

Центральноукраїнський національний технічний університет
Факультет будівництва, транспорту та енергетики
Кафедра “Електротехнічні системи та енергетичний менеджмент”

“Допущено до захисту ”
Зав. кафедрою ЕТС та ЕМ
к.т.н., професор
_____Петро ПЛЄШКОВ
“ ____ ” _____2024р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

ЗА ДРУГИМ (МАГІСТЕРСЬКИМ) РІВНЕМ
ВИЩОЇ ОСВІТИ

на тему:

**«Обґрунтування системи оцінки показників якості
перетворення енергії і ефективності її використання в
електротехнічних системах електроспоживання»**

Виконав здобувач вищої освіти
ІІ курсу магістратури, групи ЕНМ-23М
ОПП «Енергетичний менеджмент»
спеціальності 141 «Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка»

_____Анатолій СОЛОХ

« ____ » _____2024 р.

Керівник роботи професор, к.т.н.

_____Петро ПЛЄШКОВ

« ____ » _____2024 р.

Рецензент _____

Центральноукраїнський національний технічний університет

Факультет будівництва, транспорту та енергетики

Кафедра електротехнічних систем та енергетичного менеджменту

Рівень вищої освіти другий (магістерський)

Галузь знань 14 «Електрична інженерія»

Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

Освітньо-професійна програма «Енергетичний менеджмент»

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Завідувач кафедри ЕТС та ЕМ

к.т.н., професор

_____ Петро ПЛЕШКОВ

«_____» _____ 20__ р.

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

Солох Анатолій Григорович

(прізвище, ім'я, по-батькові)

1. Тема роботи (проекту) Обґрунтування системи оцінки показників якості перетворення енергії і ефективності її використання в електротехнічних системах електроспоживання

Substantiation of a system for assessing the quality of energy conversion and efficiency of its use in electrical power consumption systems and processing enterprises for the implementation of energy-saving modes

2. Керівник роботи (проекту) Плешков Петро Григорович, к.т.н., професор

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

3. Строк подання студентом роботи до захисту 12.12.2024 р.

4. Мета та завдання випускної кваліфікаційної роботи (проекту) _____

Вступ; Показники якості перетворення електроенергії; Математичний опис процесів перетворення електроенергії; Принципи побудови мікропроцесорних модулів для оцінювання якості перетворення електроенергії; Розробка імітаційної моделі для визначення показників якості перетворення енергії; Техніко-економічне обґрунтування доцільності застосування засобів для визначення показників якості перетворення електроенергії; Охорона праці; Висновки.

5. Консультанти по роботі, із зазначенням розділів роботи

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

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів випускної кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
<i>1</i>	<i>Вступ</i>	<i>07.10.24</i>	
<i>2</i>	<i>Показники якості перетворення електроенергії</i>	<i>15.10.24</i>	
<i>3</i>	<i>Математичний опис процесів перетворення електроенергії</i>	<i>22.10.24</i>	
<i>4</i>	<i>Принципи побудови мікропроцесорних модулів для оцінювання якості перетворення електроенергії</i>	<i>04.11.24</i>	
<i>5</i>	<i>Розробка імітаційної моделі для визначення показників якості перетворення енергії</i>	<i>12.11.24</i>	
<i>6</i>	<i>Техніко-економічне обґрунтування доцільності застосування засобів для визначення показників якості перетворення електроенергії</i>	<i>18.11.24</i>	
<i>7</i>	<i>Охорона праці</i>	<i>24.11.24</i>	
<i>8</i>	<i>Висновки</i>	<i>02.12.24</i>	
<i>9</i>	<i>Оформлення пояснювальної записки ВКР</i>	<i>08.12.24</i>	
<i>10</i>	<i>Оформлення презентаційної частини ВКР</i>	<i>10.12.24</i>	

Дата видачі завдання _____
Підпис керівника _____

«___» _____ 2024 р.
Петро ПЛЄШКОВ

Завдання прийнято до виконання _____
Підпис здобувача _____

«___» _____ 2024 р.
Анатолій СОЛОХ

АНОТАЦІЯ

Кваліфікаційна робота: 122с.; 27 рис.; 23 табл.; 17 джерел.

Солох А.Г. Обґрунтування системи оцінки показників якості перетворення енергії і ефективності її використання в електротехнічних системах електроспоживання. – Рукопис.

Магістерська робота за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка», ОПП «Енергетичний менеджмент». – Центральноукраїнський національний технічний університет, Кропивницький, 2024 рік.

Об'єктом досліджень є асинхронні двигуни.

Предмет досліджень – показники якості перетворення енергії в електротехнічному обладнанні.

Метою кваліфікаційної роботи є дослідження системи оцінки показників якості перетворення енергії і ефективності її використання в електротехнічних системах електроспоживання.

В роботі наведено математичні вирази для визначення показників якості перетворення енергії, що характеризують стан електричної машини та дозволяють судити про її термін служби, визначено показники якості перетворення енергії (коефіцієнт потужності та коефіцієнт реактивності) при живленні полігармонічним напругою за методикою, заснованою на аналізі складових миттєвої потужності.

Значну увагу приділено розробці алгоритму роботи пристрою для визначення показників якості перетворення енергії. Одним із шляхів реалізації цього завдання є побудова вимірювально-обчислювальних систем, що вимірюють та обробляють різну інформацію про стан енергооб'єктів.

В рамках роботи було запропоновано методику, яка дозволяє оцінити вплив таких факторів, як нестабільність напруги, перевантаження та інші негативні на процес старіння ізоляції обмоток статора. Цей підхід дозволяє більш точно прогнозувати термін служби двигуна та уникнути несподіваних поломок.

Отримане значення терміну окупності капітальних витрат за впровадження модуля контролю якості перетворення електроенергії підтверджує доцільність встановлення цієї системи двигунах великої потужності.

Ключові слова: якість перетворення електроенергії, діагностика, оптимізація, термін служби двигуна, інформаційно-вимірювальна техніка, енергоефективність.

ANNOTATION

Qualification work: 122 p.; Fig. 27; 23 tables; 17 sources.

Solokh A.G. Justification of the system for evaluating the quality indicators of energy conversion and the efficiency of its use in electrotechnical power consumption systems. - Manuscript.

Master's thesis on specialty 141 "Electric power engineering, electrical engineering and electromechanics", OPP "Energy Management". – Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, 2024.

The object of research is asynchronous motors.

The subject of research is indicators of the quality of energy conversion in electrical equipment.

The purpose of the qualification work is to study the system for evaluating energy conversion quality indicators and the efficiency of its use in electrical power consumption systems.

The paper gives mathematical expressions for determining the energy conversion quality indicators that characterize the state of the electric machine and allow judging its service life, the energy conversion quality indicators (power coefficient and reactivity coefficient) are determined when powered by polyharmonic voltage using the method based on the analysis of instantaneous power components .

Considerable attention is paid to the development of the algorithm of the device to determine the indicators of the quality of energy conversion. One of the ways to implement this task is the construction of measuring and computing systems that measure and process various information about the state of energy facilities.

As part of the work, a methodology was proposed that allows to evaluate the influence of such factors as voltage instability, overloading and other negative factors on the aging process of the insulation of the stator windings. This approach makes it possible to more accurately predict the life of the engine and avoid unexpected breakdowns.

The obtained value of the payback period for capital costs for the implementation of the power conversion quality control module confirms the feasibility of installing this system on high-power engines.

Keywords: power conversion quality, diagnostics, optimization, engine service life, information and measurement technology, energy efficiency.

ЗМІСТ

	ВСТУП.....	6
1	ПОКАЗНИКИ ЯКОСТІ ПЕРЕТВОРЕННЯ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ.....	8
1.1.	Завдання дослідження показників якості перетворення.....	8
1.2.	Основні показники якості електроенергії.....	10
1.3.	Характеристики показників якості електроенергії.....	26
2	МАТЕМАТИЧНИЙ ОПИС ПРОЦЕСІВ ПЕРЕТВОРЕННЯ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ.....	38
2.1.	Визначення показників якості перетворення енергії електричного обладнання із синусоїдальною напругою живлення.....	39
2.2.	Визначення показників якості перетворення електроенергії для електротехнічного обладнання, що викривлює напругу.....	51
2.3.	Комплекс показників електротехнічних процесів, що визначають показники якості перетворення електроенергії.....	60
3	ПРИНЦИПИ ПОБУДОВИ МІКРОПРОЦЕСОРНИХ МОДУЛІВ ДЛЯ ОЦІНЮВАННЯ ЯКОСТІ ПЕРЕТВОРЕННЯ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ.....	64
3.1.	Вимоги до обладнання для вимірювання якості перетворення електроенергії.	64
3.2.	Розробка структури модуля визначення якості перетворення електроенергії.	68
3.3.	Алгоритми для визначення якості перетворення електроенергії за параметрами миттєвої потужності.	72
3.4.	Система датчиків для визначення показників якості перетворення електроенергії.....	77
4	РОЗРОБКА ІМІТАЦІЙНОЇ МОДЕЛІ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ПОКАЗНИКІВ ЯКОСТІ ПЕРЕТВОРЕННЯ ЕНЕРГІЇ.....	82

4.1.	Моделювання електричних процесів в асинхронному двигуні при несинусоїдності напруги живлення.....	82
4.2.	Моделювання електричних процесів в асинхронному двигуні із несиметричними параметрами фазних ланцюгів.....	85
4.3.	Визначення залишкового терміну служби ізоляції обмоток двигуна.....	89
4.4.	Визначення показників якості перетворення енергії за результатами моделювання при несинусоїдальній напрузі живлення двигуна.	90
4.5.	Визначення показників якості перетворення енергії за результатами моделювання при зменшенні індуктивності статора фази.	97
5	ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ ДОЦІЛЬНОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ ЗАСОБІВ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ПОКАЗНИКІВ ЯКОСТІ ПЕРЕТВОРЕННЯ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ.....	104
5.1.	Обґрунтування застосування системи оцінювання якості перетворення енергії АД.	104
5.2.	Розрахунок терміну служби АД.	108
5.3.	Економічні збитки внаслідок аварійного виходу з ладу асинхронного двигуна.	109
5.4.	Економічний ефект при безаварійному вимкненні асинхронного двигуна.....	112
6	ОХОРОНА ПРАЦІ.....	115
6.1.	Технічні заходи для безпеки робіт із зняттям напруги.....	115
6.2.	Пожежна безпека.	117
	ВИСНОВКИ.....	119
	СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	121

ВСТУП

В даний час контроль якості електроенергії набуває особливої значущості на тлі глобальних змін у структурі енергоспоживання.

Проблеми з якістю електричної енергії можуть спровокувати низку негативних наслідків, таких як підвищені втрати електроенергії у мережах, перегрів і передчасний знос електромоторів і устаткування через ризик однофазних коротких замикань, що переходять у багатofазні, зростання енергоспоживання та збільшення навантаження на обладнання, хибні спрацьовування автоматики та релейного захисту, збої у їх роботі, некоректна робота обчислювальної техніки та керуючої електроніки, неточності у показаннях електролічильників.

