

ДВНЗ «Донецький національний технічний університет»
факультет машинобудування, електроінженерії та хімічних технологій
(повне найменування інституту, назва факультету)

кафедра електричної інженерії
(повна назва кафедри)

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

О.Ю. Колларов
(підпис) (ініціали, прізвище)

“ ” 2021 р.

Дипломна робота

магістра

(освітній ступінь)

на тему Розробка системи діагностики роботи асинхронних двигунів

Виконав: студент 2 курсу, групи ЕЛКМ-20
(шифр групи)

напряму підготовки (спеціальності) 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
(шифр і назва напряму підготовки, спеціальності)

Ізмайлов А.А.

(прізвище та ініціали)

(підпис)

Керівник Колларов О. Ю., зав. каф. ЕлІн, к.т.н, доц.
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

(підпис)

Рецензент:

(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

(підпис)

Нормоконтроль:

Любименко О. М.

(підпис)

(дата)

Засвідчую, що у цій випускній кваліфікаційній роботі немає запозичень з праць інших авторів без відповідних посилань.

Студент

(підпис)

(дата)

Покровськ – 2021 р.

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ ВИЩИЙ НАВЧАЛЬНИЙ ЗАКЛАД
«ДОНЕЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ»

Факультет машинобудування, електроінженерії та хімічних технологій

Кафедра електричної інженерії

Освітній ступінь: магістр

Спеціальність: (141) електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Завідувач кафедри

_____ (Колларов О. Ю.)

« ____ » _____ 2021 р.

ЗАВДАННЯ

НА ДИПЛОМНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Ізмайлову Андрію Андрійовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: Розробка системи діагностики роботи асинхронних
двигунів

керівник роботи Колларов О. Ю., зав. каф. ЕлІн, к.т.н, доц.

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

затверджені наказом вищого навчального закладу від _____ №

2. Строк подання студентом роботи 12 грудня 2021 року

3. Вихідні дані до роботи: Напруга живлення (U_n) 660 В,

частота напруги живлення (f) 50 Гц, номінальна потужність на валу

двигуна ($P_{ном}$) 18 кВт, Параметри асинхронного двигуна: число фаз (m) 3,

синхронна частота обертання (n_c) 1500 об./хв., висота осі обертання (h) 160

мм, ККД (η) 0,88, коефіцієнт потужності двигуна ($\cos \varphi$) 0,88, ступінь

захисту – IP44, обмотковий коефіцієнт ($k_{об}$) 0,95, щільність струму в

обмотці статора (J_1) $3 \cdot 10^6$ А/м², щільність струму в стрижнях ротора (J_2)

$7 \cdot 10^6$ А/м², допустима індукція в зубцях ротора (B_{z2}) 1,6 Тл.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) 1. Огляд загальних відомостей про асинхронні двигуни.

2. Огляд несправностей асинхронних двигунів та джерел їх виникнення.

3. Розрахунок параметрів роботи асинхронного двигуна.

4. Створення комплексу для моніторингу стану асинхронного двигуна шляхом моделювання його роботи.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень, якщо передбачається)

Одинадцять слайдів презентаційного матеріалу

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Охорона праці	Колларов О. Ю.		
Розділи 1, 2	Колларов О. Ю.		
Нормоконтроль	Любименко О. М.		

7. Дата видачі завдання 15 лютого 2021 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1.	Огляд загальних відомостей про асинхронні двигуни.	04.10.2021 – 13.10.2021	
2.	Огляд типів несправностей асинхронних двигунів.	14.10.2021 – 23.10.2021	
3.	Огляд джерел виникнення несправностей асинхронних двигунів.	24.10.2021 – 02.11.2021	
4.	Розрахунок параметрів роботи асинхронного двигуна.	03.11.2021 – 12.11.2021	
5.	Визначення методів та складання алгоритму виявлення несправностей.	13.11.2021 – 22.11.2021	
6.	Створення комплексу для моніторингу стану асинхронного двигуна шляхом моделювання його роботи.	23.11.2021 – 02.12.2021	
7.	Огляд питань охорони праці	03.12.2021 – 12.12.2021	

Студент

Ізмайлов А.А.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник роботи

Колларов О. Ю.
(підпис) (прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

Ізмайлов А.А. Розробка системи діагностики роботи асинхронних двигунів / Випускна кваліфікаційна робота на здобуття освітнього рівня «магістр» за спеціальністю 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка. – ДВНЗ ДонНТУ, Покровськ, 2021.

Дипломна робота складається зі вступу, основної частини, яка включає чотири розділи, висновків, списку використаної літератури та додатків.

У першому розділі здійснено огляд загальних відомостей про асинхронні двигуни.

У другому розділі було виконано огляд типів несправностей асинхронних двигунів, джерел їх виникнення та обґрунтування необхідності здійснення моніторингу стану асинхронних двигунів.

У третьому розділі здійснено розрахунок параметрів роботи асинхронного двигуна.

У четвертому розділі були визначені методи та складено алгоритм виявлення несправностей асинхронного двигуна, складено математичну та комп'ютерну модель трифазного асинхронного двигуна, здійснено компонування комплексу для моніторингу його стану.

Ключові слова: асинхронний двигун, несправність, моніторинг, алгоритм, параметр роботи, математична модель, моделювання

SUMMARY

Izmailov A. Development of a system for diagnosing the operation of induction motors / Graduation qualifying work for obtaining an educational level «master» in specialty 141 Electricity, electrical engineering and electromechanics. – DVNZ DonNTU, Pokrovsk, 2021.

Thesis consists of an introduction, the main part, which includes four chapters, conclusions, list of references and appendices.

The first section provides an overview of general information about induction motors.

In the second section we reviewed the types of malfunctions of induction motors, describe their occurrence and justify the need to monitor the condition of induction motors.

In the third section the calculation of parameters of operation of the induction motor is carried out.

The fourth section defines the methods and algorithm for detecting malfunctions of an induction motor, compiles a mathematical and computer model of a three-phase induction motor, and assembles a complex to monitor its condition.

Keywords: asynchronous motor, fault, monitoring, algorithm, operating parameter, mathematical model, modeling

ЗМІСТ

	стор.
ВСТУП	7
1 ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО АСИНХРОННІ ДВИГУНИ	9
2 ОГЛЯД НЕСПРАВНОСТЕЙ АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ ТА ДЖЕРЕЛ ЇХ ВИНИКНЕННЯ	15
2.1 Огляд типів несправностей асинхронних двигунів	15
2.2 Обґрунтування необхідності здійснення моніторингу стану асинхронних двигунів	30
3 РОЗРАХУНОК АСИНХРОННОГО ДВИГУНА	33
3.1 Розрахунок статора	33
3.2 Розрахунок ротора	38
4 МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА	44
4.1 Визначення методів та складання алгоритму виявлення несправностей	44
4.2 Складання математичної моделі трифазного асинхронного двигуна	49
4.3 Складання комп'ютерної моделі трифазного асинхронного двигуна	55
4.4 Створення комплексу для моніторингу стану асинхронного двигуна	66
ВИСНОВКИ	70
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	71
ДОДАТОК А. ГРАФІЧНА ЧАСТИНА	74
ДОДАТОК Б. ОГЛЯД УМОВ ЕКСПЛУАТАЦІЇ АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ (ВИТЯГ)	87
ДОДАТОК В. ПЕРЕЛІК ЗАУВАЖЕНЬ НОРМОКОНТРОЛЕРА	96

ВСТУП

Для електроприводів технологічних підприємств дуже важливим є швидке та надійне визначення несправностей. Адекватні процедури виявлення несправностей дозволяють здійснити цей процес на початковій стадії для вжиття відповідних коригуючих заходів до виникнення аварійних ситуацій. Це стає особливо-важливим для електричних приводів з високими вимогами до безпеки та надійності.

Не дивлячись на те, що асинхронні двигуни досить прості за конструкцією, у них виникають характерні та специфічні несправності впродовж усього терміну його служби. Серед характерних несправностей можна виділити ушкодження статорних обмоток, стрижнів ротора та вихід з ладу підшипників.

Іноді досить важко завчасно виявити несправність, після її виникнення – ідентифікувати, а після аварійної ситуації – визначити причину її виникнення.

На поверхні знаходяться ті можливі несправності, що обумовлені режимом роботи двигунів – часті пуски та зупинки, перевантаження двигуна, термічні впливи та інше.

Для діагностики та моніторингу стану двигуна існує досить широке коло методів, більшість яких побудована на аналізі величини та спектру струму статора, вібраційний та шумовий аналіз, коливання частоти обертання та величини електромагнітного моменту. Перевагами даних методик є простота здійснення та досить просте застосоване обладнання.

У більшості випадків, у разі роботи двигуна під номінальним навантаженням за відсутності сторонніх коливальних процесів механічних параметрів несправності можуть бути лише наслідком фізичного старіння окремих елементів двигуна. Для запобігання таким явищам, необхідно дотримуватися вимог технічного обслуговування.

Мета роботи – здійснити розробку системи діагностування стану асинхронних двигунів з використанням сучасних підходів.

Завдання роботи:

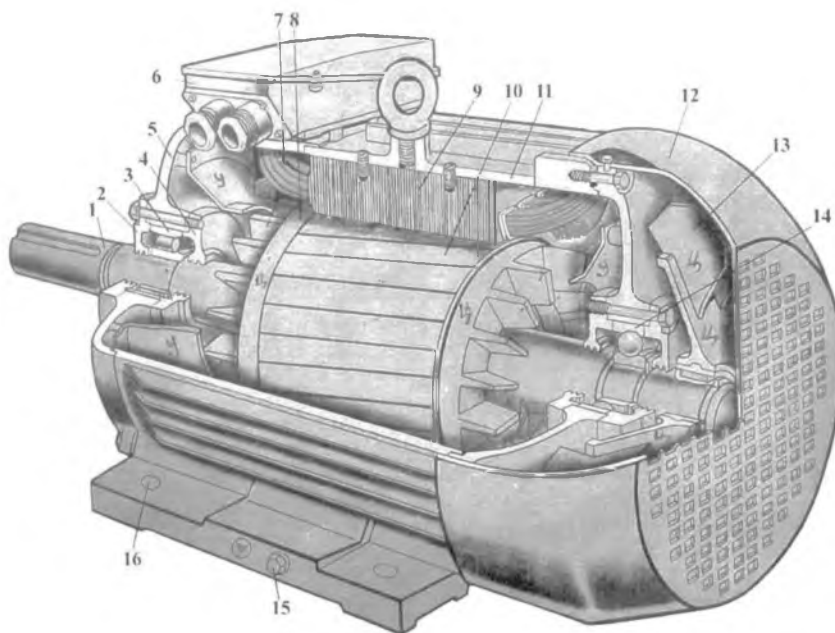
- здійснити огляд загальних відомостей про асинхронні двигуни,
- здійснити огляд типів несправностей асинхронних двигунів,
- визначити джерела виникнення несправностей асинхронних двигунів,
- розрахувати параметри роботи асинхронного двигуна,
- скласти алгоритми виявлення несправностей,
- створити комплекс для моніторингу стану асинхронного двигуна шляхом моделювання його роботи.

Об’єкт досліджень – електромеханічні процеси у асинхронних двигунах.

Предмет досліджень – параметри роботи асинхронного двигуна.

1 ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО АСИНХРОННІ ДВИГУНИ

Головними компонентами асинхронних двигунів є статор і ротор. Статор – це нерухома частина, а ротор – рухома, що обертається з визначеною частотою (рис. 1.1) [1].



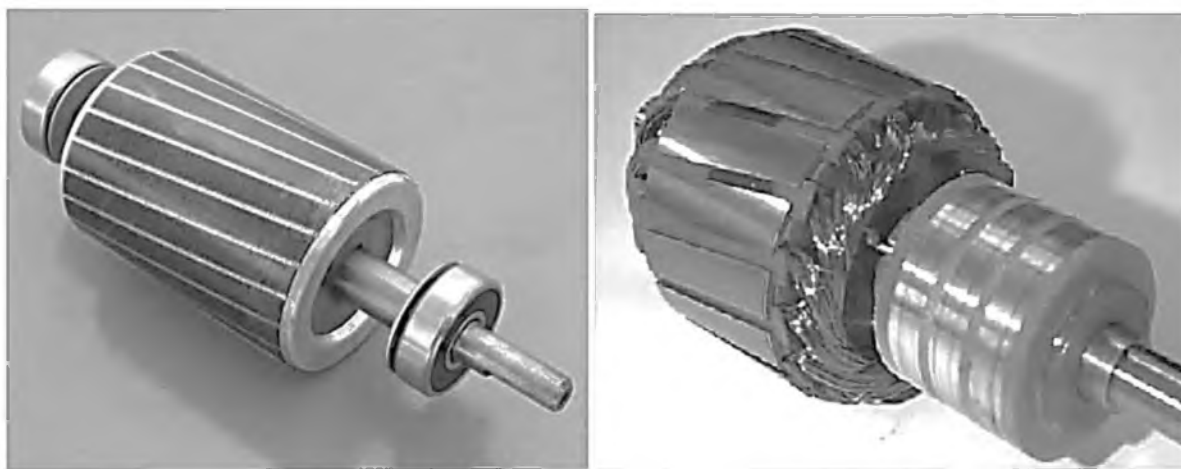
1 – вал, 2 – зовнішня кришка підшипника, 3 – роликовий підшипник, 4 – внутрішня кришка підшипника, 5 – підшипниковий щит, 6 – клемна коробка, 7 – обмотка статора, 8 – обмотка ротора, 9 - статор, 10 – ротор, 11 – корпус двигуна, 12 – кожух вентилятора, 13 – вентилятор, 14 – кульковий підшипник, 15 – болт заземлення, 16 – кріпильні отвори

Рисунок 1.1 – Трифазний асинхронний двигун

Корпус виготовляють литим з алюмінієвого сплаву або чавуна шляхом утворення просторової рами. У середині рами формується конструкція – статор, яка складається з набору штампованих пластин з електротехнічної сталі, у отвори яких укладаються обмотки мідних провідників. Така конструкція дозволяє зменшити втрати на продукування та рух вихрових струмів і теплові втрати. Мідні провідники загалом

утворюють три фазні обмотки, що можуть бути різним чином під'єднані до живлячої мережі – у «трикутник» або «зірку». Ротор являє собою циліндричну конструкцію, яка виконана у вигляді короткозамкнених обмоток («біляча клітка») або виконі з набору листової електротехнічної сталі з прокладеними обмотками мідного провідника. Між статором і ротором існує радіальний повітряний зазор, у якому «циркулює» магнітне поле, що було створене у статорі під дією змінності протікання струму в його обмотках. Магнітне поле, що циркулює у повітряному зазорі, відповідає за продукування напруги і струму в обмотці ротора [1].

Ротор «біляча клітка» виготовляється шляхом лиття з алюмінію, латуні або міді у прес-форми. Ротори з мідною обмоткою мають більші значення ККД, забезпечують більші можливості керування, підвищену щільність струму у обмотках та кращу тепловіддачу [1].



а)

б)

Рисунок 1.2 – Типи роторів асинхронних двигунів: а) короткозамкнений, б) фазний

При живленні обмотки статора трифазним струмом, створюється магнітне поле, що обертається з синхронною частотою прямо-пропорційною частоті напруги живлення та зворотно-пропорційне числу пар полюсів асинхронного двигуна [1].

Магнітне поле, що обертається перетинає стрижні чи обмотку ротора та індукуює в них ЕРС. Напрямок ЕРС визначається за «правилом правої руки» при обертанні магнітного потоку за годинниковою стрілкою. Під дією індукованої ЕРС у обмотці ротора протікають струми, які по фазі співпадають з ЕРС [1].

На обмотку ротора зі струмом, що розташована у магнітному полі, діють електромагнітні сили, напрямки яких визначаються по «правилу лівої руки». Сумарне зусилля створює електромагнітний момент, що примушує ротор обертатися слідом за магнітним полем. Частота обертання ротора, що встановилася, відповідає рівності електромагнітного та гальмівного моменту. Відносна різниця частот обертання магнітного поля і ротора називають ковзанням [1].

Електромагнітні властивості роботи асинхронних двигунів дозволяють здійснювати їхнє дослідження за допомогою створення схем заміщення. Дані схеми поєднують обмотки статора і ротора у єдину електричну схему, а поєднуючим параметром виступає потокозчеплення – розрахунковий реактивний опір, що характеризує магнітний зв'язок між статорною та роторною обмотками. Шляхом дослідження даної схеми відомими прийомами електротехніки, можна визначити струми, втрати потужності та падіння напруги в обмотках асинхронної машини, будувати робочі та пускові характеристики двигуна та інше [1].

Асинхронним короткозамкненим двигунам при їх застосуванні у нерегульованому електроприводі властиві такі недоліки [1]:

- відсутність можливості регулювання кутової швидкості,
- квадратична залежність моменту двигуна від напруги мережі, що значно погіршує його роботу при наявності довгих кабельних ліній,
- продукування реактивної потужності, що знижує коефіцієнт потужності мережі,
- великі пускові струми при малих пускових моментах.

Через те, що парк асинхронних двигунів на будь-якому технологічному підприємстві є багаточисельним, передчасне виявлення та попередження їхніх несправностей є досить важливим. Несправності двигунів можуть бути пов'язані з помилками при проектуванні, виготовленні, монтажі, перенавантаженнях та недостатньому об'ємі технічного обслуговування. Основними місцями виникнення несправностей асинхронних двигунів є статор, ротор та підшипникові вузли. Несправності короткозамкнених обмоток ротора через відсутність прямого електричного зв'язку між ними і статором є найскладнішими для виявлення.

Асинхронні двигуни з короткозамкненим ротором є досить надійними машинами та набули широкого використання у промисловості через їхню конструкційну міцність, компактність та невибагливість у порівнянні з іншими електричними двигунами. Однак, як і будь-який електромеханічний пристрій, асинхронні двигуни є досить чутливими до різноманітних несправностей. Аналіз можливих несправностей є досить важливою процедурою при здійсненні моніторингу стану асинхронних двигунів. Цей аналіз може слугувати виробкою керуючих вказівок, що безпосередньо впливають на роботу двигуна у разі виникнення небажаних ситуацій. Здійснення передчасної або своєчасної діагностики допомагає запобігти розвитку небажаних ситуацій, які можуть стати критичними для окремих конструктивних елементів двигуна [2].

Існує три основних напрямки для попередження несправностей асинхронних двигунів [3]:

- планове технічне обслуговування, яке передбачає технічне обслуговування двигуна на основі рекомендацій виробника, здійснюється згідно визначених термінів у відповідності до кількості робочих годин машини. Цей метод, хоча і є найрозповсюдженішим, не дозволяє у повній мірі захистити двигун від аварійних ситуацій,

– наробка на відмову, яка передбачає виробку двигуна до межі працездатності, і тільки після цього – на видачу його на обслуговування. Ця метода передбачає обов'язкову наявність резервування, що іноді виявляється досить дорогим або неможливим заходом,

– технічне обслуговування за поточним станом, яке передбачає здійснення постійного моніторингу роботи двигуна для виявлення будь-яких відхилень, що виникають під час його роботи. Ця методика є найбільш прогресивною і перспективною для впровадження, але вимагає створення відповідних до роботи двигуна систем моніторингу, аналізу та сигналізації з установкою контролюючих та реєструючих пристроїв. Дана метода, у більшості випадків, здатна виявити розвиток несправності та запобігти аварійних ситуацій, серйозних ушкоджень електричних машин та зменшити простоювання технологічного обладнання або технологічного процесу.

Моніторинг у режимі реального часу визначає «унікальний», характерний стан, що дає знання про поточний стан досліджуваної системи. Несправність, що не була помічена на ранній стадії розвитку здатна призвести до раптової зупинки з наступними наслідками від простоювання та ремонту. У основі моніторингу можуть бути принципи визначення параметричних або непараметричних характеристик з використанням статистичних прийомів.

Непараметричні методи оцінки стану обладнання мають низьку точність оцінки стану і полягає у дотриманні певної процедури: спочатку здійснюється кореляційна оцінка стану з наступним оціночним судженням.

Прикладом параметричного методу може бути визначення значення сили струму двигуна для виявлення потенційної несправності. Причому хвилі струму контролюються не лише на основній частоті, а і на гармонійних частотах, які з'являються при роботі двигуна під навантаженням. Останнє твердження говорить про можливість використання даного методу лише при роботі двигуна під навантаженням,

що може бути досить небезпечним при наявності несправності. При дисбалансі напруги по окремим статорним обмоткам можна отримати широкий спектр, який можна аналізувати, і який можна порівнювати зі спектрами, що характеризують несправності. Але дані спектри дуже схожі на спектри, що характерні для комутаційних станів, що не дозволяє його використовувати досить широко [3].

Для полегшення пошуку, визначення та ідентифікації несправностей асинхронних двигунів на допомогу можуть прийти математичні та комп'ютерні моделі, для створення яких використовуються загальні теорії та програмне забезпечення. У якості контрольованих параметрів цих моделей можуть виступати: статорний і роторний струми, величина електромагнітного крутного моменту і частота обертання валу. Визначені параметри використовується в алгоритмах обробки сигналів для пошуку і виявлення несправності.

2 ОГЛЯД НЕСПРАВНОСТЕЙ АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ ТА ДЖЕРЕЛ ЇХ ВИНИКНЕННЯ

2.1 Огляд типів несправностей асинхронних двигунів

Розвиток засобів обчислювальної техніки з можливістю зберігання великої кількості даних на тривалий час, дозволяє створювати різноманітні досить точні моделі технічних об'єктів з урахуванням їхнього призначення. Більш того, існує можливість створення та широкого використання шаблонів загальних агрегатів, властивості яких добре вивчені та мають характерні узагальнюючі властивості. Отримані під час численних досліджень дані можуть бути збережені та є доступними для здійснення аналізу нових даних шляхом їхнього порівняння з одночасним виокремленням найбільш придатних та «цінних» з інформаційної точки зору [4].

Розробка методів розпізнавання та класифікації несправностей асинхронних двигунів є досить важливим питанням для промисловості через те, що виникнення несправності може призвести до зупинки виробничого процесу, кошовного ремонту двигуна та під'єднаної периферії, непродуктивного простоювання та іншого.

Запобігання несправностей дозволяє уникнути недопустимого перегріву, надлишкових вібрацій, збільшення значень струм та напруги і їхній дисбаланс, коливання чи «скидання» крутного моменту, «перекидання» двигуна, зниження ККД на іншого.

Через підвищення вимог до надійності електричних машини зростає попит з боку «експлуатаційників» на доступні та недорогі методи моніторингу та прогностного забезпечення для раннього виявлення несправностей та порушень у роботі асинхронних двигунів.

Несправності, що виникають, можуть бути результатом зміни фізичного стану окремих компонентів, що не є випадковими чи

непередбачуваними, а є природно закономірними. Це дає певні надії на раннє виявлення таких несправностей шляхом застосування методів статистичного аналізу та контролю різних візуальних та акустичних проявів при роботі двигунів [4].

Несправності асинхронного двигуна можна розділити на «внутрішні» та «зовнішні» характерні для «механічних» або «електричних» елементів.

Внутрішні несправності можуть мати і механічне, і електричне походження, та зароджуються на стадії виготовлення та/або в результаті експлуатаційного пошкодження. Зовнішні несправності викликаються під впливом навколишнього середовища, з боку навантаження та неадекватністю поведінки джерела живлення.

Електричні несправності у обмотках статора і ротора викликають зниження значення величини магнітного потоку та електромагнітного моменту, спотворення та зміну амплітуди струмів у зазначених елементах.

Механічні несправності полягають у виникненні ексцентриситету та асиметрії елементів, що обертаються, вібрації та дисбалансі частин, що мають масу та іншому.

Вплив навколишнього середовища на виникнення несправностей полягає у підвищених показниках вологості, температури, запиленості та забруднення.

Досить позитивним фактом є те, що збір даних для виявлення і класифікації несправностей двигуна може здійснюватися, у більшості випадків, без переривання виробничого процесу, а їхня реалізація є досить легкою і доступною.

Для реалізації методів діагностики несправностей асинхронних двигунів необхідною є розробка системи класифікації несправностей з визначенням ступеня важливості по відношенню до несправності. Для впровадження даного підходу необхідно виробити певні правила та встановити критичні залежності між вхідними та вихідними даними кожного елемента, що досліджується. Вимогою до цих правил є

дотримання фізичних законів та можливість їх дослідження, обробки та транспорції, мають бути доступними з технічної та ідеологічної точки зору [5].

Для пошуку та класифікації несправностей асинхронних двигунів використовують так звані «дерева рішень» з «алгоритмами пошуку».

Дерева рішень розкривають структуру взаємозв'язків окремих елементів, забезпечуючи збирання інформації для побудови алгоритмів з набору стандартних блоків. Це дозволяє зрозуміти «фізику процесу», побачити та зрозуміти вплив окремих компонентів один на одного та здійснити порівняння отриманих параметрів з існуючим набором даних [5].

При роботі асинхронного двигуна є беззаперечний зв'язок між вхідними та вихідними параметрами, який дозволяє схарактеризувати нормальну або передаварійну поведінку системи та «озвучити» результат цього порівняння для можливості прийняття відповідних керуючих рішень. Для збиранні зазначених даних можуть бути використані різноманітні датчики та засоби вимірювання.

При визначенні наявності несправностей двигуна перевагу слід віддавати універсальним методам, що здатні здійснити його діагностування на базі відомих та широковикористовуваних теоретичних методів та технічних засобів. Кожен з цих підходів, безумовно, має свої особливості та межі використання, які можуть бути розширені за допомогою використання сучасних інтелектуальних систем, що значно підвищує ефективність здійснення діагностики несправностей. Перевага використання інтелектуальних систем полягає у можливості здійснення, так званого «неруйнівного контролю» елементів двигунів та часто без необхідності переривання їх роботи під навантаженням. Значну допомогу для виявлення несправностей надають візуальні огляди двигунів – працездатних і після аварій [6].

