

Міністерство освіти і науки України
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя
(повне найменування вищого навчального закладу)
Прикладних інформаційних технологій та електроінженерії
(повна назва факультету)
електричної інженерії
(повна назва кафедри)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня

магістр

(назва освітнього ступеня)

на тему: Оцінка впливу зниження показників якості електричної енергії
на надійність роботи двигунів

Виконав: студент (ка) 2 курсу, групи ЕТм-62

спеціальності 141–

електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

(шифр і назва спеціальності)

Жуковський М.М.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник Белякова І.В.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Нормоконтроль Коваль В.П.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Завідувач кафедри Коваль В.П.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Рецензент
(підпис) (прізвище та ініціали)

Тернопіль
2024

Міністерство освіти і науки України
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя
 (повне найменування вищого навчального закладу)

Факультет _____ прикладних інформаційних технологій та електроінженерії
 (повна назва факультету)
 Кафедра _____ електричної інженерії
 (повна назва кафедри)

ЗАТВЕРДЖУЮ
 Завідувач кафедри ЕІ
 _____ Коваль В.П.
 (підпис) (прізвище та ініціали)
 “ 11 ” жовтня 2024 р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

на здобуття освітнього ступеня _____ магістр
 (назва освітнього ступеня)
 за спеціальністю _____ 141 – електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
 (шифр і назва спеціальності)
 студенту _____ Жуковському Миколі Мироновичу
 (прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Оцінка впливу зниження показників якості електричної енергії на надійність роботи двигунів
 Керівник роботи _____ Белякова Ірина Володимирівна, к.т.н., доцент
 (прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)
 Затверджені наказом ректора від “10” жовтня 2024 р. № 4/7-984

2. Термін подання студентом завершеної роботи _____ 15 грудня 2024 року

3. Вихідні дані до роботи двигун 4А80В4У3(1.5 кВт); показники якості електричної енергії: несиметричність; несинусоїдальність.

4. Зміст роботи (перелік питань, які потрібно розробити)
Вступ. 1. Аналітичний розділ. 2. Розрахунково-дослідницький розділ. 3. Проектно-конструкторський розділ. 4. Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях. Загальні висновки. Перелік посилань.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень, слайдів)
Аналіз аварійності АД та схема причин виникнення аномальних режимів роботи. Загальна теплова модель АД. Моделі надійності. Результати розрахунку функції надійності за наявності несиметрії та несинусоїдальності напруги. Вплив вищих гармонік на термін служби ізоляції обмоток АД.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Охорона праці	Гурик О.Я., к.т.н., доцент		
Безпека в надзвичайних ситуаціях	Клепчик В.М., старший викладач		

7. Дата видачі завдання 11 жовтня 2024 року

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз літературних джерел та патентний пошук	15.09.24 - 01.11.24	
2	Аналітичний розділ	15.10.24 - 01.11.24	
3	Розрахунково-дослідницький розділ	15.10.24 - 01.11.24	
4	Проектно-конструкторський розділ	15.10.24 - 01.11.24	
5	Заходи з охорони праці та безпеки в надзвичайних ситуаціях	15.10.24 - 01.11.24	
6	Формування пояснювальної записки та плакатів по кваліфікаційній роботі	01.11.24 - 15.12.24	
7	Попередній захист кваліфікаційної роботи	15.12.24 - 20.12.24	

Студент

(підпис)

Жуковський М.М.

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

(підпис)

Белякова І.В.

(прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота. Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя. Факультет прикладних інформаційних технологій та електроінженерії. Кафедра електричної інженерії, група ЕТм-62. – Тернопіль.: ТНТУ, 2024.

У кваліфікаційній роботі проведений аналіз виникнення відмов двигунів обумовлених негативним впливом несиметрії та несинусоїдальності напруги.

Запропонована загальна теплова модель двигуна, яка дозволяє врахувати ймовірнісні характеристики несинусоїдальності та несиметрії напруги й оцінити вплив на надійність.

Обґрунтована можливість використання рівномірного закону розподілу для оцінки впливу старіння ізоляції на зниження надійності двигунів.

Проведені дослідження щодо оцінки вірогідності безвідмовної роботи двигунів при негативному впливі несиметрії та несинусоїдальності напруги.

Запропоновані заходи діагностичного контролю для підвищення терміну безаварійної роботи двигунів.

Ключові слова: несиметрія, несинусоїдальність, функція надійності, закон розподілу.

ЗМІСТ

ВСТУП	5
1 АНАЛІТИЧНИЙ РОЗДІЛ	7
1.1 Аналіз аварійності асинхронних двигунів	7
1.2 Методи оцінки надійності асинхронних двигунів	11
1.3 Методи оцінки втрати від зниження якості електроенергії	13
1.4 Визначення терміну служби асинхронних двигунів при порушенні показників якості електричної енергії	14
1.5 Висновки до першого розділу	17
2 РОЗРАХУНКОВО-ДОСЛІДНИЦЬКИЙ РОЗДІЛ	18
2.1 Оцінка строку служби ізоляції асинхронного двигуна	19
2.2 Загальна теплова модель асинхронних двигунів	19
2.3 Оцінка надійності асинхронних двигунів	28
2.4 Оцінка впливу вищих гармонік на строк служби ізоляції	36
2.4.1 Оцінка строку служби ізоляції	37
2.4.2 Моделі надійності	40
2.5 Висновки до другого розділу.....	42
3 ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ	44
3.1 Діагностування систем із асинхронними двигунами	44
3.2 Завдання моніторингу та функціонального діагностування енергоефективності електромеханічних систем	47
3.3 Висновки до третього розділу	52
4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ	53
4.1 Електробезпека при роботі на електроустановках	53
4.2 Проведення аварійно-відновлювальних робіт та ліквідація наслідків при надзвичайних ситуаціях	57
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	61
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	62

ВСТУП

Актуальність теми.

В якості робочих механізмів серед динамічного електричного обладнання широкого використання набули асинхронні двигуни (АД), що працюють від трифазної мережі, частка яких перевищує 60 %. Асинхронні двигуни відрізняються простою конструкцією, надійністю та високою ефективністю, а їх виробництво, експлуатація та ремонт значно легші в порівнянні з іншими типами електродвигунів [1].

Зменшення строку служби асинхронних двигунів та, відповідно, надійності при несинусоїдальності та несиметрії напруги пов'язують з тепловим старінням ізоляції, через підвищення температури обмоток статора. Навіть невелика несиметрія напруги спричиняє несиметрію струмів, що викликає додатковий нагрів і прискорене старіння ізоляції обмотки статора [1].

На сьогодні при проектуванні та дослідженні асинхронних двигунів найефективнішим методом теплового розрахунку при сталих теплових режимах є метод еквівалентних теплових схем [2], недоліком якого є складність визначення теплових провідностей.

Тому, оцінку надійності АД при зниженні показників якості електроенергії необхідно проводити на основі побудови комплексної теплової моделі.

Мета і завдання дослідження. Метою кваліфікаційної роботи є оцінка впливу зниження показників якості електроенергії на надійність асинхронних двигунів на основі комплексної теплової моделі.

Відповідно до вказаної мети поставлені наступні завдання:

- провести аналіз причин відмов електричних двигунів;
- провести оцінку надійності асинхронних двигунів та збитки від зниження показників якості електроенергії;
- здійснити побудову загальної теплової моделі та провести тепловий розрахунок асинхронних двигунів для проведення оцінки надійності;

- здійснити оцінку надійності асинхронного двигуна при несинусоїдальності та несиметрії напруги;
- здійснити оцінку впливу вищих гармонік на термін служби ізоляції обмоток асинхронного двигуна;
- провести аналіз методів діагностування систем з асинхронними двигунами.

Об’єкт дослідження – процеси перетворення енергії в електричних машинах.

Предмет дослідження – методи оцінки надійності асинхронних двигунів при зниженні показників якості електроенергії.

Наукова новизна отриманих результатів.

- отримало подальший розвиток застосування методів оцінки надійності асинхронних двигунів при зниженні показників якості електроенергії на основі побудови комплексної теплової моделі.

Практичне значення отриманих результатів. Результати досліджень дозволяють приймати рішення щодо зменшення навантаження асинхронного двигуна при зниженні показників якості електричної енергії для забезпечення надійності роботи.

Апробація.

Результати досліджень за темою кваліфікаційної роботи були представлені на XIII Міжнародній науково-технічній конференції молодих учених та студентів “Актуальні задачі сучасних технологій” (12-13 грудня 2024 року), Тернопіль, Тернопільський національний університет імені Івана Пулюя.

Структура роботи. Робота складається зі вступу, 4 розділів, висновків, переліку посилань (22 найменування).

Загальний обсяг текстової частини – 64 сторінки, 14 таблиць, 14 рисунків.

1 АНАЛІТИЧНИЙ РОЗДІЛ

1.1 Аналіз аварійності асинхронних двигунів

Трифазні асинхронні двигуни змінного струму з короткозамкненим ротором є найпоширенішими у промисловості та сільському господарстві. Аналіз даних показує, що після капітального ремонту асинхронні двигуни часто виходять з ладу, що в більшості випадків пов'язано зі зміною характеристик і параметрів двигунів після ремонту або тривалої експлуатації та призводить до невідповідності з паспортними даними [1].

За даними аналізу [2], основні причини аварій електродвигунів у сільському господарстві: обрив фаз (35–45%), тривалі навантаження (10–15%), пробій фази статорної обмотки (20–25%). Близько 20% двигунів сільськогосподарських машин виходять з ладу через теплове перевантаження [3], а понад 80% пошкоджень обмотки статора АД припадає на виткові замикання, попри пошкодження міжфазної та пазової ізоляції, що становлять 5% та 2% відповідно, як правило – через виткові замикання. Причини виходу з ладу двигунів змінного струму класифікуються на дві групи [4]:

- а) механічні – вихід з ладу підшипників;
- б) короткі замикання, що призводить до руйнування ізоляції.

Як показує аналіз [1, 4] (рис. 1.1), основна причина виходу з ладу асинхронних двигунів – пошкодження обмоток.

Варто звернути увагу на показник терміну служби електричних двигунів до наступного ремонту. Згідно з даними [5, 6], цей показник за місяцями розподіляється так, як показано на рис. 1.2. З рисунка 1.2 видно, що після повторного ремонту найбільш схильні до пошкоджень саме асинхронні двигуни.

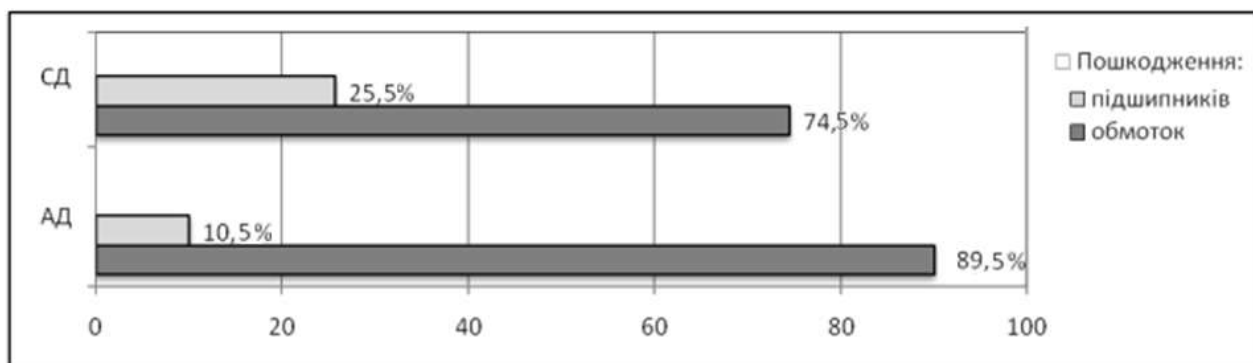


Рисунок 1.1 – Щодо виходу з працездатного стану двигунів змінного струму.

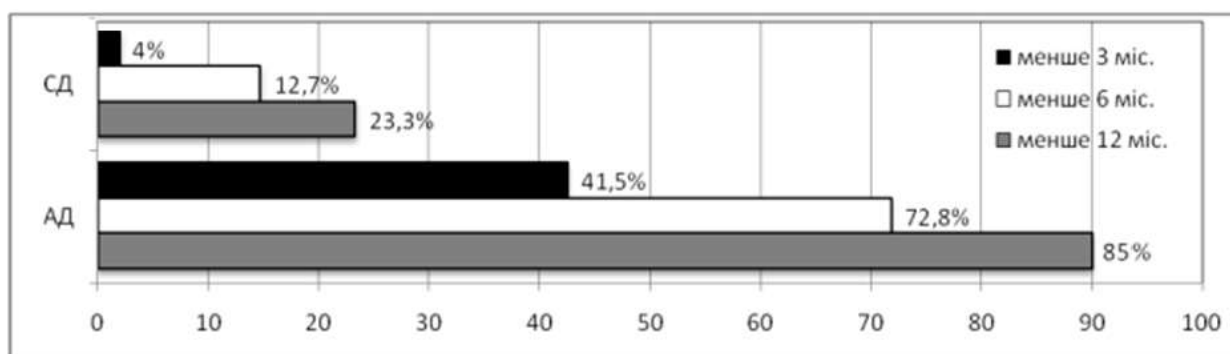


Рисунок 1.2 – Термін напрацювання двигунів до планового ремонту.

Якість напруги живлення є важливим чинником, що впливає на стан асинхронних двигунів [20,21]. При відхиленнях показників якості електроенергії, що перевищують нормативні значення (*ГОСТ 13109–97*), номінальний режим роботи двигуна стає неможливим або лише при значному зниженні навантаження. За даними [6, 7], несиметрія та несинусоїдальність напруги є найбільш значущими факторами, які знижують ефективність роботи електродвигунів. Наявність фазової несиметрії напруги та гармонік вищих порядків змінюють фізичні процеси в АД.

За теоретичним представленням, несинусоїдальність описують гармонічними складовими, де основна – період гармоніки, становить частоту 50 Гц, а гармоніки вищих частот – спотворюють результуючу синусоїду, яка представляється коефіцієнтом спотворення за напругою [2]:

$$K_{U(i)} = \frac{100}{U_{nom}} \sqrt{\sum_{i=2}^{40} U_{n(i)}^2}, \quad (1.1)$$

де ν – номер гармонічної складової.

Несиметрія напруги встановлюється наявністю в трифазній ланці складової напруги нульової та зворотної послідовності, які описуються відповідними коефіцієнтами [2]:

$$K_{2U} = \frac{U_{2(i)}}{U_{ном.мф}} \cdot 100 \%, K_{0U} = \frac{U_{0(i)}}{U_{ном.ф}} \cdot 100 \%, \quad (1.2)$$

де $U_{ном.мф}$ – величина міжфазної напруги, В;

$U_{ном.ф}$ – величина фазної напруги, В.

Через низький опір зворотної послідовності напруги на затискачах АД виникає несинусоїдальність струмів, зростання активного опору струмам вищих гармонік та, відповідно, підвищення додаткових втрат активної потужності й, як наслідок, додатковий нагрів обмоток. Відомо [4], що перевищення температури ізоляції класу А на 8°C зменшує термін служби обмоток вдвічі, а при відхиленні напруги від номінального значення за зворотною послідовністю на 4 % призводить до зменшення часу роботи в справному стані в два рази. При подальшій роботі та зниженні напруги мережі, зростає величина ковзання, а обертовий момент АД двигуна спадає. Це, на кінцевому етапі, призводить до зупинки двигуна, а при відновленні напруги – повторний запуск двигуна та проходження через його обмотки струмів, що в декілька разів перевищують номінальні [4]. Навіть короткочасність проходження описаних процесів може спричинити суттєве перегрівання обмоток, що є небезпечним.

Через зношування та фізичне й теплове старіння компонентів і матеріалів під час експлуатації АД, його реальні характеристики та параметри, як було означено вище, не відповідають паспортним, відповідно, зростає ймовірність аномальних режимів роботи та, в подальшому, аварійної зупинки.

Показники роботи АД з номінальним навантаженням за умови несиметрії напруги, яка описана формулою 1.2 представлені в таблиці 1.1 [8].