Суворе дотримання стандартів якості електроенергії не завжди гарантує надійний захист чутливого обладнання. Тому застосування програмованих пристроїв та реле суттєво підвищує рівень захисту електрообладнання.

В даний час асинхронні двигуни є найпоширенішими серед електротехнічного обладнання. Вони широко використовуються в промисловості як електроприводи, виступаючи основними пристроями для перетворення електричної енергії на механічну.

При експлуатації електричної машини можуть виникати режими, у яких відбуваються зміни у конструкції. Це призводить до зміни характеристик машини: нерівномірності зазору, зміни активних опорів фаз статора, асиметрії взаємних індуктивностей та індуктивностей статора. Ці фактори викликають появу струмів вищих гармонік, змінну складову потужності, вібрації, що погіршує показники якості перетворення енергії у двигуні. Зниження якості перетворення енергії прискорює знос двигуна та його вихід із ладу.

У сучасних умовах очевидна потреба у створенні механізмів, які б дозволяли продовжити термін служби електрообладнання через оцінку його поточного ресурсу працездатності, а також з урахуванням стратегії модернізації та оновлення на довгострокову перспективу.

Щоб запобігти аварійним зупинкам електродвигунів, діє система планово-попереджувальних ремонтів. У рамках цих ремонтів виконуються профілактичні роботи на електромашинах незалежно від їх фактичного стану, що потребує тимчасової зупинки виробничого процесу та спричиняє збитки для підприємства. При цьому можуть тимчасово виводитися з експлуатації справні машини, які в момент проведення планового ремонту не потребують втручання. Більше того, проведення профілактичних ремонтів не завжди гарантує безаварійну роботу обладнання в проміжках між ремонтами, оскільки ППР не враховує експлуатаційний режим і застосовується однаково для всіх аналогічних електромашин, що працюють з різним навантаженням.

Визначення терміну служби двигуна – ключове завдання для ефективного енергозбереження. Облік ресурсу електричної машини, що залишився, в процесі експлуатації дозволяє вчасно вивести її з роботи і провести поточний ремонт до аварійного відключення. З економічної точки зору такий ремонт значно дешевше, ніж середній або капітальний ремонт, який стає неминучим при аварійному виході двигуна з ладу.

Для підтримки якості перетворення енергії необхідно створити та впровадити надійну систему моніторингу технічного стану електричної машини. Ця система повинна виконувати захисні функції, проводити діагностику несправностей та визначати залишковий термін служби обладнання. Подібна система дозволить прогнозувати можливі аварійні ситуації під час експлуатації, точно визначати ресурс машини, що залишився, і знаходити оптимальні режими роботи для конкретних умов. Це допоможе підвищити чи хоча б не знизити ресурс електромашини.

1 ПОКАЗНИКИ ЯКОСТІ ПЕРЕТВОРЕННЯ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ

1.1. Завдання дослідження показників якості перетворення.

Під час роботи електричної машини можуть виникати режими, що призводять до змін у її конструкції, таких як неврівноваженість ротора, поява еліптичної форми цапфи валу чи погіршення стану підшипників. Крім того, конструктивні параметри двигуна можуть змінюватися під час ремонтних робіт, що впливає на його характеристики. Це може спричинити нерівномірний зазор, зміну активного опору окремих фаз статора, а також асиметрію взаємних та власних індуктивностей. Усі ці фактори провокують виникнення струмів вищих гармонік, коливань потужності, вібрацій, і загалом знижують ефективність процесу перетворення енергії у асинхронному двигуні.

Струми вищих гармонік та вібрації в електродвигуні також можуть виникати при живленні його несинусоїдальною або несиметричною напругою. Крім того, насичення сталі в активних частинах двигуна сприяє появі струмів найвищих гармонік. Погіршення якості перетворення енергії в двигуні спричиняє його пришвидшене зношення і зменшує термін служби. Дослідження впливу таких змін на процес зносу двигуна та узагальнення результатів цих досліджень вимагає застосування спеціального обладнання. Це, у свою чергу, дозволяє прогнозувати момент виходу двигуна з ладу та визначати його залишковий ресурс.

При розробці математичної моделі враховується вплив зниження якості перетворення енергії на ізоляцію обмоток асинхронного двигуна, оскільки саме цей компонент найбільш схильний до механічних впливів (вібрація) і термічних навантажень (додатковий нагрівання, викликаний появою вищих гармонік струмів).

Порядок дій визначення залишкового терміну служби двигуна наочно представлений схемою на рисунку 1.4. Цей алгоритм дозволяє структуровано

підійти до оцінки стану ізоляції обмоток та виявлення критичних параметрів, що впливають на зношування двигуна.

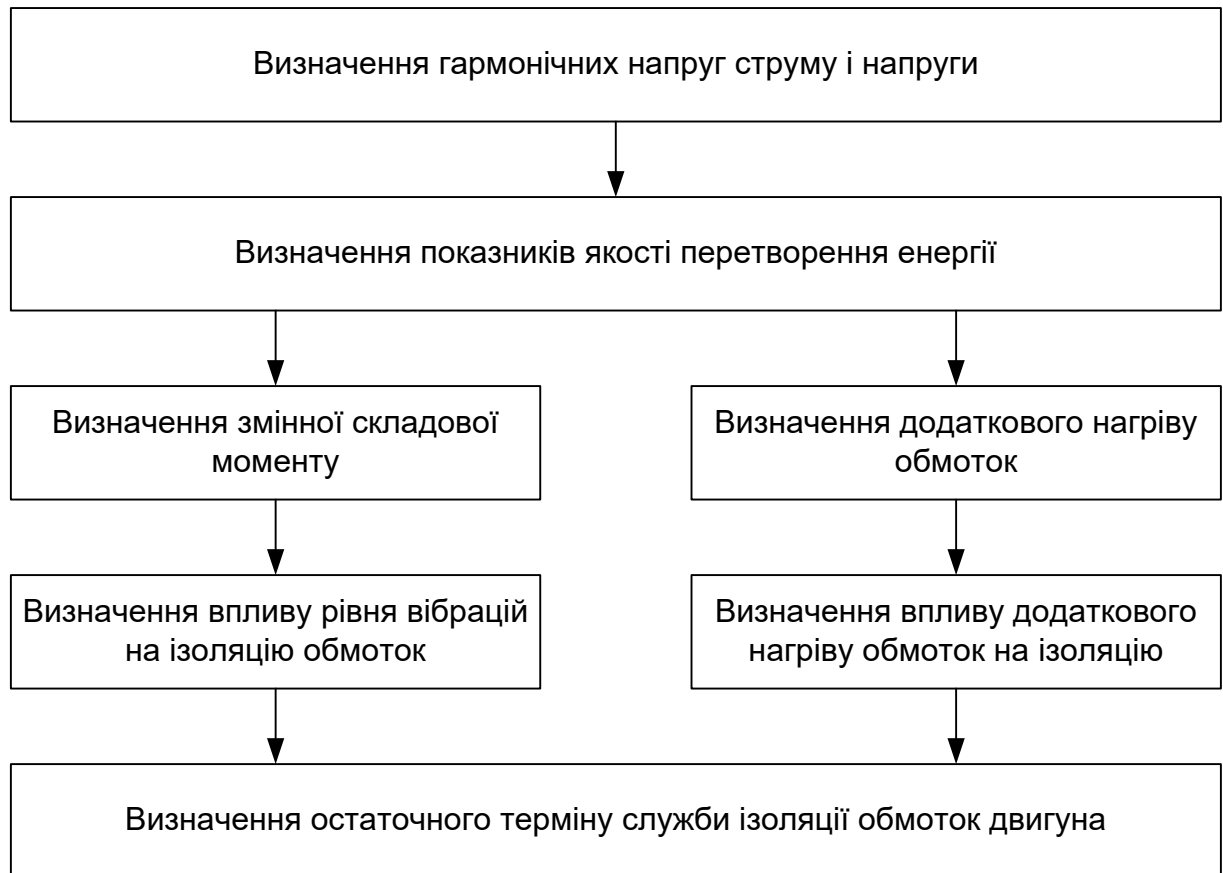


Рисунок 1.4 - Послідовність дій визначення терміну служби асинхронного двигуна

Визначення терміну служби двигуна відіграє ключову роль в енергоресурсозбереженні. Контроль залишкового ресурсу електричної машини в процесі експлуатації дозволяє своєчасно вивести її з роботи для проведення поточного ремонту, запобігаючи аварійному вимкненню. Такий підхід є економічно вигідним, оскільки поточний ремонт обходиться значно дешевше порівняно із середнім або капітальним ремонтом, які потрібні після аварійного виходу двигуна з ладу.

Таким чином, мета дослідження полягає в обґрунтуванні можливості оцінки залишкового терміну служби електроустаткування на основі показників якості перетворення енергії. Для цього необхідно провести аналіз основних факторів, що прискорюють старіння ізоляції обмоток асинхронного

двигуна, виявити закономірності впливу погіршення якості перетворення енергії на цей процес старіння та розробити на їх основі алгоритми, які будуть вбудовані в систему керування пристроєм.

1.2. Основні показники якості електроенергії

Електроенергія, як особливий вид продукції, має низку характеристик, які визначають її придатність для використання у різних виробничих процесах. Сукупність цих показників, які забезпечують нормальне функціонування споживачів електроенергії, об'єднується під поняттям якості електроенергії.

В останні роки питання підвищення якості електроенергії набули особливої значущості, оскільки її параметри можуть суттєво вплинути на рівень енергоспоживання, надійність електропостачальних систем та на стабільність виробничих процесів[5].

Зі зростанням продуктивності праці та ускладненням технологічних процесів на сучасних промислових підприємствах активно впроваджуються регульовані вентильні електроприводи, потужні дугові печі, зварювальні установки. Ці споживачі відрізняються тим, що їхня робота впливає на якість електроенергії в мережі живлення. У той же час стабільна робота самого електроустаткування безпосередньо залежить від якості електроенергії, що надходить з системи живлення. Взаємодія між електрообладнанням і мережею живлення називають електромагнітною сумісністю.

Вирішення задачі електромагнітної сумісності тісно пов'язане з визначенням та підтриманням оптимальних параметрів якості електроенергії, при яких дотримуються технічні вимоги з мінімальними витратами[14].

Основними напрямками у покращенні якості електроенергії є економічні, математичні та технічні аспекти. Економічний аспект включає методи оцінки збитків, що виникають через неякісну електроенергію в промислових електромережах. Математичний аспект пов'язаний із

розробкою методів розрахунку показників якості електроенергії, обґрунтовуючи вибір оптимальних підходів. Технічний аспект охоплює створення обладнання та заходів для підвищення якості електроенергії, а також організацію системи моніторингу та управління якістю електроенергії [6].

