробоями корпусної ізоляції. Ці пошкодження частіше відбуваються в системах з тиристорним електроприводом. З механічних пошкоджень, найбільш характерними є поломки підшипників, такі як знос вкладишів, руйнування кульок, сепараторів тощо.

Аналіз відмов електричних машин на прикладі гірничо-збагачувальних комбінатів Кривого Рогу показує, що у порівнянні з підприємствами

підземного видобутку корисних копалин, велика частина двигунів є ремонтowanими, що обумовлює високу аварійність машин постійного струму на гірничо-збагачувальних комбінатах. Це пов'язано з тим, що електропривод постійного струму, як правило, використовується у важких умовах, таких як екскаватори та тепло-електровози, і часто працює з істотною недозавантаженістю.

Електроприводи з асинхронними двигунами часто мають проблеми щодо надійності. Велика кількість відмов в таких двигунах, особливо у тих, які мають потужність понад 5 кВт, призводить до різних проблем, таких як міжвиткові замикання (до 93%), пробіи міжвиткової і пазової ізоляції (до 5%), а також механічні пошкодження (до 8%) [1, 3, 12, 13]. Пошкодження асинхронних двигунів, як правило, пов'язані з експлуатаційними причинами (до 50%), і технологічні причини, які пов'язані з виробниками, складають до 30%. Відмови в обмотці статора можуть бути різного походження, такі як робота в двофазному режимі, місцеві або локальні перегріву, важкі умови запуску та інші.

Синхронні двигуни мають складну конструкцію порівняно з асинхронними двигунами. Показники надійності синхронних двигунів чітко визначаються за обмотками статора та роторної обмотки [3, 13]. Міжвиткові замикання та замикання секцій на корпусі статора є основними причинами відмов статорних обмоток. Причини відмов статорів синхронних машин різноманітні і залежать від технології виготовлення машин та умов експлуатації (частота запуску синхронних машин тощо). Найбільш вразливі частини статорних обмоток - лобові частини, і їх пошкодження часто виникає внаслідок порушення ізоляції під впливом механічних напруг, зокрема під час запуску. Навколишнє середовище та культура обслуговування також мають значний вплив на надійність синхронних двигунів.

Відмови роторів обумовлені порушеннями пускової та демпферної обмоток, а також порушеннями в обмотці збудження. Пошкодження пускової обмотки, як правило, пов'язані з важкими умовами пуску, зокрема запуском під навантаженням і залежать від рівня напруги живлення.

# НУБІП України

## 1.2 Проблеми та особливості процесу моніторингу параметрів електричних приводів

У відношенні до технічного обслуговування та ремонту складних технічних об'єктів, існує раціональність в переході від стратегії планово-попереджувальних ремонтів до стратегії управління експлуатаційною надійністю цих об'єктів на основі їхнього технічного стану. Ця ідея призводить до виникнення поняття моніторингу. За визначенням моніторинг - це система регулярних, тривалих спостережень у просторі та часі, які надають інформацію щодо стану об'єкта для оцінки його минулого, поточного стану і передбачення змін його параметрів у майбутньому. Отже, структура процесу моніторингу стану будь-якого об'єкта (системи) повинна включати принаймні три вищезазначені завдання у відповідній послідовності (див. рис. 1.1).



Рис. 1.1 – Узагальнена структура процесу моніторингу

Якщо умовно позначити вектор параметрів поточного стану об'єкта, який підлягає діагностиці, як  $X_t$ , то з точки зору структури процесу стає очевидним, що завдання оцінки минулих станів полягає в аналізі послідовності  $n$  оцінок векторів  $X_{t-1}, X_{t-2}, \dots, X_{t-k}, \dots, X_{t-n}$ , одержаних на етапах попередньої діагностики відповідно до часових моментів  $t-1, t-2, t-k, \dots, t-n$ . Отже, задача оцінки майбутнього стану, іншими словами, прогноз, полягає в оцінці послідовності векторів стану  $X_{t+1}, X_{t+2}, \dots, X_{t+k}, \dots$  (див. рис. 1.2).



Рисунок 1.2 – Структура взаємозв'язку задач процесу моніторингу

Зрозуміло, що точність оцінок минулого і прогнозу результатів сильно впливає на правильність прийнятих рішень щодо стану об'єкта, який підлягає діагностиці. Ця точність визначається двома основними чинниками: систематичною та випадковою похибками.

Систематична похибка (позначена як  $\Delta_{\text{сист}}$ ) формується невеликим набором факторів, які вносять систематичні або сталий характер похибки в оцінку вектору параметрів  $X_t$ . Випадкова похибка (позначена як  $\Delta_{\text{вип}}$ ) виникає внаслідок впливу численних факторів, які додають випадковий характер похибки.

Оцінка точності вектору  $X_t$  в поточний момент часу  $t$  визначається як сума систематичної та випадкової похибок:  $\Delta_t = \Delta_{\text{сист}} + \Delta_{\text{вип}}$ .

При вивченні об'єкта діагностики дуже важливо відстежувати тренд окремих складових вектору  $X_t$ , їх функцій тощо, якщо такі зміни відбуваються.

Отже, тренд вказує на можливі зміни параметрів об'єкта і служить основою для прийняття відповідних рішень щодо управління його експлуатаційною надійністю.

При розробці системи моніторингу потрібно враховувати, по-перше, оптимальну кількість діагностичних показників і, по-друге, систематичні та випадкові фактори, які впливають на формування шкідливого тренду. Такий підхід дозволяє налаштовувати математичні моделі для оцінки параметрів об'єкта без втручання в технічну складову вимірювального комплексу шляхом вилучення або корекції  $\Delta_{\text{сист}}$ .

Відносно випадкової складової, завдання полягає, передусім, у розробці математичних інструментів для оцінки її характеристик. Це надасть можливість визначити остаточну точність вимірювання діагностичних показників і, відповідно, точність визначення параметрів об'єкта на поточний момент часу. Характеристики випадкової складової  $\Delta_{\text{вип}}$  є важливими для прийняття рішень щодо значимості змін параметрів об'єкта під час ретроспективного аналізу та прогнозу.

У будь-якому випадку, моніторинг параметрів електродвигунів систем електроприводу вимагає визначення вимог до показників моніторингу, включаючи в себе обґрунтування обсягу діагностичних показників і розробку технічних рішень для їх вимірювання з необхідною точністю в реальних умовах проведення ремонту та експлуатації систем електроприводу.

### 1.3 Обґрунтування вимог до показників моніторингу електромеханічного обладнання

Виходячи із структури процесу моніторингу (зображеної на рис. 1.1) та взаємозв'язків між його задачами (показані на рис. 1.2), можна представити вимоги до його показників у вигляді наступної схеми (поданої на рис. 1.3):

В першу чергу, це обсяг необхідної інформації, яку слід отримати через спостереження за об'єктом, і ця інформація суттєво впливає на точність визначення параметрів стану об'єкта, а також визначає точність і достовірність прогнозу щодо майбутнього стану об'єкта. Крім того, слід зауважити, що обсяг вимірюваної інформації також впливає на швидкість обробки цієї інформації, і для обчислення необхідні певні обчислювальні ресурси. З цих причин, з одного боку, ми можемо говорити про обґрунтування мінімально необхідної кількості діагностичних показників, які можуть бути обчислені на основі ефективних, зі статистичної точки зору, оцінок параметрів стану електричного двигуна в системі електроприводу, об'єкт моніторингу.

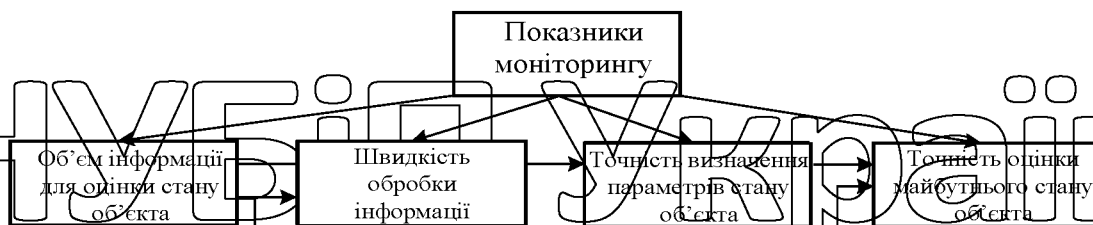


Рисунок 1.3 – Показники процесу моніторингу та їх взаємозв'язок

Нижче проводиться аналіз існуючих підходів до діагностики параметрів систем електроприводу (ЕП), їх класифікація та розгляд підходів до вибору діагностичних показників для моніторингу різних типів систем електродвигунів (ЕД).

У дослідженні представлено класифікацію наявних методів діагностики аварій дискових (АД) і проведено їх порівняльний аналіз. Автори вказують на серйозні недоліки існуючих методів, зокрема, на складність діагностичних процедур, які часто вимагають демонтажу електричних машин (ЕМ), а також на неповний перелік параметрів, які визначаються. Вони підкреслюють необхідність розробки нових методів діагностики та автоматизації процесу випробувань з використанням електронно-обчислювальних машин (ЕОМ). Ця автоматизація включає не лише математичну обробку емпіричних даних, але також управління процесом випробувань, підтримку необхідних режимів роботи випробувального комплексу, контроль сенсорів та інтерпретацію отриманих даних за допомогою різних методів діагностики. Важливою є також можливість електронно-обчислювальних машин видачі результатів випробувань та висновків про працездатність діагностикованої машини.

У дослідженні наведено досить повний перелік методів діагностики синхронних двигунів (СД) і проведено їх порівняльний аналіз. Автори вказують на те, що немає жодного методу, який би ідеально відповідав вимогам як випробувального процесу, так і практичних завдань, пов'язаних із сучасними електроприводами. Більшість існуючих методів випробувань є недосконалими, оскільки вони дозволяють визначити лише певну частину електромагнітних параметрів СД, і це відбувається у вигляді інтегральних величин без можливості окремої ідентифікації параметрів за фазами. Також слід зазначити, що часто визначаються не самі параметри схеми заміщення, а лише їх похідні величини (наприклад, синхронні, перехідні, та інші параметри). У дослідженні розроблено випробувальне обладнання, яке дозволяє проводити додаткові дослідження без будь-яких перерв та змін у структурі обладнання. Також відзначено перспективи використання вентильних схем та полігармонічних тестових сигналів у розробці методів ідентифікації електромагнітних параметрів і діагностики стану ЕМ.

#### 1.4 Промислові системи контролю стану асинхронних двигунів

Фірма "Вібро-Центр" активно займається розробкою систем для оцінки стану різних типів електричних машин. На даний момент вже розроблено та випускається чотири типи таких систем, які відрізняються за своїм призначенням, функціональністю та вартістю. Ці системи, зокрема AMTest, MDR-M, MDR і REMM [22-25], призначені для моніторингу стану обертових електричних машин. У режимі реального часу ці системи дозволяють: оперативно оцінювати поточний технічний стан електричних машин;

вирішувати питання щодо можливості та строків експлуатації генераторів або електродвигунів;

виявляти та постійно контролювати рівень розвитку дефектів у ізоляції електричних машин.

Для допомоги потенційним користувачам діагностичного обладнання, у цьому огляді намагаємося підкреслити основні відмінності між цими чотирма системами моніторингу. Також подається додаткова порівняльна інформація, що сприятиме фахівцям у прийнятті обґрунтованих рішень.



# НУБІП України

Таблиця 1/1 - Типи систем моніторингу

Марка системи	Типи машин	Діапазон напруги і потужності	Технологічна важливість
AMTest	Асинхронні двигуни 0,4кВ	UPOB >0,4кВ PДВ >1кВт	Контроль управління електродвигунами з робочою напругою 0,4 кВ - Допоміжна система для високовольтних електродвигунів
MDR- M	Високовольтні асинхронні і синхронні двигуни	UPOB >6,0кВ PДВ >200кВт	- Контроль стану ізоляції статорів електродвигунів і генераторів - Контроль електромагнітної асиметрії статора
MDR	Високовольтні синхронні	UPOB >6,0кВ	- Контроль стану ізоляції статора

# НУБІП України

# НУБІП України

# НУБІП України

Марка системи	Призначення	Реалізовані методи діагностики
<u>AMTest</u>	Контроль асинхронних двигунів від 0,4 кВ	Контроль електромагнітної асиметрії статора і стану КЗ клітини ротора за спектрами струму і потужності (6 датчиків) Контроль і захист електродвигуна від тривалих перевантажень Контроль вібрації підшипників електродвигуна (2 датчика)
<u>MDR-M</u>	Контроль високовольтних асинхронних	Контроль стану ізоляції обмотки статора по частковим розрядам (4 датчика) Контроль електромагнітної асиметрії статора за спектрами

Перелік діагностичних алгоритмів, реалізованих в різних системах моніторингу, наведено в табл. 1.2.

Таблиця 1.2 – Перелік діагностичних алгоритмів систем моніторингу

# НУБІП України

Марка системи	Призначення	Реалізовані методи діагностики
	синхронних двигунів	струму і потужності (2 датчика) Контроль вібрації пакета статора для визначення ослаблення кріплення обмотки (1 датчик) Контроль вібрації підшипників двигуна (2 датчика)
<u>MDR</u>	Контроль високовольтних синхронних двигунів і генераторів	Контроль стану ізоляції обмотки статора по частковим розрядам (до 13 датчиків) Контроль стану ізоляції обмотки вбудованого за величиною магнітного потоку взгорі (1 датчик) Контроль електромагнітної асиметрії статора за спектрами струму і потужності (6 датчиків) Контроль вібрації пакета статора для визначення ослаблення кріплення обмотки (2 датчика) Контроль внутрішнього зазору між ротором і статором (2 датчика)

Контроль  
висковольтн

1. Контроль стану ізоляції обмотки статора  
по частковим

# НУБІП України

Загальний огляд витрат на придбання та впровадження різних систем

для моніторингу електричних машин надано в таблиці 1.3. У цій таблиці

подається середня цінова категорія, яка може змінюватися в залежності від

численних факторів та економічної ситуації в країні. Основна мета цієї

таблиці полягає в порівнянні витрат на різні системи моніторингу для

зручності вибору.

Таблиця 1.3 – Заходи на відомі системи моніторингу

Марка системи	Вартість мінімальної поставки	Вартість максимальної поставки	Заходи на монтаж і впровадження	Загалом
<a href="#">AMTest</a>	600 дол. США.	900 дол. США.	100 дол. США.	700 – 1000 дол. США.
<a href="#">MDR-M</a>	3800 дол. США	4700 дол. США	900 дол. США	4700 – 5600 дол. США.
<a href="#">MDR</a>	4700 дол. США	7800 дол. США	1500 дол. США	6200 – 9300 дол. США.
<a href="#">REMM</a>	9300 дол. США	21800 дол. США	4700 дол. США	14000 – 26500 дол. США.

### 1.4.1. Характеристика промислових пристроїв

AMTest - це компактний стаціонарний пристрій, призначений для захисту, управління та діагностики електричних двигунів і механізмів. Він надає повний спектр функцій для керування асинхронними електродвигунами, захисту від дефектів, і планування ремонтних робіт.

Основні характеристики приладу AMTest включають:

1. Здатність управляти практично будь-якими електродвигунами з робочою напругою від 0,4 до 10,0 кВ.

2. Мікропроцесорний трифазний лічильник, який контролює спожиту електроенергію для оцінки загальної ефективності роботи електроприводу.

3. Функції управління, захисту і діагностики розділені на три групи: а. Управління електродвигуном включає в себе спеціальні алгоритми включення та відключення з різними затримками, а також можливість дистанційного керування по RS-485. б. Функції захисту і безпеки включають в себе реєстрацію спожитої електроенергії, захист від перевантаження, зниження напруги живлення, однофазного включення, аномальних режимів роботи та контроль стану ізоляції і температури підшипників. с. Функції діагностики включають в себе виявлення дефектів стану електродвигуна, оцінку роботи насосів, збір додаткових параметрів, визначення залишкового ресурсу та передачу інформації по RS-485.