Таблиця 1.1 – Показники АД при несиметрії напруги

Характеристики АД	Значення несиметрії напруги, %			
	0	2.0	3.5	5.0
Статор:				
– струм, %	100	101	104	107.5
– максимальне значення збільшення втрат, %	0	33.0	63.0	93.0
– середнє значення збільшення втрат, %	0	2.0	8.0	15.0
– загальне значення збільшення втрат в АД, %	0	8.0	25.0	50.0
Ротор:				
– максимальне значення збільшення втрат, %	0	12.4	39.2	76.1
Струм зворотної послідовності, %	0	15	27	38
Зростання температури обмотки, °C:				
– клас А	60	65	75	90
– клас В	80	86	100	120

Несинусоїдальність та несиметрія напруги та, в подальшому, несиметрія обмоток і несинусоїдальність за струмом, призводить до виникнення вищих гармонік поля ($BГ$) в повітряному проміжку АД, що в кінцевому випадку призводить до спотворення синусоїди напруги, зростання втрат потужності та, відповідно зниження коефіцієнта потужності АД, які оцінюються з виразу [2]:

$$\Delta A = 3 \cdot T \cdot \sum_{v=3}^m K_{\phi v}^2 \cdot I_{cp.v}^2 \cdot R_v, \quad (1.3)$$

де T – період розрахунку;

$K_{\phi v}$ – коефіцієнт форми v -ї гармоніки;

R_v – величина активного опору струмам $BГ$, Ом.

Схематичний аналіз щодо основних причин виникнення аномальних режимів роботи АД подана на рис.1.3, де представлені взаємозв'язки між параметрами “електропостачання – двигун – режим роботи” при невідповідності показників якості електричної енергії (ПЯЕЕ) визначаються в комплексі “мережа – двигун – навантаження”. Також, слід відмітити, що основний вплив на аварійність АД відіграють зміни теплових режимів обмоток при зміні чинників магнітних та електричних параметрів.

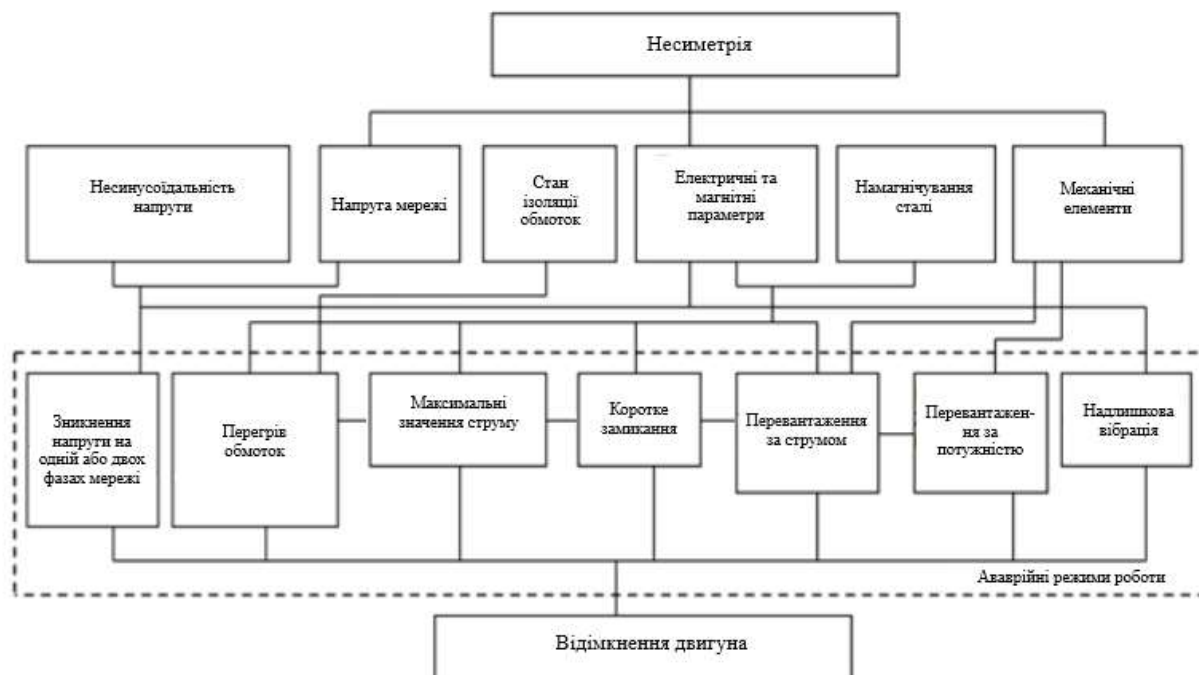


Рисунок 1.3 – Схема причин виникнення аномальних режимів роботи АД.

З огляду на те, що парк АД працює за важких умов та практично не оновлюється, відповідно, вичерпано експлуатаційний термін і проведено декілька стадій капітального ремонту, є актуальним питання забезпечення його надійної роботи під час виконання технологічного процесу.

1.2 Методи оцінки надійності асинхронних двигунів

Існують два підходи до вирішення питання оцінки надійності: один базується на статистиці відмов АД, інший – на дослідженні фізичних закономірностей виникнення відмов, що включає оцінку “функціональної надійності”.

У більшості випадків використовується статистичний метод, де надійність визначається за кількістю відмов або безвідмовної роботи АД, враховуючи сукупний вплив різних факторів на його стан без врахування фізичних процесів, які відбуваються. Недоліком цього методу є те, що він констатує лише факт

виконання/невиконання функцій об'єкта, що суттєво обмежує як керування надійністю так і проведенням порівняльного аналізу.

Отримання вихідних даних також є значною складністю, оскільки електроенергетичне обладнання має високу надійність (термін служби АД зазвичай 25–35 років), доступна обмежена кількість статистичних даних про відмови елементів системи. Для розрахунку надійності необхідно використовувати спеціальні методи, що працюють з малими вибірками, для зменшення невизначеності вихідних даних під час розрахунків надійності, що дозволить підвищити достовірність отриманих результатів навіть при ймовірності високої похибки з врахуванням об'єктивності вихідної інформації.

Описані обмеження можливо виключити при використанні методів “функціональної надійності” АД із врахуванням процесів старіння та зношення ізоляції й об'єднання зі статистичними даними відмов.

Зокрема [4] означено проводити оцінку впливу теплового та вібраційного старіння ізоляції АД на їхню функціональну надійність, де враховується випадковий характер зміни навантаження та температури перегріву, проте вказується, що математичний опис процесів є спрощеним. Слід зазначити також що при формуванні моделей не розглядається: облік якості електричної енергії (*ЯЕЕ*) для формування моделей функціональної надійності АД; прогнозування рівня надійності в різних режимах експлуатації, наприклад, коли АД пропрацювало без відмови певний період часу; надійність з урахуванням можливих структурних змін в системі електропостачання.

Провести аналіз показників надійності можливо при використанні методу моделювання поступових відмов [4], де необхідний об'єм вхідних статистичних даних є мінімальним.

Щодо питання надійності електричних машин в [9] означено, що зміни експлуатаційних факторів та властивостей матеріалів повинні виражатися у кількісними показниками. Наприклад [9], закономірності старіння ізоляції обмоток АД, дозволяють взяти до уваги вплив температури, електричного поля,

навколишнього середовища, механічних зусиль, при чому означено, що основна роль належить процесам теплового старіння.

З короткого аналізу, можна зробити висновок, що методи оцінки “функціональної надійності” вимагають врахування не тільки умов експлуатації АД, а й ПЯЕЕ, що вимагає дослідження фізичних закономірностей виникнення поступових відмов, обумовлених негативним впливом ПЯЕЕ.

1.3 Методи оцінки втрати від зниження якості електроенергії

Питання ПЯЕЕ розглянуті в роботах [6, 7], де щодо методів оцінки втрати від знижених ПЯЕЕ описано, що втрату поділяють на дві складові: електромагнітну та технологічну.

Розрахунок електромагнітної складової втрати ґрунтується на визначенні додаткових втрат активної потужності та відповідного скорочення терміну служби ізоляції обмоток АД внаслідок прискореного їх старіння. Втрата як кількісна характеристика, виражається фіксованою величиною без урахування часу експлуатації. Описаний підхід до розрахунку втрати дозволяє вибрати методи підвищення ПЯЕЕ, але не вирішує питання оцінки їх ефективності. Зниження втрати залежать не тільки від застосування заходів щодо зниження негативного впливу ПЯЕЕ, а і від того, коли відбудеться прийняття конкретного рішення щодо застосування методів на практиці, тобто відсутність фактору часу у виразах для розрахунку електромагнітної складової втрати виключає можливість врахування зміни потужності навантажень, незворотність процесу старіння ізоляції. Зазначені недоліки не дозволяють вирішувати завдання прогнозування втрати [7].

Застосування детермінованого підходу до розрахунку втрати не враховує випадковий характер зміни ПЯЕЕ та умов експлуатації АД (електричне навантаження, температура охолоджуючого середовища, тощо), хоча вказані величини є ймовірнісними за природою, оскільки залежать від випадкових змін багатьох чинників (погода, склад ввімкненого обладнання, конфігурація системи

електропостачання різних рівнів напруги, тощо.).

Особливістю розроблених методів розрахунку електромагнітної складової втрати є його диференціація за групами обладнання та є виправданий при нормуванні досліджуваних показників ΔEEE , натомість, необхідно враховувати конструктивні особливості та умови експлуатації AD . Крім цього, обмеженість описаних методів зумовлена й недосконалістю функціональної залежності втрати від ΔEEE , наприклад [6], взаємозв'язок між додатковими втратами активної складової та скороченням строку служби ізоляції AD досліджують як єдиний елемент, що значно спрощує математичний опис фізичних процесів, що протікають, але це не є правильним.

Висвітлені вище обмеження методів розрахунку втрати вимагають удосконалення, хоча ряді робіт намагаються обійти існуючі методологічні обмеження, хоча на практиці високу питому вагу мають втрати, зумовлені зниженням строку служби ізоляції по причині негативного впливу несинусоїдальності та несиметрії напруг на конструктивні елементи AD .

1.4 Визначення терміну служби асинхронних двигунів при порушенні показників якості електричної енергії

Зниження терміну служби AD при невідповідності несинусоїдальності та несиметрії напруги нормативним значенням пов'язують, в основному, з тепловим старінням по причині збільшенням температури ізоляції через зростання температури обмоток статора. Опір зворотної послідовності AD в декілька разів менший за опір прямої послідовності, то при виникненні навіть малої несиметрії напруги, виникає суттєва несиметрія струмів, що викликає як додаткове нагрівання так і прискорене старіння ізоляції обмоток статора [4, 6, 9]. Несинусоїдальність напруги викликає перегрів за рахунок появи додаткових втрат за активною потужністю в обмотках статора, ротора та сталі AD . Крім цього, несинусоїдальність та несиметрія напруги негативно впливає на довговічність підшипників і, в кінцевому варіанті, на термін служби AD [7].

Як показують дослідження, несиметрія напруги на термін служби ізоляції АД впливає негативно в більшій мірі в порівнянні з несинусоїдальністю [1, 3, 4, 9]. Однак, слід відмітити, що вкрай несприятливий вплив на ізоляцію мають субгармоніки.

Визначення додаткових втрат активної потужності, які зумовлені невідповідністю значень несинусоїдальності та несиметрії напруги не відповідають нормативним значенням, прийнято припущення їх пропорційності втратам в обмотках статора за умов: номінальний струмі та незалежність від навантаження [9, 10].

$$\Delta P_{AD} = 2.41 \cdot k_{\Pi}^2 \cdot k_{2U} \cdot \Delta P_1, \quad (1.4)$$

де k_{Π} – кратність пускового струму;

$k_{2U} = U_2 / U_{ном}$ – коефіцієнт зворотної послідовності, U_2 – напруга зворотної послідовності;

$U_{ном}$ – номінальна напруга;

ΔP_1 – втрати в обмотках статора за номінального струму.

Проте, при виконанні обчислень необхідно використовувати узагальнену теплову модель, оскільки зміна температури АД не залежить від зміни втрат активної потужності за лінійною залежністю [9]. Слід врахувати також, що на підприємстві АД виготовляють із запасом на перевищення температури при номінальному режимі ($7-10\text{ }^{\circ}\text{C}$), тому визначення температури необхідно проводити з урахуванням конструктивних особливостей кожного двигуна.

Температуру обмотки статора, як правило, розраховують з використанням еквівалентних теплових заступних схем та побудови трифазної моделі, вважаючи, що ЕП працює з номінальним навантаженням при сталій температурі середовища охолодження [9].

Наприклад, [9] для визначення температури АД використана модель із зосередженими параметрами, з побудовою двох заступних схем – окремо для статора й ротора, а параметри теплових заступних схем розраховуються за

паспортними конструктивними даними двигуна. що складається з двох теплових заступних схем – статора і ротора. Параметри теплових схем заміщення розраховувалися за конструктивними даними двигуна. Описаний підхід з побудовою симуляційної теплової моделі здійснено в програмному середовищі *MatLab Simulink*.

Термін служби *АД* при несинусоїдальності та несиметрії напруги розраховують за емпіричними виразами, залежно від зростання температури ($\Delta\tau$), що, з врахуванням класу нагрівостійкості, призводить до скорочення терміну служби ізоляції практично в два рази.

Здійснюючи розрахунки оцінки негативного впливу несиметрії напруги, для врахування фазових співвідношень прийнято розглядати коефіцієнт k_{2U} як комплексну величину [6]:

$$\dot{k}_{2U} = \kappa_{2U} \cdot \exp(j\theta), \quad (1.5)$$

де κ_{2U} та θ – значення модуля та аргумента $\dot{k}_{2U}$ [6]:

$$\kappa_{2U} = \frac{A - \sqrt{3 \cdot A^2 - 6 \cdot B}}{\sqrt{6 \cdot B - 2 \cdot A^2}}; \quad (1.6)$$

$$\theta = \arctg \left(\frac{\sqrt{3} \cdot (U_{AB}^2 - U_{CA}^2)}{U_{AB}^2 + U_{CA}^2 - 2U_{BC}^2} \right); \quad (1.7)$$

$$A = U_{AB}^2 + U_{BC}^2 + U_{CA}^2; \quad (1.8)$$

$$B = U_{AB}^4 + U_{BC}^4 + U_{CA}^4, \quad (1.9)$$

де U_{AB} , U_{BC} , U_{CA} – несиметричні лінійні напруги.

Встановлено [6], що зміна параметра θ при певному значенні величини κ_{2U} призводить до зміни в певному діапазоні максимального значення струму та температури обмоток статора, коефіцієнта, відповідно до значення якого необхідно знижувати дійсну потужність *АД* при несиметрії напруги. Однак, при $\kappa_{2U} < 5\%$ зміни параметра θ незначні, тому враховують лише граничний випадок для виключення можливого перегріву *АД* та передчасного виходу з ладу [6].

При оцінці негативного впливу несинусоїдальності напруги електричне старіння ізоляції статора обмоток АД не враховують. Здійснюють оцінку комплексного впливу електричного та теплового старіння ізоляції за умови відсутності їх взаємного впливу [1]; встановлено, що переважний вплив на зниження строку служби АД надає електричне старіння ізоляції, тоді як внесок теплового незначний.

1.5 Висновки до першого розділу

На основі аналізу причин відмов електричних двигунів та втрату від зниження показників якості електроенергії встановлено необхідність проведення теплових розрахунків АД й побудови моделі оцінювання теплового старіння ізоляції при впливі несинусоїдальності на несиметрії напруги.

Розробити практичні рекомендації щодо зниження впливу несинусоїдальності та несиметрії напруги на надійність АД.

2 РОЗРАХУНКОВО-ДОСЛІДНИЦЬКИЙ РОЗДІЛ

Частка споживаної *АД* електричної енергії промисловими підприємствами перевищує 80 %. Тому, підвищення надійності *АД* є актуальним завданням. Будь-яке дослідження в області якості електроенергії та енергозбереження вимагає здійснювати аналіз функціонування *АД* в умовах знижених *ПЯЕЕ* [10].

Несиметрія та несинусоїдальність напруги – найбільш важливі фактори зниження строку служби *АД* [1, 2, 4]. Внаслідок дії складових вищих гармонік та несиметрії напруги втрата через зниження строку *АД* оцінюється в 3–4 млрд. доларів на рік [10].

2.1 Оцінка строку служби ізоляції асинхронного двигуна

В результаті проведеного аналізу (розділ 1.1) роботи *АД* встановлено, що розподіл пошкоджень за окремими вузлами змінюється в залежності від умов їх застосування, проте найбільша кількість пошкоджень припадає на обмотки статора. У середньому через пошкодження обмоток двигунів відбувається майже 90 % всіх відмов (рис. 1.1).