Поліпшення якості електроенергії можливе як за рахунок оптимізації мережі живлення, так і шляхом впровадження спеціального обладнання, ґрунтуючись на досвіді проектних та експлуатаційних організацій.

Деякі рішення мають загальний характер і розробляються згідно з встановленими технічними вимогами, тоді як у ряді випадків необхідний облік специфіки конкретних умов, наприклад, якщо підприємство характеризується наявністю великих ударних навантажень, що потребує особливого підходу.

Питання забезпечення стабільної якості електроенергії потребують глибшого вивчення, оскільки складність таких завдань зростає через відсутність необхідної вимірювальної апаратури в мережах та необхідність адаптації методів вимірювань. Так, випадкові коливання навантажень вимагають застосування статистичних інструментів та аналізу даних, що включає використання імовірісно-статистичних методів розрахунку для більш точної оцінки показників [10].

1.2.1. Відхилення напруги.

Одним з ключових параметрів, що визначають якість електроенергії, є значення напруги, що діє, яке може бути фазним або лінійним в залежності від схеми підключення споживачів.

На одному рівні трансформації значення напруги мережі змінюється у межах невеликого діапазону. Щоб спростити розрахунки та забезпечити більшу наочність, на практиці часто використовують показник відхилення напруги [2] .

Відхилення напруги, що позначається як ΔU , є різницею між фактичним значенням напруги U та його номінальним значенням $U_{\text{ном}}$, встановлений для конкретної мережі.

Відхилення напруги істотно впливають на техніко-економічні параметри систем електропостачання. Основні причини цих відхилень у промислових електромережах включають зміни режиму роботи приймачів електроенергії у вузлі навантаження, коливання режиму джерела живлення, а також нераціональне підключення однофазних та імпульсних навантажень.

Навіть за змін напруги в межах, передбачених стандартами, техніко-економічні характеристики обладнання можуть значно змінюватися. Крім того, коливання напруги впливають на параметри мережі живлення, так як вони тягнуть за собою зміни втрат потужності та енергії.

Асинхронні двигуни, будучи основними приводами різних механізмів, особливо чутливі до відхилень напруги. У таблиці 1.1 наводяться дані про вплив відхилень напруги в діапазоні від -10% до +10% на основні параметри цих двигунів[4].

Таблиця 1.1 - Зміна параметрів приймачів електроенергії при відхиленні напруги від норми.

Параметри двигунів	Зміна параметрів при зміні напруги	
	+10 %	-10 %
Пусковий та максимальний крутний момент	-19 %	21 %
Синхронна частота обертання	const	const
Ковзання, %	22 %	-18 %
Частота обертання з номінальним навантаженням	-1,5 %	1 %
Коефіцієнт корисної дії при навантаженні: номінальним 75% 50%	-2 % const -1÷2 %	+1 % const 1÷2 %
Коефіцієнт потужності при навантаженні: 100 % 75% 50%	1 % 2–3 % 4–5 %	-3 % -4 % -5÷-6 %
Пусковий струм	-10÷-12 %	10–12 %
Струм ротора при номінальному навантаженні	14 %	11 %
Струм статора при номінальному навантаженні	10 %	-7 %
Підігрів температури обмотки за номінального навантаження	5–6 %	const

При зміні напруги мережі щодо номінального значення активна потужність на валу двигуна асинхронного залишається практично постійною. Однак втрати активної потужності змінюються і можуть бути зіставні з втратами в мережах живлення.

Відхилення напруги значно впливають термін служби асинхронного двигуна. Зниження напруги при високому навантаженні скорочує термін його експлуатації, тому що в цьому випадку спостерігається зростання струму, що призводить до інтенсивнішого старіння ізоляції. Наприклад, при відхиленні напруги на затискачах у розмірі 10% при номінальному навантаженні термін служби двигуна може скоротитися вдвічі.

З іншого боку, підвищення напруги на затискачах двигуна призводить до збільшення споживаної реактивної потужності через зростання струму, що також негативно позначається на його роботі та довговічності [5].

Частота обертання валу асинхронного двигуна змінюється в залежності від напруги, що підводиться, що може істотно позначитися на продуктивності технологічного обладнання, особливо в таких установках, як потокові лінії та автоматизовані верстати.

Відхилення напруги значно впливають на протікання технологічних процесів в електрообладнанні. При зниженні напруги збільшується тривалість технологічного процесу, а деяких випадках це може призвести до його повного порушення. Наприклад, при зниженні напруги на 8–10 % технологічні процеси у печах опору та індукційних печах можуть виявитися неможливими для завершення. Це вказує на важливість підтримки стабільної напруги для забезпечення ефективної роботи технологічного обладнання.

Відхилення напруги також негативно впливає на процес електричного зварювання. При зниженні напруги якість зварних швів значно погіршується. Наприклад, якщо напруга падає на 10 %, час, необхідний зварювання, збільшується приблизно на 20 % через необхідність додаткового підігріву швів.

З іншого боку, підвищення напруги призводить до зростання реактивної потужності зварювального обладнання. Зокрема, при зміні напруги з 200 до 220 збільшення напруги на 1% призводить до підвищення реактивного навантаження приблизно на 5%. Для порівняння, за номінального навантаження це збільшення становить лише близько 2,5 %. Це потребує підтримки стабільного рівня напруги для забезпечення оптимальних умов зварювання та підвищення якості виконаних робіт.

Зміни якості напруги впливають на функціонування освітлювальних систем. Нестабільна напруга може викликати проблеми з джерелами світла, такі як миготіння та спалахи, що призводить до підвищеної стомлюваності

очей у працівників. Відхилення напруги безпосередньо пов'язані з такими параметрами, як світловий потік, освітленість, термін служби ламп, споживана потужність та їх ККД.

Наприклад, якщо напруга підвищується на 1 % вище від номінальної, споживана потужність ламп розжарювання збільшується приблизно на 1,5 %, а світловий потік — на 3,7 %. Однак термін служби цих ламп при цьому скорочується на 14%. При збільшенні напруги на 3% термін служби ламп розжарювання зменшується на 30%, а при підвищенні на 5% скорочується вдвічі.

Люмінесцентні лампи також дуже чутливі до відхилень напруги: при підвищенні напруги на 10% термін служби може скоротитися на 20–30%. Хоча зниження напруги нижче за номінальну може продовжити термін служби ламп, це також призводить до зменшення світлового потоку, що негативно позначається на рівні освітленості. При падінні напруги на 20% і більше запалення газорозрядних та люмінесцентних ламп стає неможливим [1] .

1.2.2. Коливання напруги.

Коливання напруги є зміни середньоквадратичного значення напруги, які можуть бути класифіковані на повільні і швидкі. Повільні зміни відбуваються протягом дня і можуть тривати від кількох секунд до хвилин, тоді як швидкі зміни мають тривалість у діапазоні секунд та мілісекунд. Часті швидкі коливання напруги сприймаються як флікер, і цей ефект докладно розглядається у спеціальному розділі.

Основними джерелами коливань напруги є машини та обладнання із значними коливаннями навантаження, які працюють у мережах електропостачання з низькою потужністю короткого замикання. Ці коливання можуть призвести до порушення нормальної роботи обладнання, зниження потужності машин та продуктивності, а також погіршення якості

продукції. Щоб уникнути таких негативних наслідків, доцільно впроваджувати системи стабілізації напруги, які допомагають підтримувати її на стабільному рівні та мінімізувати коливання.

Колівання напруги оцінюються за допомогою кількох ключових параметрів: розмахом змін напруги, частотою цих змін та інтервалом між послідовними змінами.

Розмах зміни напруги визначається як різницю між сусідніми екстремумами огинаючої діючих значень напруги. Якщо огинаюча має горизонтальні ділянки, розмах можна обчислити як різницю між сусіднім екстремумом і горизонтальною ділянкою, або як різницю між двома сусідніми горизонтальними ділянками[2].

Якщо інтервал часу між завершенням однієї зміни напруги і початком наступного, спрямованого в тому ж напрямку становить менше 0,04 секунди, такі зміни розглядаються як єдине ціле. Під коливанням напруги розуміється сукупність із п'яти розмахів зміни напруги, зареєстрованих протягом 12 секунд. Це визначення допомагає встановити характеристики стабільності електропостачання та оцінити якість напруги в мережі.

Вплив коливань напруги на техніко-економічні показники систем електропостачання є значним. Обмеження на допустимі розмахи змін напруги для освітлювальних систем запроваджено з метою забезпечення охорони праці. Швидка зміна напруги може викликати різкі коливання світлового потоку, що, у свою чергу, призводить до зорової стомлюваності працівників, зниження їх продуктивності та підвищення ймовірності травматизму.

Колівання напруги в електричних мережах промислових підприємств часто виникають внаслідок роботи потужних і різко змінних навантажень, таких як електродугові сталеплавильні печі, зварювальні агрегати та вентильні перетворювачі. Ці навантаження викликають істотні колівання, які

можуть негативно впливати на загальну ефективність системи електропостачання, а також на якість продукції та безпеку праці.

Важливі коливання напруги спостерігаються на шинах підстанцій, що живлять зварювальні машини. Вони мають вплив як на роботу споживачів, які отримують живлення від тих самих підстанцій, так і на функціонування самих зварювальних машин, що призводить до погіршення якості зварювання. Дослідження показали, що для машин контактного зварювання коливання напруги не повинні перевищувати 5 % при зварюванні різних видів деталей, щоб забезпечити високу якість зварних швів та надійність роботи обладнання.

При живленні печей опору від тиристорних перетворювачів коливання напруги призводять до змін струму навантаження, що може спричинити нестабільний режим роботи системи автоматичного регулювання температури.

Коливання напруги, що у результаті роботи прокатних станів, викликають коливання електромагнітного моменту, і навіть активної і реактивної потужності синхронних генераторів на теплоелектричних станціях (ТЕЦ). Це негативно впливає на економічну ефективність роботи станції в цілому. Відомі випадки, коли виникають проблеми з нестабільною роботою системи автоматичного регулювання збудження та реактивної потужності синхронних генераторів та двигунів, а також збої у роботі пристроїв форсування збудження. Ці явища можуть призвести до зниження продуктивності та збільшення витрат на обслуговування обладнання.

1.2.3. Несинусоїдність напруги

Внаслідок інтенсифікації виробничих процесів та впровадження нових технологій на промислових підприємствах все частіше застосовуються вентильні перетворювачі, установки для електрозварювання як однофазного, так і трифазного типу, а також потужні електродугові печі з нелінійними

вольт-амперними характеристиками. Подібними властивостями володіють силові трансформатори, потужні магнітні підсилювачі та газорозрядні лампи. Характерною рисою цих пристроїв є їхнє споживання несинусоїдальних струмів, коли на їх затискачі подається синусоїдальна напруга.