У останній час для пошуку невідповідності роботи двигунів заданим параметрам, що свідчить про можливу несправність, дослідники усе частіше стали використовувати для будови дерева рішень та відповідних алгоритмів фазі-логіки та штучні нейронні мережі. Дані методи дозволяють здійснювати доволі точні прогнози та задовільні результати при передбаченні виникнення несправності. Варто зазначити, що при цьому можна застосувати методи самонавчання, що дозволяє використати меншу кількість операції для розрахунку та скоротити час обчислень і виробки висновків.

Зазначені прогресивні методи вимагають також попереднього створення математичної моделі, для будови якої доцільно розділити досліджуваний об'єкт на окремі елементи, для яких можна виокремити визначений набір даних відповідно до їх характеристик.

Згідно статистичних даних у контексті розпізнавання та класифікації несправностей асинхронних двигунів можна побачити наступний розподіл [6]:

- 36% – несправності статора,
- 14% – несправності ротора,
- 40% – несправності підшипникових вузлів,
- 10% – інші.

Статор асинхронного двигуна складається з окремих сталевих штампованих елементів, у яких наводиться магнітний потік, що утворюється при русі струму по електричним обмоткам. Ізольовані електричні обмотки – по одній для кожної фази – встановлені одна відносно одної на кут у 120° , завдяки чому навколо ротора двигуна створюється магнітне поле, що обертається.

Ротор є частиною двигуна, що обертається, а розташований він суворо співвісно зі статором. Ротор також виконаний з набору тонких сталевих пластин, ізольованих одна від одної. У пази, що утворені у пластинах, вкладаються провідники, тип і матеріал яких залежить від типу ротора. У

короткозамкнених роторах обмотка являє собою алюмінієві стрижні, з'єднаних по обидва кінці кільцями для створення замкнутого електричного ланцюга. У роторі з контактними кільцями обмотки виконуються з мідного проводу та не замикаються між собою, а виводяться кінцями на контактні кільця, напресовані на валу [7].

Для закріплення ротора у асинхронному двигуні передбачено два торцевих фланці, у яких облаштовуються підшипникові вузли, призначення яких полягає у підтриманні вала, що обертається, за умови найменших механічних витрат. Сам вал інтегрується у ротор і виготовляється зі сталі – його функція полягає у передачі згенерованого крутного моменту до під'єданого навантаження [7].

Для охолодження двигуна передбачають застосування вентилятора, насадженого на вал у протилежному від передачі крутного моменту кінці двигуна. Під час роботи відбувається примусове повітряне охолодження усіх частин двигуна.

Для під'єднання провідників живлення передбачена розподільна коробка, що встановлюється або зверху або збоку корпусу двигуна для легкої доступності до електричних з'єднань.

При подачі на обмотки статора асинхронного двигуна живлення від з трифазного джерела, з'являється магнітне поле, що рівномірно обертається, і приводячи у рух ротор. При цьому у обмотці ротора індукується електрорушійна сила (ЕРС), яка продукує магнітне поле, що обертається вслід за ротором і намагається протистояти зовнішньому магнітному полю від статора [7].

При даному положенні речей відбувається перетворення електричної енергії у механічну, що супроводжується втратами енергії, які можна класифікувати за наступними ознаками (у дужках – відсоток від загальних витрат) [7]:

- електричні втрати у статорі (до 40 %),
- електричні втрати у роторі (до 25 %),

- втрати на перемагнічування та у повітряному зазорі (15–25 %),
- втрати на блукаючі струми (до 20 %).
- механічне тертя (до 15 %),

При номінальному навантаженні загальний ККД сучасних двигунів може доходити до 98%.

Не дивлячись на простоту конструкції асинхронних двигунів, а отже і високою експлуатаційною надійністю, у них можливе виникнення різноманітних несправностей.

Статистичні дані по експлуатації асинхронних двигунів говорить про те, що найбільш вразливими частинами двигуна є підшипники, обмотки статора, короткозамкнені обмотки ротора і вал. Рідше зустрічаються несправності, викликані нерівномірністю або відсутністю повітряного зазору між ротором і статором.

У загальному випадку, несправності асинхронних двигунів можна класифікувати за наступними ознаками [6]:

- несправності електричні – характеризуються дисбалансом напруг або струмів окремих фаз, короткими замиканнями, обривами та інші,
- несправності механічні – характеризуються змінами у роботі ротора, зміщенням масового балансу, появою ексцентриситету, ушкодженням підшипникових вузлів та інші,
- несправності з боку навантаження – характеризуються відхиленням частоти обертання від номінального значення через перевантаження з боку технологічного агрегату,
- несправності загальні – характеризуються критичним підвищенням температури, іржавінням, заклинюванням, появою вібрацій з різних причин.

Необхідно пам'ятати, що перераховані несправності можуть виникати одночасно або одна може бути наслідком іншої, що ускладнює їх визначення та класифікацію. Несправності асинхронного двигуна можуть стати причиною виникнення несиметричних струмів і напруг, коливання

крутного моменту, зниження ККД, перегріву та вібрації. Ще одним проявом несправностей може стати продукування гармонійних складових струмів і напруг, що негативно впливають як на саму електричну машину, так і на споживачі, що підключено до спільної з двигуном мережі.

Згідно статистики, останнім часом найбільшого числа ушкоджень зазнають стрижні роторів асинхронних двигунів, виконані за принципом «білячої клітини». Ушкодження стрижнів проявляється у появі тріщин або повному порушенні електричного ланцюга. Причиною таких ушкоджень можуть бути [6]:

- виробничі дефекти,
- помилки при збиранні,
- неоднорідність металу,
- наявність попередніх напружень,
- вплив значних відцентрових сил.

Ушкоджені стрижні ротора викликають асиметричний розподіл роторних струмів – при виході з ладу одного зі стрижнів, у інших стрижнях сила струму збільшується, що може викликати вже їхнє ушкодження, і це може розвиватися лавиноподібно, аж до повного виходу з ладу усіх стрижнів.

Геометрично тріщини можуть з'явитися будь де – у стрижнях, у кільцях, у місцях з'єднання стрижнів і кілець. Особливістю цього процесу є його швидший розвиток при частих пусках та зупинках та при тривалій роботі двигуна під максимальним навантаженням.

Тріщини або поломки стрижнів продукують виробку гармонійних частот від основної частоти струму, які можна розрахувати за формулою [8]:

$$f_{\text{гарм.стр.}} = f \cdot (1 \pm 2ks) \quad (2.1)$$

де f – частота живлячої напруги, Гц,

s – ковзання асинхронного двигуна,

k – ціле натуральне число.

Поява і значення даних частот може бути використана у якості показника несправності стрижня короткозамкненого ротора.

У працездатному двигуні за відсутності ушкоджень стрижнів ротора, маємо співвісність ротора і статором, яка знаходиться на геометричній осі, що співпадає з віссю центру мас. Ексцентриситет відсутній і зазор між статором і ротором рівномірний. Поява ексцентриситету може свідчити про несправність двигуна, які є можуть бути наслідком порушення балансу ротора, викривленням ротора та інших причин т. д. У критичних значеннях ексцентриситету ротор може дотикатися до статора, що викликає їхнє пошкодження. Наявність ексцентриситету можна ідентифікувати завдяки підвищеним параметрам шуму та вібрації [8].

Масовий дисбаланс ротора виникає у більшості випадків через дефекти, що були допущені при виробництві елементів двигуна, що обертаються, зокрема роторів. Зазначені дефекти можуть не проявлятися тривалий час, а виявити їх заздалегідь іноді досить важко. Їх прояв може спостерігатися під час роботи двигуна на максимально-допустимому навантаженні досить тривалий час. Це може викликати появу ексцентриситету ротора, через появу незбалансованих електромагнітних сил. Вирізняють статичний та динамічний масовий дисбаланс [8].

Статичний дисбаланс проявляється у більшому ступені у момент пуску та при холостому ході, а динамічний – при роботі двигуна під навантаженням. При дисбалансі можна спостерігати коливання ширини повітряного зазору, що призводить до коливання щільності магнітного потоку, а отже – коливання величини струму в обмотках ротора.

Частоту гармонік щільності магнітного потоку у повітряному зазорі можна визначити за залежністю [8]:

$$f_{\text{гарм.}} = f \cdot \left[\frac{k(1-s)}{p} \right] + 1 \quad (2.2)$$

Підшипникові вузли, що розміщені по обом кінцям ротора асинхронного двигуна, покликані для підтримки валу, при дотриманні умови забезпечення меншого значення сили тертя.

У якості підшипників у асинхронних двигунах найчастіше використовують кулькові підшипники. Конструктивно кульковий підшипник складається з внутрішнього та зовнішнього кілець, у яких особливої уваги заслуговують доріжки кочення, та набору тіл кочення – кульок, що перекочуються по зазначеним доріжкам у проміжку між зазначеними кільцями. Підшипники заповнюються консистентним змащувальним матеріалом. Внутрішнє кільце насаджується на вал, а зовнішнє – занурюється у бокову кришку. Сили реакції, які виникають під дією навантаження, передаються через кульки, що поряд з використанням змащувальних матеріалів, зменшує значення сил тертя [8].

Ушкодження будь-якого з елементів підшипника призводить до його несправності, яка практично паралізує роботу асинхронного двигуна і може призвести до виходу його з ладу.

Основними причинами виходу з ладу підшипників є [2]:

- прикладання до валу навантаження, що є більшим за розрахункові значення,
- втомленісне руйнування матеріалу частин підшипника, що може бути викликано тривалим терміном експлуатації,
- виникнення і розвиток зон корозії, що може бути викликано впливом агресивних середовищ,
- потрапляння до підшипників різного виду забруднень, які заносяться до підшипників зовні під час ремонтів, оглядів або природним шляхом через ущільнення,
- невідповідність або нестача змащувального матеріалу через його невірний вибір або помилку, деградацію з часом та ймовірне випаровування через надмірний нагрів підшипникового вузла,

- неправильне встановлення, перекиї підшипників відносно технологічних площин,

Зазначені фактори незадовільного функціонування підшипникових вузлів може призвести до подій, які потенційно можуть призвести до відмови підшипника [2]:

- надмірне зростання температури у підшипниковому вузлі,
- вигорання доріжок кочення,
- руйнування та відділення з поверхонь доріжок або кульок підшипників дрібних частинок матеріалу,
- виникнення зон корозії на пошкоджених ділянках підшипників,
- плавлення та витікання з підшипника змащувального матеріалу.
- заклинювання підшипника.

Будь-яка з цих подій призводить до збільшення сил тертя з наступним, ще більшим підвищенням температури підшипників, до наростання вібрацій, прогресування процесів зношення та змащувальної недостатності.

Під час роботи асинхронного двигуна його статор та статорні обмотки піддаються різноманітним навантаженням – механічним, електричним та термічним. У залежності від джерела впливу можуть виникати відповідні несправності статора.

Загалом несправності статорів можна класифікувати на [2]:

- вихід з ладу обмоток,
- пошкодження магнітопроводу,
- викривлення магнітного поля.

Досить серйозні несправності статор може отримати від виникаючих у живлячій мережі перенапруг, які можуть з'явитися на клемах двигуна при комутаційних помилках.

Несправності електричного характеру через напруги викликаються, в основному, через появу несиметрії напруги живлення, що виникає через різноманітні дефекти – короткі замкнення між фазами, фазою (фазами) і

землею, ударів блискавки, зтяжні пуски або пуски під максимальним навантаженням, різке спрацювання автоматичних вимикачів. Часте виникнення несиметрії напруги істотно скорочує термін служби обмоток статора та може остаточно вивести двигун з ладу [9].

Підвищене значення напруги викликає навантаження на ізоляцію, а знижена напруга викликає підвищення струму, а отже – температури обмотки.



Рисунок 2.1 – Коротке замикання з вигоранням обмотки статора [9]

При обриві однієї з фаз, що може бути викликано проблемами на джерелі живлення або лінії електропередач, порушенням контакту у клемній коробці, виникненням короткого замикання між фазами, асинхронний двигун не здатний працювати у номінальному режимі та «починає грітися» через виникнення негативної складової струму та більшому навантаженні на дві працюючі фази [2].



Рисунок 2.2 – Механічне ушкодження ізоляції обмотки статора [9]

Несправності статорних обмоток відбуваються через ушкодження ізоляції провідників, які можуть викликати міжвиткові короткі замикання у одній фазі та між різними фазами або розрив фаз – обрив обмотки. Несправності при ушкодженні статорних обмоток проявляються практично на всіх режимах роботи двигуна [2].



Рисунок 2.3 – Виникнення контакту між статором і ротором через ушкодження підшипника з наступним коротке замикання обмотки в гнізда статора [9]

При проходженні струму крізь статорні обмотки може виникнути їх зміщення та випирання у повітряний зазор, що може призвести до торкання окремих елементів даної обмотки з ротором, викликаючи небажані явища, що переростають у несправності.

При наявності гармонік струму статорні обмотки здатні до виникнення коливань, що може призвести до розриву та розімкнення фази або кількох фаз статорного ланцюга.

Теплові несправності виникають через розвиток та/або посилення термічного навантаження, що може бути викликано різними причинами: збільшене за розрахункове значення протікаючого струму, виникнення несиметрії напруг, тривала робота під максимальним навантаженням, часті пуски і зупинки, несправність системи охолодження, вплив високої температури навколишнього середовища та інші [2].

Основним елементом, що виходить з ладу при критичному підвищенні температури є ізоляція провідників, яка «вигорає» оголюючи сусідні провідники, що призводить до коротких замикань.



Рисунок 2.4 – Перегрів поверхні короткозамкненого ротора [9]

Під зовнішніми впливами, що здатні порушити нормальне функціонування асинхронного двигуна та викликати несправності, можна виділити: агресивне середовище, що має критично високу або критично низьку температуру, високі показники вологості та запиленості та інші. Зазначені чинники мають вплив на стан ізоляції, процес охолодження та стан підшипникових вузлів. Несправності, що можуть виникнути під впливом зовнішніх факторів, полягають у пошкодженні ізоляції, виникненні коротких замикань, виходу з ладу підшипників, шляхом їх заклинювання, стирання та іржавлення [2].

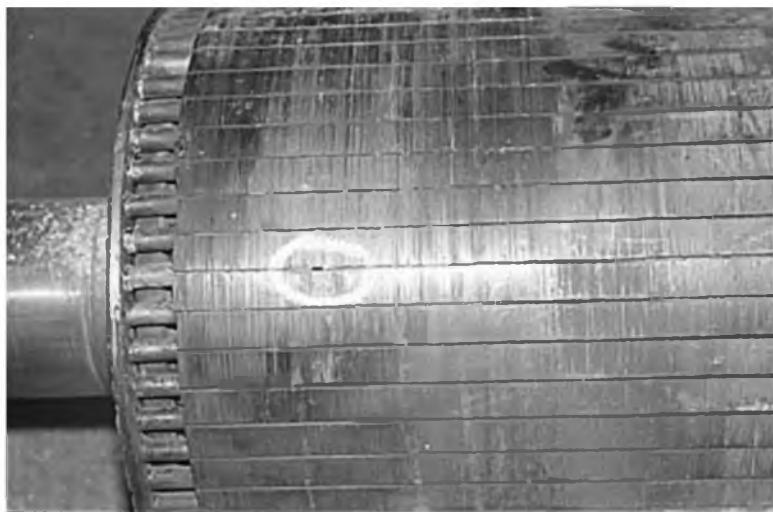


Рисунок 2.5 – Ушкодження стрижня короткозамкненого ротора [9]

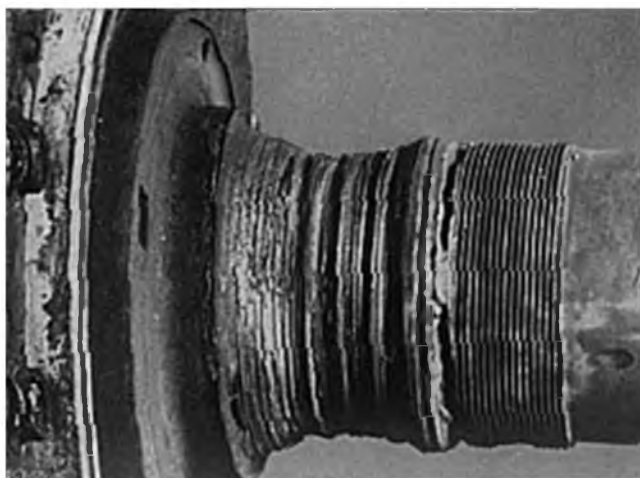


Рисунок 2.6 – Ушкодження валу через заклинювання підшипника [9]



Рисунок 2.7 – Ушкоджений в результаті блукаючих струмів підшипник [9]



Рисунок 2.8 – Ушкоджені у клемній коробці приєднання обмоток статора [9]

Магнітний потік у повітряному зазорі між статором та ротором асинхронного двигуна не є суто синусоїдальним, через наявність додаткових гармонік, що викликає додатковий крутний момент. Результатом цього ефекту може бути відсутність або затримка прискорення двигуна у навантаженому стані, не можливість виходу на номінальну частоту обертання, підвищення статорних струмів, додаткові вібрації та шум [2].

2.2 Обґрунтування необхідності здійснення моніторингу стану асинхронних двигунів

Завдяки своїм властивостям, асинхронні двигуни отримали широке розповсюдження на промислових та інших підприємствах і в установах. Вони дозволяють за умов низької початкової вартості та простоти експлуатації отримати високі показники ефективності. «Насиченість» виробничих процесів значною кількістю асинхронних двигунів, вимагає від останніх високих показників надійності та недопущення виходу їх з ладу, невиконання чого призводить до незапланованих простоїв, втраті доходів та збільшенні незапланованих витрат [10].

Перший спосіб на шляху по досягненню даної мети – проведення своєчасного обслуговування одним зі способів: розтягнутого у часі або за фактичним технічним станом.

При виникненні аварійних ситуацій необхідно мати можливість здійснити заміну, що іноді буває набагато дорожче, ніж здійснювати тривале технічне обслуговування. У той же час, для здійснення технічного обслуговування двигун необхідно зупиняти, час на який необхідно передбачити у плинні технологічного процесу, що знижує продуктивність роботи. Для здійснення технічного обслуговування необхідно залучення досвідчених технічних фахівців, працю яких необхідно оплачувати за завищеними розцінками [10].

Для впровадження більш прогресивного методу – обслуговування за фактичним станом необхідно впроваджувати систему постійного моніторингу стану асинхронного двигуна.

Моніторинг стану здійснює фіксацію, індикацію та аналіз параметрів роботи асинхронного двигуна та допомагає оператору приймати відповідні управлінські рішення. Моніторинг допомагає також визначити досконалість здійсненого технічного обслуговування або ремонту [10].

Під час моніторингу сигнали від одного або групи двигунів безперервно подаються на загальний обчислювальний блок системи, де відбувається їх обробка та оцінка з точки зору наявності чи розвитку несправностей. Завчасне розпізнавання та визначення розвитку несправностей дозволяє заздалегідь підготуватися до технічного обслуговування. Моніторинг стану, таким чином, дозволяє оптимізувати графік технічного обслуговування, мінімізувати простої та підвищити надійність роботи асинхронних двигунів [10].

Виявлення несправностей полягає у визначенні значень з датчиків, які збирають інформацію про поточний стан двигуна. У подальшому відбувається зрівняння з параметрами, що є «нормальними» для даного режиму роботи. Несправність означає невідповідність заздалегідь встановлених взаємозв'язків для вимірюваних величин. Це дозволяє з'ясувати стану роботи двигуна і визначити необхідність коригувальних дій у разі виявлення несправностей [10].

Процес виявлення несправностей може бути полегшений завдяки використанню числових та комп'ютерних моделей, які дозволяють здійснювати оцінку контрольованих параметрів у автоматичному режимі. Для кращої роботи моделей необхідним є розробка ідентифікаторів певних видів несправностей. У якості даних ідентифікаторів несправностей можуть виступати наступні параметри: незбалансованість напруги живлення, падіння та перевищення амплітуди напруги, блокування обертання ротора та перевантаження. Дані повинні контролюватися у реальному часі та забезпечувати досягнення належної точності при відносній простоті [10].

Тому необхідно побудувати систему, що реалізує в реальному часі пошук та ідентифікацію несправностей трифазного асинхронного двигуна на основі розроблених моделей. Система повинна крім усього іншого здійснити класифікацію несправностей.

Досить часто при виникненні одна несправність може призвести до іншої, наприклад, ушкодження стрижня ротора та механічна несправність підшипника. Для діагностики таких несправностей можна вивчати спектр частот струмів у статорних обмотках. Несправність виникає тоді, коли проявляється певне значення частоти – певна частотна гармоніка. Наявність несправностей призводить до коливань контрольованих величин.

Для більш глибоких досліджень необхідно зосереджувати увагу на одночасне вивчення електричної та механічних складових можливих несправностей.

3 РОЗРАХУНОК АСИНХРОННОГО ДВИГУНА

3.1 Розрахунок статора

Для розрахунку конструктивних складових асинхронного двигуна, здійснимо технічні розрахунки за методою [11].

Число пар полюсів асинхронного двигуна розраховуємо за формулою:

$$p = \frac{60 \cdot f}{n_1} = \frac{60 \cdot 50}{1500} = 2 \quad (3.1)$$

Зовнішній діаметр статора приймаємо дорівнюючим $D_{cm.} = 0,280$ мм [11].

Внутрішній діаметр статора [11]:

$$d_{cm.} = k_{cm.} \cdot D_{cm.} \quad (3.2)$$

де $k_{cm.}$ – статорний коефіцієнт, який приймаємо дорівнюючим, $k_{cm.} = 0,70$ [11].

$$d_{cm.} = 0,70 \cdot 0,280 = 0,196 \text{ м}$$

Полюсний поділ [11]:

$$\tau = \frac{\pi \cdot d_{cm.}}{2 \cdot p} = \frac{3,14 \cdot 0,196}{2 \cdot 2} = 0,154 \text{ мм} \quad (3.3)$$

Розрахункова потужність [11]:

$$P_p = P_{ном} \cdot \frac{k_e}{\eta \cdot \cos \varphi}, \quad (3.4)$$

де k_e – відношення ЕРС обмотки статора до номінальної напруги, $k_e = 0,98$,

$$P_p = 18000 \cdot \frac{0,98}{0,9 \cdot 0,89} = 22022,5 \text{ Вт}$$

Лінійне навантаження для двигуна із заданим ступенем захисту – $A = 28000 \text{ А/м}$, а індукція у повітряному зазорі – $B_\delta = 0,8 \text{ Тл}$ [11].

Синхронна кутова швидкість двигуна [11]:

$$\omega_c = \frac{2 \cdot \pi \cdot n_c}{60} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 1500}{60} = 157 \text{ рад/с} \quad (3.5)$$

Коефіцієнт форми магнітного поля [11]:

$$k_B = \frac{\pi}{p \cdot \sqrt{2}} = \frac{3,14}{2 \cdot \sqrt{2}} = 1,11 \quad (3.6)$$

Розрахункова довжина повітряного зазору [11]:

$$l_\delta = \frac{6,1 \cdot P_p}{\alpha_\delta \cdot k_e \cdot k_{об} \cdot A \cdot B_\delta \cdot d_{cm}^2 \cdot n_c} \quad (3.7)$$

де α_δ – розрахунковий коефіцієнт полюсної дуги, $\alpha_\delta = 0,70$,

$$l_\delta = \frac{6,1 \cdot 22022,5}{0,70 \cdot 0,98 \cdot 0,95 \cdot 28000 \cdot 0,85 \cdot 0,196^2 \cdot 1500} = 0,150 \text{ м.}$$

Через те, що $l_\delta < 0,3 \text{ м}$, радіальні вентиляційні канали не виконуємо, а довжину осердя статора l_l приймаємо дорівнюючою розрахунковій довжині повітряного зазору l_δ .

Мінімальне число пазів статора [11]:

$$Z_{1\min} = \frac{\pi \cdot d_{cm.}}{t_{Z1\max}}, \quad (3.8)$$

де $t_{Z1\max}$ – максимальний зубцовий поділ статора асинхронного двигуна, $t_{Z1\max} = 0,016$ [11],

$$Z_{1\min} = \frac{3,14 \cdot 0,196}{0,016} = 38,5.$$

Максимальне число пазів статора [11]:

$$Z_{1\max} = \frac{\pi \cdot d_{cm.}}{t_{Z1\min}}, \quad (3.8)$$

де $t_{Z1\min}$ – мінімальний зубцовий поділ статора асинхронного двигуна, $t_{Z1\min} = 0,012$ [11],

$$Z_{1\max} = \frac{3,14 \cdot 0,196}{0,012} = 51,3.$$

У відповідності до [11] приймаємо $Z_1 = 48$.