Отже, надійність *АД* в більшій мірі встановлюється надійністю обмоток, яка, відповідно, залежить від стану ізоляції. Серед різних факторів, що визначають термін служби ізоляції, одним із основних є теплове старіння. *ДСТУ 4743:2007* [11] нормує значення гранично допустимої температури ізоляційного матеріалу, граничного тривало допустимого перевищення температури обмоток статора *АД*, а також величину різниці максимальної та середньої температур обмотки, яка приймається неоднаковою для різних класів нагрівостійкості, який встановлюється за зміною старіння ізоляції при дії вищих за нормовані значення температур. Виходячи з означеного, основні методи розрахунків базуються на оцінці строку служби ізоляції [6].

Для проведення досліджень використовуємо ”восьмиградусне” правило, в відповідності до якого, при підвищенні температури ізоляції на 8°C скорочує термін служби ізоляції в два рази, яке виражається рівнянням [6]:

$$V = V_H \cdot e^{-0,0866\Delta\tau}, \quad (2.1)$$

де V_H – експлуатаційний період ізоляції при номінальній температурі ϑ_H ;

V – експлуатаційний період ізоляції при температурі ϑ : $\Delta\tau = \vartheta - \vartheta_H$.

Отже, маючи значення додаткового перегріву обмоток АД $\Delta\tau$, що обумовлене зниженням ПЯЕЕ, можна розрахувати термін служби ізоляції.

Додатковий нагрів обмоток статора АД в умовах знижених ПЯЕЕ виникає за рахунок додаткової втрати активної потужності в відповідності до аналізу АД як одне фізичне тіло. Тому, доцільно прийняти при подальшому аналізі впливу знижених ПЯЕЕ на надійність АД модель нагрівання двигунів. Описаним вимогам відповідає загальна теплова модель АД [12].

2.2 Загальна теплова модель асинхронних двигунів

На практиці при дослідженні та розрахунку теплових режимів АД застосовують методи: аналітичний (метод температурного поля); еквівалентних теплових схем; еквівалентних втрат на нагрівання [12].

Метод еквівалентних теплових схем (ЕТС) використовує оцінки теплових потоків аналогічно протіканню електричних струмів, тобто, єдина форма представлення рівнянь тепло масообміну (закон Фур'є) та електричного струму (закон Ома), що дозволяє за методом ЕТС здійснювати розрахунки лінійних ланок алгебраїчними рівняннями [12].

За методом ЕТС визначають значення середніх температур елементів двигуна та їх зміну при модифікації параметрів електротехнічних матеріалів, умов охолодження й т.д., що підтверджує ефективність методу [13]. Негативним моментом методу ЕТС є складність при обчислення теплової провідності з використанням означених рівнянь при великій кількості об'єктів в еквівалентній

схемі, тобто, не завжди відомі точні значення теплових параметрів конструкційних (електротехнічних) матеріалів, які використовуються, й існує значна невизначеність щодо прийнятих до розрахунку значень теплових коефіцієнтів для поверхонь, що охолоджуються [13].

У разі представлення загальної теплової заступної схеми необхідно визначити як мінімум дванадцять невідомих значень теплової провідності, а кількість рівнянь за якими розраховуються необхідні значення температури є недостатньою. В цьому випадку невідоме число рівнянь можливо отримати за допомогою випробувань АД задаючи різні теплові умови, проте, при цьому виникають труднощі, пов'язані з точним визначенням температури та втрати у кожному елементі двигуна [13].

Враховуючи вищезначене, пропонуємо загальну теплову модель АД (рис. 2.1), де, до уваги при розрахунках приймаємо три складові загального джерела теплоти – електричні втрати: обмотка статора – ΔP_1 , обмотка ротора – ΔP_2 ; втрати в сталі – ΔP_3 [12].

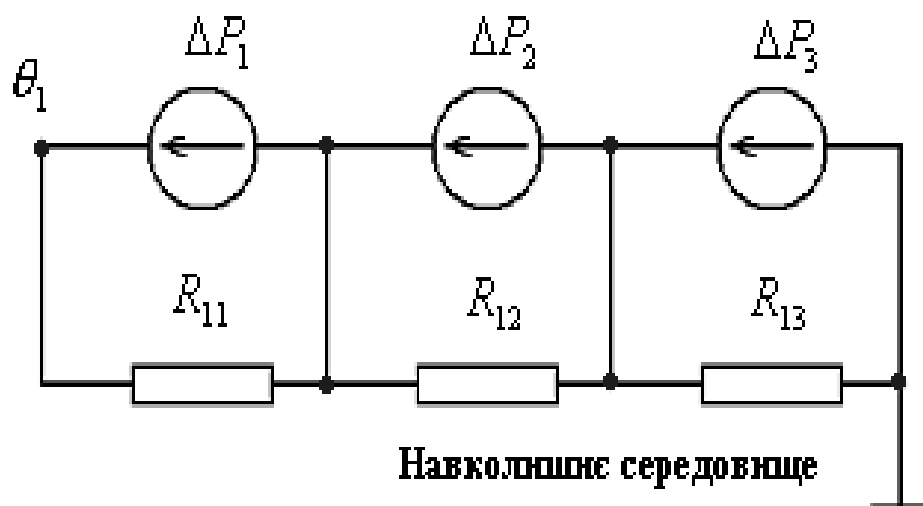


Рисунок 2.1 – Загальна теплова модель.

При розрахунках будемо нехтувати тертям в підшипниках і витратами на охолодження, а додаткові втрати (1 % від номінальної потужності) сумуємо з втратами на роторі.

Слід зазначити, що за тепловою заступною схемою на рисунку 2.1

можливо отримати лише середнє значення перевищення температури обмоток статора ΔD , але, ця температура дозволяє здійснити оцінку надійності, сподіване значення періоду експлуатації та здатності до перевантаження ΔD .

Виходячи з сказаного, отримуємо:

$$\theta_1 = R_{11} \cdot \Delta P_1 + R_{12} \cdot \Delta P_2 + R_{13} \cdot \Delta P_3, \quad (2.2)$$

де θ_1 – середнє збільшення температури обмоток статора $^{\circ}\text{C}$;

R_{11} , R_{12} , R_{13} – загальні теплові опори ланок заступної схеми, Ом (рис.3.1), значення яких обчислюємо на основі досліджень неробочого ходу та короткого замикання ΔD за емпіричними виразами [13]:

$$R_{11} \cong \frac{K}{D_{a1} \cdot l_1}, R_{12} \cong R_{13} \cong 0,6 \cdot R_{11}, \quad (2.3)$$

де D_{a1} – зовнішній діаметр статора, см ;

l_1 – довжина сердечника статора, см ;

K – коефіцієнт, $K = 27$ – для двигунів потужністю $0,5 \div 10 \text{ кВт}$.

Для отримання розрахункових значень проводимо тепловий розрахунок ΔD за методом [9] з використанням вихідних даних за [12] трьох ΔD серії 4А (технічні дані ΔD представлені в табл. 2.1) за усередненими значеннями щодо тепловіддачі поверхні окремими елементами ΔD , теплопровідності ізоляції з врахуванням конструктивних особливостей двигунів та врахуванні, що: $\Delta P_1 = P_{ел1}$, $\Delta P_2 = P_{ел2} + 3 \cdot 0,01 \cdot U_{1\phi} I_1$, $\Delta P_3 = P_{см}$.

Таблиця 2.1 – Технічні дані ΔD [14]

Тип ΔD	$P_{ном},$ кВт	$I_1,$ А	$s_n,$ $\%$	η	$\cos \varphi$	Значення опорів статора та ротора, Ом			
						R_1	X_1	R_2'	X_2'
4А80В4УЗ	1.5	3.56	5.8	0.75	0.83	7.42	4.82	4.26	7.42
4А90L4УЗ	2.2	5.0	5.1	0.8	0.83	4.29	3.33	2.63	5.7
4А90S4УЗ	3.0	6.68	4.4	0.82	0.83	2.57	2.6	1.75	4.28

А) Розрахунок втрат статора [13]:

$$P_{ел1} = 3I_1^2 \cdot r_1, \quad (2.4)$$

де $P_{ел1}$ – електричні втрати, які залежні від: величини активного опору за нагріву обмотки до $75^{\circ}C$ (r_1), яка залежить від параметру активного опору при $75^{\circ}C$ $r_{1(20)}$; температурного коефіцієнта ($\alpha_t = 0,004$);

$$P_{ст.осн} = p_{1,0/50} \left(\frac{f_1}{50} \right)^{1,5} \cdot [1,6B_{a1}^2 \cdot G_{a1} + 1,8B_{z1}^2 \cdot G_{z1}], \quad (2.5)$$

де $P_{ст.осн}$ – втрати сталі (основні), які залежні від конструктивних особливостей статора: питомих втрат ($p_{1,0/50}$); індукції в ярмі (B_{a1}); індукції в зубці сердечника (B_{z1}); висоти паза (зубця) ($h_{n1}(h_{z1})$); зовнішнього діаметра сердечника (D_{a1});

$$P_{ст.дод} = P_{пов2} + P_{пуль2}, \quad (2.6)$$

де $P_{ст.дод}$ – втрати сталі додаткові, як залежать від конструктивних особливостей поверхні ротора ($P_{пов2}$): питомих поверхневих втрат ($p_{пов2}$), зубцевого ділення t_2 , ширина шліца пазів m_p , довжина сердечника (l_2), числа пазів (z_2), зовнішнього діаметра (D_2); конструктивних особливостей зубців t_2 ($P_{пуль2}$): амплітуди пульсацій ($B_{пуль2}$), ширини нижньої та верхньої частини, відповідно (b_{1p}, b_{2p}), висоти паза, (h_{n2}), ширина шліца пазів ротора (m_p), повітряного зазору статор/ротор (δ);

$$P_{мех} = \kappa_T \cdot \left(\frac{n_c}{10} \right)^2 D_{a1}^4, \quad (2.7)$$

де $P_{мех}$ – механічні втрати, які залежать від конструктивних параметрів статора: зовнішнього діаметра сердечника (D_{a1});

$$P_{дод} = 0,005 \cdot \frac{P_{ном}}{\eta}, \quad (2.8)$$

де $P_{дод}$ – додаткові втрати;

$$P_{ст} = P_{ст.осн} + P_{ст.дод}, \quad (2.9)$$

де P_{cm} – повні втрати в сталі.

Б) Розрахунок втрат ротора [13]:

$$P_{e2} = 3I_2'^2 \cdot r_2', \quad (2.10)$$

де P_{e2} – електричні втрати, які залежні від: величини активного опору

(приведеного) (r_2'): $r_2' = R_2' \cdot \frac{U_{1\phi}}{I_1}$, $x_2' = X_2' \cdot \frac{U_{1\phi}}{I_1}$, приведенного значення струму

$$(I_2'): I_2' = c_1 \cdot \frac{U_{1\phi}}{\sqrt{R^2 + X^2}}.$$

Значення опорів: R_1 , X_1 , R_2' , X_2' отримуємо на основі експериментальних досліджень неробочого ходу та короткого замикання АД (Таблиця 2.1).

В) Розрахунок перевищення нагріву обмоток статора в порівнянні з температурою навколишнього середовища [13]:

$$\Delta \mathcal{G}_1 = \Delta \mathcal{G}'_1 + \Delta \mathcal{G}_e, \quad (2.11)$$

де $\Delta \mathcal{G}'_1$ – усереднене значення перегріву обмотки статора щодо температури внутрішнього повітря в АД:

$$\Delta \mathcal{G}'_1 = \frac{(\Delta \mathcal{G}_{нов1} + \Delta \mathcal{G}_{із\ n1}) \cdot 2l_1 + (\Delta \mathcal{G}_{із\ л1} + \Delta \mathcal{G}_{нов\ л1}) \cdot 2l_{л1}}{l_{\omega 1}}, \quad (2.12)$$

де $\Delta \mathcal{G}_{нов1}$ $\Delta \mathcal{G}_{нов1}$ – перегрів внутрішньої площини сердечника статора щодо температури повітря в АД, який залежить від електричних ($P_{ел.1}$) та магнітних (P_{cm}) втрат в обмотках з врахування конструктивних параметрів статора: діаметра розточки (D), зовнішнього діаметра сердечника (D_{a1}), довжини сердечника ℓ_1 , усередненої довжини витка обмотки ($l_{\omega 1}$), висоти паза (h_{n1}), ширини та висоти шліца, відповідно (m_c , e_c);

$\Delta \mathcal{G}_{із\ n1}$ – різниця температури в пазах статора АД, яка залежить від електричних ($P_{ел.1}$) втрат із врахування конструктивних особливостей паза статора: периметра поперечного перетину (Π_{n1}); ширини нижньої та верхньої

частини, відповідно (b_{1c}, b_{2c}) , товщини ізоляції обмотки (b_{i31}) та параметрів теплопровідності ізоляції, які є залежними від відношення d/d_{i3} (d – діаметр дроту; d_{i3} – усереднений діаметр з ізоляцією);

$\Delta \vartheta_{i3 \text{ л1}}$ – різниця температури за товщиною ізоляції, яка залежить від конструктивних параметрів лобової частини котушки: довжини $(l_{\text{л1}})$, периметра поверхні охолодження $(\Pi_{\text{л1}})$, односторонньої товщини ізоляції $(b_{i3 \text{ л1}})$, усередненої довжини витка обмотки $(l_{\omega 1})$;

$\Delta \vartheta_{\text{нов л1}}$ – різниця температури поверхні ізоляції щодо температури повітря в АД, яка залежить від конструктивних параметрів лобової частини котушки: довжини вильоту $(l_{\text{вил1}})$; діаметра розточки статора (D) та висоти паза статора $(h_{\text{л1}})$;

$\Delta \vartheta_{\epsilon}$ – усереднене значення перегріву внутрішнього повітря в АД щодо температури зовнішнього середовища:

$$\Delta \vartheta_{\epsilon} = \frac{\sum P'_{\epsilon}}{S_{\text{нов}} \cdot \alpha_{\epsilon}}, \quad (2.13)$$

де $\sum P'_{\epsilon}$ – сумарні втрати, що розсіюються в повітря з АД, які залежать від втрат в пазах обмотки $(P'_{e \text{ л1}})$ (ступінь захисту IP23 [11]), коефіцієнт виводу тепла зі статора в зовнішнє середовище ($k = 0.8$ при $2p = 4$):

$$\sum P'_{\epsilon} = \sum P' - (1 - k)(P'_{e \text{ л1}} + P_{\text{ст.осн}}) - 0,9P_{\text{мех}}, \quad (2.14)$$

де $\sum P'$ – втрати, що враховують особливості зростання споживаної потужності в АД залежно щодо класу стійкості за нагрівом ($k_p = 1.15$ для класу B [13]):

$$\sum P' = \sum P + (k_p - 1)(P_{e \text{ л1}} + P_{e \text{ л2}}), \quad (2.15)$$

де $\sum P$ – загальні втрати АД:

$$\sum P = P_{\text{ст}} + P_{\text{мех}} + P_{e1} + P_{e2} + P_{\text{одд}}. \quad (2.16)$$

Розраховані параметри елементів АД (статор, ротор, обмотки) подані в таблиці 2.2, розрахунки втрат АД – таблиця 2.3, розрахунки теплових втрат – таблиця 2.4.