Вплив несинусоїдальних режимів на функціонування електроустаткування.

При протіканні струмів вищих гармонік через елементи системи електропостачання промислових підприємств виникають додаткові втрати як активної потужності, і електроенергії. Найбільші збитки активної потужності, пов'язані з вищими гармоніками, спостерігаються в трансформаторах, двигунах і генераторах, де збільшення активних опорів обмоток зі зростанням частоти відбувається майже пропорційно $\sqrt{\nu}$. У деяких випадках ці втрати можуть викликати неприпустиме перегрівання обмоток електричних машин і в будь-якому випадку призводять до значних додаткових витрат електроенергії. Рівень таких втрат у мережах живлення промислових підприємств становить від 4 до 6 % від номінальних втрат при синусоїдальній напрузі, а у внутрішньовиробничих мережах і мережах електрифікованого залізничного транспорту вони можуть досягати 10–15%.

Спотворення синусоїдальної форми напруги в електричній мережі значно погіршують умови експлуатації силових кабелів. Вищі гармоніки, що виникають в результаті цих спотворень, прискорюють процес руйнування ізоляції кабелів, збільшують ймовірність виникнення коротких замикань і призводять до більш частих ремонтів. У результаті підприємства несуть істотні додаткові витрати на підтримку кабельних мереж у працездатному стані. Так, зі збільшенням коефіцієнта несинусоїдності напруги на 5-10% витрати на ремонт та обслуговування кабелів зростають на 15-20%, а при більш високих значеннях цього коефіцієнта – до 30%.

У процесі експлуатації важливим аспектом є збільшення похибок індукційних лічильників активної та реактивної енергії. У більшості випадків

це збільшення може досягати 10% при несинусоїдності напруги. лічильників, що призводить до недоурахування витрати електроенергії через їх великі негативні частотні похибки.

Також присутність вищих гармонік ускладнює, а в деяких випадках унеможлиблює використання силових ланцюгів для передачі інформації. перетворювачів, що призводить до погіршення якості випрямленого струму.

Найбільш помітний вплив вищі гармоніки струму та напруги надають на функціонування батарей конденсаторів. Досвід роботи як вітчизняних, так і зарубіжних промислових підприємств показує, що батареї конденсаторів, що функціонують в умовах несинусоїдальних режимів, нерідко виходять з ладу через спучування або навіть вибухи. Основною причиною руйнування конденсаторів стає їхнє перевантаження струмами вищих гармонік, що, як правило, відбувається при виникненні резонансного режиму в системі електропостачання на частоті однієї з гармонік.

1.2.4. Несиметрія напруги.

Несиметрія напруг і струмів у трифазній системі є одним із ключових аспектів оцінки якості електроенергії. Причиною виникнення цієї несиметрії є різноманітні невідповідні режими роботи системи електропостачання. Широке впровадження потужних однофазних електротермічних установок (до 10 000 кВт) та трифазних дугових печей значно збільшило частку несиметричних навантажень на промислових підприємствах. Підключення таких великих несиметричних навантажень до трифазних мереж призводить до тривалого несиметричного режиму роботи, який проявляється у вигляді спотворень напруги та струмів.

Нерівномірний розподіл однофазних та використання двофазних споживачів електричної енергії створюють асиметричне навантаження на трансформатори та мережі електроживлення. Активне навантаження споживача викликає нерівномірність у фазовому напрузі, тоді як реактивне

навантаження породжує фазовий зсув, який відхиляється від ідеальних 120° . Це, у свою чергу, призводить до збільшення втрат енергії, шумного гудіння трансформаторів та нестійкої роботи електродвигунів, що може спричинити більш високі втрати, а також скоротити термін служби двигунів через теплове навантаження та знос підшипників. Неоптимальна компенсація реактивного струму призводить до значних витрат.

Для усунення несиметрії можна застосовувати методи, такі як баланс фазових навантажень, збільшення потужності короткого замикання в мережі або впровадження систем динамічного контролю симетрії. Для компенсації реактивного струму рекомендується використовувати системи з параметрами несиметрії, які регулюються.

У системах електропостачання виділяють короткочасні (аварійні) та тривалі (експлуатаційні) несиметричні режими. Короткочасні несиметрії часто виникають через різні аварійні ситуації, такі як несиметричні короткі замикання або обриви проводів повітряних ліній з наступним замиканням на землю. Тривалі несиметричні режими, зазвичай, пов'язані з особливостями конструкції елементів електричної мережі чи підключенням до системи несиметричних навантажень (однофазних, двофазних чи трифазних) [5].

Несиметрія напруги і струмів, що виникає внаслідок невідповідностей в елементах електричної мережі, називається поздовжньою. Прикладом поздовжньої несиметрії можуть бути неповнофазні режими роботи повітряних ліній та відмінності в параметрах фаз окремих компонентів мережі.

Поперечною називається несиметрія напруг та струмів, викликана підключенням до мережі багатофазних та однофазних несиметричних навантажень. Вона також може виникати при нерівності активних і реактивних опорів окремих фаз деяких споживачів енергії, таких як дугові електропечі.

Для аналізу та розрахунків несиметричних режимів у трифазних ланцюгах застосовується метод симетричних складових. Цей метод заснований на тому, що будь-яку несиметричну трифазну систему величин (таких як струми, напруги та магнітні потоки) можна подати як суму трьох симетричних систем величин. Ці симетричні системи, що разом утворюють несиметричну систему, називають симетричними складовими. Кожна з симетричних складових відрізняється порядком проходження фаз, тобто порядком, в якому фазні величини досягають своїх максимальних значень. Вони називаються системами прямої, зворотної та нульової послідовності.

Несиметрія міжфазної напруги виникає через наявність складових зворотної послідовності, у той час як несиметрія фазних напруг також пов'язана з присутністю складових нульової послідовності. Несиметрія напруг у системах електропостачання істотно впливає на функціонування окремих компонентів мережі та споживачів електроенергії.

1.2.5. Відхилення та розмах коливань частоти.

Відхилення частоти визначається як різниця між фактичним значенням та номінальною основною частотою. У нормальних умовах функціонування енергосистеми допускаються відхилення частоти, усереднені за 10 хвилин у межах $\pm 0,1$ Гц. Також дозволяється тимчасова робота системи з відхиленням частоти, усередненим за той же період, у межах $\pm 0,2$ Гц.

Коливання частоти є її зміни, що відбуваються зі швидкістю 0,2 Гц в секунду, при цьому розмах цих коливань не повинен перевищувати 0,2 Гц. Навіть невеликі зміни відхилень та розмаху коливань частоти, навіть у суворо встановлених межах, можуть впливати на роботу електричних споживачів та надійність деяких типів електрообладнання. Асинхронні та синхронні електродвигуни, що працюють із постійним моментом на валу, змінюють свою частоту обертання ω залежно від частоти мережі.

Наприклад, для асинхронного двигуна дану залежність визначають за формулою:

$$\omega = \frac{2\pi f_1}{p}(1-s) \quad (1.1)$$

де s – величина ковзання двигуна; p - кількість пар полюсів двигуна; f_1 - частота напруги мережі живлення, Гц;

Асинхронні двигуни з квадратичною залежністю моменту від швидкості (наприклад, вентилятори, насоси) особливо чутливі до змін частоти мережі живлення. Відхилення частоти можуть призвести до суттєвих змін їхньої продуктивності і, як наслідок, до порушення технологічних процесів.

При цьому активна потужність визначається за формулою:

$$P = a \cdot f^n, \quad (1.2)$$

де n — показник ступеня, який набирає значення 0 – 4.

Зміна частоти мережі живлення істотно впливає на роботу різних електроприймачів. Для металорізальних верстатів характерна пряма пропорційність між частотою та потужністю двигуна. Вентилятори та насоси демонструють складнішу залежність, пов'язану з особливостями їх робочих процесів. Нагрівальні елементи та лампи розжарювання практично нечутливі до змін частоти через специфіку їх роботи.

Відхилення частоти у промислових мережах можуть викликати резонанс в ланцюгах із фільтрами вищих гармонік. За певних умов, обумовлених параметрами мережі та фільтра, виникає резонанс напруги, що призводить до перевантажень конденсаторних батарей і може спричинити їх вихід з ладу. Крім того, резонансні явища можуть призвести до перерозподілу вищих гармонік у мережі, що погіршує якість електроенергії та може негативно позначитися на роботі електрообладнання.

1.2.6. Провал напруги.

У разі провалів напруги, коли середньоквадратичне значення напруги падає до 1-90% від номінального, причиною зазвичай служать короточасні навантаження системи. Особливо це актуально для мереж з низькою потужністю короткого замикання. Основний винуватець таких провалів – пуск потужних електродвигунів, коли пусковий струм може у кілька разів перевищувати номінальний. Аналогічна ситуація спостерігається під час пуску двигунів під навантаженням. Наслідком провалів напруги стає відключення захисту струму або напруги, збої в роботі контролерів і, як результат, простий обладнання. Для вирішення цієї проблеми застосовують різні методи, такі як компенсація пускового струму, пуск двигунів із зірки на трикутник або використання пристроїв плавного пуску, а також збільшення потужності короткого замикання мережі.

Провал напруги визначається за показником його тривалості, для якого встановлені певні норми. Зокрема, гранично допустиме значення тривалості провалу напруги в електричних мережах з напругою до 20 кВ включно становить 30 секунд. Тривалість автоматичного усунення провалу напруги в будь-якій точці підключення до електричних мереж встановлюється відповідно до витримки часу релейного захисту та автоматичних систем керування. [5].

1.2.7. Перехідні процеси.

Перехідні перенапруги виникають в основному внаслідок перемикальних операцій у мережі. До причин піків напруги, що досягають кількох кіловольт, відносяться також блискавки, а також згоряння запобіжників та автоматичних вимикачів, що спрацьовують у разі короткого замикання.

Ці перехідні процеси можуть викликати відмову контролерів, збої в роботі комп'ютерів та пошкодження компонентів мережі, включаючи

обмотки електродвигунів та трансформаторів. Крім того, вони можуть призводити до дугових пробоїв у пристроях та перешкод у сигнальних лініях та системах передачі даних.

Для ефективного вирішення цих проблем рекомендується встановлювати варистори або конденсатори, які забезпечують захист від перенапруг.

1.2.8. Гармоніки.

Останнім часом багато підприємств і організацій, які впроваджували електроприводи з живленням від ВРП, не вживаючи при цьому заходів для покращення якості електроенергії (наприклад, встановлення фільтрів вищих гармонік), зіткнулися з проблемами, пов'язаними з передчасним виходом з ладу електрообладнання, а також збоїв у роботі електронних систем.