Число пазів на полюсі [11]:

$$q = \frac{Z_1}{2 \cdot p \cdot m} = \frac{48}{2 \cdot 2 \cdot 3} = 4. \quad (3.9)$$

Зубцовий поділ статора [11]:

$$t_{Z1} = \frac{\pi \cdot d_{cm.}}{2 \cdot m \cdot p \cdot q} = \frac{3,14 \cdot 0,196}{2 \cdot 3 \cdot 2 \cdot 4} = 0,0128 \quad (3.10)$$

Число ефективних провідників у пазу [11]:

$$q_n = \frac{\pi \cdot d_{cm.} \cdot A}{I_{ном} \cdot Z_1}, \quad (3.11)$$

де $I_{ном}$ – номінальний струм обмотки статора [11]:

$$I_{ном} = \frac{P_{ном}}{m \cdot U_{ном} \cdot \eta \cdot \cos \varphi} = \frac{18000}{3 \cdot 660 \cdot 0,90 \cdot 0,89} = 11,35 \text{ A} \quad (3.12)$$

$$q_n = \frac{3,14 \cdot 0,196 \cdot 28000}{11,35 \cdot 48} = 31,63.$$

Скоректоване число витків у фазі [11]:

$$w_1 = \frac{q_n \cdot Z_1}{2 \cdot a \cdot m} = \frac{32 \cdot 48}{2 \cdot 1 \cdot 3} = 256 \text{ вит.} \quad (3.13)$$

Скоректоване значення лінійного навантаження [11]:

$$A = \frac{2 \cdot I_{ном} \cdot w_1 \cdot m}{\pi \cdot d_{cm.}} = \frac{2 \cdot 11,35 \cdot 256 \cdot 3}{3,14 \cdot 0,196} = 23327 \text{ A/м} \quad (3.14)$$

Значення обмоточного коефіцієнта за відсутності скосу пазів [11]:

$$k_{об1} = k_p \cdot k_y \quad (3.15)$$

де k_p – коефіцієнт розподілу [11]:

$$k_p = \frac{0,5}{q \cdot \sin \frac{30^\circ}{q}} = \frac{0,5}{4 \cdot \sin \frac{30^\circ}{4}} = 0,958 \quad (3.16)$$

k_y – коефіцієнт укорочення при кроці укорочення $\beta = 1$ [11]:

$$k_y = \sin \frac{\pi}{2} \cdot \beta = \sin \frac{180^\circ}{2} \cdot 1 = 1 \quad (3.17)$$

$$k_{o\delta 1} = 0,958 \cdot 1 = 0,958.$$

Магнітний потік [11]:

$$\Phi = \frac{k_e \cdot U_{1ном}}{4 \cdot k_B \cdot w_1 \cdot k_{o\delta 1} \cdot f} = \frac{0,98 \cdot 660}{4 \cdot 1,11 \cdot 256 \cdot 0,958 \cdot 50} = 0,0119 \text{ Вб} \quad (3.18)$$

Індукція в повітряному зазорі [11]:

$$B_\delta = \frac{p \cdot \Phi}{d_{cm} \cdot l_\delta} = \frac{2 \cdot 0,0119}{0,196 \cdot 0,150} = 0,81 \text{ Тл} \quad (3.19)$$

Перетин ефективних провідників [11]:

$$S_{ef.} = \frac{I_{1ном}}{a \cdot J_1} = \frac{11,35}{1 \cdot 3 \cdot 10^6} = 3,78 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2 \quad (3.20)$$

З огляду на значення ефективного перетину, розбиваємо його на елементарну кількість елементарних провідників кількістю – $n_{ел.} = 4$.

Перетин елементарного провідника [11]:

$$S_{ел.} = \frac{S_{эф.}}{n_{ел.}} = \frac{3,78 \cdot 10^{-6}}{4} = 0,945 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2 \quad (3.21)$$

Для обмотки статора вибираємо обмотувальний дріт ПЕТВ з наступними параметрами [12]: $S_{ел.} = 1,227 \text{ мм}^2$, $d_{ел.} = 1,25 \text{ мм}$, $d_{ел.маx} = 1,349 \text{ мм}$, $S_{эф} = 4,908 \text{ мм}^2$.

Кінцеве значення щільність струму в обмотці статора [11]:

$$J_1 = \frac{I_{ном}}{a \cdot S_{ел.} \cdot n_{ел.}} = \frac{11,35}{1 \cdot 1,227 \cdot 10^{-6} \cdot 4} = 2,313 \cdot 10^6 \text{ А/м}^2 \quad (3.22)$$

3.2 Розрахунок ротора

Зовнішній діаметр ротора [11]:

$$D_p = d_{cm.} - 2 \cdot \delta, \quad (3.23)$$

де δ – повітряний зазор [11]:

$$\delta = (0,25 + d_{cm.}) \cdot 10^{-3} = (0,25 + 0,196) \cdot 10^{-3} = 0,446 \cdot 10^{-3} \approx 0,5 \text{ мм} \quad (3.24)$$

$$D_p = 0,196 - 2 \cdot 0,5 \cdot 10^{-3} = 0,195 \text{ м.}$$

Зубцовий поділ [11]:

$$t_{Z2} = \frac{\pi \cdot D_p}{Z_2}, \quad (3.25)$$

де Z_2 – число пазів ротора, яке приймаємо дорівнюючим $Z_1 = 36$.

$$t_{Z2} = \frac{3,14 \cdot 0,195}{36} = 0,017.$$

Внутрішній діаметр ротора [11]:

$$d_p = d_{вал} = k_{вал} \cdot D_{ст.}, \quad (3.26)$$

де $k_{вал}$ – коефіцієнт для розрахунку діаметра валу, $k_{вал} = 0,25$ [11].

$$d_p = d_{вал} = 0,25 \cdot 0,28 = 0,07 \text{ м}$$

Струм у стрижні ротора [11]:

$$I_{2ном.} = k_i \cdot \nu_i \cdot I_{1ном.}, \quad (3.27)$$

де k_i – коефіцієнт впливу струму намагнічування та опору обмоток на відношення струмів I_1/I_2 [11]:

$$k_i = 0,2 + 0,8 \cdot \cos \varphi = 0,2 + 0,8 \cdot 0,89 = 0,912 \quad (3.28)$$

ν_i – коефіцієнт приведення струму [11]:

$$\nu_i = \frac{2 \cdot m \cdot w_1 \cdot k_{об1}}{Z_2} = \frac{2 \cdot 3 \cdot 256 \cdot 0,958}{36} = 40,87 \quad (3.29)$$

$$I_{2ном.} = 0,912 \cdot 40,87 \cdot 11,35 = 423,05 \text{ А.}$$

Для короткозамкнутого ротора вибираємо литу алюмінієву обмотку без скошу пазів, які є закритими.

Площа поперечного перерізу стрижня [11]:

$$S_{стр.} = \frac{I_{2ном.}}{J_2} = \frac{423,05}{7 \cdot 10^6} = 60,44 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2 \quad (3.30)$$

Допустима ширина зубця [11]:

$$b_{z2} = \frac{B_\delta \cdot t_{z2}}{B_{z2} \cdot k_{cm.}} = \frac{0,81 \cdot 0,017}{1,6 \cdot 0,70} = 0,0123 \text{ мм.} \quad (3.31)$$

Приймаємо: висоту шлицю паза – $h_{uu} = 1,0$ мм, висоту перемички над пазом – $h'_{uu} = 0,2$ мм, ширину шлицю паза – $b_{uu} = 1,5$ мм.

Більша ширина паза [11]:

$$\begin{aligned} b_1 &= \frac{\pi \cdot (D_p + 2 \cdot h_{uu} - 2 \cdot h'_{uu}) - Z_2 \cdot b_{z2}}{Z_2 + \pi} = \\ &= \frac{3,14 \cdot (0,195 + 2 \cdot 1,0 \cdot 10^{-3} - 2 \cdot 0,2 \cdot 10^{-3}) - 36 \cdot 0,0123}{36 + 3,14} = \\ &= 0,00446 \text{ м} \end{aligned} \quad (3.32)$$

Менша ширина паза [11]:

$$b_2 = \sqrt{\frac{b_1^2 \cdot \left(\frac{Z_2}{\pi} + \frac{\pi}{2} \right) - 4 \cdot S_{cmp.}}{\frac{Z_2}{\pi} - \frac{\pi}{2}}} =$$

$$= \sqrt{\frac{0,00446^2 \cdot \left(\frac{36}{3,14} + \frac{3,14}{2} \right) - 4 \cdot 60,44 \cdot 10^{-6}}{\frac{36}{3,14} - \frac{3,14}{2}}} = 0,0017 \text{ м} \quad (3.33)$$

Відстань між осями закруглень [11]:

$$h_1 = (b_1 - b_2) \cdot \frac{Z_2}{2 \cdot \pi} =$$

$$= (0,00446 - 0,0017) \cdot \frac{36}{2 \cdot 3,14} = 0,0158 \text{ м} \quad (3.34)$$

Повна висота паза ротора [11]:

$$h_{n2} = h'_{uu} + h_{uu} + \frac{b_1}{2} + h_1 + \frac{b_2}{2} =$$

$$= 0,0003 + 0,001 + \frac{0,00446}{2} + 0,0158 + \frac{0,0017}{2} = 0,0202 \text{ м} \quad (3.35)$$

Розрахункова висота зубця ротора [11]:

$$h_{z2} = h_{n2} - 0,1 \cdot b_2 = 0,0202 - 0,1 \cdot 0,0017 = 0,02 \text{ м} \quad (3.36)$$

Уточнене значення перерізу стрижня [11]:

$$\begin{aligned}
 S_{стр.} &= \frac{\pi}{8} \cdot (b_1^2 + b_2^2) + \frac{1}{2} \cdot (b_1 + b_2) \cdot h_1 = \\
 &= \frac{3,14}{8} \cdot (0,00446^2 + 0,0017^2) + \frac{1}{2} \cdot (0,00446 + 0,0017) \cdot 0,0158 = \\
 &= 58,1 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2
 \end{aligned}
 \tag{3.37}$$

Щільність струму в стрижні ротора [11]:

$$J_2 = \frac{I_{2ном.}}{S_{стр.}} = \frac{423,05}{58,1 \cdot 10^{-6}} = 7,28 \cdot 10^6 \text{ А/м}^2 \tag{3.38}$$

Площа поперечного перерізу замикаючих кілець короткозамкнутого ротора [11]:

$$S_{к\acute{и}л} = \frac{I_{к\acute{и}л}}{J_{к\acute{и}л}}, \tag{3.39}$$

де $I_{к\acute{и}л}$ – струм у кільці [11]:

$$I_{к\acute{и}л} = \frac{I_{2ном.}}{\Delta}, \tag{3.40}$$

де

$$\Delta = 2 \cdot \sin \frac{\pi \cdot p}{Z_2} = 2 \cdot \sin \frac{3,14 \cdot 2}{36} = 0,3473. \tag{3.41}$$

$$I_{к\acute{и}л} = \frac{423,05}{0,3473} = 1218,11 \text{ А}$$

$J_{к\acute{и}л.}$ – щільність струму в замикаючих кільцях [11]:

$$J_{к\acute{и}л} = 0,85 \cdot J_2 = 0,85 \cdot 7,28 \cdot 10^6 = 6,188 \cdot 10^6 \text{ А/м}^2 \tag{3.42}$$

$$S_{kil} = \frac{1218,11}{6,118 \cdot 10^6} = 199,1 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$$

Розміри короткозамикаючих кілець [11]:

$$h_{kil} = 1,25 \cdot h_{n2} = 1,25 \cdot 0,0202 = 0,02525 \text{ м} \quad (3.43)$$

Ширина кільця [11]:

$$b_{kil} = \frac{S_{kil}}{h_{kil}} = \frac{199,1 \cdot 10^{-6}}{0,02525} = 0,00789 \text{ м} \quad (3.44)$$

Уточнений перетин замикаючих кілець короткозамкнутого ротора [11]:

$$S_{kil} = b_{kil} \cdot h_{kil} = 0,00789 \cdot 0,02525 = 199,2 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2 \quad (3.45)$$

Значною мірою характеристики машини визначаються електромагнітними навантаженнями та магнітною індукцією, тому їх попередній вибір повинен здійснюється особливо ретельно. Щільність струму, коефіцієнт заповнення пазу знаходяться у допустимих межах, а значення намагнічуючих струмів показує, що розміри машини близькі до оптимальних.

4 МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА

4.1 Визначення методів та складання алгоритму виявлення несправностей

Збої у роботі асинхронних двигунів можуть порушити технологічний процес, погіршити якість продукції, викривити протікання окремих операцій, призвести до грошових втрати, завдати шкоди життю чи здоров'ю обслуговуючого персоналу та забруднити навколишнє середовище. Способи діагностики та виявлення збоїв та несправностей роботи двигунів можна здійснювати або на реальних об'єктах або на основі створених моделі [13].

При застосуванні моделей основна ідея полягає в обчисленні та передбаченні тих величин, що відображають стан досліджуваної системи та невідповідності, що і визначають несправність або ряд несправностей. Для отримання якісного результату моделювання особлива увага приділяється точності та адекватності створеної моделі.

Створення моделі здійснюється шляхом використання відомих та продуктивних комп'ютерних програм, а передує цьому процесу створення математичної моделі. Ця, остання модель шляхом встановлення математичних зв'язків для окремих величин між входом та виходом системи визначає аналітичні залежності, що відображають фізичні взаємозв'язки, закладені в основу роботи досліджуваного об'єкта [13].

Фактично, створена модель визначає відхилення контрольованих величин понад визначений «коридор» коливань її значень, що свідчить про наявність несправності. На дані моделі також розповсюджується вимога уникнення помилкових спрацювань системи моніторингу.

Моніторинг роботи двигуна на основі створеної моделі полягає у виявленні несправностей та виробка команди на вимкнення чи виведення у ремонт і ця процедура вирізняється безперервністю. На рис. 4.1

представлено загальну структуру системи моніторингу з використанням моделей [14].

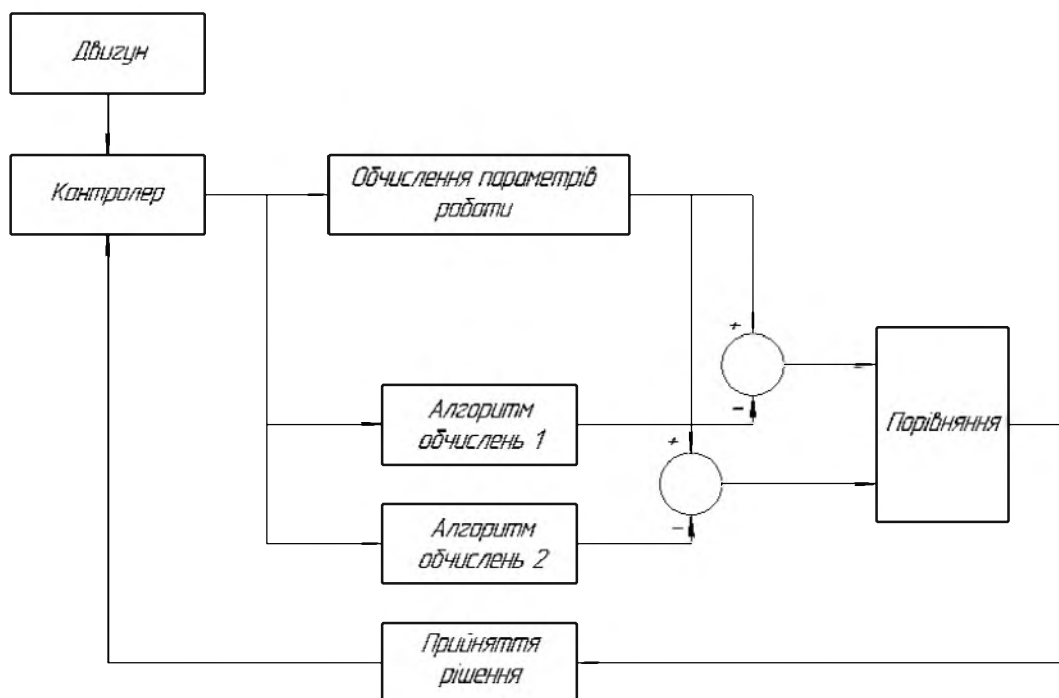


Рисунок 4.1 – Загальна структура системи моніторингу з використанням моделей у якості алгоритмів обчислень

Моделі процесів, що протікають, здійснюють порівняння параметрів при справній та при несправній роботі окремих елементів двигуна з виокремленням різниці, що і визначають поточний стан роботи двигуна. Отримана різниця є індикатором для прийняття рішення про наявність або відсутність несправності та про її тип. На заводі цьому процесу може стати наявні при роботі двигуна шуми різного походження та перешкоди у передачі контрольованого сигналу. Створені моделі повинні бути налаштовані на певні порогові значення визначених різниць з огляду на процес, що досліджується та можливість виникнення похибки під дією зовнішніх впливів [15].

Моделі у залежності від кінцевих цілей можуть бути досить різними, що і визначає їхню структуру. Математичні моделі засновані на відомих фізичних взаємодіях у системі. Фізичні моделі будуються на основі знань

про процес та його особливості та можливостей досліджувати процес, що розглядається. Іноді, фізичні моделі засновуються на практичних вимірюваннях і не відомі аналітичні залежності між окремими компонентами. Для розгорнутих, складних та фізично-невизначених систем створення математичної моделі, що має достатньо високу ступінь точності є дуже складним та трудомістким завданням. У деяких випадках математичну модель скласти взагалі неможливо. На допомогу у даному випадку можуть прийти комп'ютерні моделі, які дозволяють з високим ступенем точності отримати дані, що нас цікавлять та визначити коло проблем, які за допомогою даних моделей можна вирішити [16].

Для коректної будови моделі моніторингу стану асинхронного двигуна необхідним є отримання за допомогою відповідних датчиків значень характерних параметрів: напруг, струмів, частоти обертання, температур, крутного моменту, вібраційних і шумових коливань та інших. Дані відомості у зручній формі дозволяють обробити їх шляхом аналізування отриманої інформації з використанням відомих методів обробки сигналів. Проведений аналіз дозволяє ідентифікувати та виявляти несправності за отриманими даними.

Переваги застосування моделей полягають у тому, що вони є інтелектуальним продуктом, який після остаточного настроювання та калібрування не потребують додаткових спостережень. Ця властивість виявляється дуже корисною для її використання у засобах моніторингу стану асинхронних двигунів. Вони в автоматичному режимі здатні перевіряти відповідність контрольованих параметрів та виявляти потенційні дефекти. Якщо виникають «нестандартні» ситуації, які розроблена програма не в змозі ідентифікувати, необхідно передбачити відповідну світлову та звукову сигналізацію для привернення уваги обслуговуючого персоналу [16].

Модель визначення несправностей асинхронного двигуна не може забезпечити повної його ідентифікації, що нашо́вхує на думку про

неповноцінну адекватність складеної моделі на всіх режимах роботи двигуна. Тому складена модель повинна бути побудована на знаннях, що визначає ієрархію впливів параметрів, а для достовірного визначення несправності або відхилення від нормальної роботи необхідно використовувати кілька джерел інформації та кілька незалежних каналів обробки інформації [16].

На рис. 4.2 наведено алгоритм визначення несправностей, який покладено в основу роботи моделі для діагностики роботи асинхронного двигуна [17].

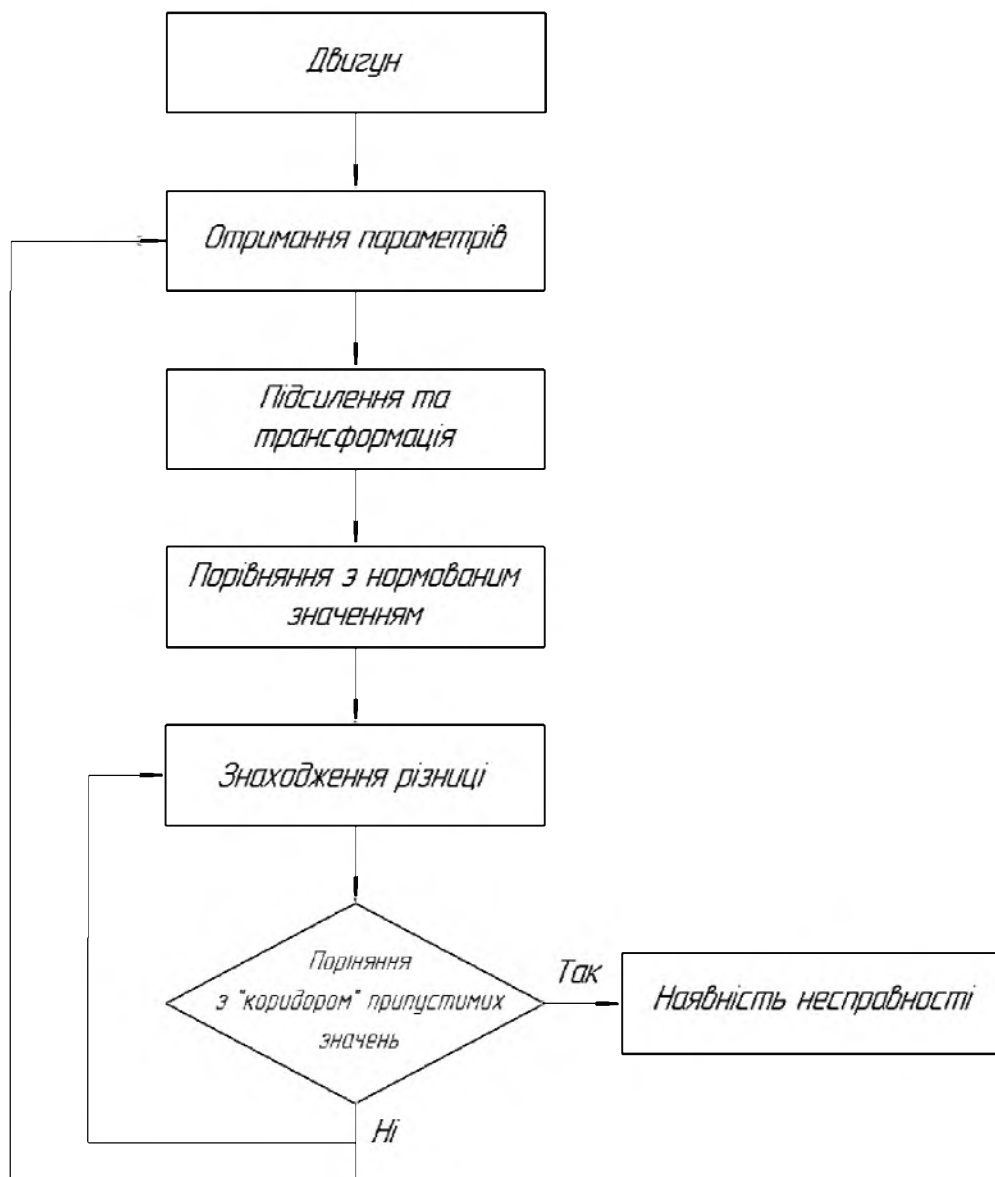


Рисунок 4.2 – Алгоритм визначення несправностей, який покладено в основу роботи моделі

Даний алгоритм може бути застосований до асинхронних двигунів при різних режимах робіт, при різних умовах навантаження, при наявності та відсутності різного виду несправностей. В основу роботи даного алгоритму покладено наступні положення [17]:

- контроль значення струмів та напруг статора асинхронного двигуна,
- застосування векторного перетворення для обчислення струмів і напруг,
- застосування порівняльного механізму на основі ідентифікації параметрів,
- при відповідності параметрів заданим умовам, робиться висновок про наявність несправності та індикацію даної несправності.

Алгоритм визначення несправностей, який наведено на рис. 4.3 засновано на перевірці визначених параметрів: двигуна у режимі реального часу при відповідних межах невизначеності та коефіцієнта розпорошення, які розраховані в режимі реального часу.

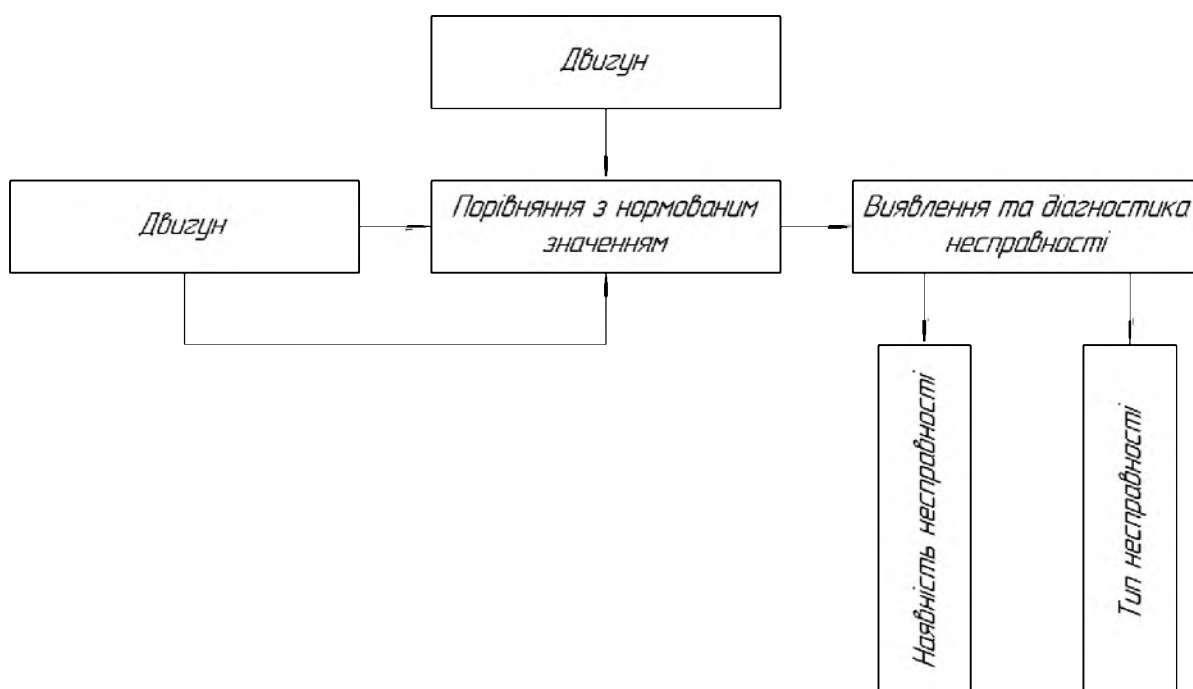


Рисунок 4.3 – Алгоритм визначення несправностей, який засновано на перевірці визначених параметрів

Алгоритм реалізує метод виявлення несправностей заснований на техніці ідентифікації ієрархічності параметра у визначеному наборі даних роботи двигуна. Процедура ідентифікації системи буде здійснюватися за допомогою еквівалентної моделі під час усталеної роботи в режимі реального часу. У запропонованій схемі виявлення несправностей на основі зазначеного методу, розрахунок здійснюється на основі такого мінімального значення визначеної різниці, яке ще відповідає працездатному режиму. Дана метода є досить прогресивною завдяки своїм властивостям [17]:

- скорочений час виявлення несправності,
- висока надійність та ефективність виявлення несправності,
- оціночний коефіцієнт є універсальним,
- можливість застосування на різних режимах роботи двигуна.