Таблиця 2.2 – Результати розрахунків конструктивних елементів АД

Тип АД	$2p$	$U_{1\phi},$ B	$D_{a1} / D,$ $см/см$	$l_1,$ $см$	$\delta,$ $мм$	z_1 / z_2	Статор		
							Паз		
							$b_{1c} / b_{2c},$ $мм/мм$	$h_{n1},$ $мм$	$e_c / m_c,$ $мм/мм$
4A80B4Y3	4	220	13.1/8.4	8.0	0.25	36/28	4.6/6.2	12.2	0.5/2.5
4A90L4Y3	4	220	14.9/9.5	10.0	0.25	36/28	4.8/6.5	12.9	0.5/3.0
4A90S4Y3	4	220	16.8/10.5	10.0	0.3	36/28	4.9/7.1	15.8	0.5/3.0

Тип АД	Статор			Ротор		
	Обмотка			Паз		
	$d / d_{из},$ $мм/мм$	$\ell_{\omega 1},$ $см$	$r_{1(20)},$ $Ом$	$b_{1p} / b_{2p},$ $мм/мм$	$h_{n2},$ $мм$	$e_p / m_p,$ $мм/мм$
4A80B4Y3	0.69/0.75	40.8	7.47	4.7/1.7	16.4	0.5/1.0
4A90L4Y3	0.9/0.965	46.2	3.11	4.9/1.9	16.6	0.5/1.0
4A90S4Y3	1.12/1.2	50	1.9	5.1/1.5	19.3	0.5/1.0

Таблиця 2.3 – Результати розрахунків втрат АД

Тип АД	$P_{ел.1},$ Bm	$P_{ел.2},$ Bm	$P_{ст},$ Bm	$P_{мех},$ Bm	$P_{доод},$ Bm	$\sum P,$ Bm	$\sum P',$ Bm	$\sum P'_e,$ Bm
4A80B4Y3	282.1	64.8	51.8	8.2	7.5	387.4	403.8	298.4
4A90L4Y3	286.8	113.8	89.3	12.3	13.8	516	576.1	399.0
4A90S4Y3	310.2	131.3	108.1	19.4	18.3	587.3	653.6	454.5

Таблиця 2.4 – Результати розрахунків перевищення температури

Тип АД	$\Delta \vartheta_{нов1}$	$\Delta \vartheta_{из n1}$	$\Delta \vartheta_{из л1}$	$\Delta \vartheta_{нов л1}$	$\Delta \vartheta'_1$	$\Delta \vartheta_e$	$\Delta \vartheta_1$	θ_1
4A80B4Y3	14.4	2.1	0.4	14.2	15.4	58.4	73.8	74.2
4A90L4Y3	15.3	2.4	0.5	15.7	16.8	60.8	77.6	77.7
4A90S4Y3	14.6	2	0.5	14.4	15.6	59.2	74.8	77.2

Результати теплових розрахунків за моделями подані в таблиці 2.5

Таблиця 2.5 – Результати теплових розрахунків АД

Тип АД	Номінальна потужність, кВт	Середнє збільшення температури обмоток, °C	
		Загальна теплова модель АД	Тепловий розрахунок за [9]
4A80B4Y3	1.5	74.2	73.8
4A90L4Y3	2.2	77.7	77.6
4A90S4Y3	3.0	77.2	74.8

Як означувалося вище, прийнята модель дозволяє розрахувати тільки середнє значення підвищення температури обмотки статора АД, а довговічність ізоляції визначається максимальною температурою обмотки [6], тобто, при неозначеності співвідношення максимального підвищення температури обмоток до середнього θ_{1m}/θ_1 , величина середнього підвищення температури обмотки статора АД не є достатнім критерієм, хоча, чим менше значення відношення θ_{1m}/θ_1 , тим конструкція АД є досконалішою та краще використовуються конструктивні (електротехнічні) матеріали.

У відповідності з ДСТУ 4743:2007 [11] при температурі середовища охолодження $+40^\circ\text{C}$, регламентована різниця $(\theta_{1m} - \theta_1)$ є неоднаковою й приймається в залежності від класу нагрівостійкості, тобто, використовуючи прийняту теплову модель АД, експлуатаційний термін ізоляції можливо визначити за виразом (2.2), для чого необхідно розрахувати тільки додаткові втрати із-за невідповідності ПЯЕЕ.

Виходячи з означеного:

А) Додаткові втрати за активною компонентою в обмотках АД, які спричинені струмами ВГ з виразів:

$$\Delta P_{1v} = \Delta P_1 \cdot k_{II}^2 \cdot \sum_{v=2}^n \frac{U_{*v}^2}{v^2} \cdot \sqrt{v}; \quad (2.18)$$

$$\Delta P_{2v} = \Delta P_1 \cdot k_{II}^2 \cdot \sum_{v=2}^n \frac{U_{*v}^2}{v^2} \cdot \sqrt{v \pm 1}, \quad (2.19)$$

де $\Delta P_{1\nu}$, $\Delta P_{2\nu}$, – додаткові втрати за активною компонентою в статорних та роторних обмотках, відповідно;

$U_{*\nu} = U_\nu / U_H$ – відносне значення напруги ν – ї гармоніки;

n – номер останньої гармоніки, яка враховується.

Б) Додаткові втрати за активною компонентою в сталі AD [6]:

$$\Delta P_{3\nu} = \Delta P_3 \cdot \sum_{\nu=2}^n \frac{U_{*\nu}^2}{\nu^{0,6}}. \quad (2.20)$$

Отже, з врахування температури середовища охолодження $+40^\circ C$ отримуємо [6]:

$$V = B \cdot e^{-\beta \cdot \Delta \tau}; \quad (2.21)$$

$$\Delta \tau_\nu = R_{11} \cdot \Delta P_{1\nu} + R_{12} \cdot \Delta P_{2\nu} + R_{13} \cdot \Delta P_{3\nu}; \quad (2.22)$$

$$B = V_H \cdot e^{-\beta \cdot \Delta \tau_H}; \quad (2.23)$$

$$\Delta \tau_H = \theta_{1M} + 40 - \vartheta_M, \quad (2.24)$$

де ϑ_M – допустима температура матеріалу ізоляції; відповідно до ДСТУ 4743:2007, для ізоляції класу B , $\vartheta_H = 130^\circ C$.

Для несиметрії напруги, можна записати:

$$V = B \cdot e^{-\beta \cdot \Delta \tau_{(2)}}; \quad (2.25)$$

$$\Delta \tau_{(2)} = \frac{2 \cdot k_{2U\%}^2}{100} \cdot \theta_1, \quad (2.26)$$

де $k_{2U\%} = \frac{U_2}{U_H} \cdot 100\%$ – коефіцієнт зворотної послідовності.

Додатковий нагрів обмоток AD , зумовлений впливом знижених $ПЯЕЕ$ напруги живлення, проводимо за формулою:

$$\Delta \tau = \Delta \tau_\nu + \Delta \tau_{(2)} = R_{11} \cdot \Delta P_{1\nu} + R_{12} \cdot \Delta P_{2\nu} + R_{13} \cdot \Delta P_{3\nu} + \frac{2 \cdot k_{2U\%}^2}{100} \cdot \theta_1. \quad (2.27)$$

2.3 Оцінка надійності асинхронних двигунів

Для проведення дослідження впливу знижених *ПЯЕЕ* на надійність *АД*, необхідно здійснити вибір закону розподілу часу безаварійної роботи.

Загальних методів для опису фізичних процесів, що призводять до відмов, наразі не існує. Кожен випадок потребує індивідуальний підхід та аналіз у відповідності з визначеними умовами та характеристиками системи або обладнання [5, 6].

Що стосовно *АД*, мова ведеться про раптові відмови, які, як правило, описуються експоненціальним розподілом, де, для опису поступових відмов використовують функцію розподілу Вейбулла [7], яку в більшості випадків застосовують для аналізу процесів старіння та зношення в елементах електроустаткування різного виду. Оцінка коефіцієнта варіації з допустимою для практики точністю розрахунків, функція Вейбулла є еквівалентна щодо обчислення середнього часу безаварійної роботи елементів електропостачання [6].

Поступові відмови в *АД* – наслідок старіння ізоляції обмоток або зношування підшипників, що проявляється доволі частіше [1]. Як описано в [4], розподіл часу виникнення поступових відмов *АД* потужністю до 10 *кВт*, краще узгоджується з логарифмічно нормальним розподілом, ніж з розподілом Вейбулла.

Для проведення досліджень та обчислень оцінки надійності *АД* приймаємо допущення про нормальний розподіл часу безаварійної роботи.

Тоді, математичне очікування та середньоквадратичне відхилення строку служби ізоляції *АД* становить [12]:

– для випадкової величини $\Delta \tau$ (зростання температури *АД*):

$$m_v = B \cdot \exp(-\beta \cdot m_{\Delta \tau} + \frac{\beta^2}{2} \cdot \sigma_{\Delta \tau}^2); \quad (2.28)$$

$$\sigma_v = m_v \cdot \sqrt{\exp(\beta^2 \cdot \sigma_{\Delta \tau}^2) - 1}, \quad (2.29)$$

де $m_{\Delta\tau}$ та $\sigma_{\Delta\tau}$ – математичне сподівання та стандартне відхилення випадкової змінної $\Delta\tau$.

– для випадкових величин U_{*v} , $k_{2U\%}$ (зміна несиметрії та несинусоїдальності напруги) [12]:

$$\begin{aligned} m_{\Delta\tau} = & R_{11} \cdot \Delta P_1 \cdot k_{II}^2 \cdot \sum_{v=2}^n \frac{\sqrt{v}}{v^2} \cdot (m_{U_{*v}}^2 + \sigma_{U_{*v}}^2) + \\ & + R_{12} \cdot \Delta P_1 \cdot k_{II}^2 \cdot \sum_{v=2}^n \frac{\sqrt{v \pm 1}}{v^2} \cdot (m_{U_{*v}}^2 + \sigma_{U_{*v}}^2) + \\ & + R_{13} \cdot \Delta P_3 \cdot \sum_{v=2}^n \frac{1}{v^{0,6}} (m_{U_{*v}}^2 + \sigma_{U_{*v}}^2) + 2 \cdot 10^{-2} \cdot \theta_1 \cdot (m_{\kappa_{2U\%}}^2 + \sigma_{\kappa_{2U\%}}^2); \end{aligned} \quad (2.30)$$

$$\begin{aligned} \sigma_{\Delta\tau}^2 = & R_{11}^2 \cdot \Delta P_1^2 \cdot k_{II}^4 \sum_{v=2}^n \frac{1}{v^3} (4 \cdot m_{U_{*v}}^2 \cdot \sigma_{U_{*v}}^2 + 2 \cdot \sigma_{U_{*v}}^4) + \\ & + R_{12}^2 \cdot \Delta P_1^2 \cdot k_{II}^4 \sum_{v=2}^n \frac{v \pm 1}{v^4} (4 \cdot m_{U_{*v}}^2 \cdot \sigma_{U_{*v}}^2 + 2 \cdot \sigma_{U_{*v}}^4) + \\ & + R_{13}^2 \cdot \Delta P_3^2 \cdot \sum_{v=2}^n \frac{1}{v^{1,2}} (4 \cdot m_{U_{*v}}^2 \cdot \sigma_{U_{*v}}^2 + 2 \cdot \sigma_{U_{*v}}^4) + \\ & + 4 \cdot 10^{-4} \cdot \theta_1^2 (4 \cdot m_{\kappa_{2U\%}}^2 \cdot \sigma_{\kappa_{2U\%}}^2 + 2 \cdot \sigma_{\kappa_{2U\%}}^4). \end{aligned} \quad (2.31)$$

– за наявності даних про струми $B\Gamma$ (на зміну розподілу магнітного потоку в AD вплив практично відсутній) [12]:

$$\begin{aligned} m_{\Delta\tau} = & 3R_{11} \cdot r_1 \cdot \sum_{v=2}^n \sqrt{v} (m_{I_v}^2 + \sigma_{I_v}^2) + 3R_{12} \cdot r'_2 \cdot \sum_{v=2}^n \sqrt{v \pm 1} (m_{I_v}^2 + \sigma_{I_v}^2) + \\ & + 2 \cdot 10^{-2} \cdot \theta_1 \cdot (m_{\kappa_{2U\%}}^2 + \sigma_{\kappa_{2U\%}}^2); \end{aligned} \quad (2.32)$$

$$\begin{aligned} \sigma_{\Delta\tau}^2 = & 9R_{11}^2 \cdot r_1^2 \cdot \sum_{v=2}^n v (4m_{I_v}^2 \sigma_{I_v}^2 + 2\sigma_{I_v}^4) + 9R_{12}^2 \cdot r'^2_2 \cdot \sum_{v=2}^n (v \pm 1) \cdot (4m_{I_v}^2 \cdot \sigma_{I_v}^2 + 2\sigma_{I_v}^4) + \\ & + 4 \cdot 10^{-4} \cdot \theta_1^2 (4m_{\kappa_{2U\%}}^2 \cdot \sigma_{\kappa_{2U\%}}^2 + 2\sigma_{\kappa_{2U\%}}^4), \end{aligned} \quad (2.33)$$

де I_v – струм v -ї гармоніки, A ;

r_1 – активний опір обмотки статора, Om ;

r'_2 – приведений активний опір ротора, Om .

Отримані вирази дають можливість оцінити вплив несинусоїдальності та несиметрії напруги на надійність AD .

Для розрахунку надійності AD необхідно знати економічно доцільну можливість безаварійної роботи. Ресурс напрацювання AD в основному визначається технічним ресурсом обмоток статора та становить 20000 год; економічно доцільна можливість безвідмовної роботи становить 0.8 – 0.85.

Ступінь використання AD для кожній галузі промисловості чи сільського господарства залежить від технологічних процесів. Проведені теплові розрахунки (табл. 2.5) здійснювалися за значеннями тривалості роботи AD розвинених галузей промисловості Західного регіону в відповідності до даних таблиці 2.7 [3].

За аналізом даних таблиці 2.6 робимо висновок, що для AD необхідний рівень надійності – безаварійна робота ізоляції обмоток статора відбувається з ймовірністю 0.8 – 0.85 протягом 20 років.

Проводимо розрахунок функції надійності $R(t)$ для AD типу 4A80B4УЗ в програмному середовищі *MathCad* за формулами 2.30-2.33 за наявності несиметрії напруг (таблиця 2.8), а графік за наслідками розрахунку наведено на рисунку 2.2.

Таблиця 2.7 – Річна тривалість роботи AD (0.5 – 3 кВт) в базових галузях промисловості Західного регіону

Галузь промисловості	Тривалість роботи, год
Енергетика	1800
Легка промисловість	980
Харчова промисловість	990
Будівельні матеріали	1150

При розрахунку приймаємо, що робота двигуна відбувається за номінального навантаження.

Таблиця 2.8 – Результати розрахунку функції надійності $R(t)$ для АД типу 4A80B4УЗ при несиметрії напруги

Параметри несиметрії напруги							Рівень надійності
$m(\kappa_{2U}), \%$	1.5	1.75	2.0	2.25	2.5	3.0	
$\sigma(\kappa_{2U}), \%$	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	
$R(t)$	0.935	0.843	0.712	0.552	0.354	0.084	0.8 – 0.85

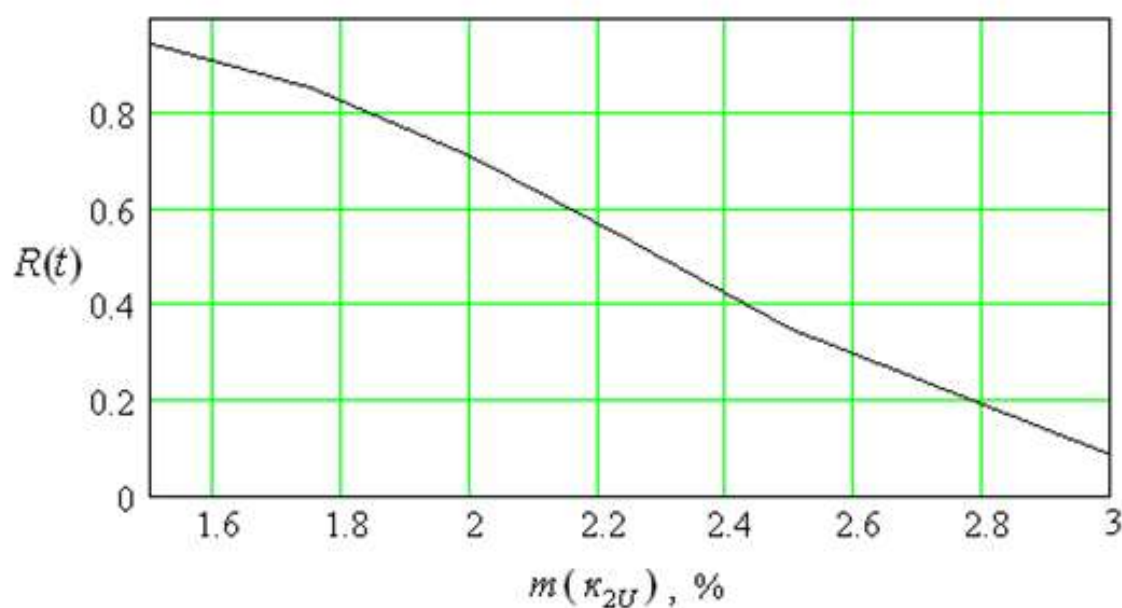


Рисунок 2.2 – Оцінка функції надійності $R(t)$ для АД типу 4A80B4УЗ при $t = 20$ років.