Вищі гармоніки спричиняють додаткові втрати в електричних машинах, трансформаторах та електричних мережах. Вони значно скорочують термін служби електроізоляції двигунів, конденсаторів та кабелів. У батареях конденсаторів можуть виникати резонансні явища, що призводить до збільшення втрат, підвищення температури та прискорення старіння ізоляції, що може викликати їх вихід з ладу. Крім того, вищі гармоніки негативно впливають на працездатність персональних комп'ютерів, систем автоматики та телемеханіки, часто призводячи до збоїв у їхній роботі.

Гармоніки є синусоїдальними компонентами сигналу, накладені на основну частоту напруги або струму. Співвідношення частоти гармонійної складової частоти мережі позначається номером гармоніки h . Ціле число, кратне частоті мережі, називається гармонікою, тоді як нецілочисленні кратні називаються субгармоніками.

Збільшення використання нелінійних споживачів електроенергії призводить до появи більшої кількості гармонік у мережах електроживлення.

Це пов'язано, зокрема, з використанням блоків живлення з виходом постійного струму, які поширені в комп'ютерах, принтерах, копіювальних апаратах, факсах, галогенних низьковольтних лампах і електронних контролерах. Додаткові гармонічні складові виникають також через застосування електронних баластів для люмінесцентних та енергозберігаючих ламп, частотних перетворювачів для приводів із регульованою швидкістю, а також у електричних дугових печах.

Вплив гармонік на електромережу проявляється у збільшенні втрат, збоїв у роботі та відмови електроустаткування та систем. Нелінійні споживачі електроенергії особливо вразливі до гармоніків. У цьому необхідно приділяти особливу увагу нейтральному провіднику, через який скидаються всі гармонійні струми з номерами, кратними трьом. Синфазні складові, що складаються в нейтральному провіднику, можуть призвести до його перевантаження, що створює ризик виникнення пожежі або збою в системі через розімкнену нейтральну точку, а також може пошкодити підключені пристрої.

Додатково варто виявляти обережність за наявності гармонійних складових з високими номерами, так як вони можуть негативно впливати на обладнання, що компенсує, зокрема, викликати перегрів і руйнування його конденсаторів.

Замість блокування мереж електроживлення, що зараз вважається застарілою практикою, компенсацією гармонік все частіше застосовуються інтелектуальні активні фільтри.

1.2.9. Субгармоніки.

Субгармонічні напруги виникають в результаті зворотного впливу на мережу від потужного експлуатаційного обладнання, що працює на частотах, відмінних від частоти мережі, або, у деяких випадках, незалежного від 50 Гц. До такого обладнання відносяться асинхронні електродвигуни, приводи з

частотними перетворювачами, пристрої з мультициклічними регуляторами та системи дистанційного керування навантаженням, що використовують пульсуючий сигнал звукової частоти. Це призводить до появи флікера та перешкод у системах управління навантаженням. Для усунення цих проблем можна встановити з'єднання в точці з більш високим рівнем потужності короткого замикання, покращити згладжування в проміжних ланцюгах перетворювачів або використовувати фільтри режектора.

1.2.10. Флікер.

Часті та різкі зміни навантаження впливають на напругу в мережі, що викликає мерехтіння світла, що, у свою чергу, може викликати дискомфорт та роздратування у людей. Це може призвести до втоми очей, запаморочення та загального нездужання. Найбільш частими джерелами флікера є зварювальні апарати, електродугові печі, рентгенівське обладнання, вітряні турбіни та механізми зі змінним навантаженням, такі як преси, штампувальні пристрої, подрібнювачі, крани та підйомники.

Для усунення ефекту флікера потрібне використання спеціальних компенсаційних систем. З їх допомогою завдяки сучасним керуючим пристроям можна протягом кількох мілісекунд активувати або деактивувати необхідне обладнання для компенсації та динамічні регулятори. Також проблему можна вирішити, ізолювавши мережу освітлення, підключивши її до іншої фази або використовуючи окремий трансформатор.

1.3. Характеристики показників якості електроенергії.

1.3.1. Відхилення напруги.

Відхилення напруги описується показником відхилення. Вимірювання відхилення напруги δU проводиться таким чином:

1) Для кожного i -го виміру протягом 24 годин фіксується значення напруги. В однофазних електричних мережах це значення напруги основної

частоти, що діє $U(I)$ у вольтах чи кіловольтах, без урахування вищих гармонік. У трифазних системах враховується чинне значення кожної міжфазної (або фазної) напруги основної частоти $U(I)_i$, а також чинне значення напруги прямої послідовності основної частоти $U_I(I)_i$.

При цьому, відповідно [15] припускається:

- а) визначати $U_{1(1)i}$ методом симетричних складових;
- б) визначати $U_{1(1)i}$ за приближеною формулою:

$$U_{1(1)i} = \frac{1}{3}(U_{AB(1)i} + U_{BC(1)i} + U_{CA(1)i}), \quad (1.3)$$

де $U_{AB(1)i}$, $U_{BC(1)i}$, $U_{CA(1)i}$ - діючі значення міжфазної напруги основної частоти в і-ому спостереженні, В, кВ;

в) вимірювати в електричних мережах однофазного і трифазного струму замість діючих значень фазної і міжфазної напруги основної частоти діючі значення відповідних напруг з урахуванням гармонійних складових цих напруг при коефіцієнті спотворення синусоїдальності напруги, що не перевищує 5 %.

2) Обчислюють значення усередненої напруги U_y у вольтах, кіловольтах як результат усереднення N спостережень напруг $U_{(1)i}$ або $U_{1(1)i}$ за інтервал часу 1 хв за формулою:

$$U_y = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N U_i^2}{N}}, \quad (1.4)$$

де U_i – значення напруги $U_{(1)i}$ або $U_{1(1)i}$ в і-ому спостереженні, В, кВ.

3) Обчислюють значення відхилення напруги, що встановилося δU_y у відсотках за формулою:

$$\delta U_y = \frac{U_y - U_{ном}}{U_{ном}} \cdot 100, \quad (1.5)$$

де $U_{ном}$ - номінальна міжфазна (фазна) напруга, В, кВ.

1.3.2. Коливання напруги.

Коливання напруги характеризуються такими показниками:

- Розмахом зміни напруги;
- Дозою флікера [2].

Розмах зміни напруги δU_t у відсотках обчислюють за формулою:

$$\delta U_t = \frac{|U_i - U_{i+1}|}{U_{ном}} \cdot 100, \quad (1.6)$$

де U_i, U_{i+1} - значення наступних один за одним екстремумів або екстремуму та горизонтальної ділянки огибаючої середньоквадратичних значень напруги основної частоти, визначених на кожному напівперіоді основної частоти, В [15].

Частоту повторення змін напруги $F_{\delta U_t}$, c^{-1} , хв¹, при періодичних коливаннях напруги обчислюють за формулою:

$$F_{\delta U_t} = \frac{m}{t}, \quad (1.7)$$

де m - кількість змін напруги за час T ;

T - інтервал часу вимірювання, що приймається рівним 10 хв.

1.3.3. Несинусоїдність напруги.

Несинусоїдність напруги характеризується такими показниками [6]:

- Коефіцієнтом спотворення синусоїдальності кривої напруги;
- Коефіцієнтом i -ої гармонійної складової напруги.

Виміри коефіцієнта i -ої гармонійної складової напруги $K_{(n)i}$ здійснюють для міжфазних (фазних) напруг [15].

1) Для кожного i -го спостереження за період часу, що дорівнює 24 год, визначають чинне значення напруги n -ої гармоніки $U_{(n)i}$, В, кВ.

2) Допускається обчислювати значення коефіцієнта n -ої гармонійної складової напруги $K_{U(n)i}$ у відсотках як результат i -го спостереження за такою формулою:

$$K_{U(n)i} = \frac{U_{(n)i}}{U_{ном}} \cdot 100, \quad (1.8)$$

де $U_{(1)i}$ - діюче значення напруги основної частоти на i -му спостереженні у вольтах, кіловольтах.

3) Обчислюють величину коефіцієнта n -ої гармонійної складової напруги $K_{U(n)}$ у відсотках як результат усереднення N спостережень $K_{U(n)i}$ на інтервалі часу T_{vs} , що дорівнює 3 с, по формулі:

$$K_{U(n)} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (K_{U(n)i})^2}{N}}. \quad (1.9)$$

Нормально припустимі та гранично припустимі значення коефіцієнта викривлення синусоїдальності кривої напруги в точках загального приєднання до електричних мереж з різною номінальною напругою наведені у таблиці 1.4.

Таблиця 1.4 - Значення коефіцієнта спотворення синусоїдальності кривої напруги.

Нормально припустиме значення при $U_{ном}, \text{кВ}$				Гранично припустиме значення при $U_{ном}, \text{кВ}$			
0,38	6-20	35	110-330	0,38	6-20	35	110-330
8	5	4	2	12	8	6	3

Вимірювання коефіцієнта викривлення синусоїдальності напруги проводиться для міжфазної (фазної) напруги. Періодична функція зміни несинусоїдальних струмів відповідає умовам Диріхле, тобто вона обмежена, шматково безперервна і має кінцеву кількість екстремумів протягом періоду. Тому таку функцію можна розкласти до ряду Фур'є. [1]:

$$f(\omega t) = A_0 + \sum_{v=1}^n (a_v \cos v\omega t + b_v \sin v\omega t) \quad (1.10)$$

де v — номер гармоніки; a_v , b_v — коефіцієнти ряду Фур'є; n — номер останньої з врахованих гармонік.

При $v = 1$ з (1.10) визначають гармоніку, яку називають першою або основною (з частотою 50 Гц), інші члени ряду називають вищими гармоніками.

Коефіцієнти ряду Фур'є визначають за формулами:

$$a_v = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(\omega t) \cos v\omega t d\omega t, \quad (1.11)$$

$$b_v = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(\omega t) \sin v\omega t d\omega t, \quad (1.12)$$

Амплітуда v -ї гармоніки визначається по формулі:

$$A_v = \sqrt{a_v^2 + b_v^2}. \quad (1.13)$$

Початкова фаза v -ї гармоніки:

$$\varphi_v = \arctg \frac{b_v}{a_v}. \quad (1.14)$$

Струми вищих гармонік, проходячи через елементи мережі, призводять до падіння напруги в опорах цих компонентів. Ці падіння накладаються на основну синусоїду, що викликає спотворення форми кривої напруги. У зв'язку з цим рівняння (1.10) - (1.14) також застосовні для кривих несинусоїдальних напруг. При розкладанні струму на гармонійні складові виникають вищі гармоніки з порядками:

$$v = kp \pm 1, \quad (1.15)$$

де p — кількість фаз випрямлення; k — послідовний ряд цілих чисел.

Гармоніки з порядковими номерами $\nu = kp + 1$ формують системи електрорушійної сили та струмів прямої послідовності, тоді як гармоніки з порядковими номерами $\nu = kp - 1$ являють зворотну послідовність.