4.2 Складання математичної моделі трифазного асинхронного двигуна

Моделі трифазного асинхронного двигуна здійснюємо у програмному середовищі Matlab-Simulink [18].

Перехідну характеристику моделі складемо для струму статора та частоти обертання ротора при різних ступенях навантаження двигуна. У подальшому складену модель використаємо для оцінки параметрів роботи двигуна та моніторингу його стану.

Модель асинхронного двигуна будуються на основі відповідних математичних залежностей, які описують характерні процеси, притаманні роботі асинхронного двигуна на різних режимах. Для адекватності моделі необхідно забезпечити математичну узгодженість між усіма прийнятими припущеннями та реальною роботою двигуна [18].

Послідовність будови моделі наступна [19]:

- складається математична модель, для якої записується ряд перехідних функцій, що описують процеси, які відбуваються у асинхронному двигуні,
- за допомогою стандартних блоків Matlab-Simulink та функціональних зв'язків дана математична модель реалізується у обраному середовищі,
- здійснюється моделювання та перевіряється адекватність моделі.

Для спрощення процесу складання моделі асинхронного двигуна приймаємо ряд припущень, які не матимуть суттєвого впливу на кінцевий результат моделювання [19]:

- допускаємо постійність та рівномірність повітряного зазору,
- просторові гармоніки у повітряному зазорі не продукуються,
- вектори магнітних сил мають суворо-синусоїдальний характер,
- магнітне поле має постійне значення,
- не враховуються вихрові ефекти та ефекти переманічування,
- напруги і струми живлячої мережі мають суворо-синусоїдальний характер,
- відсутні гармоніки у струмах і напругах живлячої мережі,
- температура усіх частин двигуна залишається незмінною.

Структура моделі асинхронного двигуна та визначення її параметрів мають вирішальне значення для підтвердження адекватності моделі. Математичну модель асинхронного двигуна зазвичай представляють у стаціонарній системі координат a , b і c . На яку наносять вектори напруги, струму та потокозчеплення (рис. 4.4) [20].

Зв'язок між векторами напруги, струму і потокозчеплення можна записати наступним чином [20]:

$$\begin{pmatrix} u_{as} \\ u_{bs} \\ u_{cs} \end{pmatrix} = R_s \cdot \begin{pmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \frac{d\psi_{as}}{dt} \\ \frac{d\psi_{bs}}{dt} \\ \frac{d\psi_{cs}}{dt} \end{pmatrix} \quad (4.1)$$

де u_{as}, u_{bs}, u_{cs} – напруги на статорних обмотках у проекціях на відповідні осі координат, В,

i_{as}, i_{bs}, i_{cs} – струми у статорних обмотках у проекціях на відповідні осі координат, А,

R_s – опір статорних обмоток, Ом,

$\lambda_{as}, \lambda_{bs}, \lambda_{cs}$ – проекції вектору потокозчеплення на відповідні осі координат.

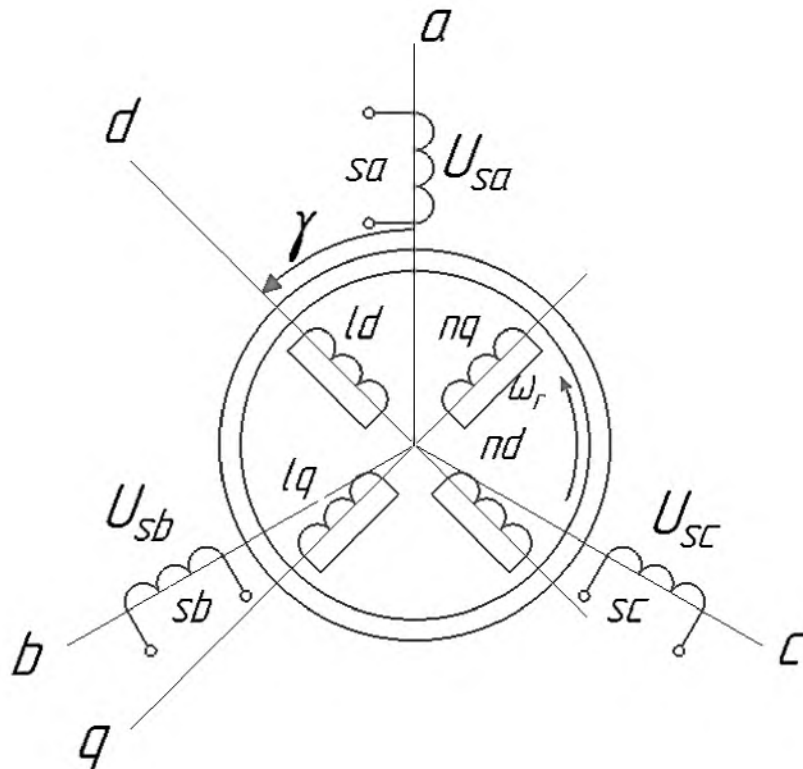


Рисунок 4.4 – Електромагнітна схема двигуна у стаціонарних координатах

Взаємну індуктивність обмоток статора можна визначити за формулою [20]:

$$L_{ss} = \begin{pmatrix} L_{ls} + L_s & L_{sm} & L_{sm} \\ L_{sm} & L_{ls} + L_s & L_{sm} \\ L_{sm} & L_{sm} & L_{ls} + L_s \end{pmatrix} \quad (4.2)$$

де L_{ls} – значення індуктивності фази статора,

L_s – самоіндукція у обмотці статора,

L_{sm} – взаємна індукція між обмотками статора.

Взаємну індуктивність стрижнів ротора можна визначити за формулою [20]:

$$L_{rr} = \begin{pmatrix} L_{lr} + L_r & L_{rm} & L_{rm} \\ L_{rm} & L_{lr} + L_r & L_{rm} \\ L_{rm} & L_{rm} & L_{lr} + L_r \end{pmatrix} \quad (4.3)$$

L_{lr} – значення індуктивності стрижня ротора,

L_r – самоіндукція у стрижні ротора,

L_{rm} – взаємна індукція між стрижнями ротора,

Взаємну індуктивність обмоток статора і стрижнів ротора можна визначити за формулою [20]:

$$L_{sr} = \begin{pmatrix} \cos \gamma & \cos(\gamma + 120^\circ) & \cos(\gamma - 120^\circ) \\ \cos(\gamma - 120^\circ) & \cos \gamma & \cos(\gamma + 120^\circ) \\ \cos(\gamma + 120^\circ) & \cos(\gamma - 120^\circ) & \cos \gamma \end{pmatrix} \quad (4.4)$$

γ – кут повороту ротора, град.

Зазначені індуктивності асинхронного двигуна можна виразити через магніто-кінематичні параметри двигуна [20]:

$$\begin{aligned}
L_s &= \omega_s^2 \cdot B \\
L_{sm} &= -\frac{1}{2} \omega_s^2 \cdot B \\
L_{sr} &= \omega_s \cdot \omega_r \cdot B \\
L_{rm} &= -\frac{1}{2} \omega_r^2 \cdot B \\
L_r &= \omega_r^2 \cdot B
\end{aligned} \tag{4.5}$$

де ω_s – число еквівалентних витків обмотки статора на фазу,

ω_r – число еквівалентних витків обмотки ротора,

B – магнітна проникність повітряного зазору.

Для зменшення числа обчислень здійснимо перетворення стаціонарної системи координат abc у систему координат, що обертається, – dq . Дане перетворення осей координат вимагає відповідного перетворення матриць змінних, розрахованих за формулами (4.1) – (4.5):

$$\begin{pmatrix} u_{ds} \\ u_{qs} \end{pmatrix} = R_s \cdot \begin{pmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \frac{d\psi_{ds}}{dt} \\ \frac{d\psi_{qs}}{dt} \end{pmatrix} \tag{4.6}$$

$$\begin{pmatrix} \psi_{ds} \\ \psi_{qs} \end{pmatrix} = L_{ls} \cdot \begin{pmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \end{pmatrix} + L_m \cdot \left[\begin{pmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} i'_{dr} \\ i'_{qr} \end{pmatrix} \right] \tag{4.7}$$

$$\begin{pmatrix} \psi'_{ds} \\ \psi'_{qs} \end{pmatrix} = L'_{lr} \cdot \begin{pmatrix} i'_{dr} \\ i'_{qr} \end{pmatrix} + L_m \cdot \left[\begin{pmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} i'_{dr} \\ i'_{qr} \end{pmatrix} \right] \tag{4.8}$$

де

$$\begin{aligned}
 i'_{dr} &= \frac{\omega_r}{\omega_s} i_{dr}, & i'_{qr} &= \frac{\omega_r}{\omega_s} i_{qr} \\
 \psi'_{dr} &= \frac{\omega_s}{\omega_r} \psi_{dr}, & \psi'_{qr} &= \frac{\omega_s}{\omega_r} \psi_{qr} \\
 L'_{lr} &= \left(\frac{\omega_s}{\omega_r} \right)^2 \cdot L_{lr}, & L_m &= \frac{3}{2} \cdot L_s
 \end{aligned} \tag{4.9}$$

Рівняння руху має вигляд [20]:

$$\frac{J}{n_n} \cdot \frac{d\omega_r}{dt} = M_{EM} + M_{зов.} \tag{4.10}$$

де J – механічний момент інерції ротора,

ω_n – номінальна швидкість обертання ротора, об./хв.,

ω_r – миттєве значення швидкості обертання ротора, об./хв.,

M_{EM} – електромагнітний момент, що розвивається двигуном, Н·м [20]:

$$M_{EM} = \frac{3p}{4} \cdot (\psi_{qs} \cdot i_{ds} - \psi_{ds} \cdot i_{qs}) \tag{4.11}$$

де p – число пар полюсів у кожній фазі статорних обмоток.

$M_{зов.}$ – крутний момент від зовнішніх сил, Н·м:

Для продовження моделювання складемо схему заміщення трифазного асинхронного двигуна, яка поєднує у електричну схему із заміщенням магнітного зв'язку між статором і ротором (рис. 4.5).

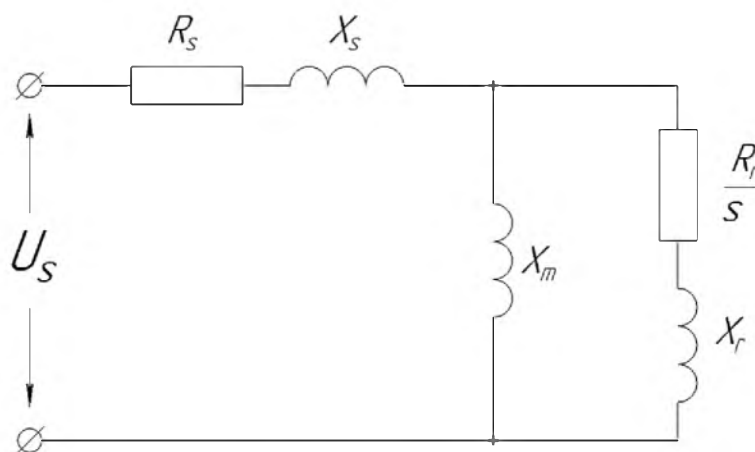


Рисунок 4.5 – Схема заміщення асинхронного двигуна

4.3 Складання комп'ютерної моделі трифазного асинхронного двигуна

Програмне середовище Matlab-Simulink відрізняється зручним графічним інтерфейсом користувача і дозволяє реалізувати різноманітні моделі безперервних та дискретних систем.

Модель асинхронного двигуна засобами Matlab-Simulink будемо здійснювати у формі введення-виведення з поточним контролем стану зі здійсненням аналізу результатів.

Модель будується на основі складеної математичної моделі. Окремі складові даної моделі будуть представлені у вигляді блоків, на кожен з яких покладено виконання тієї чи іншої функції. Для здійснення моделювання необхідно здійснити ряд послідовних кроків.

Асинхронний двигун живиться від трифазного джерела змінного струму, який ми задаємо відповідними блоками. Сам асинхронний двигун задаємо поки що простою підсистемою, що містить чотири входи і п'ять виходів. Три входи задають значення напруги на статорі двигуна, а один – величину зовнішнього навантаження, яке приймаємо постійним. Виходи містять: три значення – це струми у статорних обмотках, один – значення

електромагнітного крутного моменту, один – частоту обертання ротора (рис. 4.6) [19].

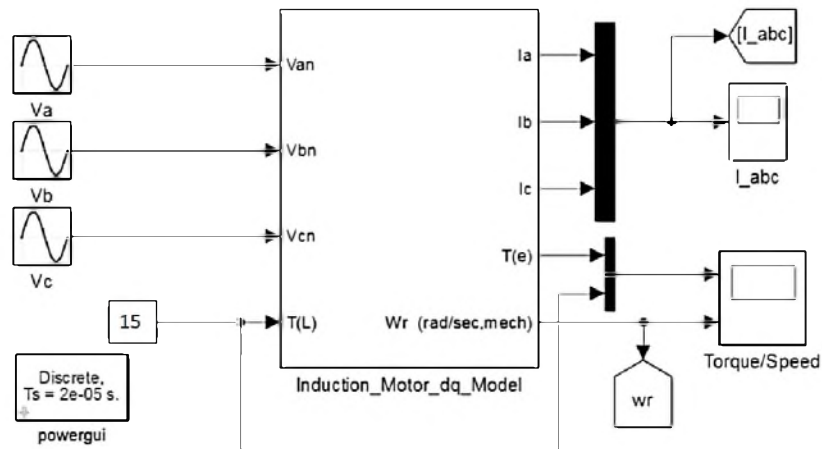


Рисунок 4.6 – Модель підключення асинхронного двигуна до джерела синусоїдної напруги

Модель асинхронного двигуна, схована у підсистему «Induction Motor dq Model» містить кілька підсистем та ряд блоків вводу-виведення (рис. 4.7) [19].

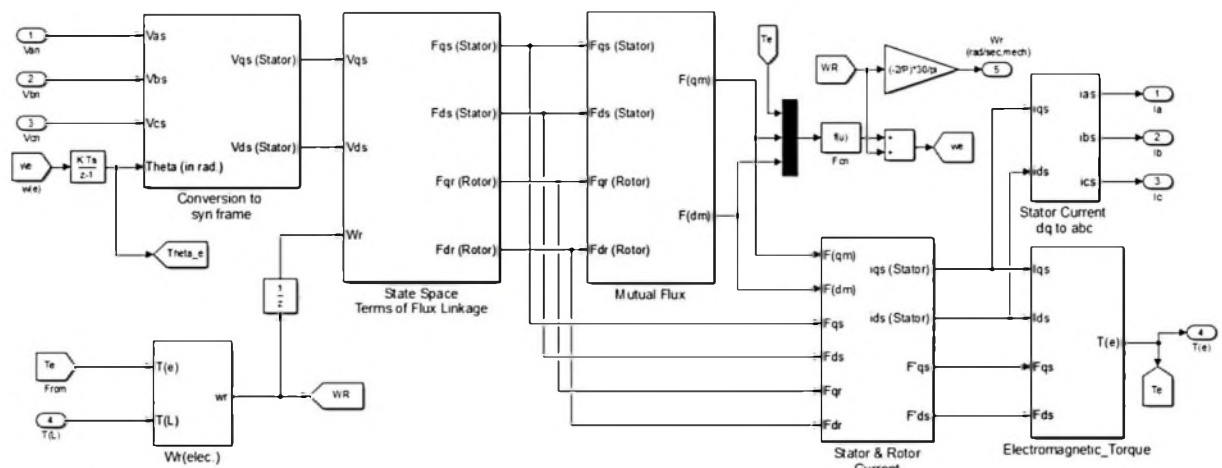


Рисунок 4.7 – Модель асинхронного двигуна (Induction Motor dq Model)

Перша підсистема двигуна – це блок для перетворення трифазної системи напруг у нерухомій системі координат «abc» у систему координат, що обертається «dq» (рис. 4.8) [19].

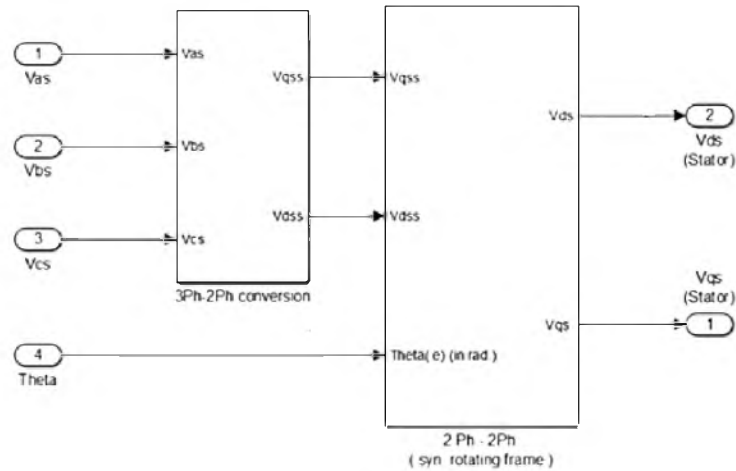


Рисунок 4.8 – Склад підсистеми перетворення у обертальну синхронну систему «dq» (Conversion to syn frame)

Підсистема «Conversion to syn frame» містить два блоки [19]:

- «3Ph-2Ph conversion», у якому безпосередньо відбуваються обчислення і перетворення (рис. 4.9),
- «2Ph-2Ph syn Totaling frame», який здійснює перетворення двофазної системи з урахуванням функції обертання (рис. 4.10).

Підсистема асинхронного двигуна «State Space Terms of Flux Linkage» імітує залежності потокозчеплення у просторі станів (рис. 4.11).

Підсистема «State Space Terms of Flux Linkage» складається з двох блоків:

- потокозчеплення у статорних обмотках «Stator Flux» (рис. 4.12), обрахунки у якій (для осі q) представлено на схемі (рис. 4.13) [19],
- потокозчеплення у роторних обмотках «Rotor Flux» (рис. 4.14), обрахунки у якій (для осі q) представлено на схемі (рис. 4.15) [19].

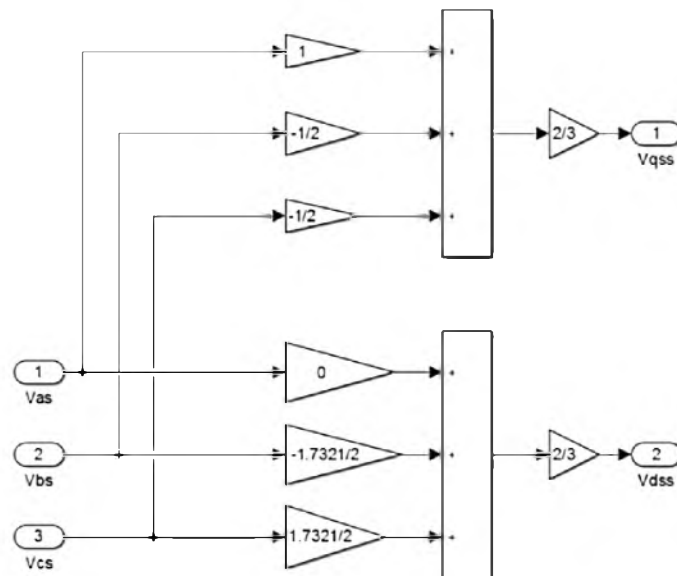


Рисунок 4.9 – Склад підсистеми безпосереднього перетворення трифазної системи у двофазну (3Ph-2Ph conversion)

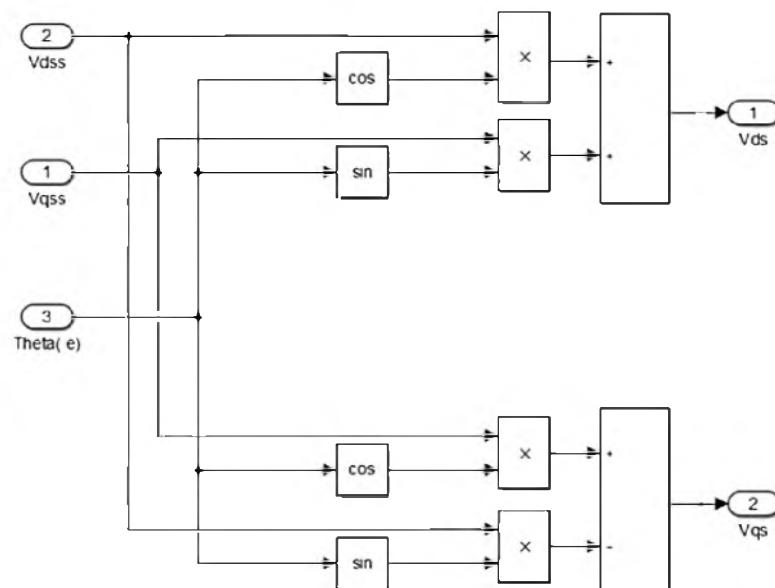


Рисунок 4.10 – Склад підсистеми безпосереднього перетворення двофазної системи з урахуванням функції обертання (2Ph-2Ph syn Totaling frame)

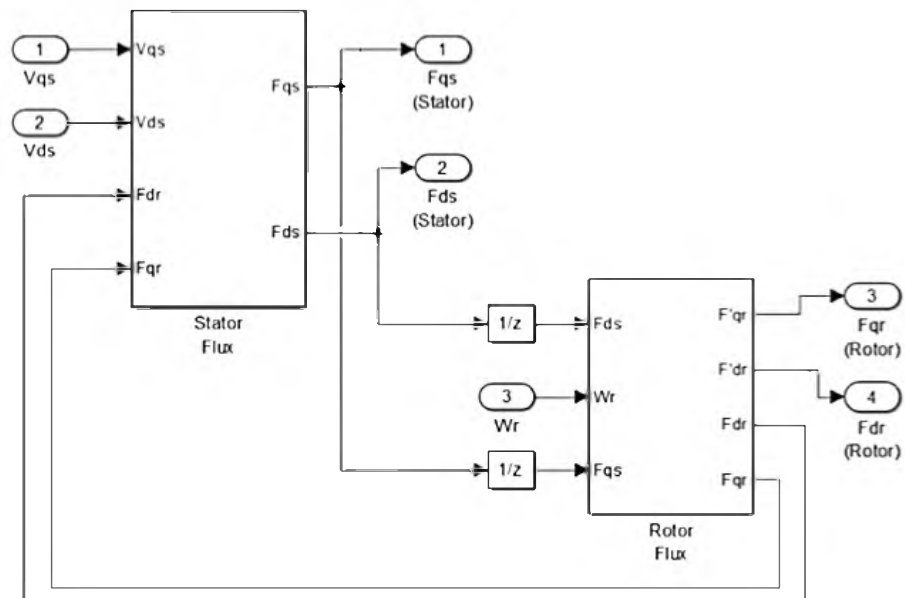


Рисунок 4.11 – Склад підсистеми для впровадження залежностей потокозчеплення (State Space Terms of Flux Linkage).