Прилад AMTest має зручний корпус і надає можливість налаштувати параметри через внутрішню клавіатуру з екраном або через інформаційний канал RS-485. Зовнішні комунікації приладу включають різні з'єднувальні клеми для зручності підключення.



1. Клеми з контактами реле для активації аварійної сигналізації.
2. Клеми з контактами реле для включення та вимкнення контрольованого електродвигуна.
3. Приймальні сигнали від зовнішніх трансформаторів струму, що використовуються для обліку спожитої потужності та захисту від перевантаження.
4. Сигнали трьох фаз живильної напруги 0,4 кВ (або сигнали трансформаторів напруги 100 В для високовольтних двигунів), що використовуються для вимірювання потужності, контролю зниження напруги та нерівномірності трифазної напруги.
5. Клеми для підключення живлення 220 В.
6. Два аналогових входи для підключення датчиків вібрації та один вихід 5 В для живлення цих датчиків.
7. Два входи для підключення датчиків температури типу Pt100.
8. Вхід для підключення диференціального трансформатора для контролю струму витoku в живильному кабелі та статорі контрольованого електродвигуна.
9. Клеми для підключення додаткових датчиків технологічних параметрів через інтерфейс зв'язку CAN.
10. Клеми для підключення лінії зв'язку від пристрою до системи автоматизованого керування та передачі інформації про стан.

контрольованого обладнання. З'єднання здійснюється через гальванічно ізолюваний інтерфейс зв'язку RS-485.

AMTest-2 - прилад діагностики стану електричних машин змінного і постійного струму



Рисунок 1.2 – Прилад AMTest-2

AMTest-2 є наступною версією приладу, створеної для комплексного моніторингу стану електричних машин. Попередня версія цього приладу мала позначення AMTest (Asynchronous Motor Test) та була спроектована для стаціонарного контролю та діагностики змінного струму в електричних машинах. За допомогою цієї версії виконувалися функції моніторингу вібраційного стану, вимірювання параметрів енергоспоживання та діагностика стану електродвигуна.

AMTest-2 є переносною версією приладу, розробленою для оперативного контролю технічного стану різних видів електричних машин. У цій версії були додані нові функції, пов'язані з контролем електричних машин постійного струму, які охоплюють діагностику стану обмотки ротора та колекторного апарату.

Важливою можливістю AMTest-2 є здатність аналізувати трифазну напругу живлення та струми, споживані в різних фазах контрольованого електродвигуна. При цьому не лише вимірюються рівні цих параметрів, а й контролюється їхня симетричність, рівень гармонік в напрузі та струмах, а також вимірюється загальна потужність, яку витрачає електродвигун.

Окрім того, AMTest-2 надає можливість контролювати технічний стан різних видів електричних машин, включаючи синхронні генератори та

електродвигуни, асинхронні електродвигуни та генератори і двигуни постійного струму.

Таблиця 1.4 – Датчики в приладі AMTest-2

N	Тип датчика	Кіл.	Параметри
1	Датчик контролю вібраційного стану -акселерометр.	2	Робочий діапазон частот: 3-2000Гц, Діапазон вимірів: Віброприскорення - 2-100 м/с <sup>2</sup> , Віброшвидкість - 2-100мм/с <sup>2</sup> Вібропереміщення - 30-500 мкм,
2	Лазерний лічильник частоти обертання і положення ротора електричної машини.	1	Діапазон частот обертання ротора - до 15000 об/хв.
3	Датчик споживаного (змінного або імпульсного) струму.	3	До 600 ампер
4	Датчик контролю фазної напруги статора.	3	До 600 В
5	Датчик інтенсивності іскрових розрядів на колекторі машини постійного струму.	1	Не нормується

Прилад використовується для моніторингу параметрів трифазної мережі, виявлення наявності гармонік та оцінки завантаження електродвигуна.

Шляхом аналізу вихідних сигналів приладу, роботи вбудованих компонентів системи експертної діагностики і за допомогою професійного досвіду діагностичного експерта, можна виявити наступні дефекти у роботі електричних машин:

Таблиця 1.5 – Дефекти електричних машин, що діагностуються

Тип машини	Контрольовані параметри	Діагностовані дефекти	Додаткові можливості
Синхронні двигуни і генератори	Вібрації підшипників і статора Струм і потужність двигуна.	Дефекти підшипників і ковзання небаланс ротора	Балансировка ротора у власних підшипниках

Тип машини	Контрольовані параметри	Діагностовані дефекти	Додаткові можливості
Генератори і двигатели постоянного тока	Вибрации подшипников Ток ротора двигателя Контроль процессов коммутации на коллекторе	Дефекти опорних підшипників небаланс ротора розцентровка приводним механізмом Неправильний монтаж ротора щодо статора Наявність щюфтів, послаблень, трощем з фундаментом	Балансировка ротора у власних підшипниках



РЕММ – система моніторингу стану генераторів і потужних електродвигунів



Рисунок 1.3 – Прилад REMM

Стационарна система під назвою REMM (Rotation Electrical Motor Monitor)

розроблена для оперативного моніторингу технічного стану великих електричних машин. В базовому варіанті система REMM включає такі основні функції:

1. Контроль стану ізоляції статора на основі виявлення часткових розрядів.
2. Моніторинг вібраційного стану статора електричної машини.
3. Оцінка електромагнітної несиметрії статора.
4. Виявлення дефектів обмотки ротора.
5. Контроль електричних параметрів статора.
6. Моніторинг температурних режимів статора.

Якщо потрібно розширити можливості системи REMM, можна додати додаткові модулі. До цих модулів може бути підключено два:

1. Модуль для контролю вібраційних параметрів підшипників електричної машини.
2. Модуль для реєстрації аварійних і перехідних процесів в електричній машині.

Система REMM має конструкцію, що складається з набору модулів, і цей склад може бути змінений в залежності від потреб користувача.

### 1.5 Оцінка стану, моніторинг і діагностика – поняття, цілі та завдання

При ретельному аналізі поточного стану систем організації технічного обслуговування та ремонту складних технічних об'єктів стає очевидною необхідність переходу від системи планово-попереджувальних ремонтів до стратегії управління експлуатаційною надійністю цих об'єктів на основі їхнього технічного стану. Цей перехід має безсумнівні переваги з точки зору економії трудових, матеріальних і фінансових ресурсів, що особливо важливо в умовах ринкової економіки. Проте, він можливий лише за умови створення

систем технічної діагностики та/або систем моніторингу технічного стану контрольованих об'єктів.

Моніторинг - це система постійних та тривалих спостережень у часі і просторі, яка надає інформацію про стан об'єкта з метою аналізу його минулого, поточного та майбутнього стану.

Система моніторингу може бути частиною системи управління, яка забезпечує безперервний нагляд, аналіз і контроль за зміною стану.

Технічна діагностика - це процес встановлення і вивчення ознак, що вказують на наявність дефектів у машинах, пристроях, їхніх вузлах, елементах тощо. Вона використовується для передбачення можливих відхилень у робочих режимах або станах об'єктів, а також розробки методів та засобів для виявлення та локалізації дефектів. Технічна діагностика може здійснюватися шляхом зовнішнього огляду, використання діагностичного обладнання або спеціальних діагностичних програм.

На жаль, теорія таких систем поки що недостатньо відображена в наукових працях вітчизняних і зарубіжних вчених, і практична реалізація таких систем ще далека від завершення. Для створення сучасних систем діагностики та моніторингу складних технічних об'єктів потрібні:

- Первинна вимірювальна апаратура для збору технічних параметрів.
- Інформаційно-обчислювальна техніка для обробки та візуалізації зібраної інформації.
- Різноманітні інформаційні технології, такі як правила вимірювання та збору технічних сигналів, алгоритми перетворення цих сигналів в цифрову діагностичну інформацію, а також комплекси програм для перетворення, зберігання, візуалізації і протоколювання накопичених даних з використанням математичних моделей переходів станів (при технологіях діагностування) та процесів деградації (при технологіях моніторингу) стану контрольованих об'єктів.

Інформаційна технологія діагностики надає можливість оцінювати стан об'єкта на основі протоколів вимірювання технічних параметрів і протоколів виявлених відхилень. Вона також дозволяє визначити види несправностей за

допомогою параметричного аналізу, спектрального аналізу або систем розпізнавання несправностей. Якщо є можливість створення єдиного документа - сертифіката технічного стану, який містить протоколи вимірювання та виявлених відхилень об'єкта одночасно, то інформаційна технологія діагностики може перетворитися в інформаційну технологію сертифікації об'єкта.

Класифікація видів діагностики виокремлює функціональну та тестову діагностику технічних об'єктів. Функціональна діагностика проводиться на працюючому об'єкті і, зазвичай, призводить до визначення одного з двох станів об'єкта: справний-несправний, працездатний-непрацездатний, правильно функціонує-неправильно функціонує. У більшості випадків така діагностика не завжди влаштовує власників об'єктів, і тоді використовується функціональна діагностика з трьохрівневою оцінкою станів: справний-несправний, працездатний-непрацездатний. У обох випадках мова йде про загальну функціональну діагностику або загальну оцінку стану об'єкта, і вона зводиться до визначення одного з вищезазначених станів об'єкта за допомогою моделей переходів станів.

Головним недоліком загальної функціональної діагностики є те, що вона не відповідає на важливі питання, такі як:

Яка саме несправність виникла?

Які конкретні заходи потрібно вжити для усунення несправності?

Які прогнозовані строки служби залишилися об'єкту?

Тож функціональна діагностика зазвичай потребує додаткового розгляду та аналізу для вирішення цих питань.

Для відповіді на перше питання, можна використовувати параметричну функціональну діагностику, яка базується на оцінці стану об'єкта за допомогою сукупності його технічних і технологічних параметрів. В такому випадку важливо мати точні дані про допустимі, граничні і позаграничні значення цих параметрів. Основною метою параметричної функціональної діагностики є вимірювання цих параметрів і порівняння їх зі зазначеними

значеннями. Протокол результатів вимірювань може вказувати на стан об'єкта, а також виявлені відхилення від допустимих значень.

Проте, навіть після проведення параметричної функціональної діагностики можна лише встановити стан об'єкта і не можна точно вказати вид несправності або передбачити, коли саме відбудеться відмова деталі, вузла або об'єкта. Зазвичай, функціональна діагностика доповнюється функцією прогнозування за трендами в часі і визначенням дати найближчого технічного обстеження об'єкта.

Інформаційна технологія сертифікації, яка останнім часом набула популярності в області контролю технічного стану об'єктів, поєднує загальну функціональну діагностику, параметричну функціональну діагностику з відстеженням відхилень від допустимих значень параметрів, і визначення видів несправностей на основі реєстрації виявлених дефектів і пошкоджень.

Інформаційна технологія моніторингу дозволяє проводити безперервне або періодичне спостереження за технічним станом об'єктів і включає в себе функції діагностики (оцінка поточного стану), генезису (оцінка минулого стану) і прогнозу (оцінка майбутнього стану) цих об'єктів. Застосування спектрального, кореляційного і гармонійного аналізу діагностичних даних у моніторингу дозволяє:

- прогнозувати можливі відмови обладнання і планувати обслуговування та ремонти з використанням оптимальних термінів і обсягів;
- визначати критерії оцінки стану об'єктів;
- визначати значення цих критеріїв;
- ідентифікувати характерні ознаки несправностей.

Для відповіді на питання про термін відмови обладнання потрібні функції генезису і прогнозування значень діагностичних параметрів. Для цього використовуються математичні моделі, які враховують траєкторію параметричного вектора в часі після кожного вимірювання діагностичних параметрів. Наразі існують кілька методів моніторингу технічного стану об'єктів, і вони використовують різні правила для визначення термінів безаварійної зупинки об'єкта.

Деякі з цих правил включають правила допускового контролю, оптимальної зупинки за ресурсною ефективністю, мінімізації залишкового ресурсу та гарантованого успіху, але всі вони вимагають математичних моделей процесів деградації обладнання для точного визначення дати припинення експлуатації несправного об'єкта.

Два поширені методи моніторингу визначають дату зупинки експлуатації за допомогою екстраполяційного полінома третього ступеня, який апроксимує процес зміни параметрів. Перший метод використовує екстраполяційний поліном для тренда зміни параметрів до рівня поза межних значень цих параметрів, в то час як другий метод використовує екстраполяційний поліном для тренда збільшення до середньоарифметичного значення спостережуваних параметрів. Ці методи можуть використовуватися для визначення дати зупинки експлуатації або технічного обслуговування об'єкта в залежності від конкретних вимог.

1. Обслуговування обладнання після виходу його з

В цьому випадку машини і обладнання експлуатуються до виходу їх з ладу (рис. 1.12) [8]. В основному це стосується дешевого допоміжного обладнання при наявності його резервування, коли заміна

У випадках, коли немає резервного обладнання для заміни під час ремонту, виробничий процес зазвичай припиняється на час ремонтних робіт.

Додатково до цього, під час експлуатації обладнання часто виконують

періодичні вимірювання вібраційного стану машини. Це дозволяє скоротити час ремонту, оскільки можна приблизно визначити, коли машина може вийти з ладу, і забезпечити обслуговуючий персонал запасними частинами вчасно.

НУБІП України

## 2. Обслуговування устаткування по регламенту.

У випадку планово-профілактичного обслуговування, обслуговування проводиться відповідно до рекомендацій виробника, зазвичай через певні регулярні інтервали часу, як, наприклад, кожного тижня або раз на місяць, незалежно від фактичного технічного стану обладнання. Цей вид обслуговування відомий як планово-профілактичне обслуговування.

Якщо періодичність обслуговування визначається шляхом статистичного аналізу, то відповідно до регуляторних документів зазвичай встановлюється інтервал часу, протягом якого принаймні 98% обладнання функціонує без відмов (див. рис. 1.13).

Частота  
возникнення  
неисправностей

Техническое обслуживание

Рисунок 1.13 – Обслуговування обладнання по регламенту

При обслуговуванні відповідно до регламенту, зберігається можливість користуватися гарантією від заводу-вироблювача, проте виявляється, що не менше половини всіх технічних обслуговувань за регламентом проводяться, навіть коли вони фактично не потрібні. Більше того, для багатьох машин обслуговування та ремонт за регламентом не призводить до зменшення частоти їх виходу з ладу (див. рис. 1.13) [8].

Крім того, після технічного обслуговування надійність роботи машин і обладнання часто знижується, особливо якщо обслуговування передбачає розбирання механізму або заміну деталей. Це зниження надійності може бути тимчасовим і тривати до моменту післяробочої роботи, або воно може бути обумовлене появою нових дефектів у монтажі, які були відсутні до обслуговування.

### 3. Обслуговування по фактичному технічному стану

Цей вид обслуговування передбачає контроль за станом машин і механізмів або періодично, коли немає виявлених дефектів, або відповідно до результатів діагнозу і прогнозу технічного стану (див. рис. 1.14). Технічне обслуговування виконується лише у випадках, коли існує висока ймовірність відмови обладнання, забезпечуючи тим самим безперервну роботу справного обладнання без займання людини.

Існує різноманітність методів вирішення завдань діагностування параметрів електричних машин, але багато з них є складними, трудомісткими і непридатними для застосування в умовах виробництва та експлуатації. Велика кількість існуючих методів діагностування свідчить на користь пошуку нових принципово простих рішень, які б були більш простими та автоматизованими для проведення діагностики.