Визначення значення коефіцієнта викривлення синусоїдальності кривої напруги K_U [15].

1) Для кожного і спостереження у встановлений період часу вимірюють діючі значення гармонійних компонентів напруги в діапазоні від 2-ї до 40-ї гармоніки, виражені у вольтах або кіловольтах.

2) Припускається обчислювати величину коефіцієнта викривлення синусоїдальності кривої напруги K_{Ui} у відсотках як результат і-го спостереження за формулою:

$$K_{Ui} = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{40} U_{(n)i}^2}}{U_{ном}} \cdot 100, \quad (1.16)$$

3) Обчислюють величину коефіцієнта викривлення синусоїдальності кривої напруги K_U у відсотках як результат усереднення N спостережень K_{Ui} на інтервалі часу T_{vs} , що дорівнює 3 с, по формулі:

$$K_U = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N K_{Ui}^2}{N}}. \quad (1.17)$$

1.3.4. Несиметрія напруги.

Несиметричність напруг визначається такими показниками:

- коефіцієнтом несиметрії напруг зворотної послідовності;
- коефіцієнтом несиметрії напруг нульової послідовності **【2】**

Вимір коефіцієнта несиметрії напруг по зворотній послідовності K_{2U} для міжфазних напруг здійснюють наступним чином [15].

1) Для кожного i -го спостереження протягом періоду часу, що дорівнює 24 год, вимірюють одночасно діючі значення міжфазних напруг за основною частотою $U_{AB(1)i}$, $U_{BC(1)i}$, $U_{CA(1)i}$ у вольтах, кіловольтах.

2) Допускається обчислювати чинне значення напруги зворотної послідовності основної частоти $U_{2(1)i}$ за формулою:

$$U_{2(1)i} = 0,62 (U_{нб(1)i} - U_{нм(1)i}), \quad (1.18)$$

де $U_{нб(1)i}$, $U_{нм(1)i}$ - найбільше та найменше діючі значення із трьох міжфазних напруг основної частоти у i -му спостереженні.

3) Припускається обчислювати коефіцієнт несиметрії напруг за зворотною послідовністю K_{2U_i} у відсотках як результат i -го спостереження за формулою:

$$K_{2U_i} = \frac{U_{2(1)i}}{U_{ном.м.ф.}} \cdot 100, \quad (1.19)$$

де $U_{2(1)i}$ - діюче значення напруги зворотної послідовності основної частоти в трифазній системі напруг в i -му спостереженні, В, кВ;

$U_{1(1)i}$ - діюче значення напруги прямої послідовності основної частоти у i -му спостереженні, В, кВ.

4) Обчислюють значення коефіцієнта несиметрії напруг за зворотною послідовністю K_{2U} у відсотках як результат усереднення N спостережень K_{2U_i} протягом інтервалу часу T_{vs} , що дорівнює 3 с, за формулою:

$$K_{2U} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N K_{2U_i}^2}{N}}. \quad (1.20)$$

Вимірювання коефіцієнта несиметрії напруг нульової послідовності K_{0U_i} проводять у чотирипровідних мережах наступним чином [15]:

1) Для кожного i -го спостереження за період часу, що дорівнює 24 год, вимірюють одночасно діючі значення трьох міжфазних і двох фазних напруг основної частоти $U_{AB(1)i}$, $U_{BC(1)i}$, $U_{CA(1)i}$, $U_{A(1)i}$, $U_{B(1)i}$, у В, кВ.

2) Допускається визначати діюче значення напруги нульової послідовності основної частоти $U_{0(1)i}$ в i -му спостереженні за формулою:

$$U_{0(1)i} = 0,62 (U_{\text{нб.}\phi(1)i} - U_{\text{нм.}\phi(1)i}) , \quad (1.21)$$

де $U_{\text{нб.}\phi(1)i}$, $U_{\text{нм.}\phi(1)i}$ - найбільше та найменше із трьох діючих значень фазних напруг основної частоти у i -му спостереженні, В, кВ.

3) Припускається обчислювати коефіцієнт несиметрії напруги за нульовою послідовністю K_{0U_i} у відсотках як результат i -го спостереження за формулою:

$$K_{0U_i} = \frac{U_{0(1)i}}{U_{\text{ном.}\phi}} \cdot 100, \quad (1.22)$$

де $U_{0(1)i}$ - діюче значення напруги нульової послідовності основної частоти в трифазній системі напруги в i -му спостереженні, В, кВ;

$U_{\text{ном.}\phi}$ - номінальна величина фазної напруги, В, кВ.

4) Обчислюють значення коефіцієнта несиметрії напруг за нульовою послідовністю у відсотках як результат усереднення N спостережень K_{0U_i} на інтервалі часу T_{vs} , що дорівнює 3 с, за формулою:

$$K_{0U} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N K_{0U_i}^2}{N}} . \quad (1.23)$$

Число спостережень N повинно бути не менше ніж 9.

Нормально припустиме та гранично припустиме значення коефіцієнта несиметрії напруг за нульовою послідовністю в точках загального приєднання до чотирьохпровідних електричних мереж з номінальною напругою 0,38 кВ дорівнюють 2,0 та 4,0 % відповідно.

1.3.5. Відхилення частоти.

Відхилення частоти напруги змінного струму в електричних мережах характеризується показником відхилення частоти.

Вимірювання відхилення частоти Δf здійснюють наступним чином [5].

1) Для кожного i -го спостереження протягом встановленого періоду часу вимірюють дійсне значення частоти f_i в герцах.

2) Обчислюють усереднене значення частоти f_y у герцах як результат усереднення N спостережень f_i протягом інтервалу часу 20 с за формулою:

$$f_y = \frac{\sum_{i=1}^N f_i}{N} . \quad (1.24)$$

3) Обчислюють значення відхилення частоти Δf в герцах по формулі:

$$\Delta f = f_y - f_{ном} , \quad (1.25)$$

де $f_{ном}$ - номінальна величина частоти, Гц.

Нормально допустиме та гранично допустиме значення відхилення частоти дорівнюють відповідно $\pm 0,2$ та $\pm 0,4$ Гц.

1.3.6. Провал напруги.

Провал напруги характеризується показником тривалості провалу напруги.

Вимірювання тривалості провалу напруги $\Delta t_{п}$ за секунди (Рисунок 1.1) здійснюють наступним чином:

1) Фіксують початковий момент часу t_n різкого спаду (тривалістю менше 10 мс), що огинає середньоквадратичні значення напруги, визначені на кожному напівперіоді основної частоти, нижче рівня $0,9U_{ном}$.

2) Фіксують кінцевий момент часу t_k відновлення середньоквадратичного значення напруги до $0,9U_{ном}$.

3) Обчислюють тривалість провалу напруги $\Delta t_{п}$ в секундах за формулою

$$\Delta t_{п} = t_k - t_n , \quad (1.26)$$

де t_n , t_k - початковий та кінцевий моменти часу провалу напруги.

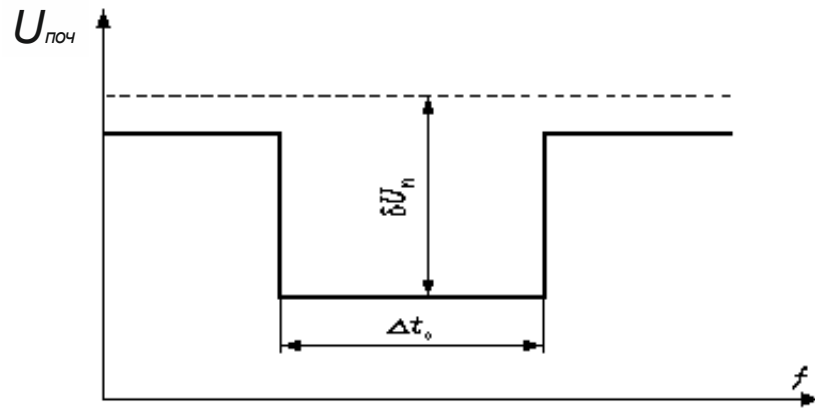


Рисунок 1.1 - Провал напруги

4) Глибину провалу напруги δU_n у відсотках (Рисунок 1.1) обчислюють наступним чином.

Середньоквадратичні значення напруги U вимірюють за кожен напівперіод основної частоти під час провалу напруги у В, кВ.

Визначають мінімальне із усіх вимірних середньоквадратичних значень напруги $U_{\min}$ у В, кВ.

Обчислюють глибину провалу напруги δU_n у відсотках за такою формулою:

$$\delta U_n = \frac{U_{\text{ном}} - U_{\min}}{U_{\text{ном}}} \cdot 100. \quad (1.27)$$

6) Частоту появи провалів напруги F_n у відсотках обчислюють за такою формулою:

$$F_n = \frac{m(\delta U_n, \Delta t_n)}{M}, \quad (1.28)$$

де $m(\delta U_n, \Delta t_n)$ - число провалів напруги глибиною δU_n та тривалістю Δt_n за період часу спостереження T ;

M - сумарна кількість провалів напруги за період спостережень T .

Максимально припустима тривалість провалу напруги електричних мережах з напругою до 20 кВ становить 30 секунд. Тривалість провалу, який

усувається автоматично у будь-якій точці підключення до мереж, залежить від тимчасових витримок релейного захисту та автоматики.

1.3.7. Імпульс напруги.

Імпульсна напруга $U_{\text{імп}}$ (Рисунок 1.2) вимірюють як максимальне значення напруги при різкій його зміні (тривалість періода імпульсу не більше 5 мс).

Тривалість імпульсу напруги на рівні 0,5 від його амплітуди $t_{\text{імп}0,5}$ (Рисунок 1.2) визначають так.

1) Виділяють із загальної кривої напруги імпульс напруги та визначають амплітуду даного імпульсу $U_{\text{імп.а}}$ як найбільше значення імпульсу напруги (Рисунок 1.2).

2) Визначають моменти часу $t_{\text{н}0,5}$, $t_{\text{к}0,5}$ (Рисунок 1.2), відповідні перетину кривої імпульсу напруги горизонтальною лінією, яка проведена на половині амплітуди імпульсу.