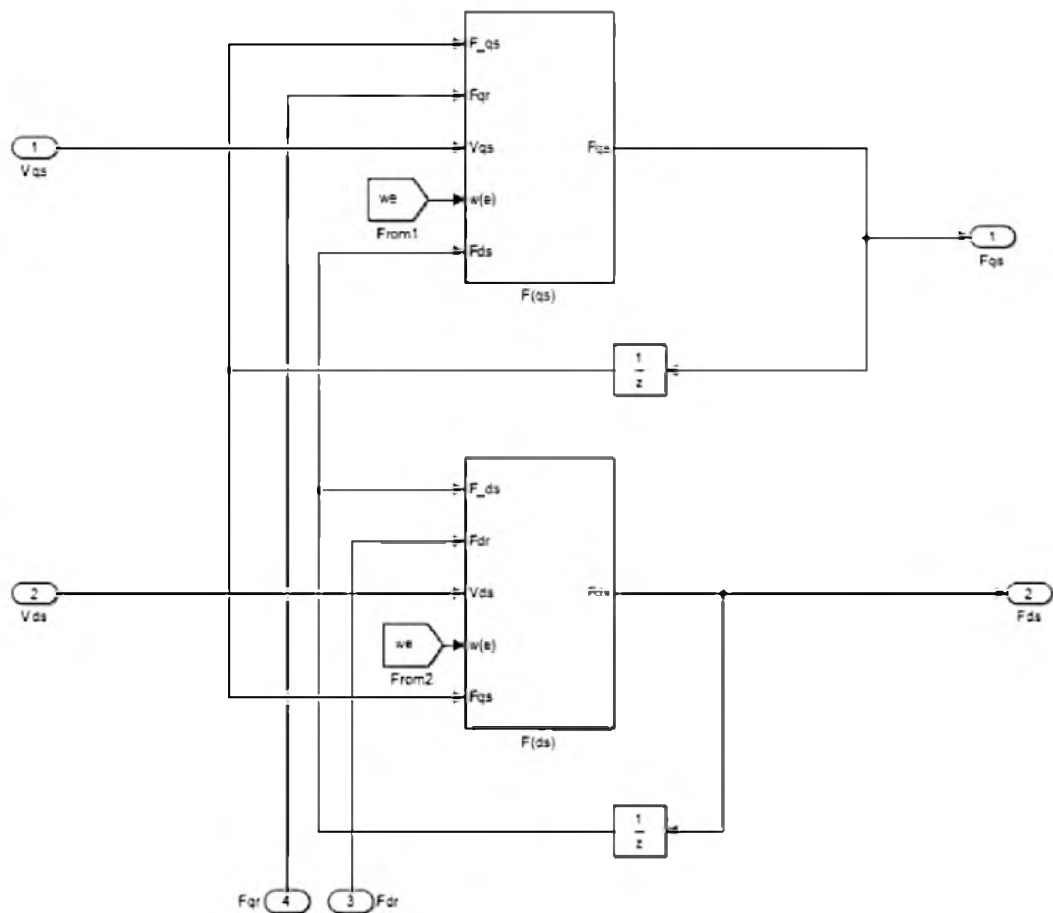


Рисунок 4.12 – Підсистема, що ілюструє потокозчеплення у статорних обмотках (Stator Flux)

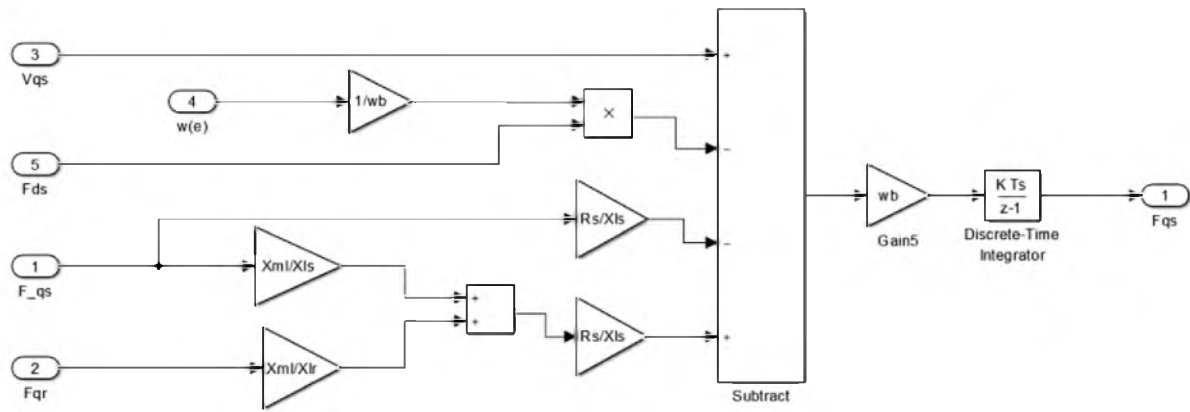


Рисунок 4.13 – Підсистема, що здійснює розрахунки потокозчеплення у статорних обмотках (Stator Flux)

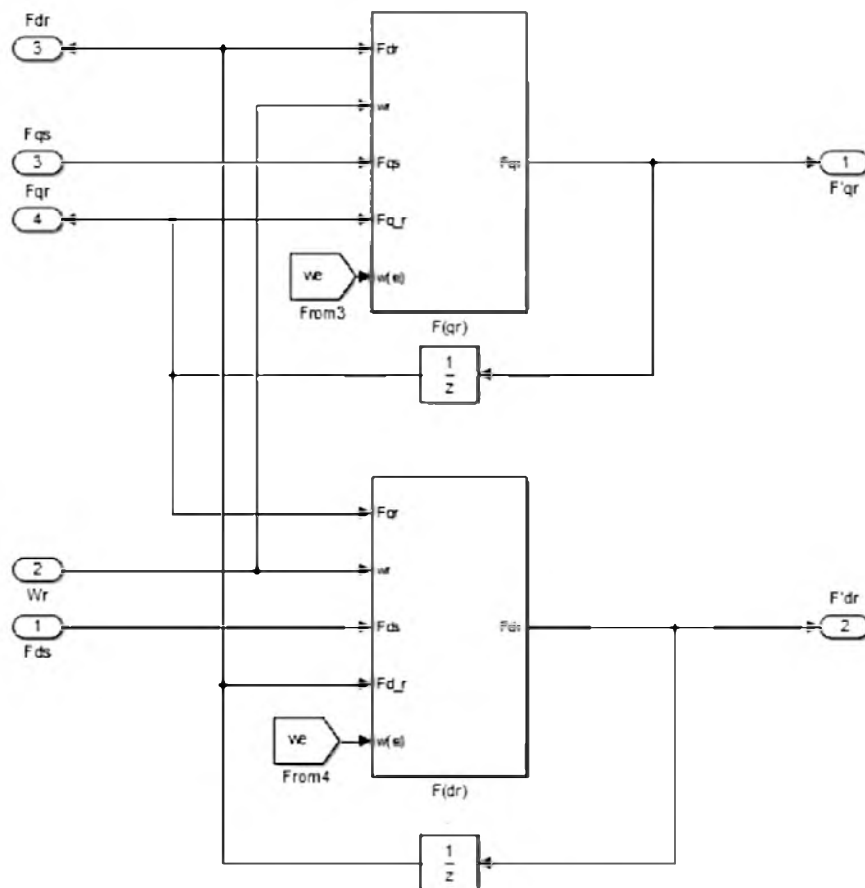


Рисунок 4.14 – Підсистема, що ілюструє потокозчеплення у роторних обмотках (Rotor Flux)

Розрахунок взаємної індукції між статором і ротором відбувається у підсистемі «Mutual Flux» (рис. 4.16) [19].

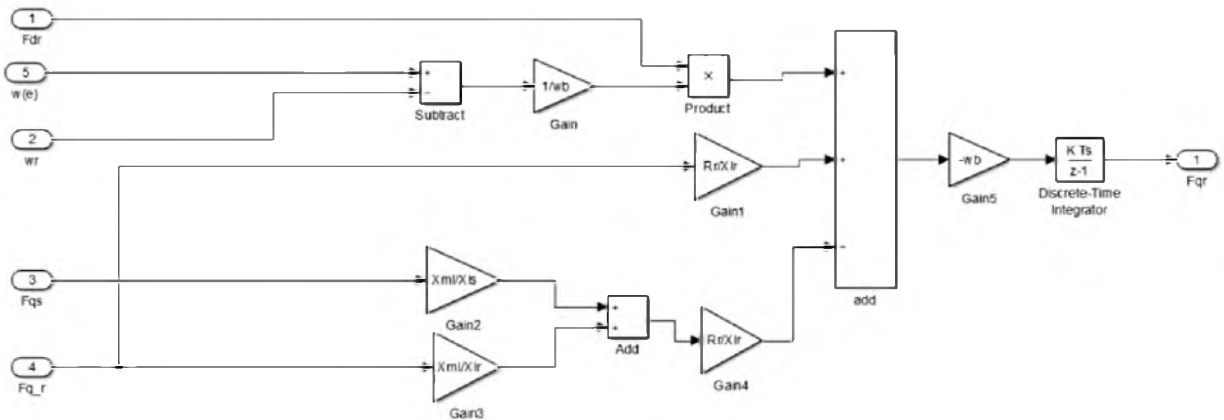


Рисунок 4.15 – Підсистема, що здійснює розрахунки потокозчеплення у роторних обмотках (Rotor Flux)

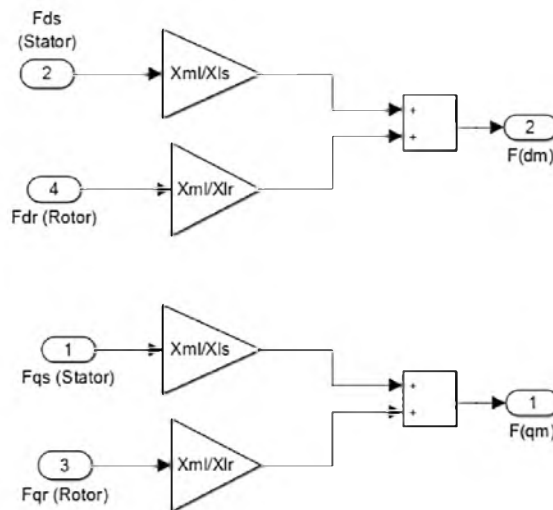


Рисунок 4.16 – Підсистема, що здійснює розрахунок взаємної індукції між статором і ротором (Mutual Flux)

Здійснені попередньо перетворення та розрахунки дозволяють нам визначити значення струмів статора і ротора, що відбувається у блоці «Calculate Stator & Rotor Current» (рис. 4.17) [19].

Раніше, для струмів ми здійснили перетворення з нерухомої трифазної системи координат (abc) у рухому двофазну (dq). Тепер, для зручності спостережень за станом системи, необхідно здійснити зворотне перетворення струмів. Дана операція відбувається у підсистемі «Stator Current dq to abc» (рис. 4.18) [19].

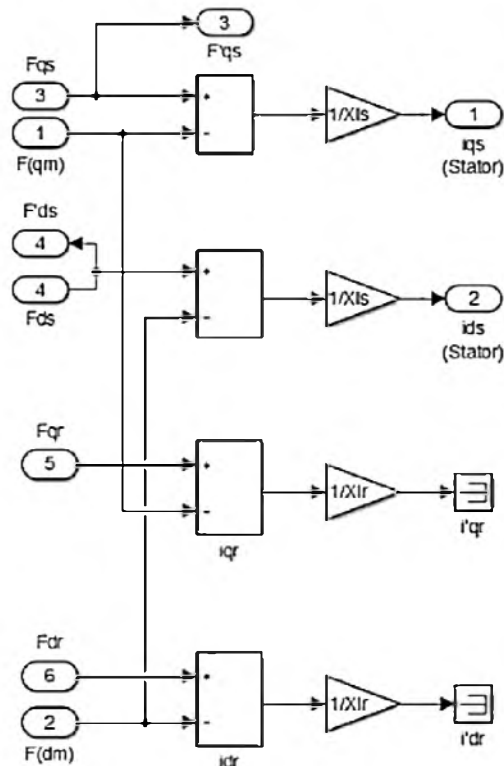


Рисунок 4.17 – Блок розрахунків значень струмів статора і ротора (Calculate Stator & Rotor Current)

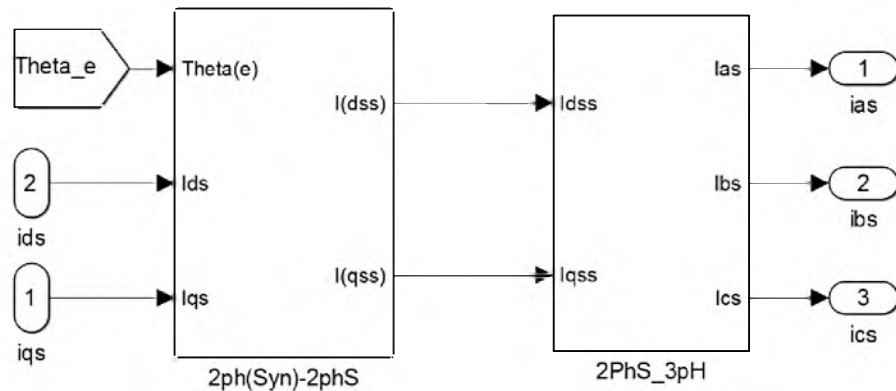


Рисунок 4.18 – Підсистема, що здійснює зворотне перетворення струмів рухомої двофазної (dq) у нерухому трифазну (abc) систему координат (Stator Current dq to abc)

Підсистеми, що містять алгоритми розрахунків представлено на рис. 4.19, 4.20 [19].

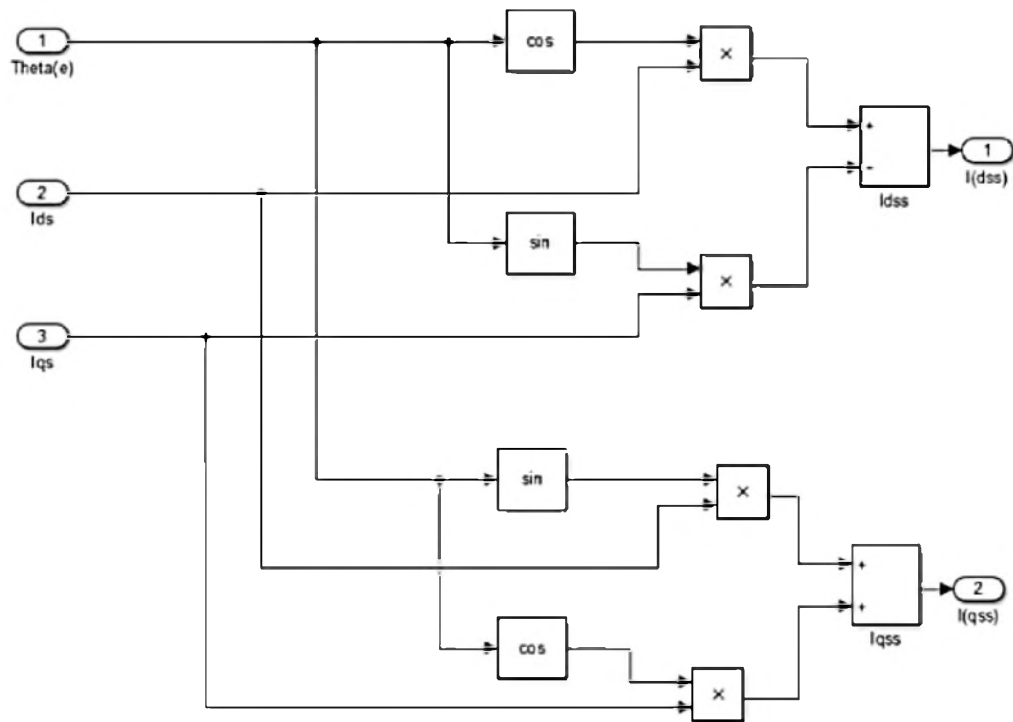


Рисунок 4.19 – Склад підсистеми зворотного перетворення з урахуванням обертання ($2\text{ph}(\text{Syn})\text{--}2\text{phS}$)

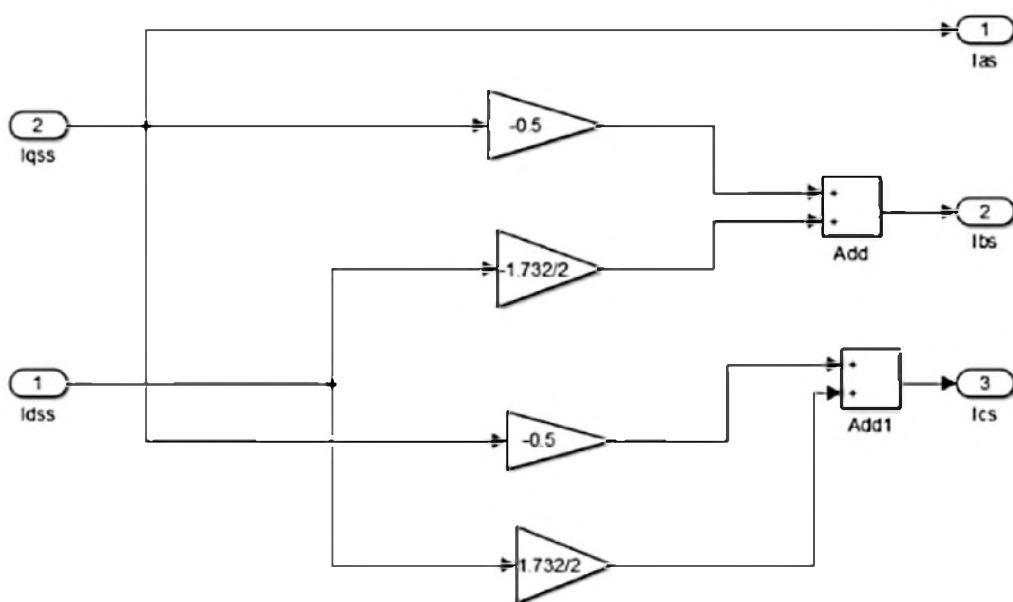


Рисунок 4.20 – Склад підсистеми зворотного перетворення з двофазної системи у трифазну ($2\text{PhS}\text{--}3\text{ph}$)

Обчислення електромагнітного крутного моменту за результатами попередніх розрахунків здійснюється у блоці «Electromagnetic_Torque», склад якого наведено на рис. 4.21 [19].

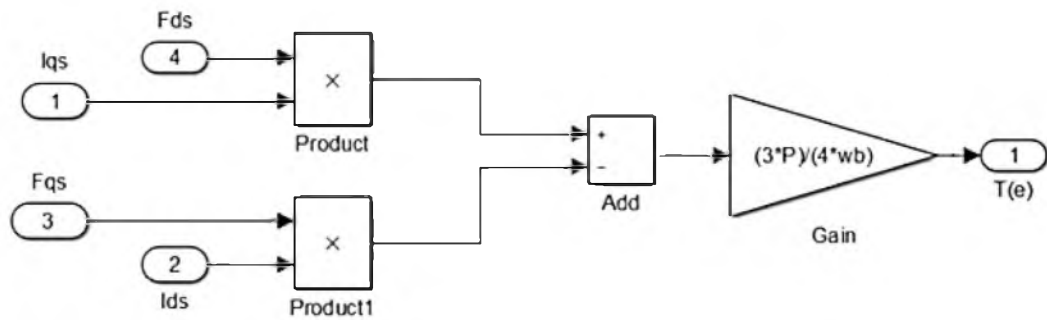


Рисунок 4.21 – Склад блоку для обчислення електромагнітного крутного моменту (Electromagnetic Torque)

За результатами моделювання отримаємо графічні залежності, що ілюструють зміну контрольованих параметрів (рис. 4.22) [19].

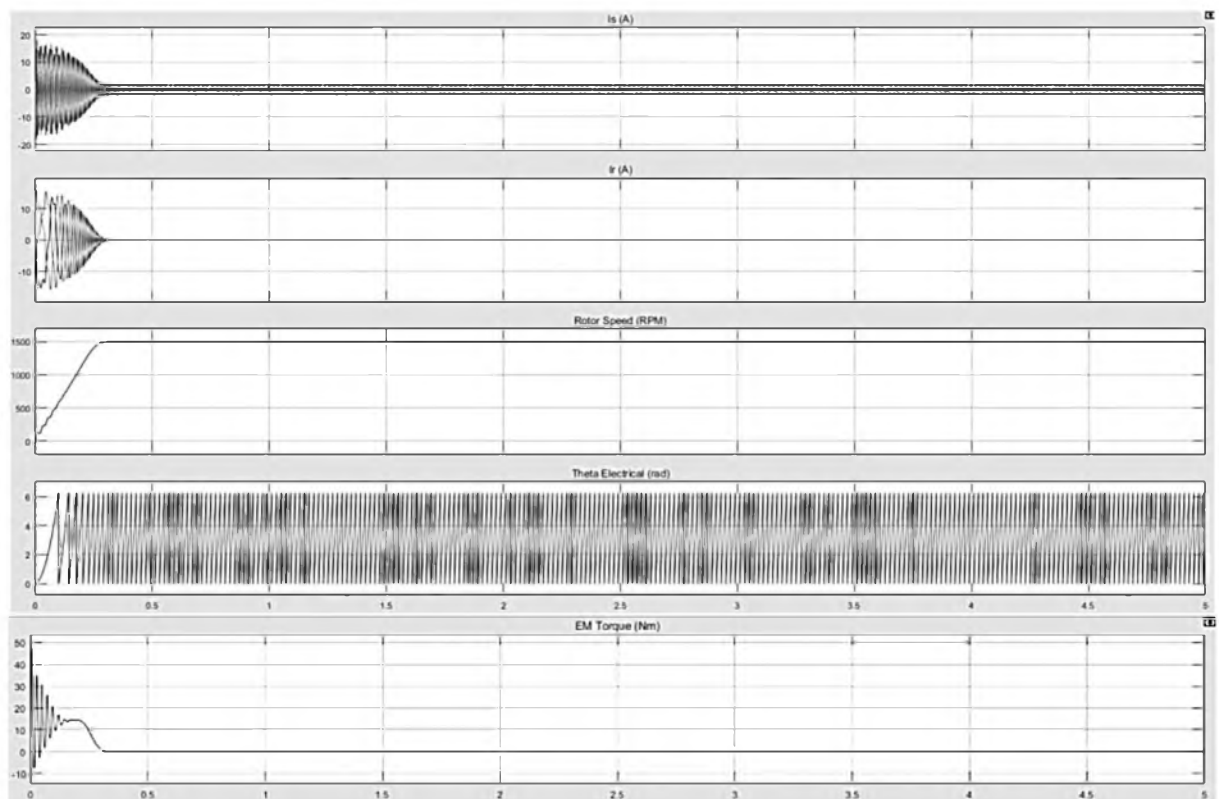


Рисунок 4.22 – Результати моделювання за симетричного номінального навантаження: а) струм в обмотках статора, б) струм в стрижнях ротора, в) частота обертання ротора, г) зміна значення електричного кута, д) електромагнітного моменту

Шляхом збільшення певної області на часовій шкалі можна збільшити масштаб зміни контрольованої величини та побачити сплески значень, що свідчатимуть про наявність несправності (рис. 4.23).

Змоделюємо несправність – ушкодження стрижня короткозамкненого ротора, форма графіків зміниться (рис. 4.24).

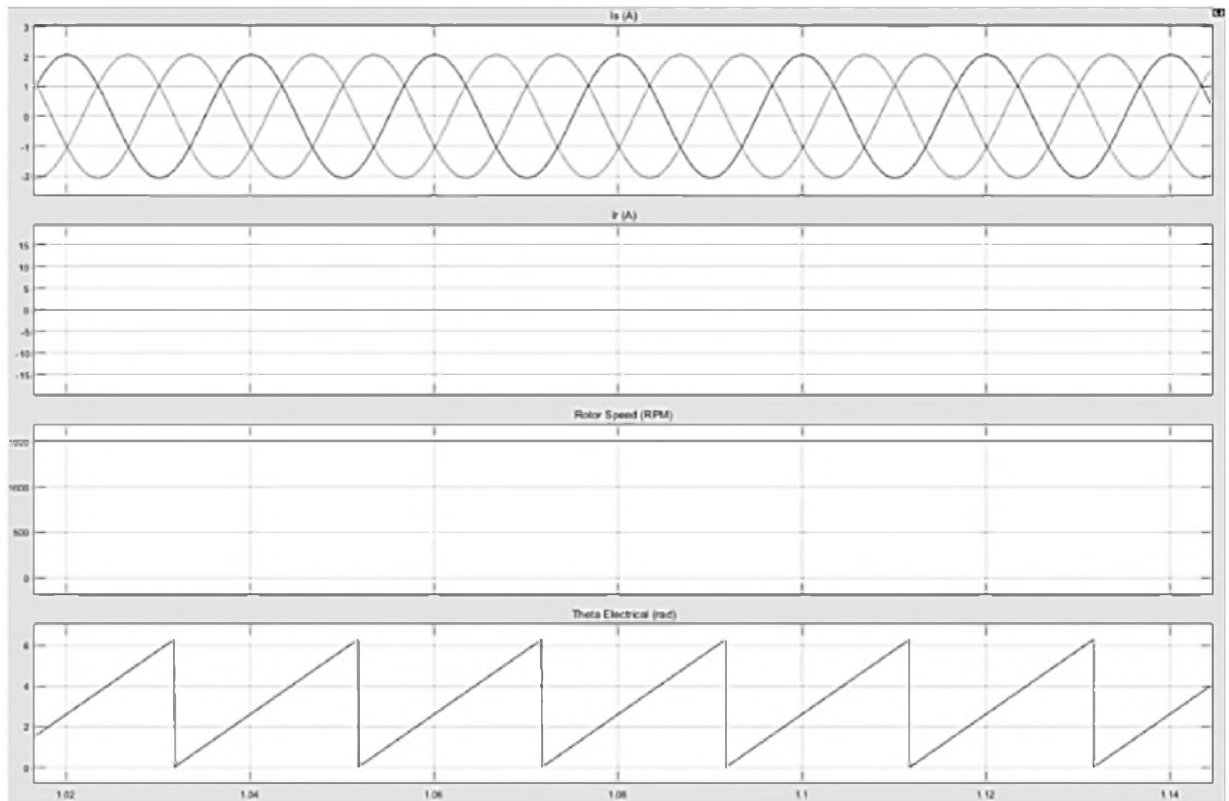


Рисунок 4.23 – Масштабування графіків, представлених на рис. 4.22

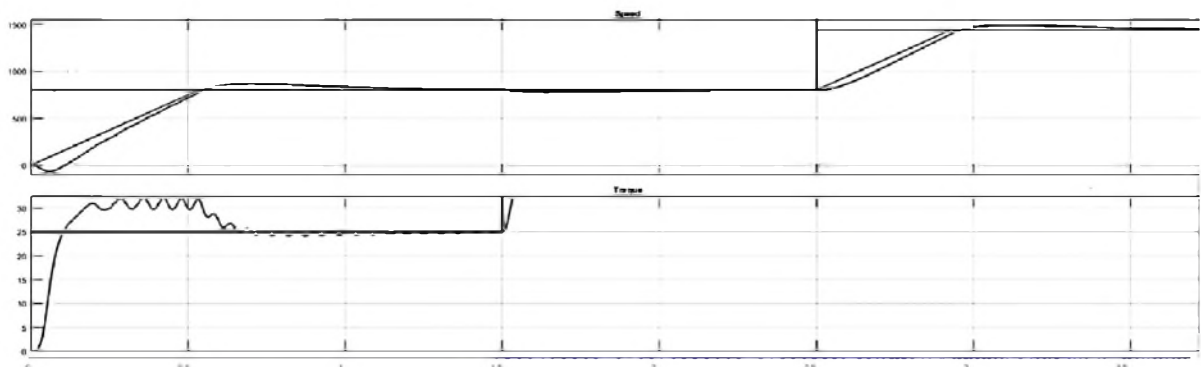


Рисунок 4.24 – Ілюстрація відхилення контрольованих параметрів у разі наявності несправності (ушкодження стрижня ротора)

Складена комп'ютерна модель дозволяє моделювати різноманітні процеси, що відбуваються у асинхронному двигуні як в усталених, так і в перехідних режимах, при постійному або змінному навантаженні, при відсутності та за наявності несправності у тих чи інших елементах двигуна. Запропонована модель дозволяє здійснювати дослідження шляхом розрахунку, запису та демонстрації зміни у часі величини напруги, струму, електромагнітного моменту та частоти обертання. Модель дозволяє узгодити результати моделювання з реальними асинхронними машинами та дозволяє здійснити оцінку параметрів роботи двигуна та моніторинг його стану.