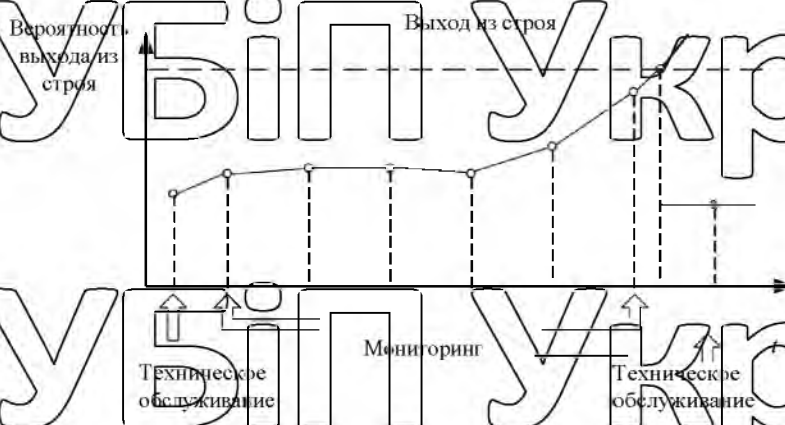


Рисунок 1.14 – Обслуговування обладнання по фактичному стану  
Урахування насиченості парку електричних машин агрегатами, що пройшли ремонт, є важливим аспектом при аналізі надійності. Показник надійності електродвигунів у відповідній галузі промисловості, у яких використовуються як заводські машини, так і машини, які були відремонтовані, можна розглядати як показник, який відображає частоту відмов, пов'язані витрати та інші аспекти. Різниця в характеристиках машин, які пройшли ремонт, порівняно з заводськими машинами, свідчить про високу ймовірність виникнення аварій у системах електроприводу при статичній оцінці таких явищ.

# МЕТОДИ ДІАГНОСТИКИ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ З АСИНХРОННИМИ ДВИГУНАМИ

## 2.1 Класифікація методів визначення параметрів

Алгоритми керування електромеханічними системами з асинхронними двигунами вимагають знання параметрів цих електричних машин. Деякі з цих параметрів можуть бути розраховані на основі каталожних даних або визначені експериментально з використанням спеціального обладнання.

Проте такий підхід може бути обмеженим, оскільки спеціальне обладнання не завжди доступне для реального використання.

Тому важливим аспектом сучасних асинхронних електроприводів є можливість визначення параметрів асинхронних двигунів при їх ініціалізації системи. Багато зарубіжних виробників асинхронних електроприводів включають функцію "self-commissioning" (самокомісіювання) в свої пристрої. Ця функція дозволяє ідентифікувати параметри електричних машин, зазвичай на непрацюючому технологічному обладнанні, такому як нерухомі або обертається з постійною швидкістю двигуни.

Проблема ідентифікації параметрів асинхронних двигунів була предметом досліджень і наукових публікацій у зарубіжних джерелах. Різні методи і алгоритми були розроблені для цієї мети. Наприклад, одним із алгоритмів базується на лінійності моделі електричної частини асинхронного двигуна при постійній швидкості. Інший алгоритм використовує розширений фільтр Калмана для ідентифікації параметрів. Інші дослідження використовують метод частотних характеристик, а також теорію адаптивних систем.

Узагальнюючи, існує кілька підходів до ідентифікації параметрів асинхронних двигунів, проте досі не існує єдиної теоретично обґрунтованої моделі для цього завдання. Різні методи мають свої переваги і обмеження, і вибір методу залежить від конкретних умов та завдань системи керування.



Аналіз наявних джерел, присвячених визначенню параметрів асинхронних двигунів, показує, що відсутній простий і надійний метод, який би дозволяв точно визначити всі параметри еквівалентної схеми заміщення асинхронного двигуна, включаючи еквівалентні параметри, що характеризують втрати в сталі статора і ротора. Існуючі методи часто базуються на спрощених моделях, які можуть не враховувати всі важливі аспекти роботи асинхронних двигунів.

Проблема ідентифікації параметрів асинхронних двигунів ускладнена відсутністю єдиної методики для вирішення цього завдання. Існують різні підходи і методи, і вибір методу зазвичай залежить від конкретних умов і завдань. Також важливо враховувати, що вимоги до ідентифікації параметрів можуть відрізнятися в залежності від конкретного виробничого завдання або нормативних вимог.

Також вказується на важливість врахування втрат в сталі двигуна, які можуть становити значну частину від загальних втрат. Незважаючи на це, деякі люди можуть ігнорувати ці втрати, особливо після ремонту, коли вони можуть значно зрости через некоректний ремонт. Тому важливо враховувати втрати в сталі при ідентифікації параметрів, особливо після ремонту.

Після капітального ремонту асинхронних двигунів характеристики сталі можуть змінюватися, особливо через руйнування міжлистової лакової ізоляції у крайках зубців, наклепів і інших ділянках сталі статора або ротора. В таких випадках поверхневий шар сталі можна розглядати як феромагнітний екран на межі між зазором і пакетом сталі статора або ротора. Це призводить до істотного збільшення втрат від вихрових струмів, зменшення ефективного потоку в зазорі та загальних втрат.

Крім того, зміни максимальної індукції в зазорі можуть бути пов'язані з числом та характером впливів на сталь під час передремонтної обробки. У результаті цих змін сталь може переходити в режим насичення, що призводить до появи гармонік вищого порядку в струмі мережі. Ці гармоніки можуть впливати на загальні втрати в сталі.

Такі зміни в характеристиках сталі після капітального ремонту можуть впливати на роботу двигуна та його надійність, тому важливо враховувати ці аспекти при проведенні ремонту та діагностиці асинхронних двигунів.

№ п/п	Завдання	Параметри для розрахунку							Кінематичний стан	
		$R_1$	$X_1$	$X_{\Sigma}$	$R_{\mu}$	$R_2$	$X_2$	$s$		$\xi$
1	Визначення параметрів схеми заміщення АД з послідовним живленням від ПЧ	X	X	X	X	X	X	-	-	Ротор двигуна нерухомий
2	Визначення параметрів АД при полігармонійному живленні	X	X	X	X	X	X	-	-	-//-
3	Визначення параметрів з урахуванням ефекту витіснення струму в роторі	X	X	X	X	X	X	-	X	-//-
4	Визначення параметрів двигуна з урахуванням втрат в сталі при полігармонійному живленні	X	X	X	X	X	X	X	-	Ротор двигуна обертається
5	Визначення опорів ковзання двигуна в процесі його роботи	X	-	-	-	X	-	X	-	-//-
6	Визначення швидкості обертання АД при наявності всіх параметрів	-	-	-	-	-	-	X	-	-//-
7	Визначення несиметрії конструкції АД	X	X	X	X	X	X	X	-	-//-
8	Визначення ступеня насичення сталі двигуна	-	-	X	X	-	-	X	-	-//-

Наявні схеми заміщення не враховують той факт, що втрати в сталі характерні не тільки для статора, а й для ротора, причому ця залежність пов'язана з частотою струму в роторі і залежить не тільки від частоти живлення, але і від навантаження на валу.

НУБІП України

НУБІП України

# НУБІП України

## 2.1 Аналіз методів ідентифікації електроприводів з АД

Звісно, методи ідентифікації параметрів асинхронних двигунів мають велике практичне значення для визначення їх характеристик і роботи в різних режимах. Давайте розглянемо деякі основні характеристики методів ідентифікації параметрів асинхронних двигунів, які ви вказали:

1. **За типом напруги живлення:** Методи ідентифікації можуть використовувати різні типи напруги для живлення асинхронних двигунів, такі як трифазна синусоїдальна, трифазна несинусоїдальна, однофазна синусоїдальна або навіть напруга постійного струму. Кожен з цих методів може вимагати своїх умов і вимірювань.

2. **За типом вихідної інформації:** Деякі методи базуються на каталожних даних та конструктивних параметрах двигуна, в той час як інші використовують перехідні функції, отримані в режимі відключення двигуна або короткого замикання, для ідентифікації параметрів. Перехідні функції також можуть використовуватися для визначення деяких характеристик, таких як коефіцієнт диференціального розсіювання.

Ця класифікація допомагає розуміти, які методи використовуються для ідентифікації параметрів асинхронних двигунів і які основні особливості кожного з них. Такі методи є важливими для підтримки надійності та ефективності електроприводів та систем керування, що використовують асинхронні двигуни.

Методи ідентифікації параметрів асинхронних двигунів, які використовують частотні характеристики, досліджують залежність параметрів машини від частоти. Вони можуть використовувати результати реєстрації пускових або згасаючих струмів, що дають інформацію про залежність параметрів від частоти напруги живлення.

Методи, що базуються на даних дослідів холостого ходу, короткого замикання та роботи в навантажувальних режимах, використовують різноманітні параметри, такі як напруга і струм статора, кут між векторами струму і напруги, активна потужність, швидкість обертання ротора, механічні та втрати в сталі. Ці параметри використовуються для визначення характеристик асинхронних двигунів в різних режимах роботи.

Також існують методи, які використовують статистичні дані з заводських контрольних випробувань. Ці дані можуть бути корисними для ідентифікації параметрів машин і визначення їх характеристик.

Кожен з цих методів має свої переваги та обмеження і може бути використаний в певних умовах для ідентифікації параметрів асинхронних двигунів.

### 3. За встановленим параметрам параметрів схеми заміщення АД

Метод, для яких в якості вихідних даних досить каталожних даних.

Мається на увазі, що для реалізації подібних методів немає необхідності попередньо визначати частину параметрів схеми заміщення – значення опорів і індуктивностей обмоток електричної машини.

Метод, для яких крім каталожних даних необхідна наявність значень одного або декількох параметрів схеми заміщення. Серед розглянутих методів зустрічаються такі комбінації:

- активний опір фази статора  $r_1$ ;
- індуктивний опір розсіювання обмотки статора  $x_1$  ;
- сукупність  $r_1$  і  $x_1$  ;
- $r_1, x_1, x$ , де  $x$  – намагнічування;
- індуктивний опір гідки
- $r_1, x_1, x, r$ , де  $r$  – активний опір намагнічування;
- сукупність  $r_1$  і наведеного активного опору фази ротора  $r_2$  (або  $r_2$ )
- $r_1, x_1, x_{ad}; s$ ),
- $r_1, x_c$  де  $x_c$
- синхронний опір;
- $x_c, x(j_s), s_0$  ;

### 4. За способом отримання кінцевого результату:

Розрізняють декілька методів ідентифікації параметрів асинхронних двигунів на основі різних підходів та вхідних даних:

1. Метод, що використовує розрахункові співвідношення для паспортних даних асинхронного двигуна. Цей метод використовує каталожні дані та емпіричні формули для визначення параметрів машини.

2. Метод, що використовує формули для обробки результатів дослідів холостого ходу і короткого замикання АД. Цей метод базується на результатах дослідів, де зазвичай вимірюються струми і напруги статора та ротора в режимах холостого ходу і короткого замикання.

3. Метод визначення параметрів схеми заміщення при побудові кругових і різного роду векторних діаграм. Використовуються векторні діаграми для визначення параметрів машини в різних режимах.

4. Метод, що використовує електромагнітні поля в зоні електромеханічного перетворення енергії та емпіричні залежності для визначення параметрів.

5. Метод на основі рішення систем рівнянь, де використовуються експериментальні дані для обраних схем заміщення і баланс напруг та електромагнітного стану машини.

6. Метод, що використовує точки сполучення відрізків асимптотичної ЛАЧХ (логарифмічної амплітудно-частотної характеристики) для визначення параметрів машини.

Кожен із цих методів має свої особливості та застосовується в залежності від конкретних умов та доступних даних для ідентифікації параметрів асинхронних двигунів.

## 5 По повноті визначення шуканих параметрів:

Методи ідентифікації параметрів асинхронних машин можуть бути розділені на дві категорії в залежності від того, чи дозволяють вони отримати всі параметри обраної схеми заміщення асинхронної машини:

Методи, що дозволяють визначити всі параметри схеми заміщення: Ці методи надають інформацію про всі активні опори фаз статора та ротора ( $r_1$  і  $r_2$ ), індуктивності фаз статора та ротора ( $L_1$  і  $L_2$ ) і максимальну взаємну індуктивність між фазою статора і ротора ( $M$ ). Вони надають повну інформацію про електричні параметри машини.

Методи, що дозволяють визначити лише частину параметрів схеми заміщення. Деякі методи дозволяють визначити лише обмежену кількість параметрів, наприклад, активні або індуктивні опори, інколи інші комбінації параметрів. В інших випадках може вимагатися попереднє визначення деяких параметрів іншими методами.

Важливо враховувати, що вибір конкретного методу ідентифікації параметрів залежить від доступних даних, обладнання, специфікації машини та конкретних завдань дослідження. Різні методи можуть мати свої переваги і обмеження, і їх вибір повинен бути обґрунтованим в кожному конкретному

випадку

- $r_1$ ,  $X_1$ ,  $x_2$ ,  $x_2$ ;

- $r_1$ ,  $X_1$ ,  $x_2$ ,  $r$ ;

- $x_1$ ,  $X_2$ ;

- $x_1$ ,  $X_2$ ,  $r_2$ ;

- $x_1$ ,  $X_2$ ,  $x_2$ ,  $r_2$ ;

- $L_1$ ,  $L_2$ ,  $L_2$ ,  $r_2$ ;

-індуктивний опір від вищих гармонік поля в повітряному зазорі (диференціального розсіювання);

-сумарний реактивний опір лобового розсіювання обмоток статора і ротора.

Методи, які спрямовані на уточнення значень всіх параметрів схеми заміщення асинхронного двигуна або їх частини, грають важливу роль у визначенні точних характеристик та параметрів машини. Наприклад, методи уточнення значення активного опору статора або індуктивного опору допомагають враховувати несиметрию і несинусоїдальність напруги мережі, а також явища насичення магнітного кола і витіснення струму ротора. Це дозволяє отримати більш точні результати і підвищити якість діагностики та контролю машини.

Уточнення параметрів машини може бути важливим для вирішення конкретних завдань, таких як розрахунок навантажень, розробка систем керування, а також визначення енергетичних показників та потужностей.

Точне визначення параметрів допомагає покращити продуктивність та надійність роботи електродвигуна.

Важливо зазначити, що уточнення параметрів може вимагати додаткових досліджень та вимірювань, і вибір методу повинен базуватися на конкретних умовах та потребах виробництва.

## 2.1 Характеристика експрес-методів діагностики асинхронних двигунів

Використання експрес-методів діагностики технічного стану електродвигунів у робочих режимах є важливим етапом в автоматизації управління технологічними процесами та обслуговуванням обладнання. Ці методи дозволяють реагувати на поточні зміни у стані обладнання, виявляти можливі дефекти та проблеми під час роботи електродвигунів, що сприяє зниженню ризику аварій та збільшенню надійності обладнання.

Основні переваги використання експрес-методів діагностики включають:

1. Здатність виявляти дефекти під час роботи обладнання, що дозволяє проводити ремонт та обслуговування "за станом" і уникнути аварійних ситуацій
2. Зменшення витрат на технічне обслуговування електродвигунів на 50-75% порівняно з обслуговуванням "за регламентом".
3. Підвищення надійності та продуктивності технологічних процесів завдяки ранньому виявленню проблем.

Докладний аналіз і використання конкретних методів експрес-діагностики може значно поліпшити управління технологічними процесами та забезпечити ефективну діагностику та планування обслуговування обладнання.

# НУБІП України

# НУБІП України

Таблиця 2.2 – Методи експрес-діагностики асинхронних електродвигунів.