3) Обчислюють $\Delta t_{\text{імп}0,5}$ за даною формулою:

$$\Delta t_{\text{імп}0,5} = t_{\text{к}0,5} - t_{\text{н}0,5}. \quad (1.29)$$

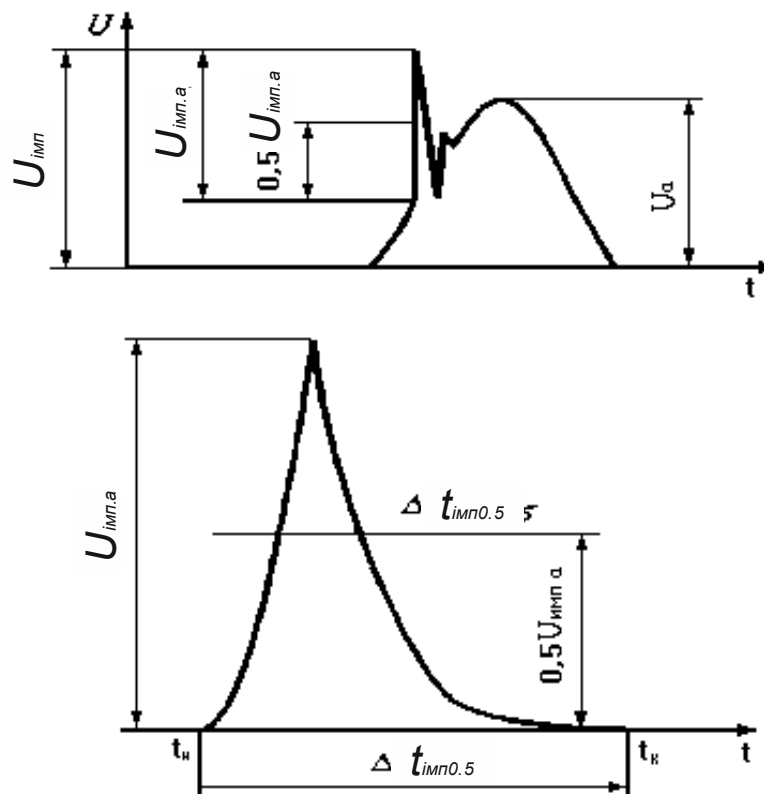


Рисунок 1.2 - Параметри імпульсної напруги

1.3.8. Тимчасова перенапруга.

Тимчасова перенапруга описується коефіцієнтом тимчасової перенапруги.

Для його $K_{перU}$ виміру (Рисунок 1.3) проводять такі дії:

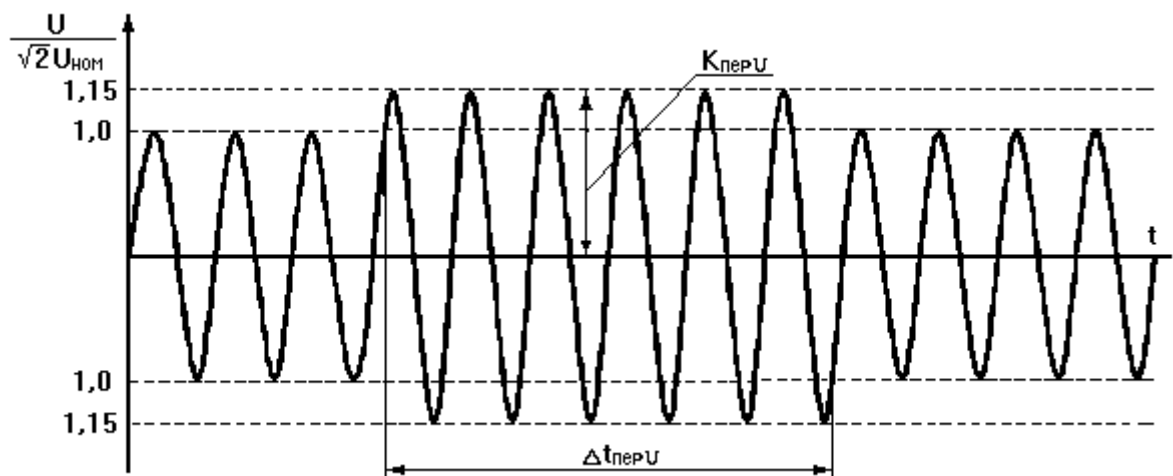


Рисунок 1.3 - Тимчасова перенапруга.

1) Обчислюють амплітудні значення напруги U_a на кожному напівперіоді основної частоти протягом різкого (тривалість фронту до 5 мс) перевищення рівня напруги, що дорівнює $1,1 \sqrt{2} U_{ном}$.

2) Визначають максимальне з вимірених амплітудних значень напруги $U_{a \max}$.

Обчислюють коефіцієнт тимчасової перенапруги за такою формулою

$$K_{перU} = \frac{U_{amax}}{\sqrt{2}U_{ном}} , \quad (1.30)$$

Тривалість тимчасової перенапруги $\Delta t_{пер}$ визначають так.

1) Фіксують момент часу $t_{н.пер}$ перевищення діючим значенням напруги рівня, який дорівнює $1,1 U_{ном}$, та момент часу $t_{к пер}$ спадання напруги до рівня $1,1 U_{ном}$.

2) Розраховують $\Delta t_{пер U}$ за такою формулою:

$$\Delta t_{пер U} = t_{к пер} - t_{н пер} . \quad (1.31)$$

2 МАТЕМАТИЧНИЙ ОПИС ПРОЦЕСІВ ПЕРЕТВОРЕННЯ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ

Енергозбереження - це комплекс науково-технічних заходів, спрямованих на практичне вирішення завдань щодо зниження енерговитрат.

Проблеми енергозбереження тісно пов'язані, а іноді й переходять у питання енергопостачання та управління технологіями.

Цей підхід залишає поза увагою інший бік питання — якість споживання електричної енергії. Відмінність між поняттями «якість електроенергії» (якість споживаної енергії) та «якість споживання енергії» (якість її перетворення) очевидна. Останнє поняття дозволяє оцінити роботу споживача, який виступає перетворювачем енергії. Якщо для електромереж показники якості електроенергії стандартизовані та добре вивчені, то показники якості споживання енергії ще доведеться обґрунтувати та визначити. Це необхідно для аналізу процесу перетворення енергії, змін у структурі обладнання, а також процесів старіння та деградації споживача.

Споживачі завдяки своїм характеристикам також впливають на живлячу енергосистему, і цей вплив визначається якістю перетворення енергії як окремих споживачів, так і їх сукупним впливом. При цьому показники якості перетворення енергії залежить від параметрів якості енергії. Це пов'язано з тим, що споживач формує певний зовнішній вплив, включаючи складові напруги, частоту та інші параметри живлення.

При цьому очевидно, що показники якості перетворення енергії повинні мати строго індивідуальні характеристики, що не залежать від умов експлуатації в конкретних ситуаціях. Щоб усунути це протиріччя, потрібно розробка відповідного математичного апарату з метою оцінки необхідних показників.

Проектна надійність електричних машин як електромеханічних засобів в основному визначається надійністю окремих компонентів конструкції та

передбачуваними умовами їх експлуатації. Виключаючи виробничі дефекти або брак, які зазвичай призводять до передчасного виходу з ладу, в процесі експлуатації або навіть зберігання відбувається природне старіння та зношування окремих елементів, особливо ізоляції. Цей процес підпорядковується певним закономірностям, що описують старіння. Те саме стосується експлуатаційного зносу електрообладнання, що виникає під впливом різних енергетичних впливів — теплових, електростатичних, електромагнітних та механічних. Цим впливам відповідають певні показники якості перетворення енергії. Зміна цих показників призводить до зміни та посилення енергетичних впливів, прискорюючи старіння електричної машини. Можна стверджувати, що відхилення у показниках перетворення енергії від передбачених конструктивними характеристиками машини, пов'язані з погіршенням якості перетворення, що є причиною прискореного зносу електромеханічного перетворювача.

2.1. Визначення показників якості перетворення енергії електричного обладнання із синусоїдальною напругою живлення.

Показники якості перетворення енергії частково залежать від характеристик якості енергії, оскільки споживач впливає на мережу через такі параметри, як напруга і частота. У поточній практиці при аналізі причин відмов електричного обладнання виділяються дві основні категорії - механічні несправності, найчастіше пов'язані з поломкою підшипників, і замикання, спричинені пошкодженням ізоляції. Часто руйнація підшипників призводить до значної зміни показника якості перетворення енергії і, як наслідок, наступного виходу з ладу ізоляції. На практиці, при існуючих підходах до побудови систем захисту вихід з ладу машини через пошкодження підшипників зазвичай супроводжується пошкодженням ізоляції. Це вказує на те, що стандартні системи захисту зазвичай не

включають контроль вібрацій, які могли б вказувати на руйнацію підшипників.

Зв'язок між якістю перетворення енергії, станом ізоляції та підшипників, а також довговічністю електричної машини можна виразити за допомогою наступної математичної алгоритмічної моделі:

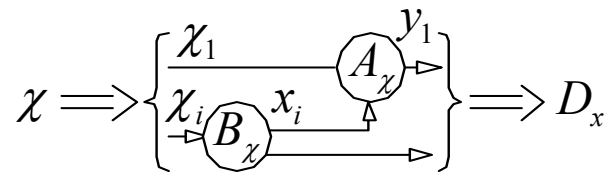


Рисунок 2.1 - Структура взаємозв'язків показників якості перетворення, що визначають працездатність електричного двигуна:

χ – узагальнений показник неякісності перетворення енергії; B_{χ} – проектне значення параметра вібрацій; x_i – вплив механічних факторів на працездатність ізоляції; A_{χ} – проектна працездатність ізоляції; D_{χ} – фактична працездатність електричного двигуна.

З представленої схеми випливає, що показники якості перетворення енергії, особливо їх складові дозволяють визначити техніко-економічні параметри електричних машин і установок. Це відкриває можливості для реалізації заходів щодо ефективного використання обладнання, а також для оцінки його працездатності та прогнозування надійності роботи.

Надалі в цьому розділі наводиться формування показників якості перетворення енергії для найбільш типового споживача - трифазного асинхронного двигуна з синусоїдальною формою напруги живлення, в загальній, неформалізованій постановці. Для інших споживачів аналогічні показники можуть бути визначені з урахуванням особливостей фізичних процесів, що супроводжують перетворення енергії.

Коефіцієнт енергетичних втрат, що також називається коефіцієнтом ефективності використання споживаної енергії або коефіцієнтом ефективності перетворення, по суті, є коефіцієнтом корисної дії (ККД).

Електромеханічна система або електромеханічний комплекс, який є перетворювачем енергії, передає її з входу на вихід. Процес перетворення супроводжується певною ефективністю, що зазвичай виражається через коефіцієнт корисної дії. Між коефіцієнтом корисної дії, вхідною та вихідною потужністю існує прямолінійна залежність:

$$P_{\epsilon} = P_c \cdot \eta; \quad (2.1)$$

бо

$$\Delta P = P_{\epsilon} - P_c = P_c(1 - \eta), \quad (2.2)$$

де P_{ϵ} - вихідна потужність; P_c - вхідна потужність; ΔP - втрати потужності;

η - ККД.