4.4 Створення комплексу для моніторингу стану асинхронного двигуна

Моніторинг роботи асинхронного двигуна полягає у збиранні, обробці, збереженні та відображенні тієї інформації, яка відображає поточний його роботи під впливом внутрішніх (несправності) та зовнішніх (навантаження) впливів. При цьому необхідно передбачити можливість ідентифікації несправності та визначити прийоми і методи виробки рекомендацій для усунення даного впливу або для прийняття керуючих рішень.

Моніторинг роботи асинхронного двигуна у теперішній час найчастіше реалізується за допомогою автоматичних апаратних комплексів, алгоритм роботи яких можна визначити за послідовністю, наведену на рис. 4.25 [21].



Рисунок 4.25 – Алгоритм роботи автоматичних апаратних комплексів для моніторингу стану роботи асинхронного двигуна

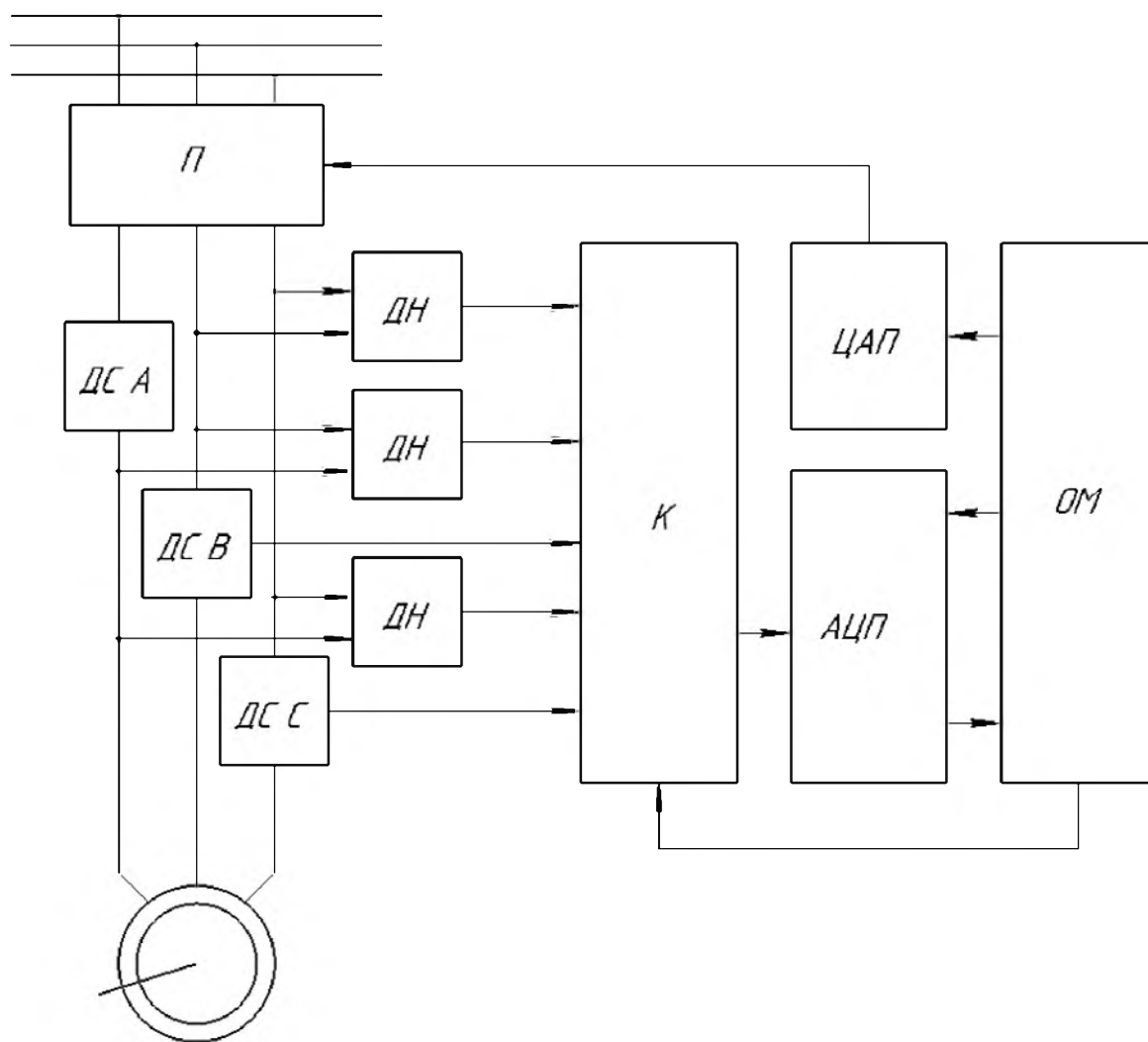
Здійснення повноцінного моніторингу стану роботи двигуна ускладнюється чинниками взаємного впливу багатьох досліджуваних параметрів один на одного, випадковістю виникнення тих чи інших станів та зовнішніх впливів, значний об'єм інформації, необхідність у складних обчислюваннях, вимога застосування точних контрольних пристроїв та дотримання вимог точності.

При здійсненні моніторингу стану двигуна відбувається постійне вимірювання визначених параметрів його роботи та порівняння з номінальними значеннями зазначених величин, визначення розходжень і порівняння цих розходжень з припустимими. Остаточню формується і виводиться зручним для сприйняття методом інформація про поточний стан, особливо якщо він є аварійним або предаварійним.

У якості «визначених» параметрів роботи асинхронного двигуна виступають: струми, напруги, частота обертання, електромагнітний крутний момент, спожита електрична потужність, тепловий стан окремих

елементів, вібраційні коливання, шумові ефекти. Контроль даних параметрів відбувається за допомогою різноманітних датчиків та вимірювальних приладів [21].

На рис. 4.26 наведено схему апаратного комплексу для моніторингу стану роботи асинхронного двигуна.



П – перетворювач, *ДС А*, *ДС В*, *ДС С* – датчики стуму, *ДН* – датчики напруги, *К* – контролер, *АЦП* – аналого-цифровий перетворювач, *ЦАП* – цифро-аналоговий перетворювач, *ОМ* – обчислювальна машина

Рисунок 4.26 – Функціональна схема апаратного комплексу для моніторингу стану роботи асинхронного двигуна

Перевагами даної схеми є її швидкодія, функціональність, простота, надійність, мінімальна кількість реєструючих засобів, можливість досягнення зазначеної точності здійснення моніторингу.

По кожному з каналів передається інформація про стан контрольованих параметрів та визначається частотний склад струмів та напруг, які визначають стан роботи асинхронного двигуна.

ВИСНОВКИ

Надійна та безперебійна робота асинхронних двигунів можлива лише за умови здійснення постійного моніторингу їх станів.

Отримати точні відомості про наявність несправностей було метою виконання даної роботи. Так, були проведені дослідження та розробки системи моніторингу стану асинхронного двигуна.

У роботі були визначені чинники, що викликають появу несправностей та визначено основні види цих несправностей.

На шляху до досягнення поставленої мети були створені математичні та комп'ютерні моделі асинхронних двигунів з урахуванням процесів, що в них протікають. Математичні моделі засновані на чисельних комплексних методах і вимагають використання значних обчислювальних потужностей та тривалого часу моделювання.

На принципи здійснення моделювання значним чином впливає вибір засобів моделювання та техніка проведення моделювання. При створенні моделі у основу, крім основних виконуваних функцій, намагався забезпечити баланс між точністю та часом обчислень на основі гібридного підходу.

Створені моделі дозволяють визначити наявність несправності шляхом аналізу окремих параметрів роботи. Про їх наявність свідчить порушення форми коливального перехідного процесу, які відсутні у при нормальній роботі.

Дослідження, аналіз і результати, представлені в роботі, доводять ефективність методу комп'ютерних моделей при діагностиці несправностей асинхронного двигуна.

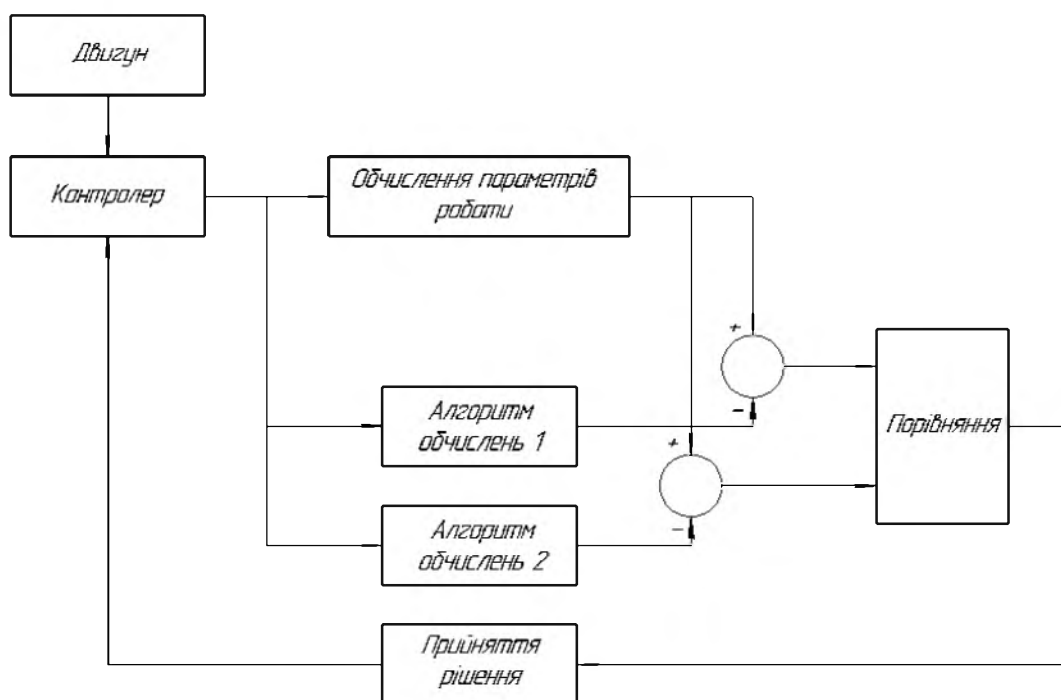
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Андрієнко В.М., Куєвда В.П. Электричні машини: Навч. посіб. – К.: НУХТ, 2010. – 366 с.
2. Гемке Р.Г. Неисправности электрических машин. Под ред. Р.Б. Уманцева. – 9-е изд., перераб. и доп. – Л.: Энергоатомиздат, Ленингр. отделение, 1989. – 336 с.
3. Петухов В.С. Диагностика состояния электродвигателей. Метод спектрального анализа потребляемого тока / В.С. Петухов, В.А. Соколов // Новости электротехники. – 2005. – № 1(31). – с. 50-52.
4. M.Y. Chow, B. Li and G. Goddu, Intelligent Motor Fault Detection, in Intelligent Techniques in Industry. L.C. Jain, Ed.: CRC Press, 1998.
5. Диагностика стержней двухклеточных и глубокопазных короткозамкнутых роторов асинхронных двигателей / В.Ф. Сивокобыленко, Д.И. Кузьменко, С.П. Яременко // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: «Електротехніка і енергетика», випуск 10 (180). – Донецьк: ДВНЗ «ДонНТУ», 2011. – с. 4-8.
6. Черный А.П., Родькин Д.И., Калинов А.П., Воробейчик О.С. Мониторинг параметров электрических двигателей электромеханических систем: Монография. – Кременчуг: ЧП Щербатых А.В., 2008. – 246 с.
7. Вольдек А.И., Попов В.В. Электрические машины. Машины переменного тока: Учебник для вузов. – СПб.: Питер, 2010. – 350 с.
8. Мусин А.М. Аварийные режимы асинхронных электродвигателей и способы их защиты / А.М. Мусин– М.: Колос, 1979. – 112 с.
9. Maciej Gołębiowski. Atlas uszkodzeń silników elektrycznych indukcyjnych wysokiego napięcia. Politechnika Warszawska, wydział Elektryczny Instytut Maszyn Elektrycznych. Praca Zakładu Maszyn Elektrycznych dydaktyczna nr. 1/2002.

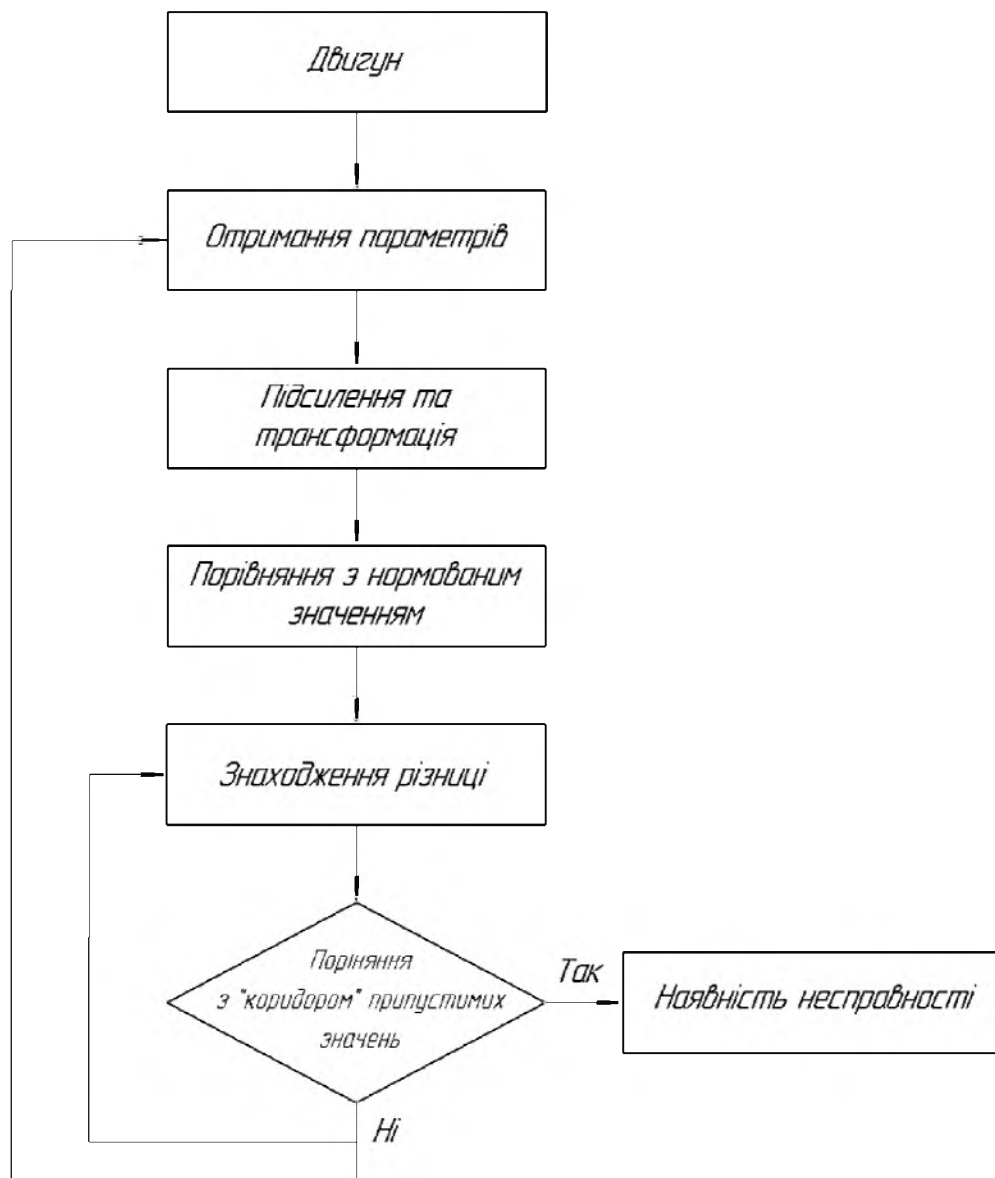
10. Черный А.П. Особенности организации и технического обеспечения мониторинга двигателей промышленных электроприводов // Вестник Харьковского государственного политехнического университета. «Проблемы электропривода. Теория и практика». – Харьков: ХГПУ. – 1998. – Спец. вып. – С. 353-358.
11. Копылов И.П., Клоков Б.К., Морозкин В.П., Токарев Б.Ф. Проектирование электрических машин. Учебное пособие для вузов. 3-е изд., испр. и доп. – М.: Высш. шк., 2002. – 757 с.
12. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://vse-e.com/provod-petv-2>
13. Сивокобыленко В.Ф. Математическое моделирование в электротехнике и энергетике: Науч. пособие / Сивокобыленко В.Ф. – Донецк: РВА ДонНТУ, 2005. – 350 с.
14. Черный А.П. Методология мониторинга электрических двигателей в промышленных сетях // Тр. 5-ой Междунар. конф. «Проблемы электропривода». Харьков: Основа, 1997. – С. 291-294.
15. A. Ah-Jaco et al., "Modelling of the three phase asynchronous motor. Application to magnetic faults diagnostic," Proceedings of the 1998 International Conference on Electrical Machines, Istanbul (Turkey), vol. 1, pp. 443-447.
16. A. Stefani, F. Filippetti, A. Bellini, "Diagnosis of induction machines in time-varying conditions", IEEE Trans, Ind. Electron., vol. 56, no. 11, pp. 4548-4556, Nov. 2009.
17. P. Tavner, L. Ran, J. Penmann, H. Sedding. Condition Monitoring of Rotating Electrical Machines. The Institution of Engineering and Technology. London, UK, 2008.
18. Дьяконов В. VisSim+Mathcad+MATLAB. Визуальное математическое моделирование. М.: Солон-Пресс, 2004. – 384 с.
19. Черных И.В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB. SimPowerSystems и Simulink. – М.: ДМК Пресс, 2007. – 288 с.

20. Чабан В.Й. Математичне моделювання електромеханічних процесів: навч. посіб. / В. Й. Чабан. – Львів: Львівська політехніка, 1997. – 341 с.
21. А.П. Черный, Д.И. Родькин А.П. Калинов, О.С. Воробейчик. Мониторинг параметров электрических двигателей электромеханических систем: Монография. – Кременчуг: ЧП Щербатых А.В., 2008. – 246 с.
22. Сибикин Ю.Д., Сибикин М.Ю. Техническое обслуживание, ремонт электрооборудования и сетей промышленных предприятий. – М.: ИРПО; Изд. Центр «Академия», 2000.
23. Правила безопасной эксплуатации энергоустановок. – Киев, 1998. – 142 с.
24. Долин П.А. Основы техники безопасности в электроустановках. – М.: Энергия, 1979. – 408 с.

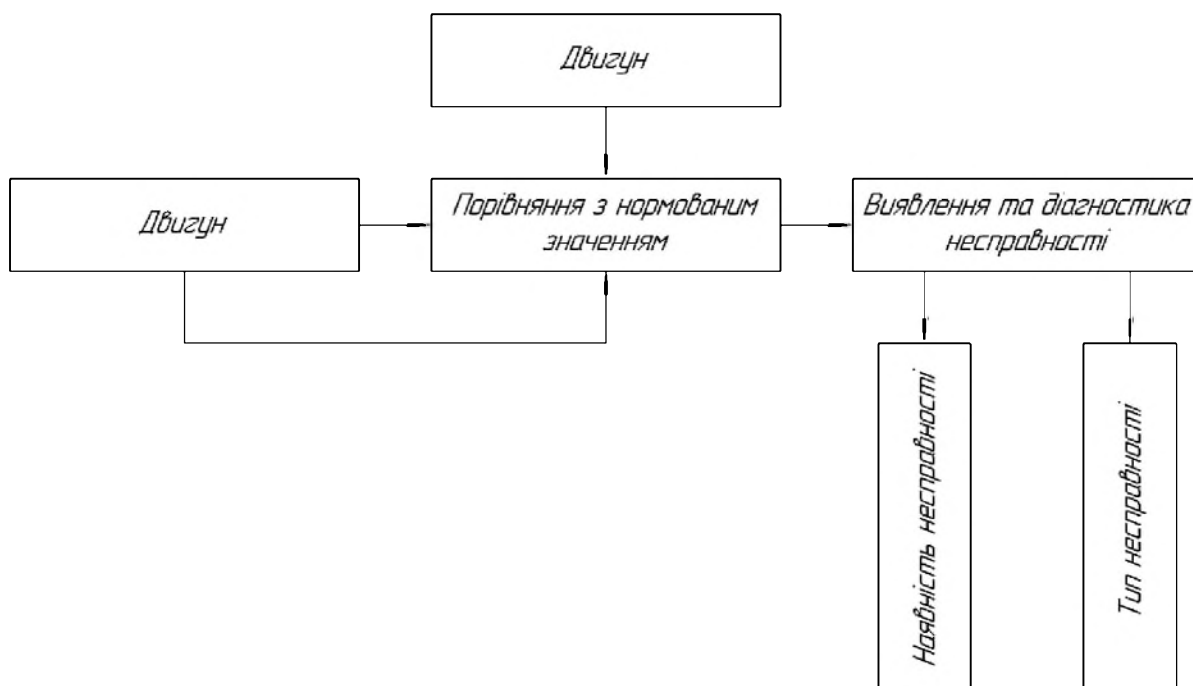
ДОДАТОК А. ГРАФІЧНА ЧАСТИНА



Загальна структура системи моніторингу з використанням моделей у якості алгоритмів обчислень



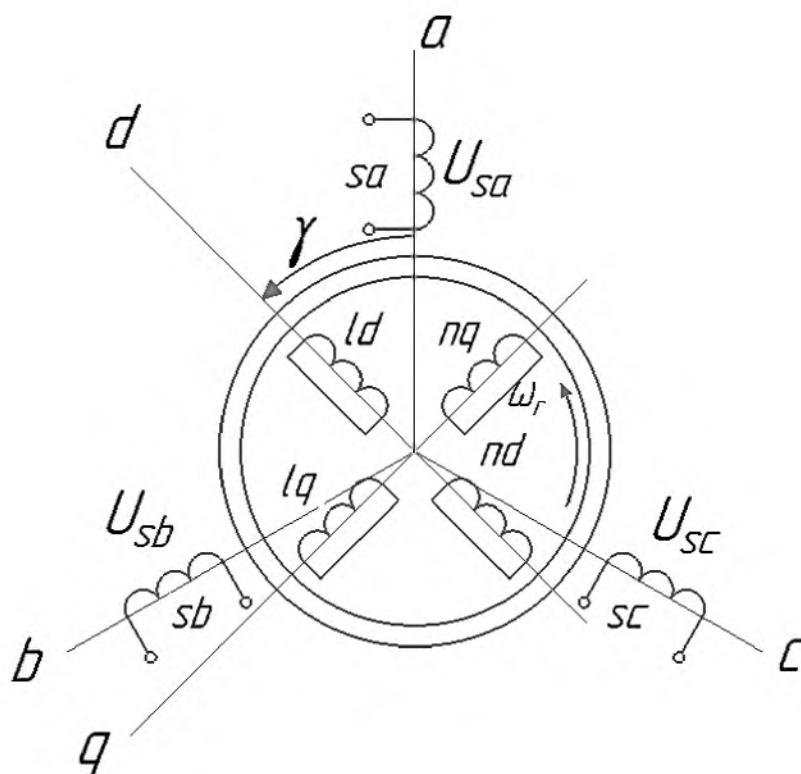
Алгоритм визначення несправностей, який покладено в основу роботи моделі



Алгоритм визначення несправностей, який засновано на перевірці визначених параметрів



Алгоритм роботи автоматичних апаратних комплексів для моніторингу стану роботи асинхронного двигуна