<p>Назва методу</p> <p>Метод контролю параметрів електричного двигуна на основі аналізу пускових струмів</p>	<p>Мета даного методу</p> <p>Суть методу полягає в тому, що проводиться пуск електродвигуна при пониженій напрузі, рівній напрузі яка застосовується в досліді короткого замикання, але ротор двигуна не зупиняють</p>
<p>Діагностика асинхронного електроприводу за даними вимірів робочого режиму</p>	<p>Метод діагностики технічного стану обмоток статора і ротора асинхронних електродвигунів з короткозамкненим ротором за результатами вимірювання параметрів робочого режиму (фазні струми і напруги електродвигуна, споживана ім потужність, частота обертання), без таких недоліків як похибки діагностування при наявності пульсацій і гармонійних складових</p>
<p>Розрахунково-експериментальне визначення параметрів схем заміщення і характеристик асинхронних двигунів</p>	<p>в напрузі, а також труднощі, пов'язані з оцінкою технічного стану електродвигуна</p> <p>Розробка методу, що дозволяє за даними експлуатаційних режимів пуску і роботи під навантаженням асинхронного електродвигуна визначити параметри схеми заміщення, яка враховує втрати в сталі і вплив ефекту витіснення струму в роторі, а також алгоритм розрахунку по знайденим параметрам двигуна сталих і перехідних режимів роботи приводу</p>



Спосіб визначення параметрів робочих характеристик асинхронного двигуна безполучення з навантажувальним пристроєм

Спосіб визначення параметрів і робочих характеристик без сполучення з навантаженням, що дозволяє визначати більшу кількість параметрів при номінальній напрузі з використанням звичайної вимірювальної апаратури і проводити розрахунок робочих характеристик по «Т» - або «Г» - подібним схемами заміщення.

У даному методі запропоновано спосіб діагностики стану обмоток статора та ротора асинхронного електродвигуна з короткозамкненим ротором, використовуючи результати вимірів параметрів в робочому режимі (фазні струми та напруги електродвигуна, споживана потужність, частота обертання).

Виявлено, що при наявності дефектів у обмотках двигуна в струмах статора, ковзанні та активній потужності виникають періодичні коливання. Симетричні компоненти прямої та зворотної послідовностей можна визначити на основі даних, отриманих під час вимірів фазних величин. Контроль пульсацій в обмотковому струмі статора надає можливість визначити ковзання асинхронного електродвигуна.

З цим методом досягається задовільна точність при частотах фіксації струмів, що є у 20-30 разів вище за частоту мережі  $f_1$ . Час контролю повинен бути не менше вказаного значення.

Проводиться розрахунок періоду  $T_1$  і частоти  $f_1$  напруги живлення, а також початкових фаз струмів і напруг. Далі визначаються амплітуди фазних струмів в кожен момент часу. Це виконується шляхом обчислення середньоквадратичного значення струму для певної кількості дискретних точок, які знаходяться зліва і справа від поточної  $i$ -тої точки відповідно до періоду сигналу номінальної частоти.

Для визначення величини ковзання асинхронного електродвигуна використовується крива зміни амплітуди фазного струму в часі  $I_{mi}(t)$ , яка

зміщена вниз до перетину з віссю часу  $t$ .  $I_m$  - це середнє значення амплітуди фазного струму електродвигуна. Після знаходження періоду коливань  $T_{кол}$  амплітуди фазного струму розраховується величина ковзання  $s$  електродвигуна.

Для оцінки стану двигуна використовується критерій нахилу характеристики  $k_r$ , який характеризує крутизну механічної характеристики асинхронного електродвигуна в області робочих ковзань. Значення  $k_d = 1$  вказує на справний двигун. Якщо значення  $k_d$  відрізняється від 1, то це свідчить про наявність дефекту в електродвигуні, і зміна  $k_d$  може вказати на місце виникнення (обмотка статора або ротора) і характер дефекту.

Використовуючи методики, які базуються на контролі миттєвих значень фазних струмів і напруг статора електродвигуна, можна виявляти дефекти механічної частини, включаючи ексцентриситет

Таблиця 2.3 – Зв'язок діагностованих дефектів та їх симптоми

Дефект	Симптом	Частота струму $\Omega f_2$	Струм в пошкодженій фазі $I_{пш}$	Струм у здоровій фазі $I_{здор}$
Виткове замикання у фазі обмотки статора		$f_1$	$\geq 0,1, 1 \cdot I_{норм}$	$\geq 1,05 \cdot I_{норм}$
			$I_{повр} > I_{здор}$	
Обрив однієї паралельної гілки обмотки статора	$m=1$	$f_1$	0	$0,86 \cdot I_{норм}$
	$m=2$		$0,6 \cdot I_{норм}$	$0,96 \cdot I_{норм}$
	$m=3$		$0,75 \cdot I_{норм}$	$0,94 \cdot I_{норм}$
	$m=4$		$0,82 \cdot I_{норм}$	$0,96 \cdot I_{норм}$
Обрив одного стержня КЗР		$f_1$ (1-2s)	Пульсації струму статора	
Дефекти механічної частини		$\beta$	Пульсації струму статора	
Ексцентриситет		$+\gamma$	$ \cos \phi $ (на у.х.)	

Виникнення струму зворотної послідовності, який має частоту мережі, може бути викликане або несиметрією обмоток статора, або несиметрією напруги живлення. Для надійної діагностики дефектів обмотки статора потрібно точно визначити причину виникнення такої несиметрії в параметрах робочого режиму електродвигуна, включаючи струми і напруги. Це можливо досягти за допомогою:

- Контролю миттєвих значень фазних струмів і напруг електродвигуна для визначення актуальних значень струмів і напруг фаз.

Запропонований метод діагностики параметрів асинхронного електродвигуна базується на експериментальному визначенні параметрів схеми заміщення шляхом вимірювання миттєвих значень струму, напруги та потужності.

У цьому методі відзначається відмінність від інших підходів, таких як той, який рекомендує ГОСТ та інші подібні методи випробувань асинхронних двигунів, де ротор загальмовується. Замість загальмування ротора, запропонований метод передбачає пуск двигуна при зниженій напрузі, еквівалентній напрузі при проведенні стандартного короткого замикання.

Дослідні дані, отримані під час пуску двигуна при зниженій напрузі та відсутності аперіодичної складової пускового струму, дозволяють отримати значення струму, напруги та потужності в періодичному режимі. Математична модель асинхронного двигуна вважається адекватною для періодичних значень струму, потужності тощо.

Розрахунки проводяться за інтегральним методом на основі отриманих експериментальних даних в кожній половині періоду напруги для кожної фази. Результати аналізу та розрахунків, такі як діючі значення струму, напруги, потужності і кут між ними, показують повну адекватність даних, отриманих під час пуску при зниженій напрузі, в порівнянні з даними, отриманими під час стандартного короткого замикання з загальмованим ротором.

Даний метод, що базується на розрахунково-експериментальному визначенні параметрів схеми заміщення асинхронного електродвигуна, має

свої обмеження та недоліки. Одним із недоліків є великі похибки в оцінці коефіцієнта потужності ( $\cos\phi$ ) та КПД, що може бути пов'язане з особливостями розрахунків.

Метод передбачає визначення параметрів схеми заміщення асинхронного двигуна на основі даних експлуатаційних режимів, включаючи пуск та роботу під навантаженням. Ця схема враховує втрати в сталі та вплив ефекту витіснення струму в роторі, а також встановлює алгоритм розрахунку на основі знайдених параметрів для стаціонарних та перехідних режимів роботи.

В розрахунках використовують схему заміщення, яка включає активні та індуктивні опори розсіювання обмоток ланцюга статора і ротора, контури для обліку ефекту витіснення струму, опори втрат в сталі та індуктивний опір взаємної індуктивності всіх контурів. При цьому припускається відсутність насичення в головному магнітному шляху та шляхах потоків розсіювання, рівність опорів обмоток статора і ротора пофазно, і розподіл індукції в повітряному зазорі у вигляді синусоїди.

Важливо враховувати, що параметри  $R_{fe}$  та  $X_{fe}$  в схемі заміщення враховують втрати в магнітопроводі та можуть бути виражені через коефіцієнт  $k_{fe}$  у співвідношенні  $R_{fe} = k_{fe} * X_{fe}$ .  $R_s$  визначається на відношенні від мережі машини, а  $X_s$  можна визначити іншим чином.

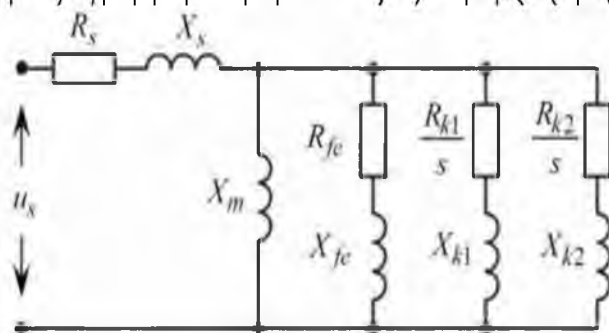


Рисунок 2.1 – Схема заміщення асинхронного двигуна

Для визначення параметрів гілки намагнічування та обмотки ротора в області робочих ковзань проводять два досліди з різними коефіцієнтами навантаження механізму. Під час цих дослідів вимірюються напруги, струми статора, споживана активна потужність та ковзання.

На основі цих даних визначаються вхідні (активний та індуктивний) опори двигуна. Після цього шляхом вирахування з відповідних опорів статора визначають активні та реактивні провідності гілки намагнічування ( $G_{gm}(s_i)$  та  $B_{rm}(s_i)$ ), які представляють собою паралельно включені провідності.

Такий підхід дозволяє отримати важливі параметри для подальших розрахунків і аналізу робочих характеристик асинхронного двигуна в області робочих ковзань.

Зараз розглянемо обчислення провідностей  $\Delta G_{r0}$  та  $\Delta B_{r0}$  як різниці між провідностями, які отримані в двох різних дослідах з різними ковзаннями  $s_1$  і  $s_2$ . Ця різниця визначається як різниця провідностей гілки намагнічування та обмотки ротора при різних ковзаннях:

$$\Delta G_{r0} = G_{gm}(s_1) - G_{gm}(s_2) = G_{f0}(s_1) - G_{f0}(s_2);$$

$$\Delta B_{r0} = B_{rm}(s_1) - B_{rm}(s_2) = B_{r0}(s_1) - B_{r0}(s_2).$$

Ці різниці провідностей виражаються через шукані опори ротора  $R_{r0}$  і  $X_{r0}$ , які в областях ковзань, менших за критичні, можна вважати постійними і незалежними від ефекту витіснення струму в роторі. Вирази для обчислення  $R$  і  $X$ :

$$R = \Delta G_{r0} [s(1 + \tau^2 s^2)^{-1} - s(1 + \tau^2 s^2)^{-1}]^{-1};$$

$$X = \Delta B_{r0} [s(1 + \tau^2 s^2)^{-1} - s(1 + \tau^2 s^2)^{-1}]^{-1}.$$

Тут  $\tau$  - це стала часу, яка визначається як  $X_{r0} / R_{r0}$ .

Параметри ротора для області номінальних ковзань вже відомі, тому параметри при інших ковзаннях можуть бути знайдені, використовуючи вхідний опір двигуна  $Z_{vx}(s_3)$ , виміряний в експерименті. Таким чином, виходячи з цього, знаходять параметри контуру втрат в сталі та індуктивного опору взаємної індуктивності.

Даний метод визначення параметрів та робочих характеристик асинхронних двигунів має свої переваги і недоліки. Однією з головних переваг є його простота реалізації, оскільки він не вимагає використання спеціалізованого обладнання та проведення окремих дослідів холостого ходу. Замість цього, для розрахунку можуть бути використані дані з нормальних робочих режимів, які включають пуск та роботу під навантаженням.

Завдяки цьому методу можна визначити багато параметрів, такі як параметри гідки намагнічування для врахування втрат в сталі, струм холостого ходу, номінальне ковзання, і значення параметрів ротора в області номінальних ковзань.

Однак, серед недоліків даного методу можна виділити його громіздкість.

Обчислення та розрахунки можуть бути складними і вимагати деякої обробки даних. Також, в процесі визначення параметрів можуть виникнути неточності, які можуть вплинути на результати.

Усього враховуючи, спосіб визначення параметрів та робочих характеристик асинхронних двигунів без спряження з навантажувальним агрегатом є корисним, але потребує обережності та уважності при застосуванні через можливі недоліки і громіздкість у розрахунках.

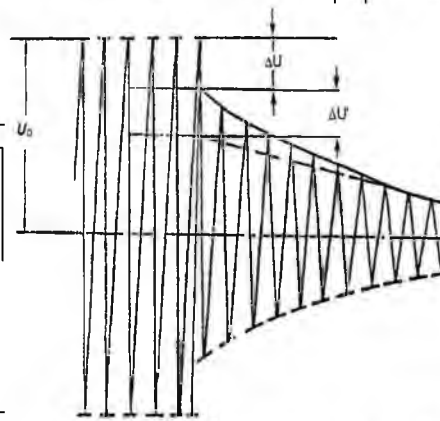


Рисунок 2.2 – Залежність напруги двигуна від часу перед відключенням після відключення від джерела живлення.

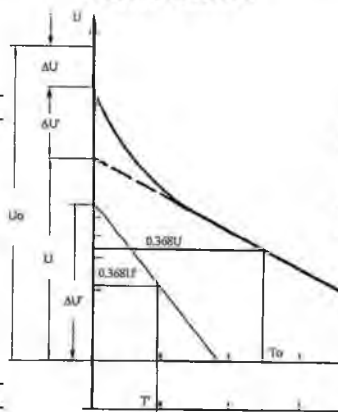


Рисунок 2.3 – Крива згасання напруги в пологарифмічних координатах

Дослід відключення двигуна від джерела живлення проводиться зі стану холостого ходу при номінальній напрузі або близькій до неї. Перед відключенням реєструють лінійні напруги  $U_0$ , струм в трьох фазах  $I_0$  та

потужність  $P_0$ . Після відключення двигуна вимірюють опір фази  $r_1$ . За вимірними значеннями до відключення двигуна можна обчислити реактивний опір статора.

Основна ідея полягає в вимірюванні параметрів до і після відключення двигуна для визначення реактивного опору статора. Розглянемо докладніше:

1. Виміряйте лінійні напруги  $U_0$ , струм в трьох фазах  $I_0$  та потужність  $P_0$  перед відключенням двигуна.
2. Після відключення двигуна виміряйте опір фази  $r_1$ .
3. Використовуйте зібрані дані для розрахунку реактивного опору статора.

Реактивний опір статора, позначений як  $X_1$ , може бути розрахований за допомогою наступного співвідношення:

$$X_1 = U_0 / I_0$$

Де  $U_0$  - лінійна напруга до відключення двигуна, а  $I_0$  - струм в трьох фазах до відключення двигуна.

Цей метод дозволяє визначити реактивний опір статора, що може бути корисним при подальших розрахунках та аналізі робочих характеристик асинхронного двигуна.

У вас представлені формули та пояснення, які використовуються для обчислення різних параметрів асинхронного двигуна під час вимірювань та дослідів. Відповідні значення і параметри розраховуються з вимірюваних даних, таких як напруга, струм, та потужність під час роботи двигуна, а також зміни напруги при його відключенні.

Формула (2.30) визначає миттєвий стрибок напруги  $\Delta U$  в момент відключення двигуна, використовуючи струм холостого ходу ( $I_0$ ), опір статора ( $r_1$ ), реактивний опір статора ( $x_1$ ) і кутовий зсув фази ( $\phi_0$ ).

Формула (2.31) обчислює реактивний опір  $X$  ротора, використовуючи знайдений стрибок напруги  $\Delta U$ , струм холостого ходу ( $I_0$ ), опір статора ( $r_1$ ), кутовий зсув фази ( $\phi_0$ ) і синус кута ( $\sin\phi_0$ ).

Далі, постійні часу  $T_0$  та  $T'$  визначаються на основі змін напруги після відключення двигуна від джерела живлення. Тут  $T_0$  визначається для повільного спадання напруги, і  $T'$  для швидкого спадання, і вони обчислюються з вимірних даних та параметрів системи.

Коефіцієнт розсіювання ротора  $\sigma_1$  обчислюється зі знайдених постійних часу  $T_0$  і  $T'$ , струму холостого ходу ( $I_0$ ) та синуса кута ( $\sin\phi_0$ ).