З результатів розрахунку видно, що при $\kappa_{2U} \geq 2,5 \%$ надійність спадає в 2.7 рази та в порівнянні з номінальним режимом роботи є вище.

Для запобігання передчасного виходу з ладу АД внаслідок перегріву при великих значеннях несиметрії напруги необхідно знижувати навантаження [15].

Рекомендоване значення навантаження k_s можна знайти з виразу [4]:

$$k_s = \left(1 + \frac{m_{\Delta\tau}}{\theta_1} \right)^{-0,588}. \quad (2.34)$$

Значення θ_1 та $m_{\Delta\tau}$ розраховуємо за виразами (2.2) та (2.33).

Розрахунком за виразом (2.20) встановлено:

- при $\kappa_{2U} = 2.5 \%$ коефіцієнт завантаження двигуна не повинен перевищувати 91 %;
- при $\kappa_{2U} = 5.0 \%$ коефіцієнт завантаження двигуна не повинен перевищувати 78 %.

Графік залежності ймовірності безаварійної роботи двигуна від часу $R(t)$ з урахуванням несиметрії напруг наведено на рис. 2.3.

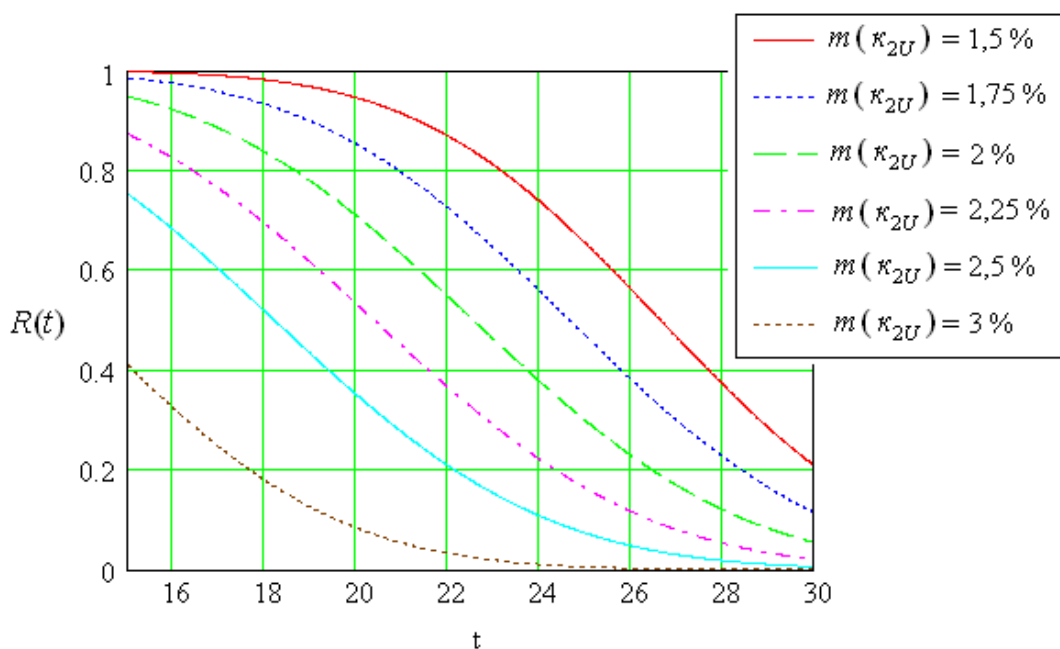


Рисунок 2.3 – Оцінка функцій надійності $R(t)$ для АД типу 4A80B4УЗ при різних значеннях $m(\kappa_{2U})$.

Результати розрахунку функції надійності $R(t)$ для АД типу 4A80B4УЗ при присутності несинусоїдальності напруги, за умови роботи двигуна з номінальним навантаженням та без врахування втрат зумовлених струмами ВГ подано в таблиці 2.9.

Таблиця 2.9 – Результати розрахунку функції надійності $R(t)$ для АД типу 4A80B4УЗ при присутності несинусоїдальності напруги

Параметри несинусоїдальності напруги, %							$k_U, \%$	$R(t)$
ν	5	7	11	13	17	19		
$m_{U_{*\nu}}$	13	11	8	6	5	4	20.66	0.986
$\sigma_{U_{*\nu}}$	2.5	2.3	1.5	1.2	1.0	0.7		
$m_{U_{*\nu}}$	14	11	9	6	5	4	20.73	0.878
$\sigma_{U_{*\nu}}$	2.7	2.3	1.7	1.3	1.1	0.7		
$m_{U_{*\nu}}$	14	12	9	7	6	5	23.77	0.624
$\sigma_{U_{*\nu}}$	3.0	2.3	2.0	1.5	1.1	1.0		
$m_{U_{*\nu}}$	16	14	10	8	6	5	25.13	0.521
$\sigma_{U_{*\nu}}$	3.0	2.5	2.2	1.7	1.2	1.0		
$m_{U_{*\nu}}$	17	15	10	8	6	5	25.77	0.344
$\sigma_{U_{*\nu}}$	3.1	2.7	2.0	1.6	1.2	1.0		
$m_{U_{*\nu}}$	18	16	11	9	6	5	27.39	0.177
$\sigma_{U_{*\nu}}$	3.3	3.0	2.0	1.6	1.2	1.0		
Коефіцієнт несинусоїдальності напруги $k_U, \%$ визначений за величинами: $m_{U_{*\nu}}; \sigma_{U_{*\nu}}=0.2 \cdot m_{U_{*\nu}}; \kappa_{2U}=0$								

Результати розрахунків показують, що значний спад надійності АД стається при $k_U > 20 \%$.

Графік залежності ймовірності безаварійної роботи двигуна 4A80B4УЗ від часу $R(t)$ з урахуванням несинусоїдальності напруги наведено на рис. 2.4.

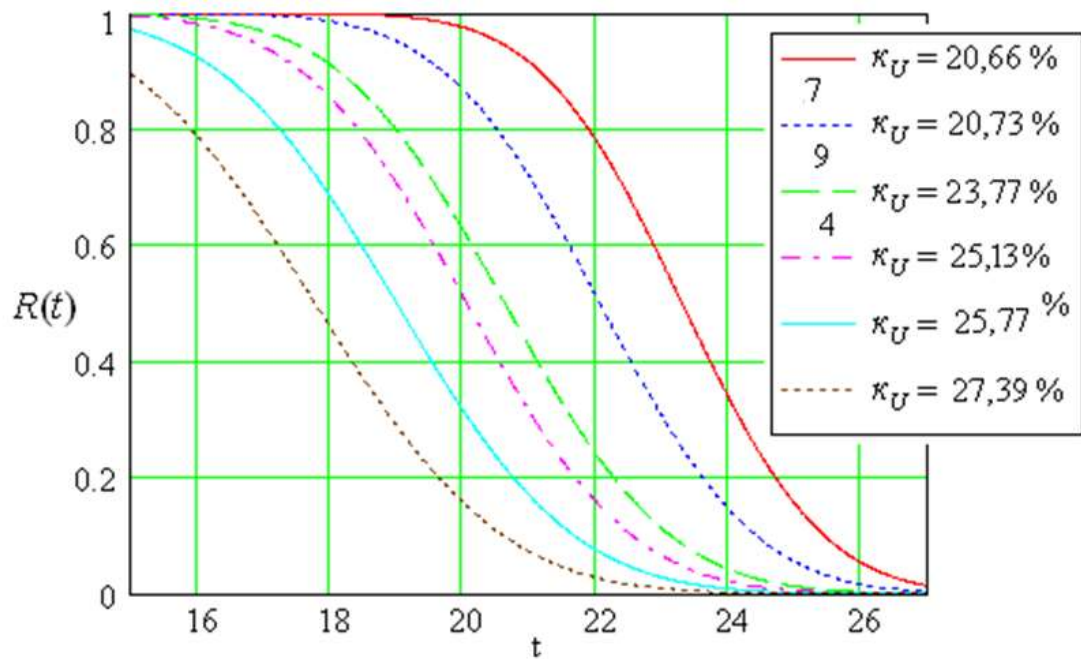


Рисунок 2.4 – Графік залежності ймовірності безаварійної роботи двигуна від часу $R(t)$ при різних значеннях несинусоїдальності напруги (k_U , %) (таблиця 2.4).

Результати розрахунку функції надійності $R(t)$ для АД типу 4A80B4УЗ при спільній дії несинусоїдальності та несиметрії напруги за умови відсутності їх взаємного впливу, роботі двигуна з номінальним навантаженням подано в таблиці 2.10.

Таблиця 2.10 – Результати розрахунку функції надійності $R(t)$ для АД типу 4A80B4УЗ при присутності несинусоїдальності та несиметрії напруги

Параметри несиметрії напруги $m(k_{2U}) = 1.75\%$; $\sigma(k_{2U}) = 0.35\%$								
Параметри несинусоїдальності напруги, %							k_U , %	$R(t)$
ν	5	7	11	13	17	19		
$m_{U_{*V}}$	5.4	4.4	2.4	2.0	1.4	1.0	8.3	0.879
$\sigma_{U_{*V}}$	1.1	0.8	0.4	0.3	0.2	0.1		
$m_{U_{*V}}$	7.0	5.0	4.0	3.0	2.5	1.5	10.57	0.815
$\sigma_{U_{*V}}$	1.3	1.0	0.7	0.6	0.5	0.4		

– продовження таблиці 2.10

1	2	3	4	5	6	7	8	9
$m_{U_{*V}}$	8.00	6.00	5.00	4.00	2.50	1.50	12.15	0.752
$\sigma_{U_{*V}}$	1.5	1.2	1.00	0.50	0.40	0.30		
$m_{U_{*V}}$	8.5	6.5	5.5	4.5	3.5	2.5	13.35	0.87
$\sigma_{U_{*V}}$	1.6	1.2	1.1	0.9	0.8	0.4		
$m_{U_{*V}}$	9.0	8.5	6.6	5.5	4.5	3.6	15.32	0.592
$\sigma_{U_{*V}}$	1.7	1.5	1.2	1.0	0.9	0.6		
$m_{U_{*V}}$	10.0	9.0	7.0	6.0	5.0	4.0	16.83	0.464
$\sigma_{U_{*V}}$	2.0	1.8	1.5	1.1	0.9	0.7		
Коефіцієнт несинусоїдальності напруги k_U , % визначений за величинами: $m_{U_{*V}}; \sigma_{U_{*V}} = 0.2 \cdot m_{U_{*V}}; \sigma(\kappa_{2U}) = 0.2 \cdot m(\kappa_{2U})$								

Графіки функцій надійності, побудовані за наслідками розрахунку, наведено на рис. 2.5–2.6. На рисунку 2.6, а, наведено графік зміни ймовірності безаварійної роботи двигуна з урахуванням лише несинусоїдальності напруги.

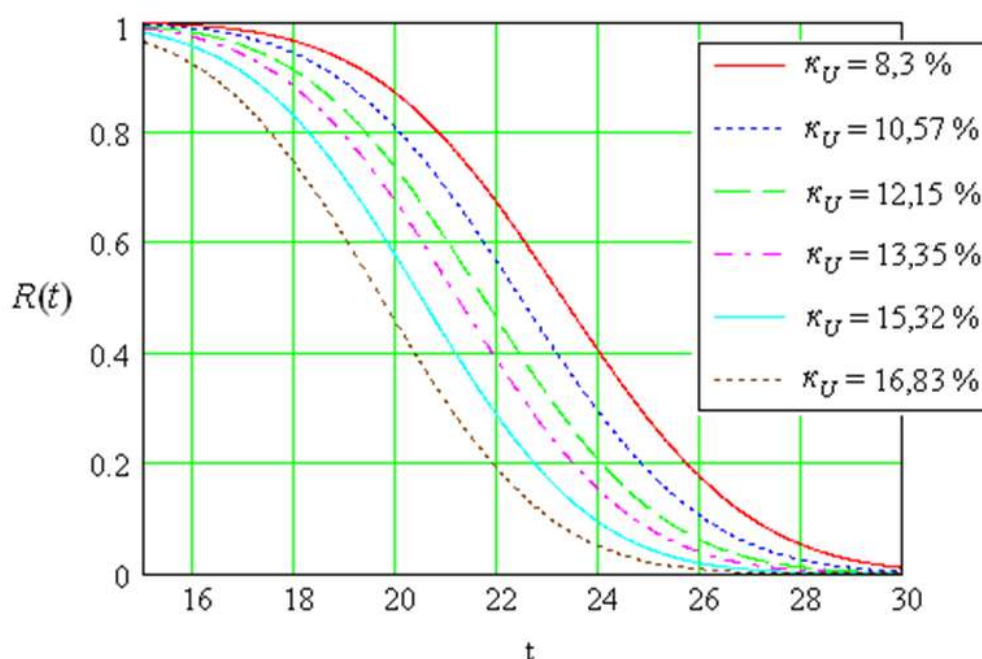


Рисунок 2.5 – Графік залежності ймовірності безаварійної роботи двигуна від часу $R(t)$ при різних значеннях несинусоїдальності напруги (k_U , %) (таблиця 2.5).

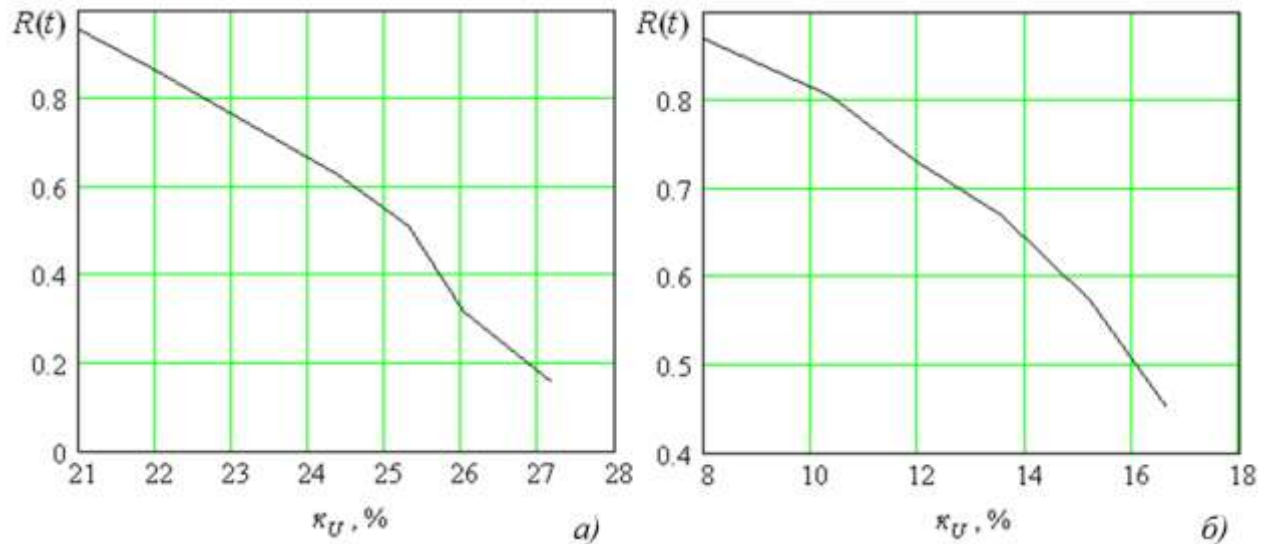


Рисунок 2.6 – Графік залежності ймовірності безаварійної роботи двигуна від часу $R(t)$ від несинусоїдальності напруги ($k_U, \%$) при $t = 20$ років:

а) – дані за результатами таблиці 2.4; б) – дані за результатами таблиці 2.5.

Аналіз отриманих результатів розрахунку функції надійності $R(t)$ для АД типу 4A80B4U3 при спільній дії несинусоїдальності та несиметрії напруги показує, що за умови відсутності їх взаємного впливу $k_U \approx 15 \%$ та $k_{2U} \approx 2 \%$ призводять до спаду надійності в 1.4 рази в порівнянні з варіантом $k_U \approx 8.3 \%$, $k_{2U} \approx 2 \%$.

2.4 Оцінка впливу вищих гармонік на термін служби ізоляції

Однією з основних причин прискореного старіння ізоляції внаслідок підвищеного нагріву – спотворення форми напруги електропостачання, що приводить до зменшення строку служби та функціональної надійності АД. Як показали дослідження в попередньому підрозділі, значне теплове старіння ізоляції відбувається при $k_U > 20 \%$.