Електромагнітна схема двигуна у стаціонарних координатах

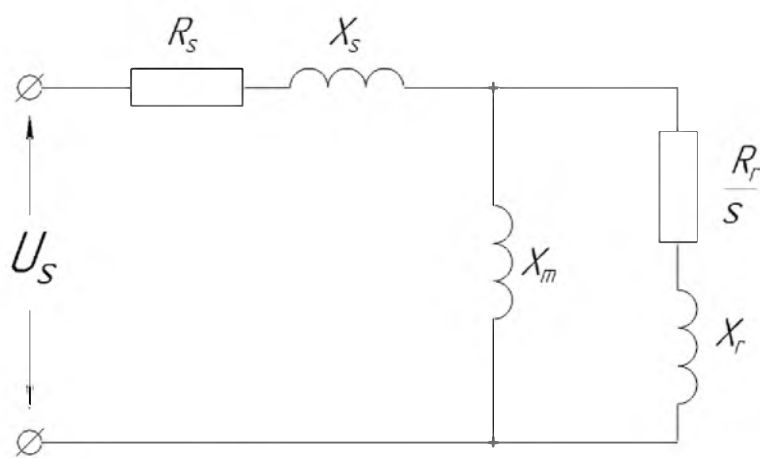
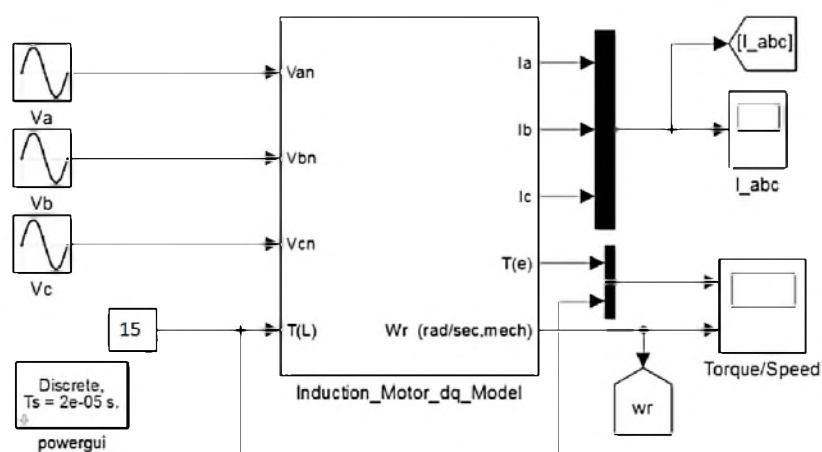
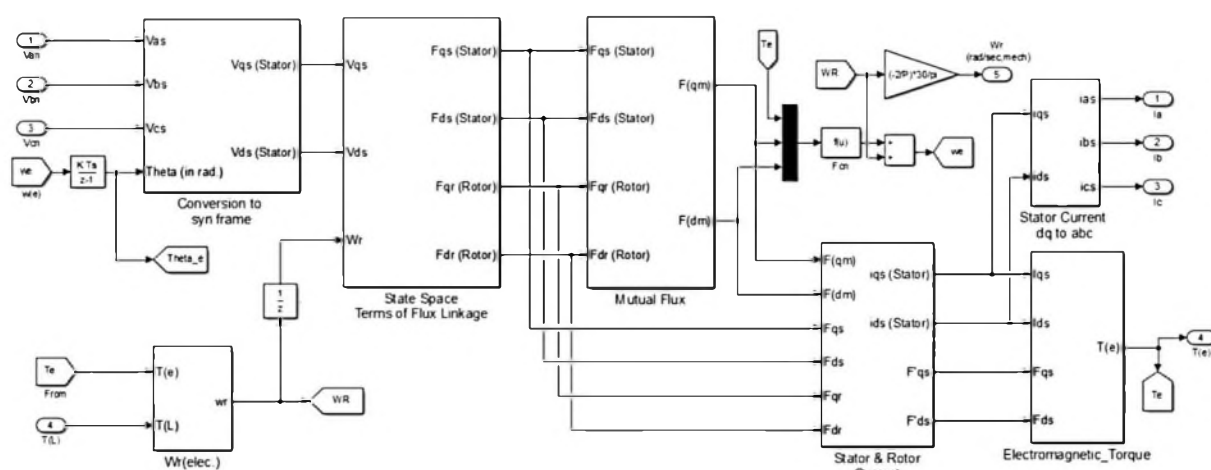


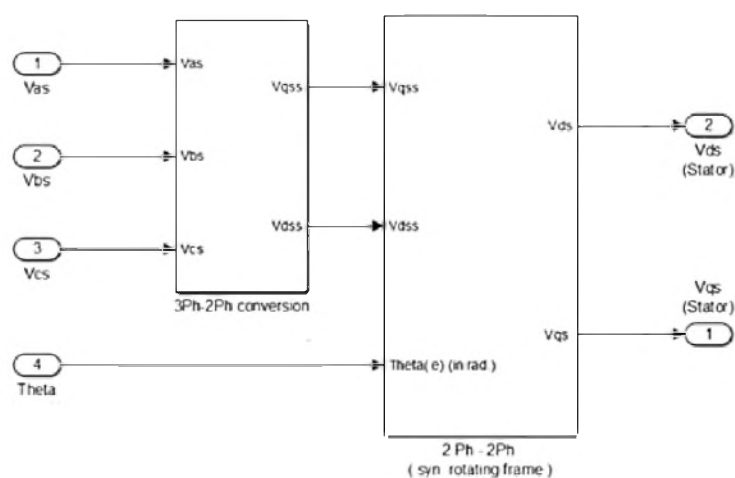
Схема заміщення асинхронного двигуна



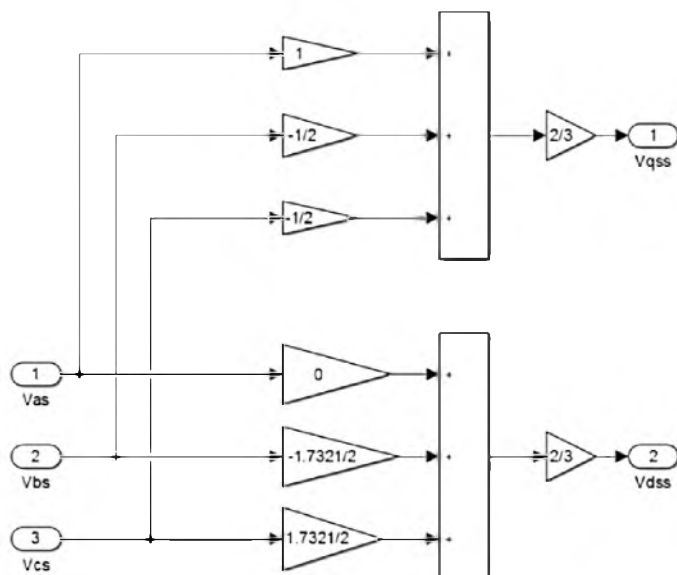
Модель підключення асинхронного двигуна до джерела синусоїдної напруги



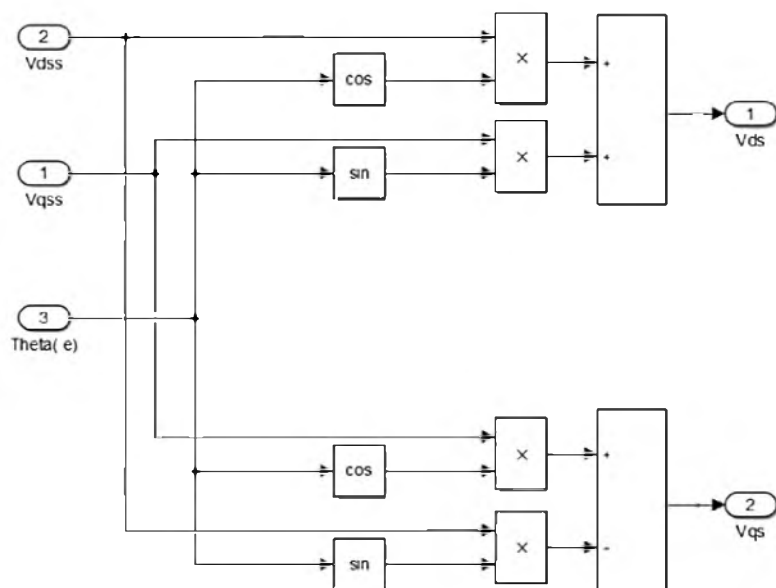
Модель асинхронного двигуна (Induction Motor dq Model)



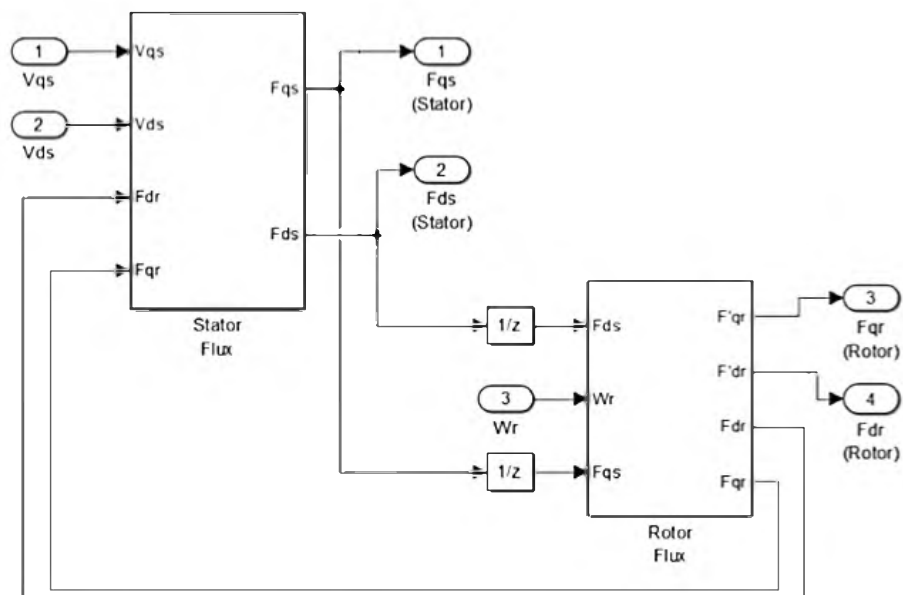
Склад підсистеми перетворення у обертальну синхронну систему «dq» (Conversion to syn frame)



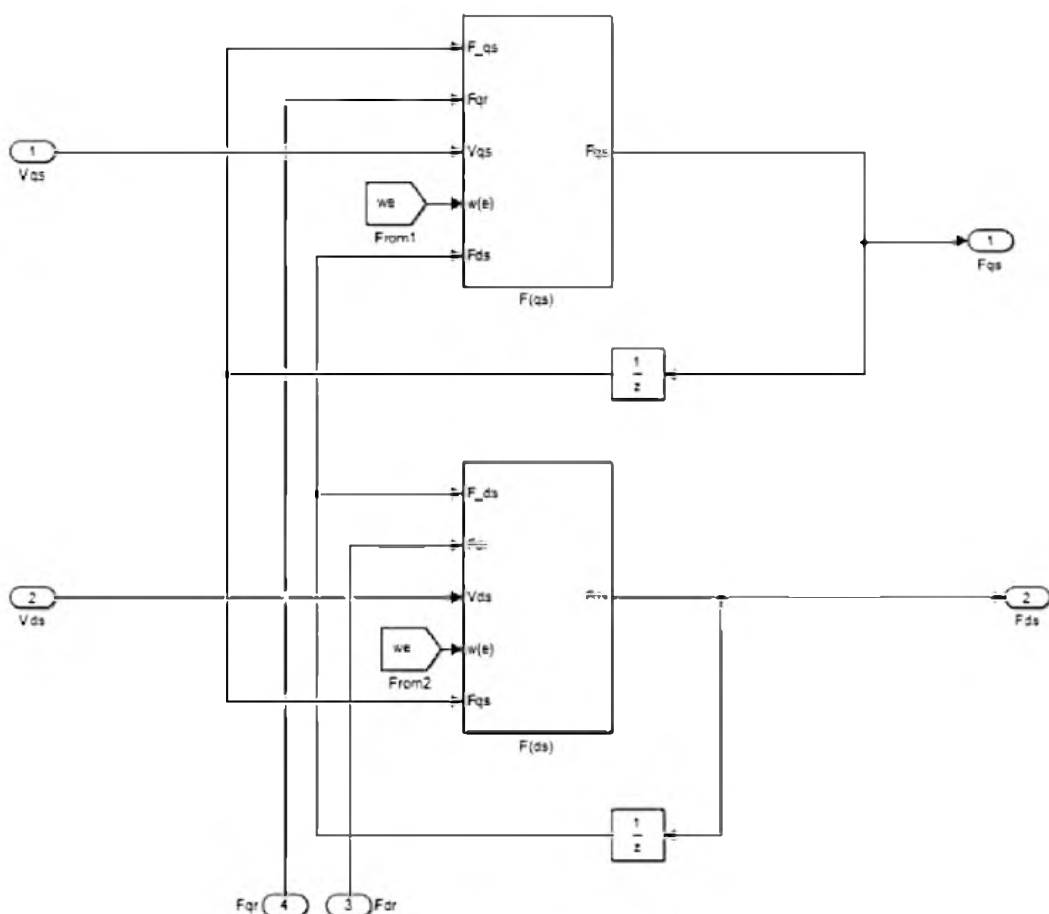
Склад підсистеми безпосереднього перетворення трифазної системи у двофазну (3Ph-2Ph conversion)



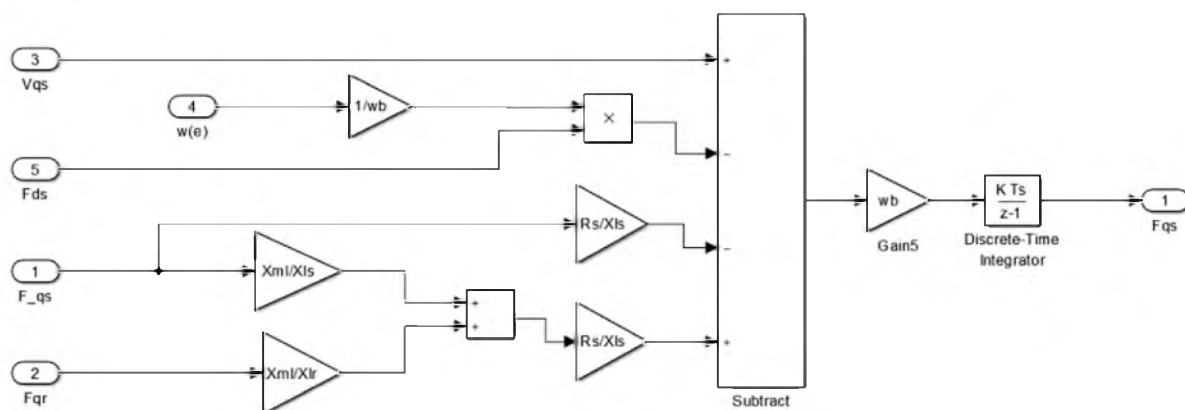
Склад підсистеми безпосереднього перетворення двофазної системи з урахуванням функції обертання (2Ph-2Ph syn Totaling frame)



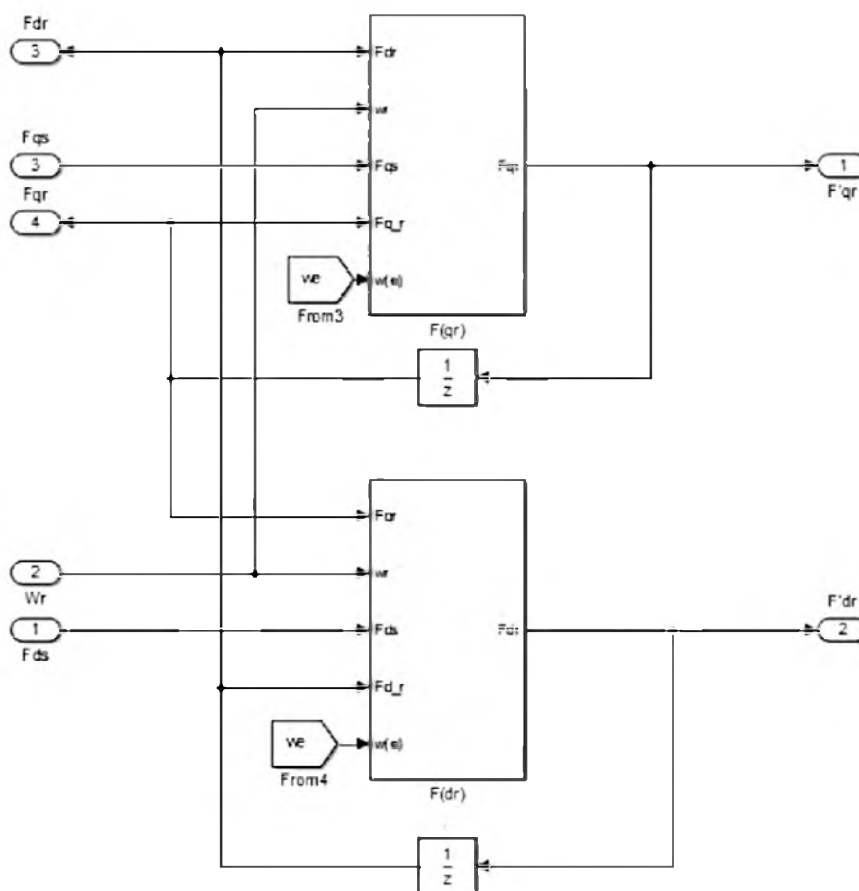
Склад підсистеми для впровадження залежностей потокозчеплення (State Space Terms of Flux Linkage).



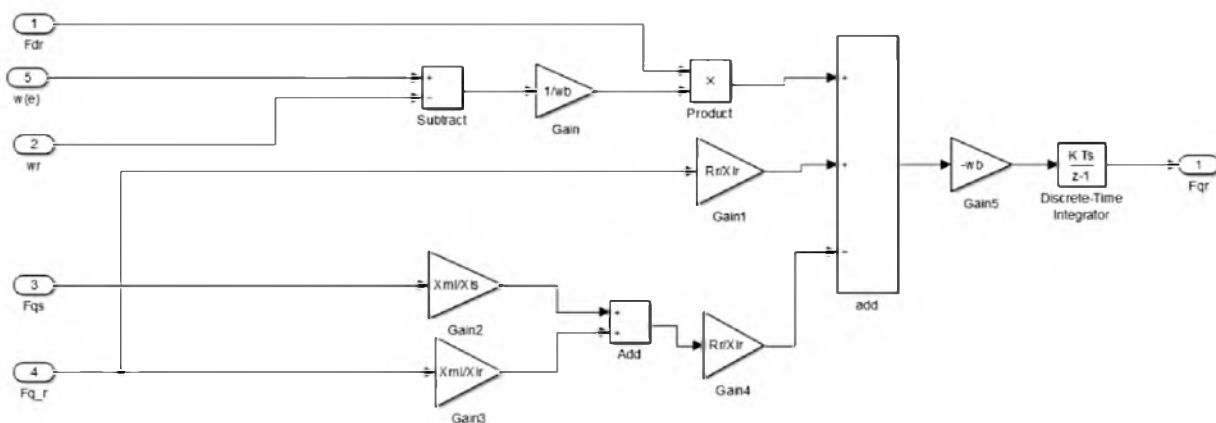
Підсистема, що ілюструє потокозчеплення у статорних обмотках (Stator Flux)



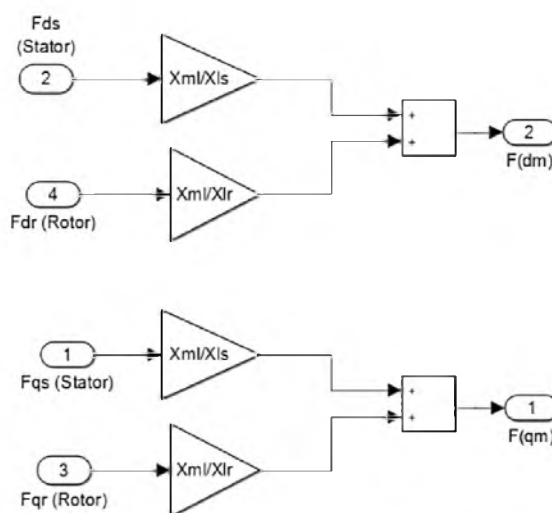
Підсистема, що здійснює розрахунки потокозчеплення у статорних обмотках (Stator Flux)



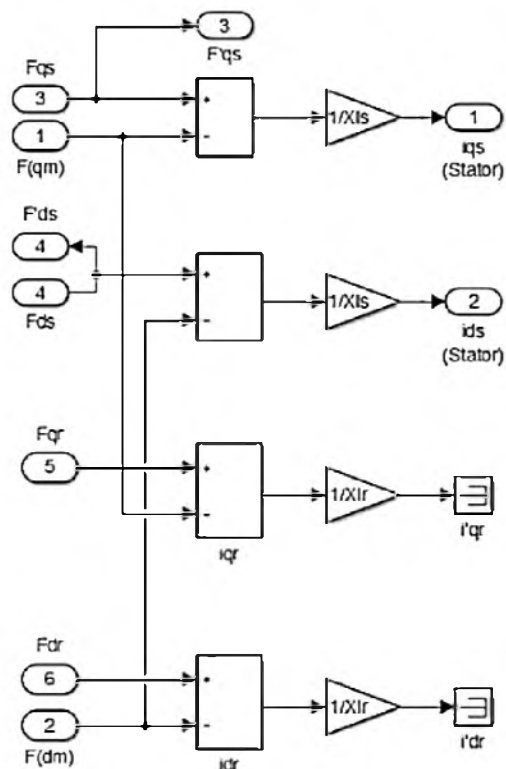
Підсистема, що ілюструє потокозчеплення у роторних обмотках (Rotor Flux)



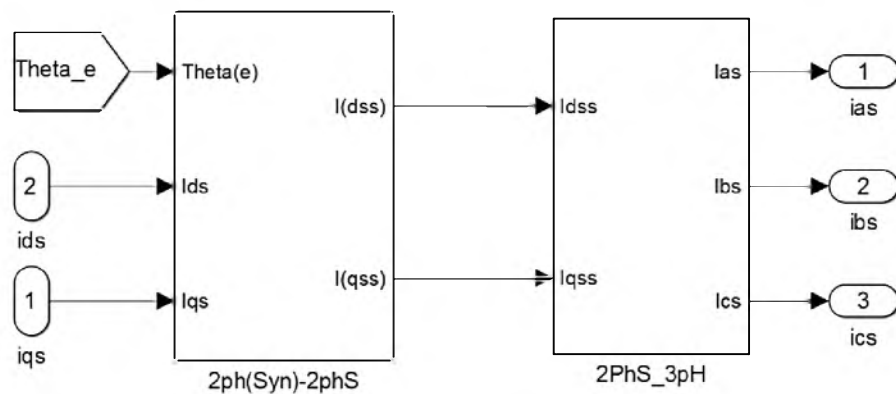
Підсистема, що здійснює розрахунки потокозчеплення у роторних обмотках (Rotor Flux)



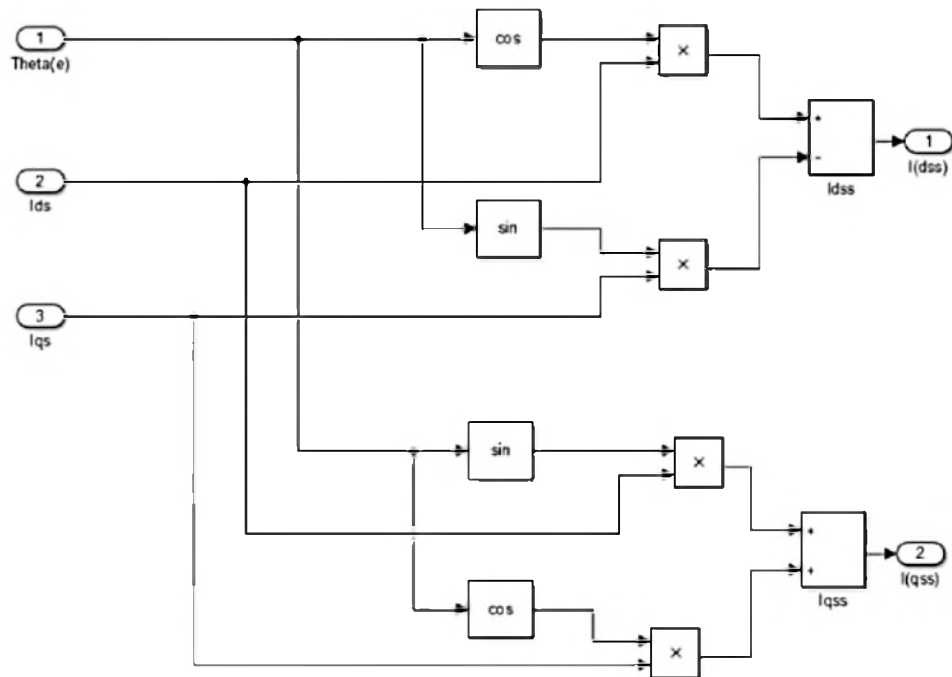
Підсистема, що здійснює розрахунок взаємної індукції між статором і ротором (Mutual Flux)



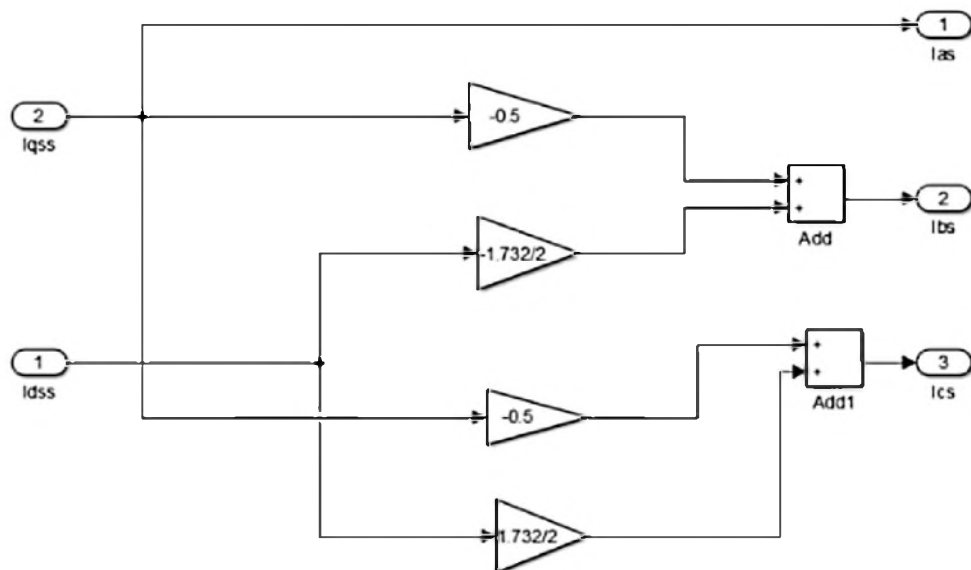
Блок розрахунків значень струмів статора і ротора (Calculate Stator & Rotor Current)