Реактивний опір взаємодукції  $X_{12}$  обчислюється на основі розрахованого значення  $X$  та коефіцієнта розсіювання ротора  $\sigma_1$ .

Коефіцієнт розсіювання ротора  $\sigma_2$  обчислюється на основі постійної часу  $T'$  і квадрату синхронної кутової частоти обертання ( $\omega_2$ )

Аналіз та діагностика електродвигунів є важливими аспектами забезпечення надійності та безпеки роботи електроприводів у різних галузях промисловості. Визначення параметрів і діагностика дефектів можуть бути виконані за допомогою різних методів та пристроїв:

**1. Методи обгрунтованої експлуатації:** Для визначення параметрів асинхронних електродвигунів в робочому режимі часто використовують методи, які базуються на аналізі вхідних та вихідних сигналів системи. Це може включати вимірювання струмів, напруги, потужності, обертового моменту і частоти обертання.

**2. Вібродіагностика:** Діагностика стану електродвигунів може бути виконана шляхом аналізу вібрації. Вібродатчики встановлюються на електродвигуні, і вимірювані вібраційні характеристики використовуються для виявлення можливих дефектів в підшипниках, статорі, роторі та інших частинах електродвигуна.

**3. Аналіз струмів і напруги:** Вимірювання струмів і напруги під час різних режимів роботи дозволяє виявляти аномалії, такі як перевантаження, збої у роботі пускових пристроїв або зміни у стані ізоляції обмоток.

**4. Термографія:** Використання термокамер для вимірювання температурних аномалій може допомогти виявити перегрів чи несправності в електродвигуні.



5. **Акустична діагностика:** Дефекти можуть бути виявлені шляхом аналізу акустичних сигналів, що генеруються електродвигуном.

6. **Сучасні технології:** Використання сучасних технологій, таких як машинне навчання та штучний інтелект, може полегшити процес діагностики, прогнозування та управління станом обладнання.

Адаптивні пристрої захисту і діагностики можуть автоматично реагувати на аномалії в роботі електродвигуна і надавати операторам або системам управління інформацію щодо стану обладнання. Це може включати в себе автоматичну зупинку приводу в разі виявлення серйозних аномалій, що можуть призвести до аварії.

Всі ці методи та технології спрямовані на забезпечення безперебійної та надійної роботи електроприводів і можуть бути важливими для виробництва та підтримки виробничого обладнання.

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

# ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ СИСТЕМ ЕЛЕКТРОПРИВОДА З АСИНХРОННИМИ ДВИГУНАМИ

## 3.1 Визначення еквівалентних параметрів асинхронної машини під час пуску за фазовим портретом сигналів струму та напруги

Аналіз показує, що існує велика кількість методик для визначення параметрів, що виникає з двох основних факторів. З одного боку, це прагнення отримати результати на основі простих схем заміщення. З іншого боку, відсутність єдиного підходу до визначення параметрів двигунів, який би дозволив знайти рішення для будь-якого завдання.

Для вирішення завдань управління сучасними системами електроприводу, включаючи статичні і динамічні режими роботи, а також для визначення параметрів асинхронних двигунів може бути застосований метод визначення параметрів асинхронної машини під час пуску, використовуючи фазовий портрет сигналів струму та напруги

Для більш докладного аналізу та реалізації цього методу на віртуальному стенді "Визначення параметрів асинхронних двигунів" був обраний саме цей підхід. Його перевага полягає в тому, що запропонований спосіб визначення еквівалентних параметрів електроприводу змінного струму під час пуску за допомогою фазового портрету сигналів струму і напруги є одним із найпростіших та не вимагає складних математичних виразів.

Отримані рівняння можуть бути легко внесені в програмне забезпечення мікроконтролерів, що використовується в системах захисту та моніторингу асинхронних двигунів.

Метод передбачає визначення еквівалентних параметрів електроприводу для моменту пуску асинхронного двигуна, що спрощує вирішення задач. При цьому приймаються наступні допущення:

- Напруга живлення двигуна є синусоїдальною, і вищі гармоніки відсутні.
- Повне затухання вільних складових струмів статора, обумовлене підключенням фаз до мережі.

Ротор асинхронного двигуна залишається нерухомим.

З урахуванням цих допущень, принципова схема однієї фази асинхронного двигуна (рис. 3.1) включає еквівалентний опір  $R_{\Sigma}$  та еквівалентний індуктивний опір  $x_{\Sigma}$ , який в загальному випадку може бути нелінійною функцією струму  $x_{\Sigma}(I)$

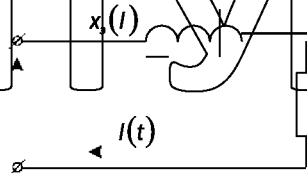


Рисунок 3.1 – Еквівалентна принципова схема фази

При синусоїдальній живильній напрузі  $U(t) = U_m \sin(\omega t)$  та еквівалентному індуктивному опорі  $x_{\Sigma} = \text{const}$ , фазний струм також має синусоїдальну форму  $I(t) = I_m \sin(\omega t + \varphi)$ , де фазовий портрет представляє собою еліпс  $E_1$ , який повернутий на кут  $\alpha$  відносно вісі абсцис. При перетворенні  $E_1$  до канонічної форми  $E_2$  (рис. 3.2)...

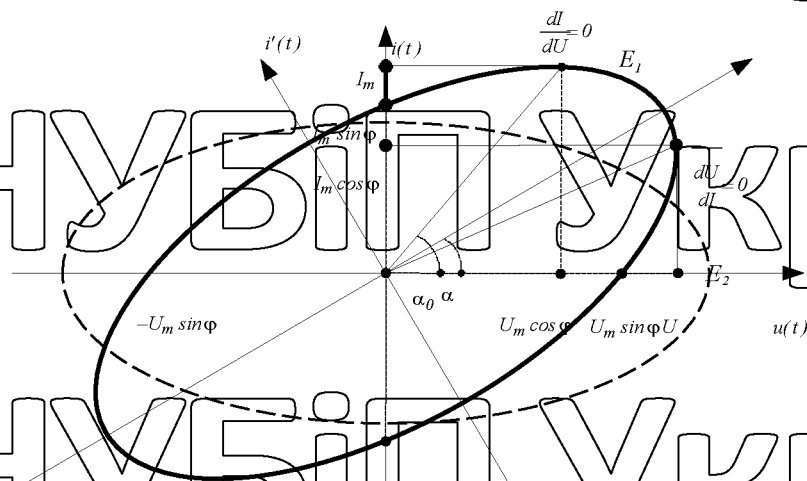


Рисунок 3.2 – Фазовий портрет напруги та струму фази при  $x_{\Sigma} = \text{const}$

Після аналізу стає зрозумілим, що активний еквівалентний опір  $R_{\Sigma}$  є функцією кута повороту  $\alpha$  і може бути визначений як точка, яка лежить на прямій, що проходить через координати еліпса  $E_1$ , де  $dI = 0$  та  $dU = 0$ .

Оскільки  $\alpha$  є функцією фазового кута  $\varphi$  ( $\alpha = f(\varphi)$ ), ми можемо знайти його за допомогою наступного виразу:  $\operatorname{tg}(2\alpha) = 2b / (a - c)$ , де  $a = 1$ ,  $b = -\cos(\varphi)$ ,  $c =$

1.

Знаючи  $\alpha$ , ми можемо обчислити активний еквівалентний опір  $R_{\Sigma}$  за формулою:  $R_{\Sigma} = U_m / I_m * \operatorname{tg}^2(2\alpha)$ .

Або, враховуючи  $Z = U_m / I_m$ , формула може бути переписана так:  $R_{\Sigma} = Z / (Z^2 - 1) * \operatorname{tg}(2\alpha)$ .

Щодо параметра  $x_{\Sigma}$  при нелінійній залежності  $x_{\Sigma} = f(I)$ , він може бути знайдений за допомогою такого виразу:  $x_{\Sigma}(I) = a_0 + a_1 * \cos(a_2 * I)$ , як показано на рисунку 3.2.

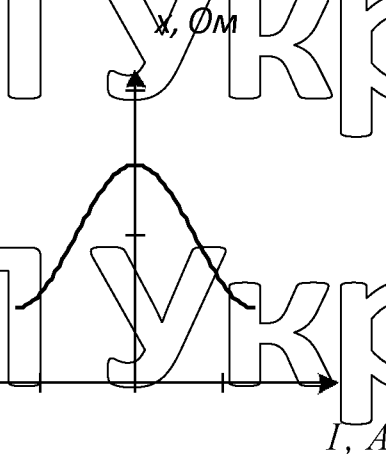


Рисунок 3.2 – Нелінійна залежність  $x_{\Sigma}$   $fI$

Сигнал струму (показаний на рисунку 3.3) має поліграфічний характер

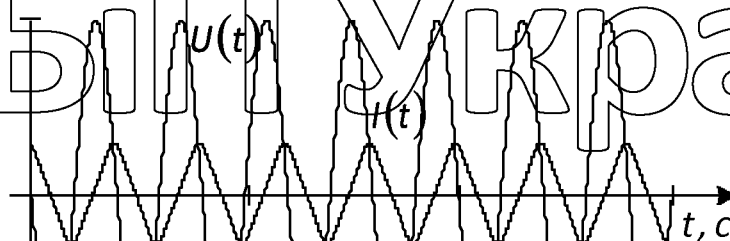


Рисунок 3.3 – Сигнали напруги та струму фази при нелінійній залежності  $x_{\Sigma} fI$

Після аналізу стає зрозумілим, що активний еквівалентний опір  $R_{\Sigma}$  є функцією кута повороту  $\alpha$  і може бути визначений як точка, яка лежить на прямій, що проходить через координати еліпса  $E1$ , де  $dI = 0$  та  $dU = 0$ .

Оскільки  $\alpha$  є функцією фазового кута  $\varphi$  ( $\alpha = f(\varphi)$ ), ми можемо знайти його за допомогою наступного виразу:  $\operatorname{tg}(2\alpha) = 2b / (a - c)$ , де  $a = 1$ ,  $b = -\cos(\varphi)$ ,  $c =$

1.

Знаючи  $\alpha$ , ми можемо обчислити активний еквівалентний опір  $R_{\Sigma}$  за формулою:  $R_{\Sigma} = U_m / I_m * \operatorname{tg}^2(2\alpha)$ .

Або, враховуючи  $Z = U_m / I_m$ , формула може бути переписана так:  $R_{\Sigma} = 1 / (Z^2 - 1) * \operatorname{tg}(2\alpha)$ .

Щодо параметра  $x_{\Sigma}$  при нелінійній залежності  $x_{\Sigma} = f(I)$ , він може бути знайдений за допомогою такого виразу:  $x_{\Sigma}(I) = a_0 + a_1 * \cos(a_2 * I)$ , як показано на рисунку 3.2.

### 3.2 Експрес-метод визначення параметрів асинхронного двигуна на основі аналізу змінних стану в динамічних режимах

Основним методом аналізу характеристик асинхронних двигунів в статичних режимах є використання еквівалентних схем. Для простоти аналізу можна розглядати одну фазу трифазного двигуна за певних умов, таких як сталість параметрів і симетрія фаз, синусоїдальність та пофазна симетрія живильної напруги, відсутність насичення магнітопроводу та впливу струму статора на реактивні опори статорної та роторної обмоток, сталість повної провідності намагнічуваного контуру, пропорційність струму намагнічування до напруги живлення незалежно від навантаження і відсутність додаткових втрат.

Метою нашого дослідження є визначення найточнішого та відносно простого методу визначення параметрів еквівалентної схеми асинхронного двигуна під час пуску. Ми обрали метод визначення параметрів асинхронного двигуна на основі аналізу змінних стану в динамічних режимах.

Цей метод спрощує розрахунок, оскільки дозволяє розглядати асинхронний двигун у момент пуску як трансформатор у режимі короткого замикання.

Ми також робимо деякі додаткові припущення:

Магнітне коло розглядається як ненасичене, тобто індуктивний опір обмоток є постійним.

(Ми не враховуємо) струм холостого ходу, оскільки для потужних машин він значно менший за пусковий струм.

Тут,  $T_k$  - стала часу;  $I_a$  - максимальне значення аперіодичного струму в момент ввімкнення двигуна;  $I_a(t_1)$ ,  $I_a(t_2)$  - значення аперіодичного струму в моменти часу  $t_1$  та  $t_2$ . Моменти часу  $t_1$  та  $t_2$  відповідають першому та другому максимальним значенням струму після ввімкнення, графік залежності струму статора від часу під час пуску показаний на рисунку 3.5.

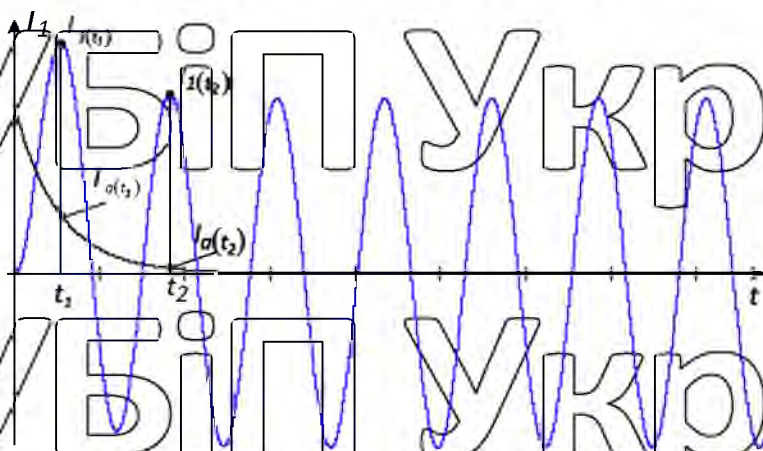


Рисунок 3.5 – Струми статора при включенні АД

Аналіз часових залежностей напруги та струму дозволяє визначити як початковий кут включення напруги  $\alpha_0$ , так і фазний кут струму  $\phi_k$ .

Для розрахунку даним методом використовуємо фрагмент часової залежності струмів статора під час пуску.

Визначимо алгоритм проведення досліду, який представлений на рисунку 3.6.



Рисунок 3.6 – Алгоритм проведення досліду з визначення параметрів

асинхронного двигуна

Обраний метод як і попередній не потребує додаткового обладнання, окрім блоку датчиків струму та напруги. Визначення параметрів двигунів значно спрощується під час пуску, що пришвидшує час для отримання результатів, та не потребує складних математичних виразів, та може легко бути покладеним до систем моніторингу або контролю АД.

### 3.3 Визначення активного опору обмотки статора в пускових режимах

Електропривод відіграє важливу роль в промисловості, і, отже, надійність та ефективність є важливими параметрами. Знання параметрів схеми заміщення електродвигуна має велике значення для досягнення ефективного управління і визначення потужності ротора за моделлю потоку. Відомості про ці параметри є важливими для побудови систем управління електроприводами з заданими показниками якості, для моніторингу та діагностики електричних машин, для визначення параметрів після ремонту.

Ця інформація також грає важливу роль в контролі якості технологічних процесів при великосерійному виробництві або ремонті електродвигунів.

Діагностика стану двигуна також є важливою областю застосування інформації про параметри. Рисунок 3.7 показує основні сфери застосування ідентифікації параметрів електродвигунів.



Рисунок 3.7 – Сфери застосування ідентифікації параметрів електродвигунів

Навіть якщо виробник надає інформацію про електродвигун, є сумніви щодо її точності. Відхилення у значеннях параметрів можуть становити 10-15% навіть для однієї моделі. Розрахунки параметрів за номінальними даними

можуть призвести до погіршень в розмірі 50-100% [49]. Тому визначення параметрів електродвигуна є важливим завданням.