Зниження строку служби АД як і іншого електричного обладнання за присутності ВГ пов'язують із тепловим старінням ізоляції, тоді як впливом електричного поля, як було означено вище, нехтують [12, 15].

Натомість, дослідженнями встановлено [16], що за наявності $ВГ$ головний вплив на скорочення строку служби $АД$ вносить електричне старіння ізоляції, негативний вплив теплового старіння є значно меншим. Тому, варто провести аналіз впливу електричного старіння ізоляції на зниження надійності електричних машин.

2.4.1 Оцінка строку служби ізоляції

В більшості випадків, для аналізу впливу електричного поля E на термін служби ізоляції V_E застосовують експоненціальну залежність [6]:

$$V_E = C_E \cdot \exp(-h \cdot E), \quad (2.35)$$

де значення коефіцієнтів C_E та h зумовлені властивостями ізоляційного матеріалу. Коефіцієнт h характеризує нахил кривої строку служби ізоляції при графічній оцінці електричної міцності в залежності від тривалості впливу високої напруги до пробою ізоляції та виражається прямою лінією.

При дослідженні ізоляції на електричну міцність застосовують двопараметричний розподіл Вейбулла [12] для оцінки пошкодження (ослаблення) обмотки як випадкової події:

$$F(t, E) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{t}{t_0} \right)^a \cdot \left(\frac{E}{E_0} \right)^b \right], \quad (2.36)$$

де $F(t, E)$ – ймовірність пошкодження (пробою) ізоляції при напруженості електричного поля E на протязі часу t ;

t_0, E_0 – параметри масштабування;

a, b – параметри форми, які об'єднані співвідношенням $n = b/a$.

Більш інтенсивне старіння ізоляції викликає спільний вплив перегріву обмоток $АД$ та підвищеної іонізації. В цьому випадку розрахунок строку служби ізоляції необхідно розглядати як функцію напруженості електричного поля E та абсолютної температури [16, 17].

Для встановлення, який з параметрів спотвореної кривої напруги (амплітуда, форма, середньоквадратичне значення) носить найбільший вплив на

процес старіння ізоляції, розглянуто три величини [12]:

$$K_m = \frac{U_m}{U_{1m}}; \quad (2.37)$$

$$K_{rms} = \frac{U_{rms}}{U_{1rms}}; \quad (2.38)$$

$$K_f = \sqrt{\sum_{v=1}^n v^2 \cdot U_{*v}^2}, \quad (2.39)$$

де U_m , U_{rms} – амплітуда й середньоквадратичне значення несинусоїдальної напруги;

U_{1m} , U_{1rms} – ті ж параметри напруги основної частоти;

$U_{*v} = U_v / U_H$ – відносне значення напруги v -ї гармоніки.

За синусоїдальною напругою: $K_m = K_{rms} = K_f = 1$.

За присутності $B\Gamma$, строк служби ізоляції буде становити:

$$V = V_H \cdot K_m^{-n_m} \cdot K_{rms}^{-n_r} \cdot K_f^{-n_f} \cdot \exp(-B \cdot \Delta C_T); \quad (2.40)$$

$$\Delta C_T = \frac{1}{T_H} - \frac{1}{T}, \quad (2.41)$$

де V_H – строк служби ізоляції за умов: номінальна температура; синусоїдальна напруга:

n_m, n_r, n_f – коефіцієнти, що відповідно відображають вплив амплітуди, середньоквадратичного значення, форми несинусоїдальної напруги (величина значення коефіцієнтів відображає вплив кожного параметра).

Дослідження на основі випробування ізоляції підвищеною напругою показали [12], що фактором найбільшого впливу на електричне старіння ізоляції за наявності $B\Gamma$ є коефіцієнт n_m – амплітуда спотвореної кривої напруги, що дозволяє для розрахунків використати дещо спрощений варіант виразу (2.26):

$$V = V_H \cdot K_m^{-n_m} \cdot \exp(-B \cdot \Delta C_T). \quad (2.42)$$

Значення коефіцієнта n_m для AD приймаємо [13]: $n_m = 9$.

Описаний підхід до оцінки строку служби ізоляції опосередковано

враховує вплив фаз напруги окремих $BГ$, який, щодо амплітуди несинусоїдальної напруги залежить від порядку гармоніки.

Наприклад, при впливі 5-ї гармоніки форма кривої напруги може бути як піковою, так і плоскою (в залежності від фази), тоді як при впливі 13-ї гармоніки, в незалежності від фази, крива напруги завжди набуває пікової форми.

На рис. 2.7 – 2.8 зображені криві напруги за наявності 5-ї (13-ї) гармоніки з амплітудою 6 % та початковими фазами 0^0 та 180^0 , які можна описати рівнянням:

$$u(t) = U_{1m} [\sin \omega t + U_{*m\nu} \cdot \sin(\nu \cdot \omega t + \varphi_\nu)], \quad (2.43)$$

де $U_{*m\nu}$, φ_ν – відповідно, відносне значення амплітуди та початкова фаза ν -ї гармоніки напруги.

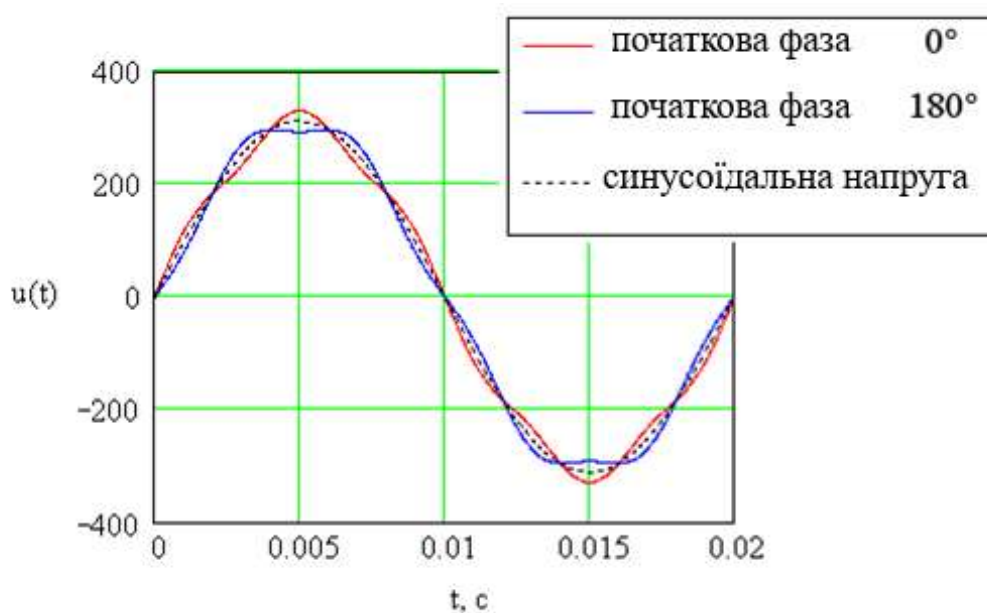


Рисунок 2.7 – Крива напруги при впливі 5-ї гармоніки.

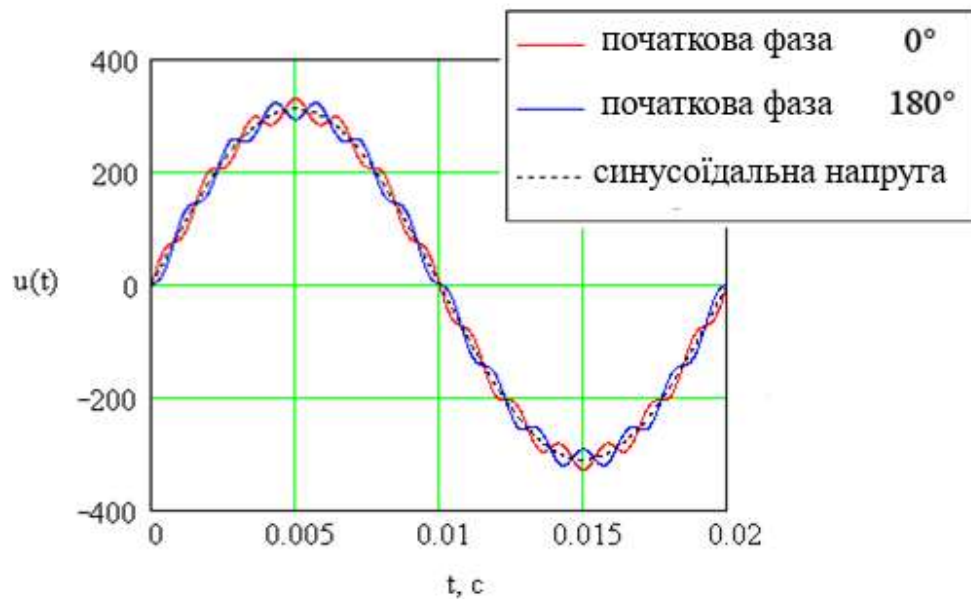


Рисунок 2.8 – Крива напруги при впливі 13-ї гармоніки.

Якщо ж знехтувати тепловим старіння ізоляції при оцінці впливу $BГ$, то вираз (2.8) можна привести до виду [13]:

$$V = B \cdot K_m^{-n_m}, \quad (2.44)$$

де величина B визначається за виразом (2.7).

2.4.2 Моделі надійності

Враховуючи ймовірнісних характер $BГ$ напруги (струму), що зумовлено випадковими змінами режимів роботи двигунів, для оцінки впливу спотвореної кривої напруги на строк служби ізоляції $АД$ вибираємо закон розподілу випадкової величини K_m , яка характеризується малими значеннями середньоквадратичного відхилення (в більшості випадків становить менше $АД$ 5 %, а в окремих випадках – 5 ÷ 10 %, а тип функції розподілу незначно впливає на величину математичного сподівання – m_v . [13]. Тому, приймаємо припущення про рівномірний закон розподілу випадкової величини K_m . Тоді, виходячи із виразу (2.30) отримуємо [12]:

$$m_v = \frac{B \cdot (b^{-n_m+1} - a^{-n_m+1})}{(-n_m + 1) \cdot (b - a)}; \quad (2.45)$$

$$\sigma_v = m_v \sqrt{\frac{(b-a)(-n_m+1)^2(b^{-2n_m+1} - a^{-2n_m+1})}{(-2n_m+1)(b^{-n_m+1} - a^{-n_m+1})^2}} - 1, \quad (2.46)$$

де a, b – параметри розподілу:

$$a = m(K_m) - \sqrt{3}\sigma(K_m); \quad (2.47)$$

$$b = m(K_m) + \sqrt{3}\sigma(K_m), \quad (2.48)$$

де $m(K_m)$ та $\sigma(K_m)$ – математичне очікування та середньоквадратичне відхилення величини K_m .

Функцію надійності $R(t)$ визначаємо за допомогою виразів (2.45), (2.46), а результати розрахунку для АД типу 4A80B4УЗ подано в таблиці 2.11.

Таблиця 2.11 – Результати розрахунку функції надійності $R(t)$ для АД типу 4A80B4УЗ при спотвореній кривій напруги

Параметри величини K_m				4A80B4УЗ
a	b	$m(K_m)$	$\sigma(K_m)$	$R(t)$
1.03	1.07	1.06	$1.155 \cdot 10^{-2}$	0.999
1.04	1.08	1.07	$1.155 \cdot 10^{-2}$	0.823
1.045	1.085	1.065	$1.155 \cdot 10^{-2}$	0.695
1.05	1.09	1.055	$1.155 \cdot 10^{-2}$	0.535
1.055	1.095	1.055	$1.155 \cdot 10^{-2}$	0.345
1.06	1.1	1.075	$1.155 \cdot 10^{-2}$	0.215
Необхідний рівень надійності при $t = 20$ років				0.8 – 0.85

При розрахунках приймали, що номінальний строк служби АД $V_H = 20$ років (такий термін служби гарантує більшість виробників у Європі); для АД при проведенні аналізу та обчислень прийняті такі самі вихідні дані, як і при оцінці впливу теплового старіння ізоляції на їх надійність.

Графік функцій надійності, побудовані за наслідками розрахунку, наведено на рис. 2.9.

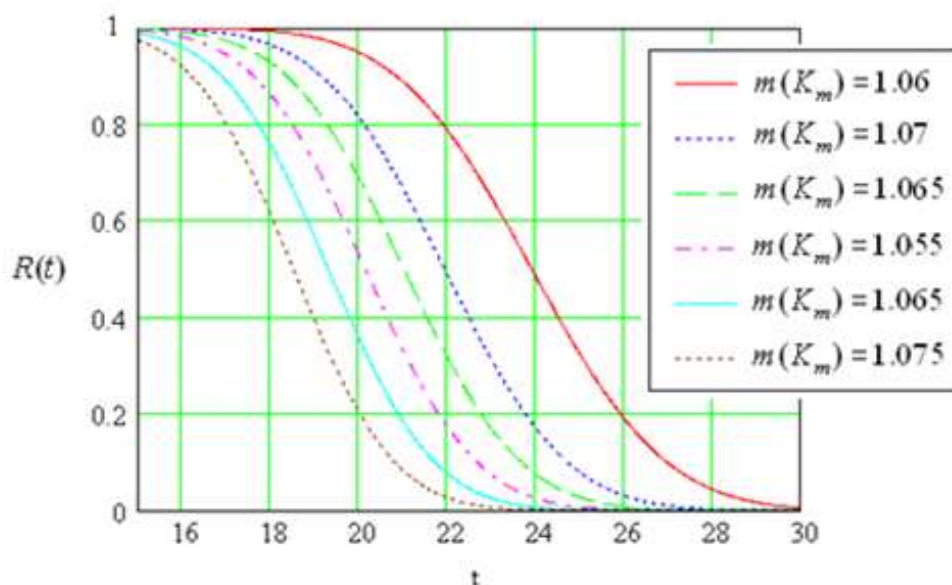


Рисунок 2.9 – Графік функції надійності $R(t)$ для АД типу при різних значеннях $m(K_m)$.

Аналіз отриманих результатів показує, що зниження надійності АД відбувається при $m(K_m) > 1.05$. Порівняння з результатами впливу теплового старіння ізоляції дозволяє зробити висновок, що при $k_U > 5\%$ переважний вплив зниження надійності АД надає електричне старіння ізоляції.

2.5 Висновки до другого розділу

Запропонована загальна теплова модель дозволяє врахувати ймовірнісні характеристики несинусоїдальності та несиметрії напруги та оцінити їх вплив на надійність АД, визначити, на скільки необхідно знижувати розраховану потужність АД при випадкових змінах означених характеристик для забезпечення необхідного рівня їх надійності.

Розрахунки показали, що при $\kappa_{2U} \geq 2,5\%$ надійність спадає в 2.7 рази та в порівнянні з номінальним режимом роботи.

Аналіз результатів розрахунку функції надійності $R(t)$ для АД типу 4A80B4УЗ при спільній дії несинусоїдальності та несиметрії напруги показує, що за умови відсутності їх взаємного впливу $\kappa_U \approx 15\%$ та $\kappa_{2U} \approx 2\%$ призводять до спаду надійності в 1.4 рази в порівнянні з варіантом $\kappa_U \approx 8.3\%$, $\kappa_{2U} \approx 2\%$.

Дослідженнями встановлено, що зниження надійності АД відбувається при $m(K_m) > 1.05$.

Порівняння з результатами впливу теплового старіння ізоляції дозволяє зробити висновок: при $k_U > 5\%$ переважний вплив зниження надійності АД надає електричне старіння ізоляції.

3 ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ

3.1 Діагностування систем із асинхронними двигунами

Як показали дослідження, основними причинами виходу з ладу *АД* при зниженні *ПЯЕЕ* – експлуатація з надлишковим строком використання, що призводить щорічно, в залежності від галузі використання (таблиця 2.7), до виходу з ладу від 20 % (енергетика) до 55 % (будівництво), при використанні в якості автоматизованого електроприводу (*АЕП*) [18].

Несправності *АД* можуть викликати суттєві аварії, що призводять, в першу чергу, до порушення безперервності технологічного процесу, по друге, зупинки взаємозалежного обладнання, по третє, вагові затрати на ремонт *АЕП* для відновлення виробничого процесу, по четверте, втрати та підвищене енергоспоживання із зростанням споживаної реактивної потужності [18].