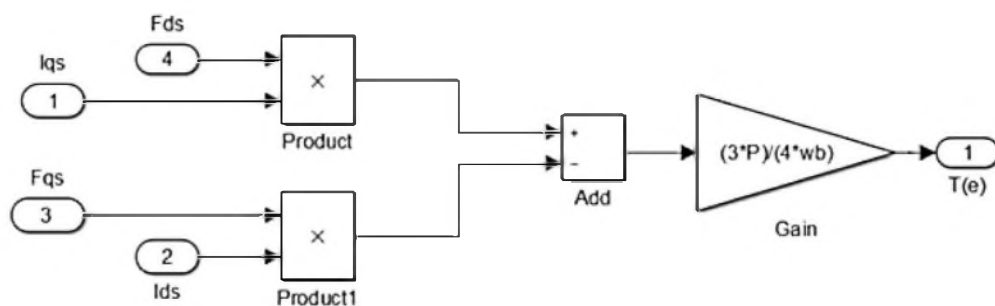
Підсистема, що здійснює зворотне перетворення струмів рухомої двофазної (dq) у нерухому трифазну (abc) систему координат (Stator Current dq to abc)



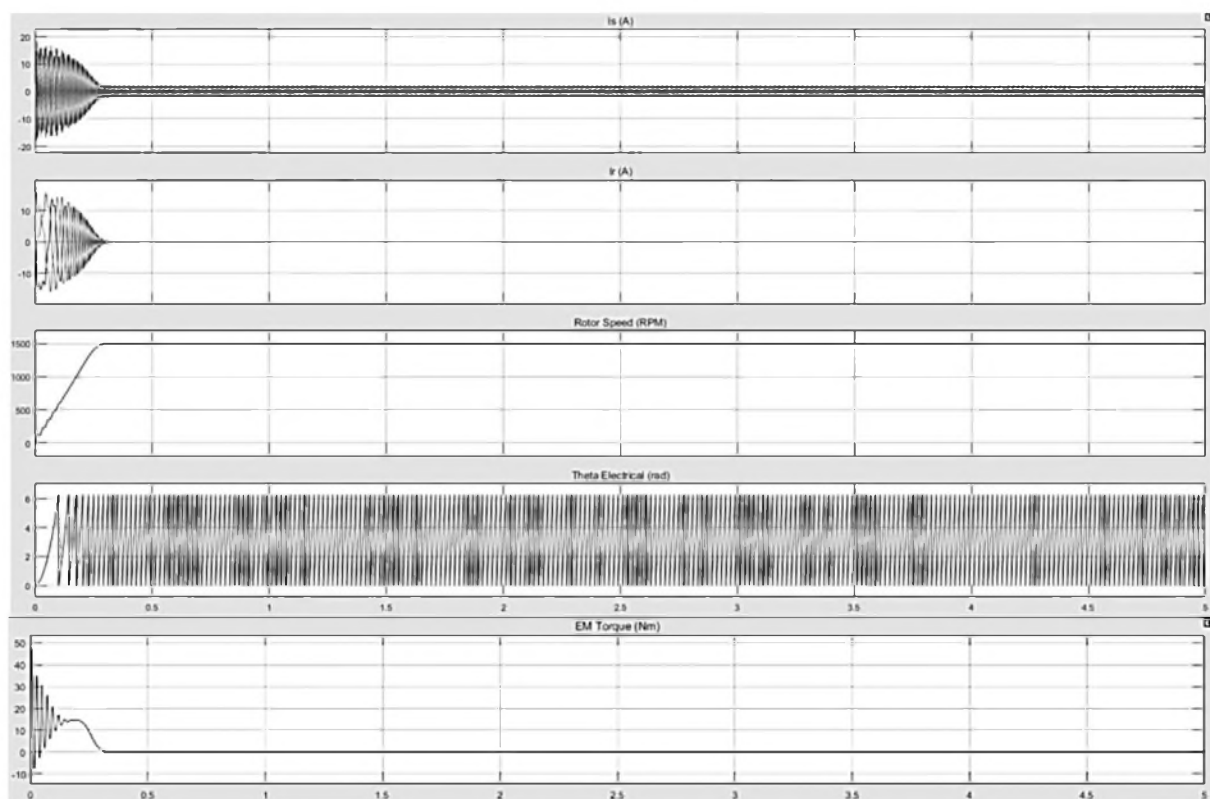
Склад підсистеми зворотного перетворення з урахуванням обертання (2ph(Syn)-2phS)



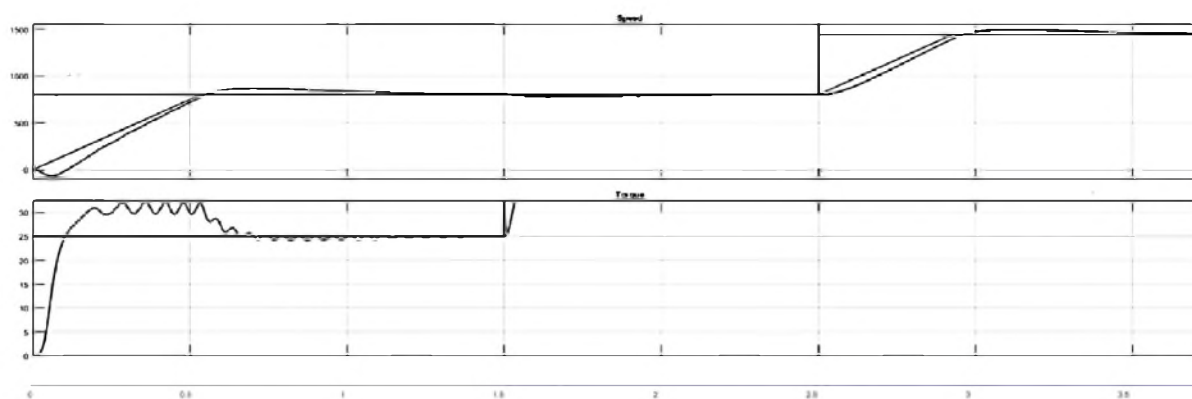
Склад підсистеми зворотного перетворення з двофазної системи у трифазну (2PhS-3pH)



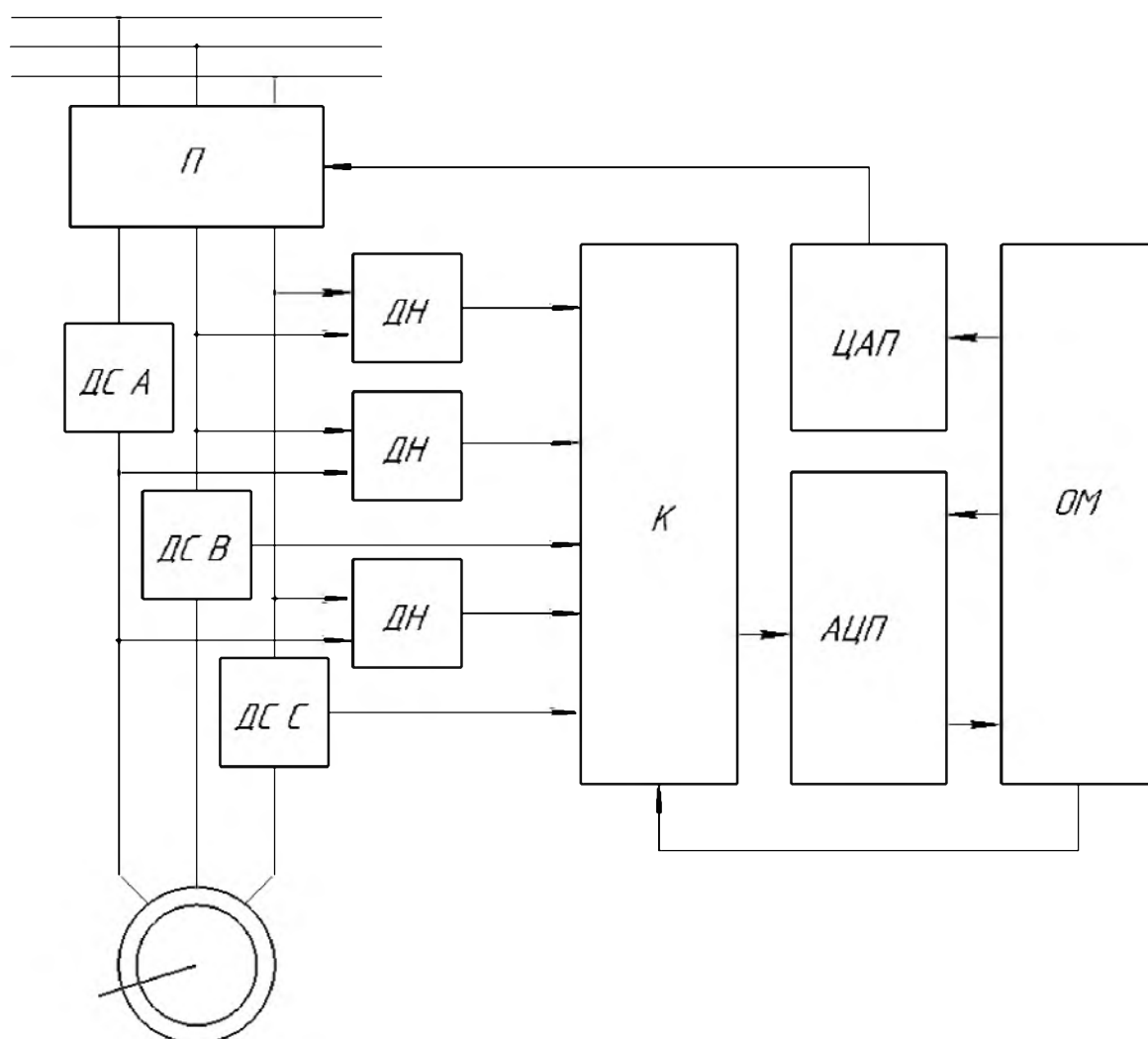
Склад блоку для обчислення електромагнітного крутного моменту (Electromagnetic Torque)



Результати моделювання за симетричного номінального навантаження: а) струм в обмотках статора, б) струм в стрижнях ротора, в) частота обертання ротора, г) зміна значення електричного кута, д) електромагнітний моменту



Ілюстрація відхилення контрольованих параметрів у разі наявності несправності (ушкодження стрижня ротора)



П – перетворювач, ДС А, ДС В, ДС С – датчики струму, ДН – датчики напруги, К – контролер, АЦП – аналого-цифровий перетворювач, ЦАП – цифро-аналоговий перетворювач, ОМ – обчислювальна машина
 Функціональна схема апаратного комплексу для моніторингу стану роботи асинхронного двигуна

ДОДАТОК Б. ОГЛЯД УМОВ ЕКСПЛУАТАЦІЇ АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ (ВИТЯГ)

2.3 Умови експлуатації

2.3.1 Умови експлуатації двигуна у частині впливу механічних факторів зовнішнього середовища – по групі М8 за ДСТУ 17516.1.

2.3.2 Двигун повинен безвідмовно працювати в таких умовах:

1) при температурі навколишнього повітря від плюс 35 °С до плюс 1 °С і відносній вологості 80 % при 25 °С – для кліматичного виконання УХЛ4 по ДСТУ 15150 і ДСТУ 15543.1;

2) при висоті над рівнем моря до 1000 м;

3) у вибухонебезпечному навколишньому середовищі, що не містить струмопровідного пилу, не містить парів речовин, що шкідливо впливають на ізоляцію. Запилення повітря не більше 10 мг/м³.

2.3.4 Двигун може працювати на висотах 4300 м над рівнем моря. Але при експлуатації двигуна на висоті вище 1000 м і до 4300 м над рівнем моря та температурі 40 °С потужність на валу необхідно знизити відповідно вказаному в табл. Б2.1.

Таблиця Б.1 – Номінальна потужність двигуна при експлуатації на висоті

Висота над рівнем моря, м	Номінальна потужність, %	Висота над рівнем моря, м	Номінальна потужність, %
1000	100	3000	88
1500	98	3500	84
2000	95	4000	80
2400	93	4300	74

2.4 Конструктивно-технічні вимоги

2.4.1 Двигун виконується з одним вільним кінцем валу циліндрової форми за ISO/R 775.

2.4.2 Ступінь захисту двигуна – IP44 за ДСТУ EN 60034-5.

2.4.3 Спосіб охолодження двигуна – IC411 за ДСТУ EN 60034-6.

2.4.4 Конструктивне виконання електродвигуна за способом монтажу повинно бути IMB3 за ДСТУ EN 60034-7.

2.4.5 Система ізоляції класу нагрівостійкості F за ГОСТ 8865.

2.4.6 Рівень шуму не повинен перевищувати рівня, вказаного для класу 2 за ГОСТ 16372.

2.4.7 За рівнем вібрації двигуни повинні відповідати категорії нормальній N за ГОСТ 20815, середнє квадратичне значення віброшвидкості двигуна повинно бути не вище 1,8 мм/с.

2.4.8 Двигун повинен мати пристрій – клемну коробку – для підведення кабелів живлення, який розташовано на корпусі двигуна. Вона повинна мати клемну панель (колодку) та два штуцери.

2.4.9 Двигун повинен виконуватися з вбудованим температурним захистом за ДСТУ EN 60034-11, що складається з вмонтованого в обмотку статора кола терморезисторів типу СТ14 за ТУ11-85 ОЖО.468.165 ТУ.

2.4.10 Опір кола, що складається з трьох послідовно з'єднаних терморезисторів, в практично холодному стані двигуна при температурі навколишнього середовища $25\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ повинен знаходитися в межах від 120 до 450 Ом.

2.4.11 Двигун повинен виготовлятися на підшипниках кочення за ДСТУ ГОСТ 520 з розрахунковою довговічністю не менше 20000 годин. Підшипники – шарикові, радіальні однорядні з захисними шайбами за ГОСТ 7242.

2.4.12 Ротор двигуна повинен бути динамічно відбалансований. Допустимий дисбаланс для класу G2,5 відповідно ГОСТ ИСО 1940 – 1.

2.4.13 Для двигуна встановлюються показники надійності:

- 1) середній ресурс до капітального ремонту не менше 30000 год.;
- 2) середній наробіток до відмови не менше 25000 год.;
- 3) середній строк служби до списання не менше 20 років.

2.5 Вимоги безпеки

2.5.1 Електродвигун повинен відповідати вимогам ДСТУ EN 60204-1, ГОСТ 12.2.007.1, ДСТУ 8828 і ДСТУ 7237.

2.5.2 Двигун забезпечує захист осіб від ураження електричним струмом класу I за ДСТУ EN 61140. Тип захисту – захисне еквіпотенціальне з'єднання, вимоги до захисного з'єднання – уземлення відповідно ДСТУ EN 60204-1.

2.5.3 Монтаж, налагоджування і введення в експлуатацію двигуна повинні виконуватися з урахуванням вимог безпеки, що висуваються до уземлення двигуна, опору і електричної міцності ізоляції відповідно до вимог документів:

- ДСТУ EN 60204-1. Безпечність машин. Електрообладнання машин. Частина 1. Загальні вимоги;
- ДСТУ EN 61140. Захист проти ураження електричним струмом. Загальні аспекти щодо установок та обладнання;
- «Правила устаткування електроустановок»;
- «Правила технічної експлуатації електроустановок споживачів»;
- «Правила техніки безпеки при експлуатації електроустановок споживачів».

2.5.4 Встановлений на об'єкті двигун повинен бути уземлений, один з затискачів уземлення встановлюється у клемній коробці, а другий на корпусі. Затискачі уземлення повинні мати пристрій для захисту від самовідгвинчування. Біля затискача уземлення повинен бути нанесений знак уземлення ІЕС 60417-5019, виконаний за ДСТУ EN 61140. Значення опору між болтом уземлення і кожною доступною для дотику металевою

неструмопровідною частиною двигуна, яка може виявитися під напругою, не повинне перевищувати 0,1 Ом.

2.5.5 Опір ізоляції обмотки статора від корпусу і між обмотками при нормальних кліматичних умовах навколишнього середовища, повинен бути не менше 10 МОм, при температурі близькій до робочої – не менше 3 МОм, при верхньому значенні вологості повітря – не менше 0,5 МОм.

2.5.6 Всі частини (муфта або деталі іншого механізму), що обертаються та розміщені на кінці валу двигуна, повинні бути захищені захисними кожухами.

2.6 Комплектність

2.6.1 У комплект постачання входять:

- двигун зі шпонкою – 1 шт.;
- паспорт – 1 шт.;
- технічний опис та інструкція з експлуатації.

2.7 Маркування

2.7.1 На двигуні повинна бути прикріплена паспортна табличка, яка виконується за ДСТУ 7232 із вказаними даними двигуна за ДСТУ EN 60034-1 і ГОСТ 18620. Для двигунів масою до 30 кг допускається на табличці масу не вказувати. Маркування виводів обмоток та напрямку обертання двигунів за ДСТУ EN 60034-8.

2.7.2 Маркування вантажної тари за ГОСТ 14192.

2.7.3 Експлуатаційна документація та маркування повинні бути виконані українською мовою.

2.8 Упакування

2.8.1 Упакування двигуна за ДСТУ-Н ISO/IEC Guide 41 та ДСТУ EN 13427.

2.8.2 Відправлення двигунів виконується в транспортній тарі за ДСТУ ISO 3394. Перевезення автомобільним транспортом, без перевантажень.

2.8.3 Консервація двигунів виконується на строк три роки гарматним змащенням за ГОСТ 19537 відповідно технологічної інструкції підприємства-виробника.

2.9 Правила приймання

2.9.1 Правила приймання повинні відповідати ДСТУ EN 60034-1 і ДСТУ 2365.

2.9.2 Для перевірки відповідності двигуна вимогам цих технічних умов установлюється категорія контрольних випробувань – приймально-здавальні за ДСТУ EN 60034-1.

2.10 Методи контролю

2.10.1 Методи випробувань двигуна повинні відповідати вимогам ГОСТ 7217 і ГОСТ 11828.

2.10.2 Конструктивне виконання за способом монтажу, способом охолодження двигуна, розташуванням клемної коробки, маркування паспоротної таблички перевіряють зовнішнім оглядом перед проведенням випробувань.

2.10.3 Комплектність постачання, маркування вантажу і транспортне маркування, консервацію й упакування перевіряють зовнішнім оглядом при упакуванні та відвантаженні.

2.10.4 Метод контролю установчих та приєднавчих розмірів двигуна – за ГОСТ 8592.

2.10.5 Випробування на нагрівання необхідно проводити в номінальному режимі роботи двигуна.

2.10.6 Визначення робочих характеристик, коефіцієнта потужності, ККД та ковзання проводити за ДСТУ EN 60034-2 та ГОСТ 7217.

2.10.7 Метод оцінки вібрацій двигуна – за ГОСТ 20815.

2.10.8 Метод визначення шумових характеристик двигуна – за ГОСТ 11929.

2.10.9 Методи випробувань ступеня захисту двигуна за ДСТУ EN 60034-5.

2.10.10 Випробування на стійкість до механічних зовнішніх факторів проводять за ДСТУ ІЕС 60068-1 та ДСТУ ІЕС 60068-2-6.

2.10.11 Випробування двигуна на стійкість до впливу вологості повітря проводять відповідно до ДСТУ 8280.

2.10.12 Випробування на вплив верхнього і нижнього значень температур (п. 2.3.2) проводять за ДСТУ 8280.

2.10.13 Оцінювання та контроль надійності за ДСТУ 2864 та ДСТУ 3004.

2.10.14 Перевірка вбудованого температурного захисту містить:

1) вимірювання опору ізоляції та випробування електричної міцності ізоляції кола терморезисторів;

2) перевірку роботи захисту при перевантаженні, проводиться при випробуванні двигуна на нагрівання;

3) перевірку роботи захисту при короткому замиканні, проводиться на двигуні із загальмованим ротором, ввімкненому на номінальну напругу з холодного стану.

2.11 Транспортування і зберігання

2.11.1 Умови транспортування двигуна у частині впливу механічних факторів – за ГОСТ 30630.1.1, у частині впливу кліматичних факторів – за ГОСТ 15150.

2.11.2 Умови зберігання упакованого двигуна – за ГОСТ 15150.

2.11.3 Строк зберігання двигуна в пакуванні і з консервацією підприємства-виробника – три роки.

2.11.4 Складування двигунів як у заводському пакуванні, так і без нього здійснюється в штабелях на стелажах і повинно забезпечувати збереження їх якості і товарного виду. Зберігання транспортного пакету допускається в два яруси.

2.12 Вказівки щодо експлуатації

2.12.1 Експлуатація двигуна повинна проводитися відповідно до «Правил технічної експлуатації електроустановок споживачів» і «Настанови з експлуатування та інструкції з обслуговування».

2.12.2 Перед монтажем двигун повинен бути очищений від змащення, а потім необхідно виміряти опір ізоляції. Якщо опір менше 5 МОм, то двигун треба піддати сушінню.

2.12.3 Двигун повинен бути уземлений. Необхідно також виключити можливість доступу до обертових частин і частин, по яким протікає струм. Заборонено роботу зі знятими кожухами і відкритою клемною коробкою.

2.12.4 Захист двигуна із вбудованим температурним захистом при перевантаженнях повинен забезпечувати замовник із застосуванням апаратів захисту, що спрацьовують при опорі кола терморезисторів у межах 1650-4000 Ом.

2.12.6 Двигун допускає роботу в режимах, що відрізняються від оговорених у 2.2.1 за умови, що перевищення температури обмотки статора, заміряне методом опору за ГОСТ 11828 не перевищує допустимої величини.

Під час роботи, пов'язаної з доторканням до струмопровідних частин електродвигуна або до частин електродвигуна, що обертаються, і механізму, який вони приводять у рух, необхідно зупинити електродвигуні на його пусковому пристрої або ключі керування вивісити плакат «Не вмикати! Працюють люди».

Під час роботи на електродвигуні або механізмі, що приводиться ним у рух, пов'язано з доторканням до струмопровідних, або тих, що і обертаються, частин, з електродвигуна має бути знята напруга У

багатошвидкісного електродвигуна, що працює, обмотка, яка не використовується, і кабель, що її живить, слід розглядати як такі, що перебувають під напругою.

Обслуговувати щітковий апарат електродвигуна, що працює, допускається одноособово оперативному працівнику або виділеному для цього навченому працівнику з групою III.

Під час обслуговування електродвигунів необхідно дотримуватися таких заходів безпеки:

- працювати в головному уборі і застебнутому спецодязі, остерігаючись захвату його частинами машин, що обертаються;
- користуватися діелектричним взуттям або гумовими килимками;
- не торкатися руками одночасно до струмопровідних частин двох полюсів або струмопровідних і заземлених частин.

Під час роботи на електродвигуні заземлення встановлюється на кабелі (з від'єднанням або без від'єднання його від електродвигуна) або на його приєднанні в розподільчу установку (РУ), або на будь-якій ділянці кабельної лінії, що з'єднує електродвигун з РУ (збіркою). Під час роботи на механізмі, не пов'язаний з доторканням до частин, що обертаються, і у випадку роз'єднання з'єднувальної муфти, заземлювати кабельну лінію не слід.

Якщо на відключеному двигуні роботи не проводять або їх перервано на кілька днів, то під'єднана від нього кабельна лінія має бути заземлена збоку електродвигуна. В тих випадках, коли перетин жил кабелю не дозволяє застосовувати переносні заземлення, допускається у електродвигунів напругою до 1000 В заземлювати кабельну лінію мідним провідником, перетином не меншим від перетину з жили кабелю, чи з'єднувати між собою жили кабелю та ізолювати їх. Таке заземлення і з'єднання жил кабелю слід враховувати в оперативному журналі нарівні з переносним заземленням.

На однотипних або близьких за габаритом електродвигунах, встановлених поряд з тим, на якому провадять роботи, слід вивісити плакати «Стій! Напруга» незалежно від того, перебувають вони в роботі чи у резерві.

Під час роботи забороняється знімати огороження тих частин електродвигунів, що обертаються, під час їх роботи.

Випробування електродвигуна спільно з виконавчим механізмом слід провадити з дозволу начальника зміни технологічного цеху, в якому вони встановлені. Під час видавання дозволу робиться запис в оперативному журналі технологічного цеху, а про отримання цього дозволу – в оперативному журналі цеху (дільниці), що проводить випробування.

Ремонт і налагоджування електросхем електроприводів, не з'єднаних з виконавчим механізмом, регулювальних органів і запірної арматури, можна проводити за розпорядженням. Дозвіл на їх випробування дає працівник, який дав розпорядження на виведення електроприводу в ремонт, налагодження. Про це слід зробити запис під час оформлення розпорядження. Вмикання електродвигуна для випробування до повного закінчення роботи здійснюється після виведення бригади з робочого місця. Після випробування провадиться повторний пуск з оформленням у наряді. Під час виконання робіт за розпорядженням на повторний пуск розпорядження дається знову.

Кільця ротора допускається шліфувати на електродвигуні, що обертається, лише за допомогою колодок з ізоляційного матеріалу, із застосуванням захисних окулярів.

ДОДАТОК В

Перелік зауважень нормоконтролера до дипломної роботи

Позначення документа	Документ	Умовне позначення	Зміст зауваження

Дата _____