Дослідники ставлять перед собою два різних завдання визначення параметрів електродвигуна. Перше завдання полягає у визначенні параметрів перед початком експлуатації електродвигуна (оффлайн ідентифікація). Друге завдання включає в себе визначення параметрів в режимі реального часу під час функціонування привода (онлайн ідентифікація). Параметри, отримані під час оффлайн ідентифікації, використовуються як вихідні дані для онлайн ідентифікації.

Один з найважливіших параметрів для електродвигунів змінного струму - це активний опір статора. Це через те, що одним з найпоширеніших дефектів електродвигунів є параметрична несиметрія активних опорів статора, яка виникає через виткові замикання фазних обмоток статора під час експлуатації.

Визначення активного опору статора допомагає спростити систему нелінійних рівнянь для визначення параметрів схеми заміщення електродвигуна.

В ході експлуатації асинхронних двигунів, однією з основних несправностей є виткове замикання фазних обмоток статора. Цей вид дефекту призводить до місцевого перегріву обмотки статора, що в свою чергу сприяє подальшому розвитку цієї проблеми і може призвести до несправностей двигуна.

В результаті виткового замикання кількість витків фазної обмотки статора зменшується. Це призводить до зміни активного опору обмотки статора через скорочення довжини провідників, а також до зміни індуктивного опору розсіювання через зменшення кількості витків фазної обмотки. В літературі, що присвячена проектуванню асинхронних двигунів, наведені формули для розрахунку активного опору статора і індуктивного опору розсіювання обмотки статора.

Отже, внаслідок виткового замикання виникає подвійний ефект: зменшення активного опору і зменшення індуктивного опору розсіювання фазної обмотки статора. Активний опір зменшується пропорційно кількості



витків, а індуктивний опір розсіювання - пропорційно квадрату кількості витків фазної обмотки.

Важливо визначити активний опір обмотки статора асинхронного електродвигуна, оскільки ця величина залежить від теплового стану електродвигуна, що може змінюватися під час роботи, особливо в повторно-короткочасних режимах. Активний опір обмотки статора може змінюватися на 20-30% під час роботи, тому важливо визначати його поточне значення для динамічної ідентифікації параметрів і стану електродвигуна.

Знання активного опору обмотки статора дозволяє отримувати оцінку потужності статора і, відповідно, електромагнітного моменту при виміряних фазних токах і напругах.

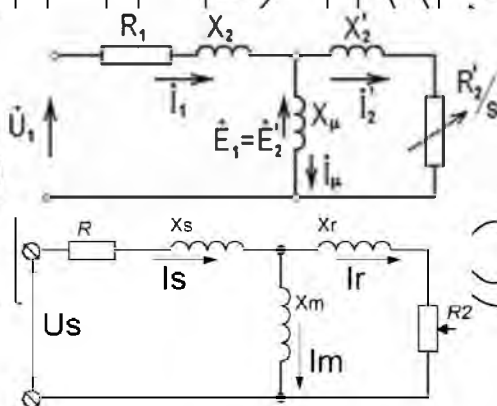


Рисунок 3.8 – Т-подібна схема заміщення асинхронного двигуна. За схемою заміщення видно, що визначення активного опору статора на основі вимірних значень фазних струмів і напруг в сталому режимі можливе лише при наявності інформації про параметри  $R_2$ ,  $L_2$ ,  $L_m$  і ковзання  $S$ . Це пояснюється тим, що величина  $R_1$  впливає на повний комплексний опір статора і залежить від зазначених величин.

У зазначеній схемі  $Z$  - це імпеданс статора, який залежить від активного опору  $R_2$ , реактивного опору  $L_2$ , реактивного опору реактора  $L_m$  і ковзання  $S$ .

Для визначення активного опору статора потрібно знати всі ці параметри.

Отже, для ефективного визначення параметрів і стану асинхронного двигуна в різних режимах роботи, система повинна мати можливість вимірювання активного опору статора, або бути здатною до його обчислення на основі вимірів інших параметрів, які впливають на активний опір статора.

Теоретичні засади online - ідентифікації активного опору електродвигуна змінного струму у динамічних режимах

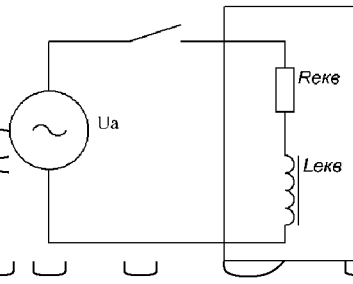


Рисунок 3.9 – Вмикання елементарного RL-кола

Отже, основний результат дослідження показує, що середнє значення періодичної складової збігається з нулем, а отже, при збільшенні періоду вимірювань, середнє значення цієї складової прямує до нуля. Це використовується для отримання яке є важливим положенням в дослідженні.

Оскільки під час доведення не використовувалися спеціальні припущення щодо частоти живлення, це положення може застосовуватися до випадків несинусоїдальних сигналів живлення або несинусоїдальних струмів у колах, які мають нелінійний характер індуктивності.

Проте залишається відкритим питання можливості використання отриманого виразу для визначення активного опору в схемах де присутні ємності або ключові елементи з активним опором, який може змінюватися з часом. Для таких схем потрібно розглядати більш складні моделі і розрахункові методи.

Для перевірки отриманої формули (3.22) для обчислення активного опору Електроприводу (ЕПД) було проведено серію експериментів на комп'ютерних моделях різних електротехнічних об'єктів, включаючи об'єкти з лінійною та нелінійною індуктивністю.

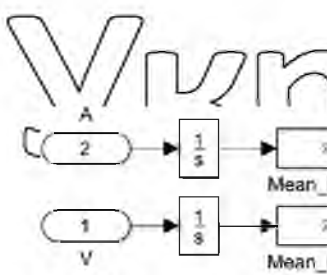
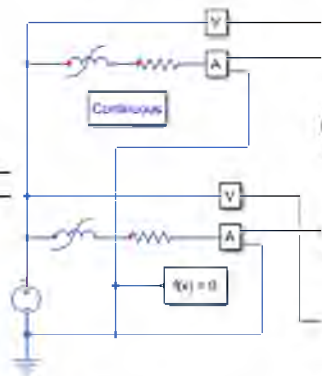
Для математичного моделювання використовувалася середовище MATLAB/Simulink разом з бібліотекою Simscape/Electronics/Passive Devices, яка містить реалізацію нелінійної індуктивності.

Структурна схема математичної моделі ЕПД з лінійною та нелінійною індуктивністю представлена на рисунку 3.10 (а), а структурна схема

підсистеми динамічної ідентифікації активного опору, подана на рисунку 3.10

Ці експерименти та математичне моделювання дозволили перевірити правильність отриманої формули і показали, що вона залишається дійсною для об'єктів з різною індуктивністю, включаючи нелінійну індуктивність.

Таким чином, отримана формула є корисним інструментом для онлайн-ідентифікації активного опору статора асинхронного двигуна в різних умовах.

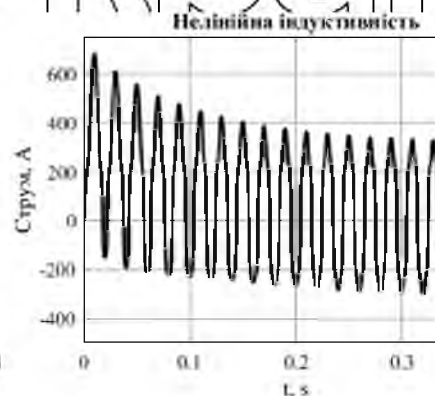
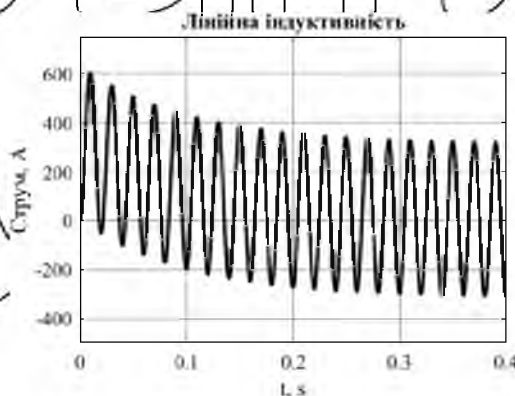


а) Рисунок 3.10 – Математичні моделі дослідження методу динамічної ідентифікації активного опору: а - структурна схема математичної моделі активно індуктивного двохполюсника; б - структурна схема

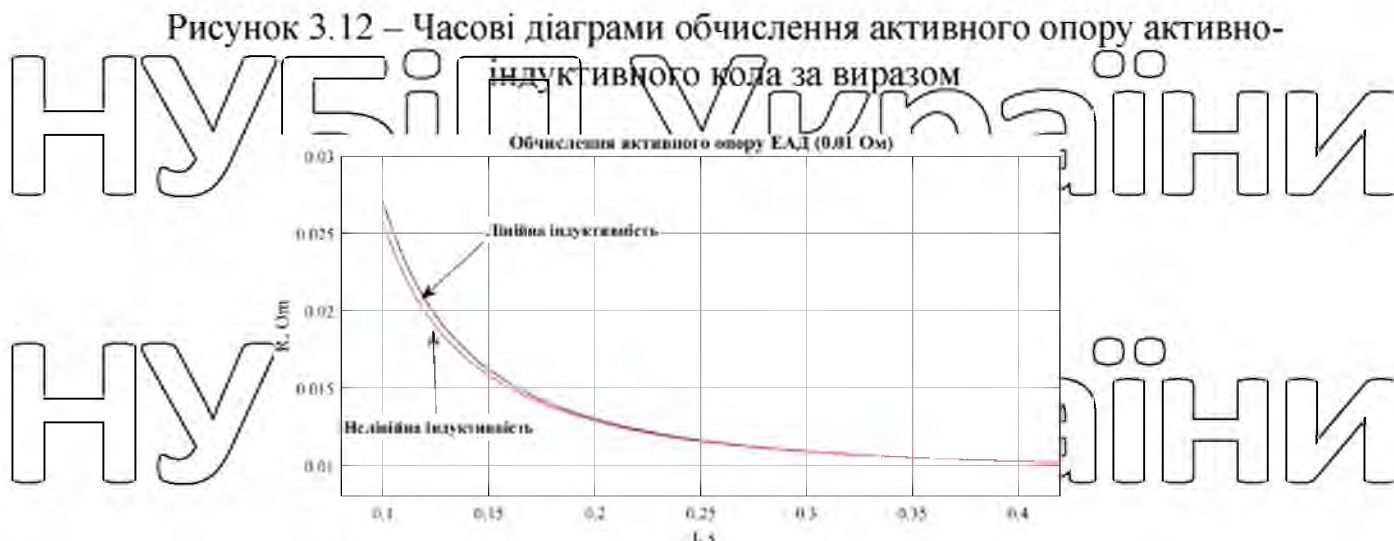
підсистеми обчислення активного опору

На рис. 3.11 наведені часові діаграми струмів у колах з лінійною (а) та нелінійною (б) індуктивністю. Для моделювання було прийнято такі параметри електричних кіл: активний опір  $R_A=0.01$  Ом; лінійна індуктивність

$L_A=1 \cdot 10^{-3}$  Гн. Частота осереднення даних у блоці обчислення середнього значення Mean дорівнює 10 Гц.



А) Б)  
 Рисунок 3.11 – Часові діаграми пускових струмів двофазових двигунів з лінійною індуктивністю а - з нелінійною індуктивністю б - з нелінійною індуктивністю  
 На рис. 3.12 наведені часові діаграми динамічного процесу обчислення активного опору  $R_A$  за виразом (3.22) при вмиканні напруги живлення.



Отримані результати чисельних експериментів підтверджують коректність отриманої формули (3.22) для динамічної ідентифікації активного опору електричних колів змінного струму, які містять як лінійну, так і нелінійну індуктивність.

У дослідженнях використовувалися математичні моделі асинхронного та синхронного електродвигунів, які були об'єднані з підсистемою для динамічного визначення активного опору. На рисунках 3.13 та 3.14 представлено діаграми обчислення активного опору статора під час пуску асинхронного та синхронного двигунів. Ці дослідження підтвердили придатність отриманої формули для динамічної ідентифікації активного опору електродвигунів змінного струму, включаючи синхронні та асинхронні двигуни.

Отже, результати підтвердили, що отримана формула є корисним інструментом для онлайн-ідентифікації активного опору статора електродвигунів змінного струму в різних умовах, включаючи режими пуску.

# НУБІП України

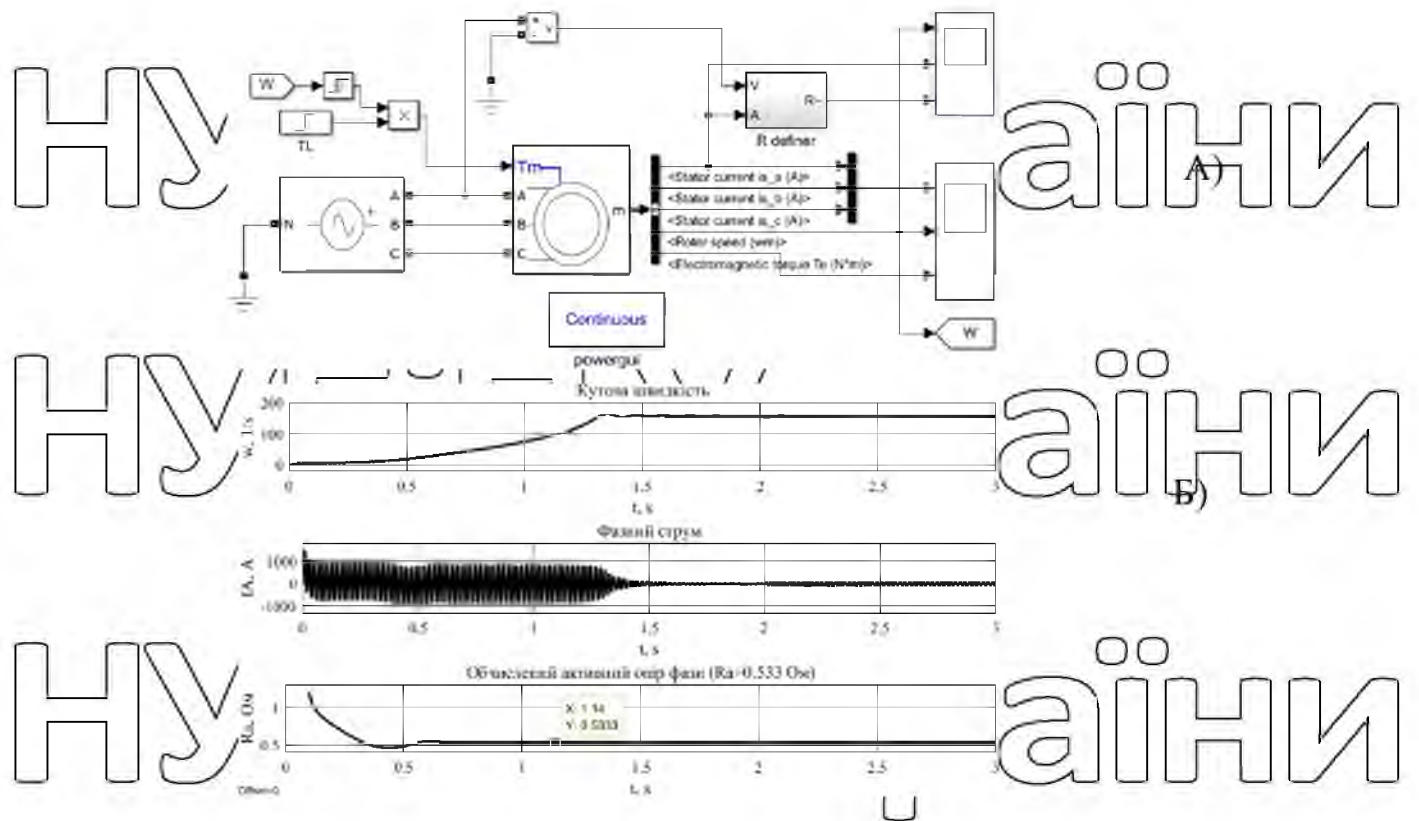


Рисунок 3.13 – Динамічне визначення активного опору статора АД: а - математична модель АД з підсистемою динамічного визначення активного опору; б – часові діаграми обчислення активного опору статора АД