Крім сказано вище, неефективне перетворення енергії в *АД* спричинює витрати на додаткове нагрівання та вібрацію, замість виконання корисної роботи та навіть при відсутності несиметрії напруги, спричинює насичення сталі й зниження потужності [18].

Як було означено в першому розділі, режим навантаження та технічний стан, якість електричної енергії та процеси перетворення енергії електромеханічної системи (*ЕМС*) взаємопов'язані в комплексі – “мережа – двигун – навантаження”.

Тому, аналіз технічного стану *АЕП* з проведенням діагностики та моніторингу енергоефективності дозволить розв'язати проблему зниження втрат при невідповідності *ПЯЕЕ*, враховуючи, що додаткові затрати складає, в основному, програмне та методичне забезпечення, а не апаратна частина [19].

Наприклад, використання системи діагностики для одного *АД* потужністю до 3 *кВт* як ланки *АЕП*, призводить до економії 100 у.о. на рік і термін окупності пристрою – 3 роки [19].

Нехтування зв'язками між процесами перетворення енергії та наслідками – значний недолік діючих засобів діагностики *ЕМС*, що унеможливорює провести аналіз причин зниження енергоефективності, появу виникнення. Це не дозволяє визначити причини, що призводять до зниження енергоефективності, виникнення та процесу розвитку несправності [18].

Розробка сукупності дій діагностичного контролю – базова складова при проектуванні електричного обладнання. Це питання особливо є принциповим в процесі експлуатації чи по закінченні терміну роботи.

Складність аналізу методів діагностування (рис.3.1) для розробки узагальненої класифікації полягає в присутності ряду причин: по перше, строк служби обладнання *АЕП* – величина ймовірнісна, пов'язана з невідповідністю *ПЯЕЕ* нормативним значенням, по друге – режими експлуатації *АД* не відповідають рекомендованим, що, в комплексі, призводить до передчасного електричного та теплового старіння ізоляції та, в подальшому, виходу з працездатного стану.



Рисунок 3.1 – Заходи діагностичного контролю [18].

Основна необхідність діагностування – збільшення терміну служби (використання) *АД* як базової складової *АЕП*. Здійснити оцінку ресурсу напруцювання *АД* можливо за відмовою, при проведенні капітального ремонту й поверненні в роботу або знятті з експлуатації. В іншому випадку можливо провести прогнозування з визначеним значенням ймовірності на відмову.

В основі діагностичного контролю для збільшення терміну експлуатації та зниження витрати лежать два критерії управління працездатністю *АД* (*АЕП*) [18]:

- зосередженість на ремонті обладнання та оперативне усунення одноразової відмови, без аналізу причини несправності;
- зосередженість на забезпеченні надійності обладнання: плановий моніторинг реального технічного стану *АД*; ранжування пошкоджень (відмов) за ступенями надійності; розробка заходів усунення аварійних станів.

В основі вибору більш результативного критерію лежать особливості експлуатації *АД* в комплексі *АЕП* [18]:

- відсоток споживання електричної енергії *АД* від загальної споживаної потужності підприємством;
- важливість ланки використання *АД* в складі *АЕП* в технологічному процесі виробництва (зрив плану виробництва; безпека життя працівників);
- об'єм витрат на ремонт та обслуговування *АД* щодо загальних витрат технічної служби;
- витрати на закупівлю нового устаткування в складі *АЕП*, терміни введення в експлуатацію.

Натомість, вагома складова підсистем експлуатації *АД* мають спільні закономірності:

- відсутність підходів щодо виявлення дефектних станів на основі комплексного діагностування *АД* та дотримання строків технічного обслуговування;

– високій рівень аварійних станів внаслідок зниження *ПЯЕЕ* (в основному несинусоїдальність та несиметрія напруги), що призводить до передчасного зношення ізоляції *АД* та, відповідно, додаткових фінансових затрат;

– відсутність автентичності даних щодо ресурсу *АД*, що унеможлиблює прийняття зважених рішень про відновлення, модернізацію, планування робіт із обслуговування.

Розв’язання питання ефективності забезпечення надійності *АД* повинно базуватися на використанні системи діагностики стану *АЕП* як сукупність методів і засобів, яка повинна містити:

– проведення регулярного моніторингу енергоефективності та технічного стану обладнання;

– виявлення дефектів і пошкоджень;

– оцінювання ступеня небезпеки дефектів;

– визначення залишкового ресурсу обладнання.

Діючі методи діагностування дозволили спроектувати схему комплексного аналізу способів діагностики систем із асинхронними двигунами (рис.3.2) за такими показниками: режим роботи; спосіб випробувань; метод дослідження.

3.2 Завдання моніторингу та функціонального діагностування енергоефективності електромеханічних систем

Дослідження впливу зниження *ПЯЕЕ* від стандартизованих значень на роботу *АЕП* показали, що найважливішими факторами падіння рівня енергоефективності систем електроспоживання з *АД* є відхилення напруги, несиметрія та несинусоїдальність напруги, а також – зміна частоти. Зрозуміло, що навіть на 2–3 % зростання *ККД* *АД* є актуальним: зниження споживання електроенергії та, відповідно, експлуатаційний витрат, призводить до швидкої окупності інвестицій, які вкладені в модернізацію [19].

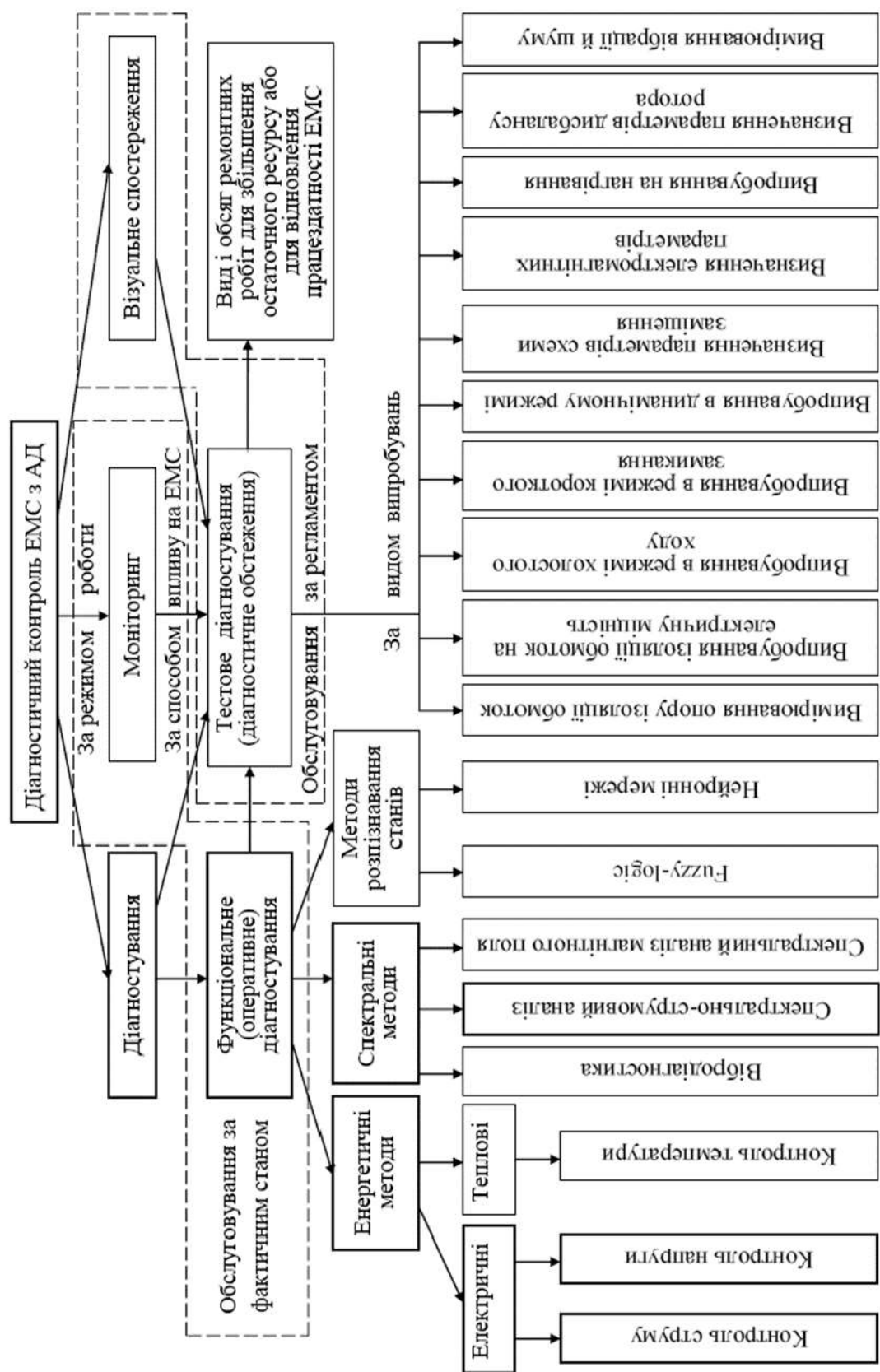


Рисунок 3.2 – Класифікація методів діагностування системи з АД.

Окрім цього, дослідження та аналіз джерел [4-6, 18-19] показують, що за умов зниження *ПЯЕЕ*, функціонування електромеханічних систем (*ЕМС*) спричинює спад енергоефективності та надійності, хоча оцінка економічних збитків практично не проводиться.

Натомість, існує два шляхи розв'язку проблеми: виконання кореляції *ПЯЕЕ* (несиметрії та несинусоїдальності) використанням технічних пристроїв або, як означено в другому розділі, функціонування зі зниженої потужністю та, відповідно, зниженим коефіцієнтом потужності, *ККД* [18].

Окрім цього, системи з *АД* характеризуються низькою надійністю (високий рівень простоїв), фізичне зношення обмоток (не рекомендовані режими роботи, особливо режим зі швидкозмінним навантаженням), що призводить до високого рівня пошкодження (працездатність *АД* за рахунок ремонтів) та затратами на обслуговування [6].

Що стосовно *АЕП*, при проектуванні розрахунки функціонування проводяться на потужності близькі до номінальних (80–100 %), а вибір потужності *АД* здійснюється за струмами запуску при значеннях *ККД* близьких до номінальних.

Практично низький фактичний термін безаварійної роботи *АЕП* (50 % від часу, який встановлений виробником) можливо збільшити за рахунок ефективного використання діагностування з аналізом поточного технічного стану обладнання (причина відмови; місце пошкодження; визначення залишкового ресурсу), на основі якого досягають основну мету – діагностичний контроль для попередження аварійних відмов і діагностування енергоефективності системи – забезпечення реального ресурсу *АЕП* при мінімальному споживанні електричної енергії.

Головні методи забезпечення виконання мети [18]:

– безперервний контроль щодо працездатності ненадійного (дефектного) обладнання, заради вчасного відімкнення при встановлених межах параметрів;

– вчасне припинення експлуатації устаткування (до настання відмови) для здійснення запобіжного ремонту поза планом та відновлення його ресурсу;

Натомість у відповідності до рисунку 3.3, завданнями підвищення енергоефективності системи АЕП з АД на основі здійснення моніторингу та діагностування [18]:

– контроль первинних діагностичних параметрів АД : значення струмів та напруги; значень показників ЯЕЕ (несинусоїдальність, несиметрія); режим навантаження (температура обмоток); умови експлуатації (стан довкілля);

– проведення моделювання режиму навантаження АД у відповідності з технологічним процесом і вибором кроку дискретизації;



Рисунок 3.3 – Завдання моніторингу та функціонального діагностування енергоефективності системи з АД.

– здійснення діагностики (порівняння реальних та каталожних значень параметрів: відхилення значень, причина зміни, значення показників *ЯЕЕ*) та оцінювання параметрів енергоефективності, теплового, енергетичного станів, за математичними моделями (проведення механічних, електромагнітних, теплових розрахунків), прогнозування спожитої електричної енергії й залишкового ресурсу;

– проведення контролю за захистами (тепловий, струмовий) *АД* на початковій стадії спрацювання релейного устаткування, створення протоколів діагностики та проходження енергетичних процесів в системі.

Зростання терміну працездатного стану (до ремонту елементів системи) *АЕП* напряму пов'язана з по детальним виконанням завдань моніторингу та діагностики, а аналіз поточного стану дозволить вчасно проводити планові ремонти та модернізацію (заміну) устаткування.

При аналізі поетапного функціонування *АД* в системі *АЕП* необхідно здійснювати керування всіма процесами для забезпечення необхідного рівня ефективності енергетичних параметрів системи та необхідних режимів роботи й надійності елементів устаткування.

При проведенні керування енергоспоживанням і контролем за технічним станом обладнання необхідно здійснювати в реальному масштабі часу аудит щодо споживання електроенергії та здійснення технічного діагностування.

Окрім зазначеного, виконання завдань щодо функціонального діагностування енергетичної ефективності системи *АЕП* з *АД* дозволить здійснювати прогнозування оптимального використання енергоресурсів і проводити оцінку станів на всіх етапах, від початку експлуатації системи *АЕП* до планового (капітального) ремонту чи списання обладнання.

3.3 Висновки до третього розділу

Запропоновано для зниження впливу зниження *ПЯЕЕ* по при зменшенні потужності проводити діагностику та моніторинг енергоефективності, що дозволить розв'язати проблему зниження втрат.

4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

4.1 Електробезпека при роботі на електроустановках

Електробезпека повинна забезпечуватися: конструкцією електроустановок, технічними засобами захисту, організаційно-технічними заходами.

Згідно напрямків, що передбачаються (обслуговування, огляд, ремонт і експлуатацію електроустаткування, електроприладів, комутаційних апаратів, електричних мереж і т.д.) розглядаються наступні питання:

- оперативне обслуговування та огляди електроустановок;
- забезпечення електробезпеки технічними способами і засобами.

Організаційно-технічні заходи по забезпеченню електробезпеки.

1. Оперативне обслуговування та огляди електроустановок.

Перемикання комутаційного обладнання повинен виконувати оперативний або оперативно-ремонтний персонал, допущений розпорядженням керівника підприємства, черговий електрик або електромонтер по експлуатації електроустаткування.

На електроустановках напругою вище 1000 В допускаються працівники з числа оперативного персоналу повинні мати групу по електробезпеці *IV*, інші працівники в зміні – *III* групу.

На електроустановках напругою до 1000 В працівники з числа оперативного персоналу, одноосібно обслуговуючі електроустановки, повинні мати *III* групу.

Одноосібний огляд електроустановок електротехнічної частини технологічного устаткування може виконувати працівник, що має групу не нижче третьої, з числа оперативного персоналу, що обслуговують цю електроустановку в робочий час або знаходиться на чергуванні, або працівник з числа адміністративно-технічного персоналу, що має *III* групу, для електроустановок напругою вище 1000 В та працівник, що має *IV* групу, для

електроустановок напругою до 1000 В та право одноосібного огляду на підставі письмового розпорядження керівника підприємства.

Працівники, не обслуговуючі електроустановки, можуть допускатися до них у супроводі оперативного персоналу, що має на електроустановках напругою вище 1000 В IV групу та III групу – на електроустановках напругою до 1000 В, або працівника, що має право одноосібного огляду.

Супроводжуючий працівник повинен стежити за безпекою людей, допущених до електроустановок і попереджати їх про заборону наближатися до струмопровідних частин.

При огляді електроустановок дозволяється відкривати двері щитів, складок, пультів управління і інших пристроїв.

При огляді електроустановок напругою вище 1000 В не допускається входити в приміщення, камери, не обладнані обгороджуваннями (вимоги до установки обгороджувань приведені в ПУЕ) або бар'єрами, що перешкоджають наближенню до струмопровідних частин на відстані менші ніж вказаних в табл. 4.1. Не допускається проникати за обгородження та бар'єри електроустановок.

Не допускається виконання будь-якої роботи під час огляду.

При замиканні на землю на електроустановках напругою 3–35 кВ наближатися до місця замикання на меншу ніж чотири метра відстань в ЗРП допускається тільки для оперативних перемикачів з метою ліквідації замикання та допомоги людям, що потрапили під напругу. При цьому слід користуватися електрозахисними засобами.

Вмикати, відмикати роз'єднувачі, вимикачі напругою вище 1000 В з ручним приводом необхідно в діелектричних рукавичках.

Знімати та встановлювати запобіжники слід при знятій напрузі.