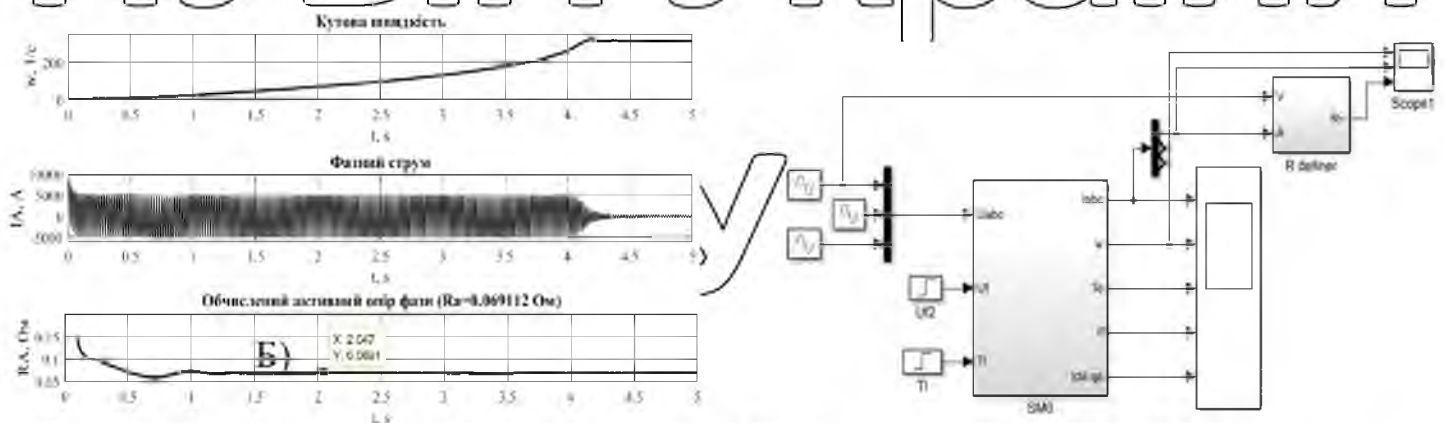


Рисунок 3.14 – Динамічне визначення активного опору статора СД: а - математична модель СД з підсистемою динамічного визначення активного опору; б – часові діаграми обчислення активного опору статора СД

Представлені результати підтверджують ефективність запропонованого методу визначення активного опору статора електродвигунів. Відносна похибка при визначенні активних опорів становить тисячні частки відсотка, що свідчить про високу точність методу.

Експериментальні дослідження на математичних моделях показали, що точність визначення активного опору не залежить від моменту опору на валу двигуна і від моменту інерції електроприводу. Це означає, що метод може бути успішно використаний для визначення активного опору як асинхронних, так і синхронних двигунів.

Пристрій, який реалізує запропонований метод, має переваги, такі як заводосійкість, простота конструкції та алгоритму роботи. Результати також вказують на важливість початкової фази напруги в момент включення та характеру та величини аперіодичної складової пускового струму статора при визначенні постійної складової інтегральної функції напруги та струму

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

## 4 Розділ

### Розробка системи керування та контролю

#### 4.1 Розробка і реалізація систем керування та контролю для електроприводів з асинхронними двигунами

1 Підвищення продуктивності та ефективності: Системи керування дозволяють оптимізувати робочий режим асинхронних двигунів, що призводить до підвищення їхньої продуктивності і ефективності. Змінюючи параметри, такі як швидкість обертання та вихідна потужність, системи керування дозволяють адаптувати привід до різних завдань і робочих умов.

2 Зменшення споживання енергії: Інтелектуальне керування дозволяє оптимізувати споживання електроенергії. Це особливо важливо в умовах зростаючих вимог до економії енергії та зменшення викидів в атмосферу.

3 Підвищення надійності та тривалості служби: Системи керування допомагають у виявленні несправностей та попередженні аварій, що може значно збільшити тривалість служби обладнання і зменшити витрати на ремонт.

4 Підвищення точності та якості процесів: Інтелектуальне керування дозволяє досягти більш високої точності та якості процесів, які залежать від роботи електроприводу. Це може бути важливим для виробництва, де вимагається висока точність та якість виготовленої продукції.

5 Зменшення впливу на навколишнє середовище: Ефективне керування дозволяє зменшити споживання ресурсів і викиди, що позитивно впливає на екологічну сталість та допомагає виконувати вимоги стосовно збереження навколишнього середовища.

6 Гнучкість та адаптабельність: Системи керування дозволяють швидко змінювати параметри і режими роботи, що робить електроприводи більш гнучкими та адаптованими до різних завдань та умов.

Усе це демонструє важливість систем керування та контролю для електроприводів з асинхронними двигунами в сучасній промисловості і ділиться позитивним впливом на продуктивність, якість, ефективність і сталість виробництва.

## 4.2 "Огляд існуючих систем керування"

Має на меті вивчити та оцінити різноманітні системи керування для електроприводів з асинхронними двигунами. В цьому підрозділі слід розглянути різні підходи та технології, які використовуються в сучасних системах керування, і проаналізувати їх переваги та недоліки.

1. В даному розділі проводиться огляд і аналіз наявних систем керування для електроприводів з асинхронними двигунами. Важливість цього огляду полягає в тому, що системи керування мають вирішальне значення для ефективності та продуктивності електроприводів. Правильний вибір системи керування може суттєво покращити робочий процес і зменшити витрати енергії.

2. **Типи систем керування:** Один із ключових аспектів огляду - це аналіз різних типів систем керування, які застосовуються для асинхронних двигунів. Серед найпоширеніших типів можна виділити поле-орієнтований контроль (FOC), простий векторний контроль, контурний регулятор і багато інших.

Поле-орієнтований контроль (FOC), наприклад, дозволяє отримати точний контроль над струмами та напругами двигуна, що робить його ідеальним для додатків, де потрібна велика точність та керування. Простий векторний контроль, з іншого боку, має меншу складність обчислень та вимагає менше ресурсів, але може бути менш точним.



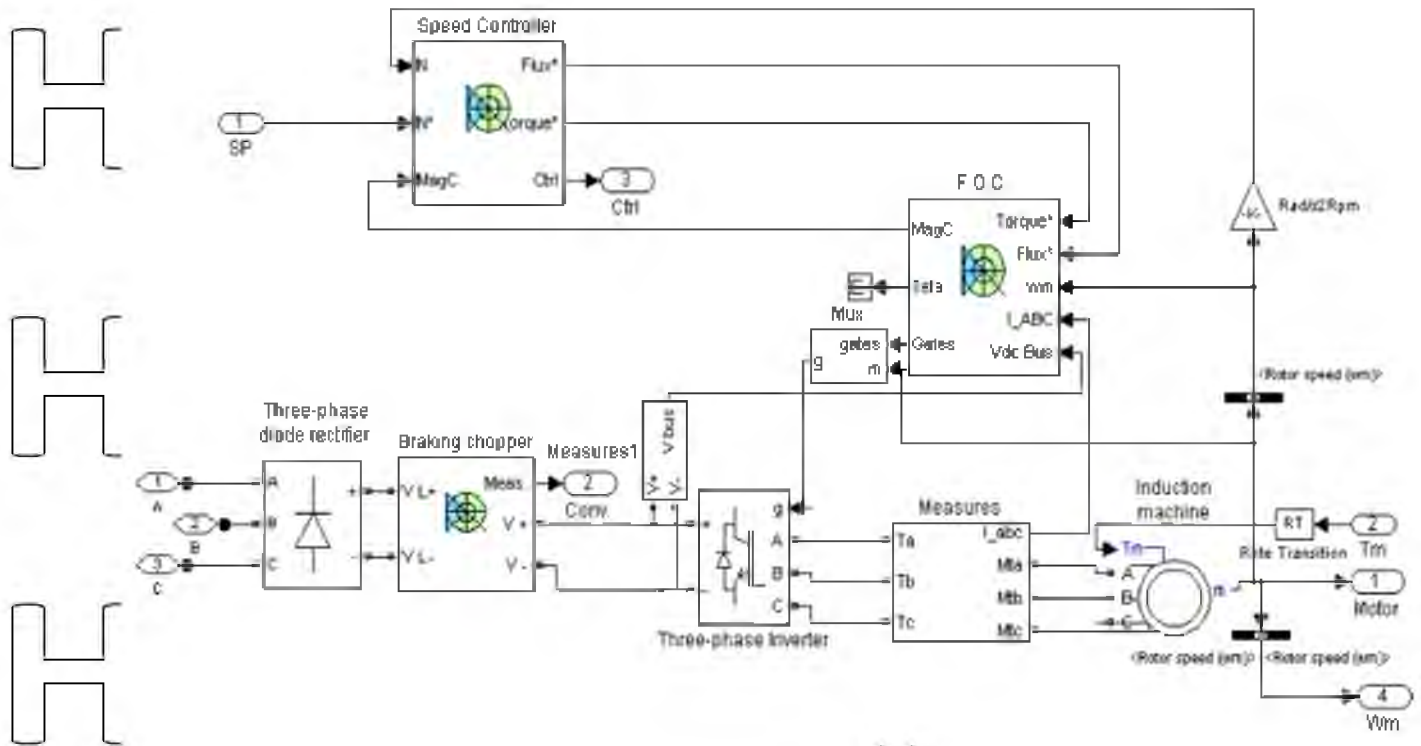


Рисунок – Імітаційна модель системи векторного керування

### 3. Керування дроселями

При дроселюванні мають місце втрати енергії, пов'язані з регулюванням і визначаються величиною дроселювання на регулюючому клапані  $\Delta H_{рд}$ .

Для аналізу режимів і можливостей при регулюванні рециркуляцією частини води з нагнітання на всас насоса, на рисунку 3.2 приведена аналогічна раніше поданій діаграма режимів для такого регулювання при постійному гідрравлічному опорі мережі.

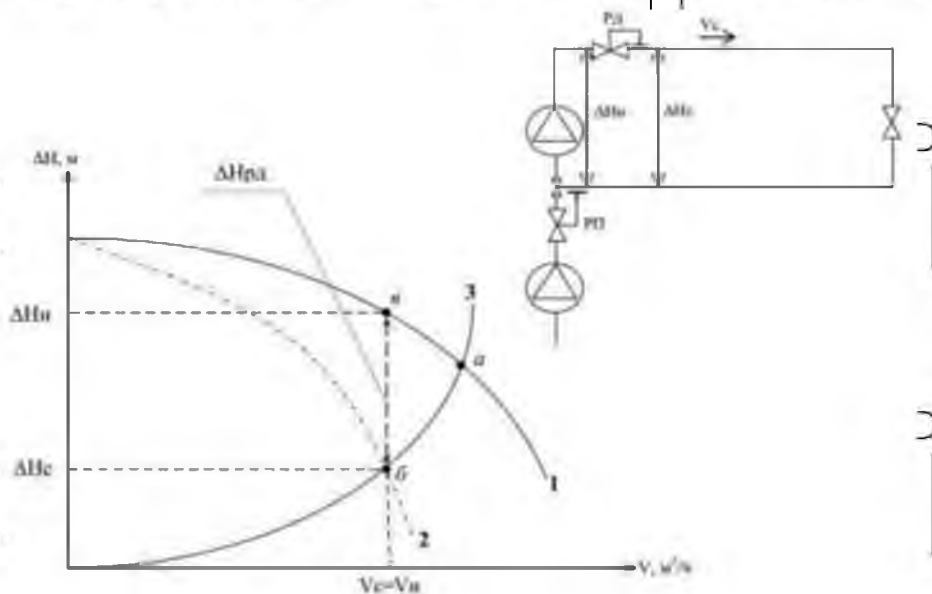


Рисунок - Регулювання дроселюванням

4. **Переваги і недоліки кожного типу керування:** Переваги і недоліки кожного типу системи керування можуть бути визначені докладніше. Наприклад, поле-орієнтований контроль може забезпечити високу точність і продуктивність, але вимагає більше обчислень, що може бути обтяжливим в деяких додатках.

Простий векторний контроль менше вимогливий до ресурсів і обчислень, що робить його популярним для простих застосувань, але менше підходить для додатків, де потрібна висока точність та динаміка керування. Порівняння може бути подане наступним чином:

• **Поле-орієнтований контроль (FOC):**

- *Переваги:* Висока точність, стійкість до завантажень, ефективне управління, точне регулювання струмів та напруг.
- *Недоліки:* Високі обчислювальні витрати, більш складна реалізація, висока вартість обладнання.

• **Простий векторний контроль:**

- *Переваги:* Менше обчислювальних витрат, більш доступна вартість, ідеальний для більшості загальних застосувань.
- *Недоліки:* Менша точність, обмежена функціональність для вищих вимог.

5. **Сучасні розробки і тенденції:** Вище зазначено, що сучасні розробки та тенденції в галузі систем керування для асинхронних двигунів мають суттєвий вплив на подальший розвиток. Опис та аналіз цих тенденцій, таких як використання штучного інтелекту, оптимізація алгоритмів керування та використання сучасних інтерфейсів користувача, може бути подано більш докладно.

6. **Порівняння систем керування:** В розділі порівняння систем керування можна більш докладно дослідити параметри, які є вирішальними для вибору конкретної системи керування для певного додатку. Проведіть порівняння за такими показниками, як точність, ефективність, вартість втрати енергії, складність в реалізац

## 5. Розділ

### 5 Оптимізація робочих параметрів

#### 5.1 Діагностування електродвигунів

Діагностика електроприводів з асинхронними двигунами є важливою складовою в сучасній промисловості, де автоматизація та ефективність грають вирішальну роль у виробничих процесах. Асинхронні двигуни є одними з найбільш поширених типів електродвигунів, які застосовуються в різних галузях, включаючи виробництво, транспорт, побутову техніку та багато інших. Тому важливо мати засоби для діагностики та підтримки їхньої безперебійної роботи.

Однією з ключових задач діагностики асинхронних двигунів є визначення параметрів системи електропривода, яка включає в себе двигун, вибірковий інвертор, передавальні механізми та інші компоненти. Визначення цих параметрів дозволяє забезпечити оптимальне керування приводом та уникнути надмірного навантаження, перегріву або нестабільної роботи системи.

Один з методів визначення параметрів системи електропривода - це вимірювання струмів і напруги, що живлять двигун. Завдяки цим даним можна визначити активну та реактивну потужність, а також коефіцієнт потужності.

Крім того, визначення струмів і напруги дозволяє контролювати споживану потужність та робочий режим системи.

Інший метод - вимірювання обертового моменту, який діє на вихідний вал двигуна. Відомості про обертовий момент дозволяють оцінити механічне навантаження на двигун та вибірковий інвертор. Це важливо для попередження перевантаження системи, що може призвести до пошкодження обладнання.

Аналіз частотної характеристики - це ще один метод визначення параметрів системи. Він включає в себе вимірювання відповіді системи на вхідний сигнал різних частот. З цих даних можна отримати інформацію про час співвідношення, частотну передачу та інші параметри системи.

Окрім цих методів, вібраційний аналіз є важливим інструментом діагностики асинхронних двигунів. Вимірювання вібрацій дозволяє виявити

механічні проблеми, такі як нерівномірний знос підшипників чи дефекти в передавальних механізмах. Регулярний моніторинг вібрації допомагає запобігти важким аваріям та зменшити витрати на обслуговування обладнання.

Усі ці методи діагностики об'єднуються в комплексну систему керування електроприводом з асинхронними двигунами, що дозволяє підтримувати оптимальний режим роботи системи, забезпечуючи її ефективність і безперебійну роботу. Правильна діагностика та підтримка електроприводів є ключовими факторами для забезпечення стабільності та ефективності в Звідки

варто почати розширення нашої розмови про діагностику електроприводів з асинхронними двигунами? Давайте подивимося на різні аспекти і методи діагностики більш докладно.

**1. Вимірювання струмів і напруги:** Вимірювання струмів та напруги є одним з перших і найважливіших кроків при діагностиці електроприводів. Сучасні прилади та датчики дозволяють здійснювати точні вимірювання струмів і напруги в реальному часі. Це надає можливість не лише визначити потужність, коефіцієнт потужності та ефективність роботи двигуна, але також виявити аномалії, такі як перевищення споживаної потужності, незвичайні коливання струмів чи напруги, що можуть свідчити про проблеми в системі.

**2. Вимірювання обертового моменту:** Обертовий момент, який діє на вихідний вал двигуна, є важливим параметром при діагностиці. Вимірюючи цей параметр, можна визначити ефективність роботи двигуна та інвертора. Це особливо корисно при моніторингу процесів, де точність і стабільність обертового моменту мають вирішальне значення, наприклад, у важких промислових виробництвах.

**3. Аналіз частотної характеристики:** Визначення частотної передачі і часу співвідношення це інша важлива частина діагностики системи електроприводу. Цей аналіз дозволяє виявити, як система реагує на зміни частоти вхідного сигналу. Важливо враховувати, що частотна передача може

змінюватися внаслідок різних факторів, таких як старіння компонентів, вплив зовнішніх чинників або помилки в управлінні.

4. **Вібраційний аналіз:** Вібраційний аналіз є важливим методом для виявлення механічних проблем в асинхронних двигунах. Діагностика вібрацій допомагає виявляти підшипникові проблеми, дисбаланс, нестабільність в роботі механічних компонентів та інші механічні аномалії. Вимірювання вібрацій дозволяє розробити плани заміни або регулювання, щоб запобігти серйозним пошкодженням обладнання.

5. **Термографія:** Ще одним корисним методом є термографія. Вимірювання температури різних частин електроприводу дозволяє виявляти перегриви та аномалії у теплорозподілі. Це особливо важливо при роботі з асинхронними двигунами, оскільки перегрів може спричинити важкі пошкодження обладнання.

Діагностика асинхронних двигунів є складним завданням, яке вимагає використання спеціалізованого обладнання та комп'ютерних програм для аналізу та обробки даних. Також, важливо вести системний моніторинг та регулярну попередню діагностику, щоб вчасно виявляти проблеми та уникати великих аварій та зупинок виробничих процесів.

Необхідно пам'ятати, що сучасні методи діагностики не тільки допомагають виявити проблеми, але і сприяють попередженню їх виникнення. Регулярний моніторинг і діагностика є важливою складовою стратегії обслуговування електроприводів з асинхронними виробничих процесів в сучасній промисловості.

## 5.2 Оптимізації робочих параметрів системи електроприводу з

### асинхронними двигунами

У цьому розділі дипломної роботи ми детально розглянемо процес оптимізації робочих параметрів системи електроприводу з використанням асинхронних двигунів. Дослідження та оптимізація робочих параметрів великої системи електроприводу може виявити значний вплив на продуктивність, надійність та ресурсну ефективність промислового обладнання та виробничих процесів. У цьому контексті використання асинхронних двигунів є поширеним і має великий потенціал для оптимізації.

Підбір потужності асинхронного двигуна є одним із важливих кроків у процесі оптимізації системи електроприводу. Вірний вибір потужності має вирішальне значення для забезпечення ефективності та продуктивності. Надмірна потужність може спричинити збільшення споживання енергії та зайві витрати, тоді як недостатня потужність може призвести до незадовільної продуктивності. Визначення оптимальної потужності включає в себе аналіз вимог виробничого процесу, час споживання енергії та інші параметри.

Використання інверторів є ключовим елементом оптимізації системи електроприводу. Інвертори дозволяють змінювати частоту та напругу подачі електроенергії на двигун, що надає можливість точного регулювання швидкості обертання вала. Це допомагає досягнути оптимальних робочих умов та зменшити споживання енергії. Використання інверторів також дозволяє зменшити навантаження на механічні компоненти системи та забезпечити більш ефективний режим роботи.

Постійний моніторинг та діагностика системи є важливим аспектом оптимізації. Збір та аналіз даних в реальному часі дозволяють виявити аномалії та потенційні проблеми в системі. Діагностика допомагає попередити можливі аварії та незаплановані зупинки, що важливо для забезпечення надійності та продуктивності. Для цього використовуються сучасні прилади та системи моніторингу, які дозволяють здійснювати контроль над станом системи електроприводу.

Регулювання робочих режимів системи електроприводу допомагає досягнути оптимальних умов для виробничого процесу. Зміна швидкості

обертання двигуна в залежності від завдання може сприяти підвищенню продуктивності або зменшенню споживання енергії. Оптимізація робочих режимів також включає в себе вибір оптимального керування системою та планування робочих процесів для максимізації ефективності.

Ефективне управління системою електроприводу передбачає використання сучасних методів керування та регуляції. Застосування розумних алгоритмів дозволяє підтримувати стабільну робочу швидкість, зменшує коливання та збільшує точність контролю. Ефективне управління допомагає враховувати змінні навантаження та забезпечує стабільну роботу системи.

Для досягнення оптимальної продуктивності та надійності системи електроприводу важливо розглядати систему охолодження та обслуговування.

Ефективне охолодження асинхронних двигунів допомагає попереджати перегрів, що може спричинити пошкодження обладнання. Заходи з підтримки та обслуговування, такі як заміна мастила, підшипників і інших деталей, також важливі для підтримки тривалості служби системи.

Оптимізація системи електроприводу також включає в себе застосування передових технологій та інновацій. Наприклад, використання системи "інтернету речей" для моніторингу та керування може забезпечити більший рівень автоматизації та оптимізації. Також, розробка та застосування алгоритмів штучного інтелекту для передбачення робочих параметрів системи дозволяє уникнути негативних наслідків та використовувати дані для оптимізації.

Основною метою оптимізації робочих параметрів системи електроприводу є досягнення балансу між високою продуктивністю та зменшенням споживання енергії. Використання асинхронних двигунів із правильно підбраною потужністю, використанням інверторів, та регуляцією робочих режимів допомагає досягнути цього балансу. Це не тільки сприяє підвищенню продуктивності виробничих процесів, але й допомагає зменшити витрати на енергію, що є важливим аспектом з точки зору сталої та відповідальної виробництва.

Оптимізація робочих параметрів системи електроприводу з асинхронними двигунами є важливою складовою для досягнення продуктивності, надійності та енергоефективності виробництва. Застосування правильної потужності, використання інверторів, постійний моніторинг та діагностика, регулювання робочих режимів, ефективне управління та обслуговування - всі ці аспекти дозволяють досягти оптимальної роботи системи електроприводу. Використання передових технологій та інновацій допомагає підтримувати конкурентоспроможність та відповідати вимогам сучасного виробництва.

Баланс між продуктивністю та енергоефективністю є ключовим аспектом оптимізації, оскільки це дозволяє досягти найкращих результатів в сфері промислового виробництва.

Дипломна робота розглядає основні аспекти оптимізації системи електроприводу з асинхронними двигунами, але існують багато напрямків для подальших досліджень та вдосконалення цієї теми. Нижче подані деякі перспективи для майбутніх досліджень:

Застосування інтелектуальних систем керування: Розвиток та впровадження інтелектуальних систем керування, зокрема на базі штучного інтелекту, може допомогти автоматизувати та підвищити рівень точності регулювання системи електроприводу.

Дослідження нових матеріалів і технологій охолодження: Розробка нових матеріалів для виробництва обмоток двигунів та удосконалення систем охолодження може покращити ефективність та надійність системи електроприводу.

Використання відновлюваної енергії: Розробка та впровадження систем для використання відновлюваної енергії, такої як сонячна або вітрова енергія, в системах електроприводу може допомогти зменшити витрати на електроенергію та зменшити вплив на довкілля.

Дослідження в області роботизації та автоматизації виробництва: Оптимізація електроприводу може бути важливою у контексті виробництва робіт та автоматизованих систем, що вимагають точного та ефективного керування.



Дослідження в області акустичної та вібраційної безпеки: Покращення параметрів системи електроприводу також може вплинути на акустичний та вібраційний комфорт виробничого приміщення. Дослідження в цій області може покращити умови праці та забезпечити безпеку працівників.

Розробка програмного забезпечення для оптимізації параметрів: Створення спеціалізованого програмного забезпечення для автоматизованої оптимізації робочих параметрів систем електроприводу може спростити процес оптимізації та зробити його більш ефективним.

Дослідження в області керування декількома двигунами: В деяких виробничих процесах використовуються системи з декількома асинхронними двигунами. Дослідження методів керування та оптимізації цих систем є важливим напрямком для подальших досліджень.

Загалом, подальше дослідження та вдосконалення систем електроприводу з асинхронними двигунами є важливим для вдосконалення виробництва та зменшення впливу на довкілля. Робота в цій області може призвести до розвитку більш ефективних і сталої виробництва, що є актуальним завданням в сучасному промисловому світі.

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

### 5.3 Вплив параметрів, таких як напруга, частота, струм тощо, на роботу двигуна та системи в цілому

Вплив різних параметрів, таких як напруга, частота, струм та інші, на роботу асинхронного двигуна та системи електроприводу в цілому. Розуміння цих впливів має важливе значення для оптимізації та керування системою електроприводу. Вплив цих параметрів може бути значущим для досягнення оптимальних робочих умов та забезпечення ефективної роботи.

Вплив напруги на асинхронний двигун: Напруга, яка подається на асинхронний двигун, є одним із основних параметрів, що впливають на його роботу. Зміна напруги може призвести до різних наслідків для роботи двигуна.

Зменшення напруги може призвести до падіння продуктивності та навантаження на двигун, викликаючи можливі перегріву та проскальзування.

З іншого боку, збільшення напруги може призвести до збільшення швидкості обертання та споживання енергії. Точний баланс напруги є важливим для досягнення оптимальних робочих умов. Напруга також впливає на струм, що проходить через двигун, та, отже, на споживану потужність.

Вплив частоти на асинхронний двигун: Частота подачі електроенергії є ще одним важливим параметром, що впливає на роботу асинхронного двигуна.

Зі збільшенням частоти збільшується швидкість обертання двигуна, а зі зменшенням - зменшується. Це важливо для регулювання швидкості та обертового моменту. Зміна частоти використовується для підтримки оптимальних робочих умов у виробничих процесах. Наприклад, в підйомних кранах змінюють частоту подачі для регулювання швидкості підйому.

Вплив струму на асинхронний двигун: Сила струму, яка проходить через обмотки двигуна, також має важливе значення для його роботи. Завеликий струм може призвести до перегріву обмоток та може бути небезпечним для надійності системи. Точний контроль струму є важливим для забезпечення безпеки та надійності роботи. Збільшення струму може бути необхідним для збільшення обертового моменту двигуна, але важливо уникати перевищення допустимих значень.

Вплив інших параметрів: Окрім напруги, частоти та струму, інші параметри, такі як крутний момент, реактивна потужність та коефіцієнт потужності, також впливають на роботу асинхронного двигуна та системи електроприводу. Крутний момент є важливим для визначення робочого обертового моменту двигуна, що визначає його здатність працювати під навантаженням. Реактивна потужність і коефіцієнт потужності впливають на ефективність споживання електроенергії та можуть бути важливими для виробничих підприємств.

Висновки: Вплив різних параметрів на роботу асинхронного двигуна та системи електроприводу є важливим аспектом при їх оптимізації. Розуміння і керування цими параметрами дозволяє досягнути оптимальних робочих умов, зменшити споживання енергії та забезпечити надійність системи. Подальше дослідження в цій області може призвести до розробки більш ефективних методів керування та оптимізації систем електроприводу з асинхронними двигунами.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Статистичний щорічник України за 2001 рік. Державний комітет статистики України. К.: Техніка, 2002. – 645 с.

2. Тимченко, М. Д., Штогрін, В. М. "Електропривід: Теорія і практика". Київ: Видавничий дім "Перун", 2019.

3. Мельничук, В. І., Шевченко, В. М. "Діагностика та моніторинг обладнання електростанцій: Навчальний посібник". Київ: Наукова думка, 2012.

4. Кондратьєв, І. С., Кучменко, І. М., Ковальчук, В. О. "Методи діагностики та моніторингу технічного стану обладнання електроенергетичних підприємств: Навчальний посібник." Київ: Техніка, 2015.

5. Кондратьєв, І. С., Кучменко, І. М., Ковальчук, В. О. "Методи діагностики та моніторингу технічного стану обладнання електроенергетичних підприємств: Навчальний посібник." Київ: Техніка, 2015.

6. "Обслуговування та ремонт електродвигунів" авторства В. В. Баклана та О. В. Самойленка.

7. "Електропривід: конструкція, технічний стан, діагностика та ремонт" авторства М. І. Лозовського та І. В. Буряка.

8. "Експлуатація і ремонт електродвигунів" авторства В. Г. Бондарчука

Книга присвячена питанням експлуатації та ремонту електродвигунів різних типів.

9. "Електродвигуни: Конструкція, діагностика, обслуговування та ремонт" авторства Г. В. Бойка.

10. "Словник обслуговування та ремонту електродвигунів" авторства В. І. Бушусьва.

11. Швець, О. М., Захарків, О. О., Жежерун, В. М. "Моніторинг технічного стану електроенергетичних систем: Підручник." Київ: Каравела, 2017.

12. Кондратьєв, І. С., Кучменко, І. М., Ковальчук, В. О. "Методи діагностики та моніторингу технічного стану обладнання електроенергетичних підприємств: Навчальний посібник." Київ: Техніка, 2015.

13. Гаврилук, О. М., Міщенко, В. О., Кравцов, О. В. "Моніторинг та діагностика технічного стану об'єктів енергетики". Київ: Фенікс, 2016.

## ВИСНОВОК

Загалом, отримані результати дослідження вказують на важливість розвитку та впровадження нових технологій у сфері моніторингу та діагностики електроприводів. Аналіз стану електромеханічних перетворювачів енергії в системах електроприводів виявив ключові проблеми, що потребують уваги та вдосконалення.

Вимоги до показників моніторингу електромеханічного обладнання були обґрунтовані з урахуванням специфіки систем електроприводу, що дозволяє забезпечити надійність та безпеку їхньої експлуатації. Промислові системи контролю стану асинхронних двигунів допомагають у реальному часі визначати та усувати несправності, підвищуючи оперативність систем.

Розділ про методи діагностики електроприводів з асинхронними двигунами пропонує широкий спектр класифікації та аналізу методів ідентифікації. Це відкриває можливості для вибору оптимального методу.

У третьому розділі досліджено визначення параметрів систем електроприводу з асинхронними двигунами, що важливо для оптимізації роботи та підвищення ефективності. Врахування пускових режимів та визначення еквівалентних параметрів асинхронної машини становлять важливий внесок у розвиток цієї галузі.

Розділ про розробку системи керування та контролю розглядає важливі аспекти, такі як векторне керування, та їхній вплив на ефективність роботи системи. Використання сучасних технологій у цьому контексті може позитивно вплинути на точність та швидкість реакції системи.

У п'ятому розділі обговорено важливість діагностування електродвигунів та оптимізації робочих параметрів системи електроприводу. Аналіз впливу параметрів, таких як напруга, частота та струм, надає детальний уявлення про оптимальні умови експлуатації системи.

Загалом, дипломна робота вирішує актуальні завдання у сфері моніторингу та діагностики електроприводів з асинхронними двигунами, внесок у яку важливий для подальшого розвитку промисловості та підвищення її конкурентоспроможності.