Таблиця 4.1 – Допустимі відстані до струмопровідних частин, що знаходяться під напругою

Напруга, <i>кВ</i>	Відстань від людей та інструментів, пристосувань, тимчасових обгороджень, <i>м</i>	Відстань від механізмів і вантажопідіймних машин в робочому і транспортному положенні від стропів, вантажозахватних пристосувань, вантажів, <i>м</i>
до 1	Не нормується (без дотику)	1.0
1 – 35	0.6	1.0

Допускається знімати та встановлювати запобіжники, що знаходяться під напругою, але без навантаження.

Під напругою та під навантаженням допускається замінювати: запобіжники у вторинних колах, запобіжники пробкового типу, у трансформаторів напруги.

При знятті та встановленні запобіжників під напругою необхідно користуватися:

- на електроустановках напругою вище 1000 В – ізолюючими кліщами (штангою) із застосуванням діелектричних рукавичок і засобів захисту особи та очей;
- у електроустановках напругою до 1000 В – ізолюючими кліщами або діелектричними рукавичками та засобами захисту обличчя та очей.

Двері приміщень електроустановок, камер, щитів, окрім тих, в яких проводяться роботи, мають бути закриті на замок.

Забезпечення електробезпеки технічними засобами.

Для забезпечення захисту від випадкового дотику до струмопровідних частин необхідно застосовувати наступні засоби: захисні оболонки; захисні обгородження (тимчасові або стаціонарні); безпечне розташування струмопровідних частин; ізоляцію струмопровідних частин (робочу, додаткову,

посилену, подвійну); ізоляцію робочого місця; низька напруга; захисне відключення; знаки безпеки.

Для забезпечення захисту від ураження електричним струмом при дотику до металевих не струмопровідних частин, які можуть виявитися під напругою в результаті ушкодження ізоляції, застосовують наступні способи: захисне заземлення; занулення; вирівнювання потенціалу; захисне відключення; ізоляцію струмопровідних частин; низька напруга; контроль ізоляції; компенсацію струмів замикання на землю; засоби індивідуального захисту.

Технічні засоби застосовують окремо або в поєднанні один з одним так, щоб забезпечувався оптимальний захист.

Для забезпечення безпеки робіт на діючих електроустановках повинні виконуватися наступні організаційні заходи:

- призначення осіб, відповідальних за організацію та безпеку виробництва;
- оформлення наряду або розпорядження на виконання робіт;
- здійснення допуску до проведення робіт;
- організація нагляду за проведенням робіт;
- оформлення закінчення роботи, перерв в роботі, переведень на інші робочі місця;
- встановлення раціональних режимів праці та відпочинку;

Для забезпечення безпеки робіт на електроустановках слід виконувати:

- відключення установки (частини установки) від джерела живлення;
- перевірку відсутності напруги;
- механічне замикання приводів комутаційних апаратів;
- зняття запобіжників;
- від'єднання кінців ліній електропостачання та інші заходів, що унеможливають помилкове подання напруги до місця роботи;
- заземлення відключених струмоведучих частин (накладення переносних заземлювачів, включення заземлюючих ножів);

– обгородження робочого місця або струмоведучих частин, які залишилися під напругою, до яких в процесі роботи можна доторкнутися або наблизитися на неприпустиму відстань.

При проведенні робіт зі зняттям напруги на діючих електроустановках або поблизу них:

- відключення установки (частини установки) від джерела електропостачання;
- механічне замикання приводів відключених комутаційних апаратів;
- зняття запобіжників;
- від'єднання кінців живлячих ліній і інші заходи, що забезпечують неможливість помилкового подання напруги до місця роботи;
- встановлення знаків безпеки та обгороджень, струмопровідних частин, які залишаються під напругою, до яких в процесі роботи можна доторкнутися або наблизитися на неприпустиму відстань;
- накладення заземлень(включення заземлюючих ножів або накладення переносних заземлень);
- обгородження робочого місця і установка попереджувальних знаків безпеки.

При проведенні робіт на струмоведучих частинах, що знаходяться під напругою виконують роботи згідно наряду не менше ніж двоє осіб, із застосуванням електрозахисних засобів, із забезпеченням безпечного розташування працюючих та механізмів і пристосувань, що застосовуються.

4.2 Проведення аварійно-відновлювальних робіт та ліквідація наслідків при надзвичайних ситуаціях

Для запобігання нещасним випадкам під час роботи, оперативний персонал після отримання розпорядження на проведення аварійно-відновних робіт з повним або частковим зняттям напруги виконує порядок проведення робіт у вказаній нижче послідовності: визначення місця та причини аварії;

виконати необхідні відключення; вжити заходів, які перешкоджають поданню напруги до місця роботи внаслідок помилкового або мимовільного включення комутаційної апаратури; вивісити плакати: «Не включати – працюють люди», при необхідності встановити обгородження місця аварії з вивішуванням заборонних плакатів «Стій – висока напруга»; перевірити відсутність напруги на струмоведучих частинах, на які має бути накладене переносне заземлення або включені стаціонарні заземлення; накласти заземлення; на руків'ї роз'єднувачів або іншої комутаційного обладнання, при помилковому включенні яких може бути подана напруга на заземлену ділянку схеми, вивішується плакат, що нагадує, «Заземлено». Цей плакат вивішується в одному екземплярі на кожному руків'ї і знімається тільки після зняття усіх заземлень; вивісити плакати «Працювати тут», «Влізати тут»; виконати відновні роботи відповідно до правил електро- та пожежної безпеки;

Зміна встановленого порядку виконання технічних заходів може дезорієнтувати оперативний персонал і стати причиною нещасного випадку.

Сутність рятувальних та інших невідкладних робіт – усунення безпосередньої загрози життю та здоров'ю людей, відновлення життєзабезпечення населення, запобігання або значні зменшення матеріальних збитків. Рятувальні та інші невідкладні роботи включають також усунення пошкоджень, які заважають проведенню рятувальних робіт, створення умов для наступного проведення відновлювальних робіт.

Невідкладні заходи поділяють на рятувальні роботи та невідкладні роботи.

До рятувальних робіт відносять:

- розвідка маршруту руху сил, визначення обсягу та ступеню руйнувань, розмірів зон зараження, швидкості та напрямку розповсюдження зараженої хмари чи пожежі;

- локалізація та гасіння пожеж на маршруті руху сил та ділянках робіт;

- визначення об'єктів і населених пунктів, яким безпосередньо загрожує небезпека;

- визначення потрібного угруповання сил і засобів запобігання і локалізації небезпеки;
- пошук уражених та звільнення їх з-під завалів, пошкоджених та палаючих будинків, із загазованих та задимлених приміщень;
- розкриття завалених захисних споруд та рятування з них людей;
- вивіз або вивід населення із небезпечних місць у безпечні райони;
- організація комендантської служби, охорона матеріальних цінностей і громадського порядку;
- відновлення життєздатності населених пунктів та об'єктів;
- санітарна обробка уражених;
- знезараження одягу, взуття, засобів індивідуального захисту, територій, споруд, а також техніки;
- соціально-психологічна реабілітація населення.

До невідкладних робіт відносять:

- прокладання колонних шляхів та улаштування проїздів (проходів) у завалах та на зараженій території;
- локалізація аварій на водопровідних, енергетичних, газових і технологічних мережах;
- ремонт та тимчасове відновлення роботи комунально-енергетичних систем та мереж зв'язку для забезпечення рятувальних робіт;
- зміцнення або руйнування конструкцій, які загрожують обвалом і безпечному веденню робіт.

Невідкладні заходи проводять у три етапи. На першому етапі вирішуються завдання:

- щодо екстреного захисту населення;
- з запобігання розвитку чи зменшення впливу наслідків;
- з підготовки до виконання невідкладних заходів.

Основними заходами щодо захисту населення є:

На першому етапі: оповіщення про небезпеку; використання засобів захисту; додержання режимів поведінки; евакуація з небезпечних у безпечні

райони; здійснення санітарно-гігієнічної, протиепідемічної профілактики і надання медичної допомоги; локалізація аварій; зупинка чи заміна технологічного процесу виробництва; попередження (запобігання) і гасіння пожеж.

На другому етапі: проводять пошук потерпілих; витягання потерпілих з-під завалів, з палаючих будинків, пошкоджених транспортних засобів; евакуація людей із зони лиха, аварії, осередку ураження; надання медичної допомоги; санітарна обробка людей; знезараження одягу, майна, техніки, території; проведення інших невідкладних робіт, що сприяють і забезпечують здійснення рятувальних робіт; надання потерпілим першої допомоги та евакуація їх (при необхідності) у лікувальні заходи.

На третьому етапі вирішуються завдання щодо забезпечення життєдіяльності населення у районах, які потерпіли від наслідків надзвичайних ситуацій: відновлення чи будівництво житла; відновлення енерго-, тепло-, водото- та газопостачання, ліній зв'язку; організація медичного обслуговування; забезпечення продовольством і предметами першої необхідності; знезараження харчів, води, фуражу, техніки, майна, територій; соціально-психологічна реабілітація; відшкодування збитків.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі проведені дослідження оцінки впливу зниження показників якості електроенергії на роботу двигунів малої потужності та встановлено:

1. Проведений аналіз причин відмов електричних двигунів від зниження показників якості електроенергії показав, що найбільша кількість пошкоджень припадає на обмотки статора.

2. Запропонована загальна теплова модель двигуна, яка дозволяє врахувати ймовірнісні характеристики несинусоїдальності та несиметрії напруги та оцінити їх вплив на надійність.

3. Обґрунтована можливість використання рівномірного закону розподілу для оцінки впливу старіння ізоляції на зниження надійності двигунів.

4. Дослідження функції надійності двигунів за наявності несиметрії напруги показали, що при $\kappa_{2U} \geq 2,5 \%$ надійність спадає в 2.7 рази в порівнянні з номінальним режимом роботи.

5. Дослідження функції надійності двигунів за наявності несинусоїдальності напруги показують, що значний спад надійності відбувається при $k_U > 20 \%$.

6. Дослідження функції надійності для двигунів при спільній дії несинусоїдальності та несиметрії напруги показує, що за умови відсутності їх взаємного впливу при $\kappa_U \approx 15 \%$ та $\kappa_{2U} \approx 2 \%$ відбувається зниження надійності в 1.4 рази в порівнянні з варіантом $\kappa_U \approx 8.3 \%$, $\kappa_{2U} \approx 2 \%$.

7. Дослідження строку служби ізоляції обмоток двигуна за впливу вищих гармонік показали, що при $k_U > 5 \%$ переважний вплив зниження надійності надає електричне старіння ізоляції.

8. Запропоновані заходи діагностичного контролю для підвищення терміну безаварійної роботи двигунів.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Видмиш А. А., Ярошенко Л. В. Основи електропривода. Теорія та практика. Частина 1: навчальний посібник. – Вінниця: ВНАУ, 2020. – 388 с.
2. Попов В. А., Ткаченко В. В., Ярмолюк О. С. Ефективне керування режимами систем забезпечення споживачів електричною енергією: навчальний посібник / В. А. Попов, В. В. Ткаченко, О. С. Ярмолюк. – К.: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. – 163 с.
3. Попова І. О. Контроль режимів роботи асинхронних двигунів при несиметрії напруг мережі: автореф. дис. на здобуття ступеня канд. техн. наук: спец. 05.09.16 "Електротехнології та електрообладнання в агропромисловому комплексі" / І. О. Попова. – Мелітополь, 2003. – 20 с.
4. Електропривод і автоматизація: Навчальний посібник / О.Ю.Синявський, П.І Савченко, Ю.М. Лавріненко та ін.; За ред. О.Ю.Синявського. – К.: Аграр Медіа Груп, 2013. – 586 с.
5. Денисюк С.П. Загальні властивості енергетичних характеристик систем з перетворювачами електричної енергії / С.П. Денисюк // Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України. Електроенергетика. – Київ: ІЕД НАНУ, – 1999. – С. 46 – 59.
6. Надійність та діагностика електрообладнання: навчальний посібник / В.М. Казак, Б.І. Доценко, В.П. Кузьмін [та ін.]. – К.: НАУ, 2013. – 280 с.
7. Денисюк С.П. Системи гарантованого електропостачання та питання економії електроенергії / С.П. Денисюк. – К.: Семінар «Синапс / НБУ - 2004». – 2004. – 21 с.
8. ДСТУ EN 50160:2014 (EN 50160:2010, IDT) Характеристики напруги електропостачання в електричних мережах загального призначення. Київ: Мінекономрозвитку України, 2014. – 32 с.
9. Проєктування електричних машин: навч. посіб. / Д.В. Ципленков, О.Б. Іванов, О.В. Бобров, В.В. Кузнецов, В.В. Артемчук, М.О. Баб'як ; Нац. техн. ун-т «Дніпровська політехніка». – Д. : НТУ «ДП», 2020. – 408 с.

10. Жежеленко І.В., Рабінович М.Л., Божко В.М. Якість електричної енергії на промислових підприємствах. – К.: Техніка, 1981. – 157 с.
11. ДСТУ 4743:2007 Проводи самоутримні ізолювані та захищені для повітряних ліній електропередавання. Загальні технічні умови.
12. Оцінка надійності електрообладнання при зниженій якості електроенергії [Текст]: автореф. дис. канд. техн. наук: 05.14.02 / Горпинич Олександр Вікторович; Донецький національний технічний ун-т. - Донецьк, 2005. – 19 с.
13. Осташевський М. О., Петренко О. М. , Юр'єва О. Ю. Теплові розрахунки електричних машин: навч. посібник / М. О. Осташевський, О. М. Петренко, О. Ю. Юр'єва – Харків : ХНУМГ ім. О.М. Бекетова, 2020. – 450 с.
14. Виконавчі механізми у системах автоматики [Електронний ресурс] : метод. реком. для виконання курсової роботи здобувачам вищої освіти ступеня "Магістр" спеціальності 141 "Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка" денної та заочної форми навчання / уклад. : А. А. Ставинський, О. А. Авдєєва, О. С. Садовий. — Електрон. текст. дані. – Миколаїв : МНАУ, 2018. – 75 с.
15. Лавріненко Ю.М., Савченко П.І., Синявський О.Ю., Войтюк Д.Г., Савченко В.В., Голодний І.М. Основи електропривода: підручник / Ю.М. Лавріненко, П.І. Савченко, О.Ю. Синявський, Д.Г. Войтюк, В.В. Савченко, І.М. Голодний. – К.: Видавництво Ліра. – 2017. – 524 с.
16. Мілих В. І. Проектування трифазних асинхронних двигунів з короткозамкненою обмоткою ротора [Текст] : навч. посібник [для студ. спеціальності «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»] / В. І. Мілих. – Харків: 2023. – 112 с.
17. Черкашин В.П. Дослідження впливу несиметричного навантаження на режим системи електропостачання / В.П.Черкашин // Матеріали XII Всеукраїнської студентської науково-технічної конференції «Сталий розвиток міст» (84-я студентська науково-технічна конференція ХНУМГ ім. О. М. Бекетова) 23-25 квітня 2019 р. – Ч.2. – С. 23-25.

18. Закладний О.О. Функціональне діагностування енергоефективності електромеханічних систем шахтних стаціонарних установок: Монографія / О.О. Закладний, О.М. Закладний – К.: Видавництво «Лібра», 2013. – 187 с.

19. Закладний О.М. Сучасні методи регулювання якості електроенергії / О.М. Закладний, О.О. Закладний // Інформаційний збірник «Промислова електроенергетика та електротехніка» Промелектро. - 2007. - №2. - С. 25-30.

20. Правила технічної експлуатації електроустановок споживачів [Текст] : [затв. Наказ М-ва палива та енергетики України 25.07.2006 № 258] / М-во палива та енергетики України. – Х. : Індустрія : Енергетичні рішення, 2012. — 318 с.

21. Стручок В.С. Безпека в надзвичайних ситуаціях. Методичний посібник для здобувачів освітнього ступеня «магістр» всіх спеціальностей денної та заочної (дистанційної) форм навчання / В.С.Стручок. — Тернопіль: ФОП Паляниця В. А., 2022. — 156 с.

22. Коваль В.П., Тарасенко М.Г., Буняк О.А., Мовчан Л.Т. Методичні вказівки до виконання кваліфікаційної роботи магістра для здобувачів другого рівня вищої освіти за ОПП Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка/ В.П. Коваль, М.Г. Тарасенко, О.А. Буняк, Л.Т. Мовчан – Тернопіль: ТНТУ, 2024. – 51 с.