Таким чином, з урахуванням рівнянь (2.1) та (2.2), коефіцієнт ефективності перетворення в електромеханічному навантаженні з синусоїдальною напругою і струмом можна виразити через відповідні параметри вхідної та вихідної потужності, що дозволяє визначити загальну ефективність роботи системи:

$$\eta_E = \frac{P_{\epsilon}}{P_c}. \quad (2.3)$$

У наукових джерелах неодноразово обговорювалося питання, як називати згаданий коефіцієнт — як коефіцієнт корисної дії (к.п.д.) або як коефіцієнт ефективності перетворення. Також розглядалася можливість використання іншого показника, наприклад, коефіцієнта втрат активної потужності при оцінці ефективності процесу перетворення енергії:

$$\xi = 1 - \eta. \quad (2.4)$$

Асинхронний двигун споживає з мережі активну потужність, яка використовується для виконання механічної роботи, долаючи опори та забезпечуючи обертання ротора:

$$P_1 = m_1 U_1 I_1 \cos \varphi. \quad (2.5)$$

Частина цієї потужності втрачається у вигляді електричних втрат $\Delta P_{ел1}$, зокрема втрати в міді статора, які виникають через активний опір первинної обмотки. Ці втрати призводять до нагрівання обмоток та зменшують загальну ефективність роботи двигуна:

$$\Delta P_{ел1} = m_1 I_1^2 r_1, \quad (2.6)$$

Інша частина потужності втрачається у вигляді магнітних втрат $\Delta P_{мг1}$ у осерді статора (первинного ланцюга). Ці втрати виникають через вихрові струми та гістерезису в магнітному матеріалі сердечника, що призводить до додаткового тепловиділення та зниження загальної ефективності двигуна:

$$\Delta P_{мг1} = m_1 I_m^2 r_m = \frac{m_1 E_1^2}{r_m} = \frac{m_1 U_{12}^2}{r_m}. \quad (2.7)$$

Частина потужності, що залишилася:

$$P_{ем} = P_1 - \Delta P_{ел1} - \Delta P_{мг1} \quad (2.8)$$

являє собою електромагнітну потужність, що передається за допомогою магнітного поля від статора до ротора. На схемах заміщення асинхронного двигуна ця потужність відповідає потужності в активному опорі вторинної ланки r_2'/s

Таким чином:

$$P_{ем} = m_1 I_2'^2 \frac{r_2'}{s} = m_2 I_2^2 \frac{r_2}{s}. \quad (2.9)$$

Частина цієї потужності втрачається у вигляді електричних втрат $\Delta P_{ел2}$ в активному опорі вторинної обмотки r_2' , що призводить до додаткового нагрівання та зниження загальної ефективності перетворення енергії в асинхронному двигуні:

$$\Delta P_{\text{ст2}} = m_1 I_2'^2 r_2' = m_1 I_2^2 r_2. \quad (2.10)$$

Решта потужності $P_{\text{ем}}$ перетворюється на механічну потужність $P_{\text{мх}}$, яка розвивається на роторі і використовується для виконання роботи, наприклад, для обертання механічних пристроїв, підключених до двигуна:

$$P_{\text{мх}} = P_{\text{ем}} - \Delta P_{\text{ст2}}, \quad (2.11)$$

або з виразів (2.8) и (2.9)

$$P_{\text{мх}} = m_1 I_2'^2 r_2' \frac{1-s}{s} = m_1 I_2^2 r_2 \frac{1-s}{s}. \quad (2.12)$$

Частина механічної потужності $P_{\text{мх}}$ втрачається всередині самої машини у вигляді механічних втрат $\Delta P_{\text{мх}}$, таких як втрати на вентиляцію, тертя в підшипниках і на щітках (у разі машин з фазним ротором, якщо щітки не піднімаються при роботі), а також у вигляді магнітних втрат у сердечнику ротора $\Delta P_{\text{м22}}$ та додаткових втрат $\Delta P_{\text{д}}$. Останні здебільшого пов'язані з вищими гармоніками магнітних полів, які виникають через наявність вищих гармонік в обмотках та зубчастій будові статора та ротора.

По-перше, вищі гармоніки поля індукують електрорушійні сили (ерс) та струми в обмотках, що призводить до додаткових електричних втрат. Ці втрати значні лише в обмотках типу клітини. По-друге, гармоніки поля викликають додаткові магнітні втрати на поверхні та в тілі зубців статора та ротора. Обертання зубців ротора щодо зубців статора призводить до пульсацій магнітного потоку, що викликає пульсаційні втрати. Магнітні втрати в осерді ротора при нормальних робочих режимах зазвичай дуже малі і не враховуються окремо.

Додаткові втрати важко піддаються точному розрахунку та експериментальному визначенню. Тому, згідно з ДЕСТ 183-66, вони приймаються рівними 0,5% від потужності, що підводиться при номінальному навантаженні. За інших навантажень ці втрати

перераховуються пропорційно квадрату первинного струму. Варто зазначити, що в обмотках також виникають додаткові втрати через вихрові струми, спричинені поверхневими ефектами. Однак ці втрати враховуються шляхом відповідного збільшення опорів r_1 та r_2 , і, отже, величину додаткових втрат ΔP_d не включаються.

Корисна механічна потужність на валу двигуна, або вторинна потужність обчислюється по формулі:

$$P_2 = P_{\text{мх}} - \Delta P_{\text{мх}} - \Delta P_d. \quad (2.13)$$

Згідно з викладеним вище, на рис. 2.2 представлено енергетичну діаграму асинхронного двигуна.

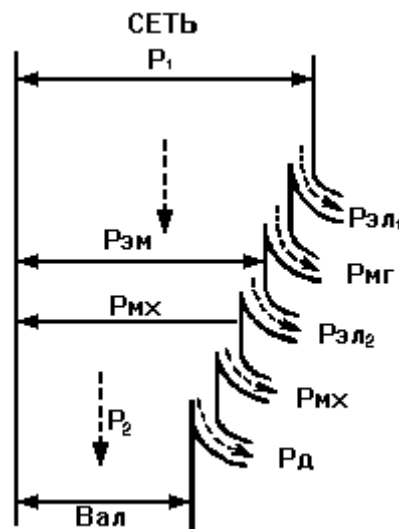


Рисунок 2.2 - Енергетична діаграма асинхронного привода при роботі в режимі двигуна

Загальний підсумок втрат електродвигуна:

$$\Delta P_{\Sigma} = \Delta P_{\text{эл1}} + \Delta P_{\text{мг}} + \Delta P_{\text{эл2}} + \Delta P_{\text{мх}} + \Delta P_d$$

Таким чином:

$$P_2 = P_1 - \Delta P_{\Sigma} \quad (2.14)$$

Визначення коефіцієнта ефективності перетворення (кпд) двигуна знаходиться:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = 1 - \frac{\Delta P_{\Sigma}}{P_1} \quad (2.15)$$

Коефіцієнт перетворення двигуна η (кпд) потужністю від 1 до 1000 кВт за номінального навантаження знаходиться в межах від 0,72 до 0,95. Вищі значення к.п.д. характерні для двигунів з більшою потужністю та вищою швидкістю обертання.

Згідно [5], миттєва потужність є ключовою функцією, яка найбільш повно описує енергопроцеси в системі, пов'язані з енергообміном між джерелом та активним або реактивним навантаженням.

Припустимо, що напруга та струм у ланцюзі описуються такими рівняннями:

$$U(t) = \sqrt{2}U \cos \Omega t = U_m \cos \Omega t; \quad (2.16)$$

$$I(t) = \sqrt{2}I \cos(\Omega t - \varphi) = I_m \cos(\Omega t - \varphi), \quad (2.17)$$

де Ω - значення циклічної частоти; φ - фазовий зсув.

Потужність визначається згідно виразу:

$$P(t) = 2UI \cos \Omega t \cos(\Omega t - \varphi). \quad (2.18)$$

Виконавши нескладні тригонометричні перетворення, отримаємо:

$$\begin{aligned} p(t) &= UI \cos \varphi + UI \cos \varphi \cos 2\Omega t + UI \sin \varphi \sin 2\Omega t = \\ &= a_0 + a_2 \cos 2\Omega t + b_2 \sin 2\Omega t. \end{aligned} \quad (2.19)$$

Відповідно до залежностей Ейлера-Фур'є для гармонійного аналізу, напруга і струм в ланцюзі можуть бути представлені як сума синусоїдальних компонентів різних частот. Ці компоненти виражаються через їх амплітуди, фази та частоти, що дозволяє аналізувати гармонійні складові сигналу:

$$a_n = \frac{2}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x) \cos nx dx; \quad (2.20)$$

$$b_n = \frac{2}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x) \sin nx dx. \quad (2.21)$$

Відповідно $a_0 = UI \cos \varphi$; $a_2 = UI \cos \varphi$; $b_2 = UI \sin \varphi$.

Це означає, що елемент a_0 є середнім значенням потужності у період, що прийнято називати активної потужністю. Застосування математичних методів для отримання залежності активної потужності призводить до втрати знакозмінних складових миттєвої потужності, що дозволяє зосередитися лише на постійній (середній) складовій, яка характеризує реальну енергію, споживаємою системою.

Вираз (2.19) для миттєвої потужності перетворимо на наступний:

$$P(t) = P_0 + P_a(t) + P_b(t), \quad (2.22)$$

где $P_0 = UI \cos \varphi$ – значення середньої за період активної потужності;

$P_a(t) = UI \cos \varphi \cos 2\Omega t$ – значення косинусної знакозмінної складової миттєвої потужності;

$P_b(t) = UI \sin \varphi \sin 2\Omega t$ – значення синусної знакозмінної складової миттєвої потужності.

Еквівалентна потужність:

$$P_{\text{э}} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} P^2(t) dt} \quad (2.23)$$

Розділивши ефективні значення активної та знакозмінної (косинусної) складових миттєвої потужності на еквівалентну потужність, ми отримуємо залежність, яка виражає показник якості енергопроцесів – коефіцієнт потужності. Цей коефіцієнт, що позначається як $\cos \varphi$, відображає відношення активної потужності до повної потужності в системі та показує ступінь узгодженості між струмом та напругою, впливаючи на ефективність передачі

енергії:

$$k_M' = \cos \varphi \frac{\sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} (UI + UI \cos 2\Omega t)^2 dt}}{\sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} P^2(t) dt}}. \quad (2.24)$$

Перетворюючи вираз, отримаємо:

$$k_M' = \cos \varphi \sqrt{\frac{3}{2 \cdot \cos^2 \varphi + 1}}. \quad (2.25)$$

Нижче представлені графіки загальноприйнятого коефіцієнта потужності та коефіцієнта, отриманого за допомогою кривої миттєвої потужності. (відповідно k_M та k_M'). Ці графіки дозволяють порівняти класичне визначення коефіцієнта потужності з точнішими результатами, отриманими з урахуванням тимчасових змін миттєвої потужності у процесі роботи системи

Різниця між показниками ясно помітна на рис. 2.3. Графік реального коефіцієнта потужності k_M' проходить вище загальноприйнятого k_M . Це свідчить про більш точну оцінку якості споживання та перетворення енергії. Коефіцієнт потужності відображає ступінь узгодженості між активною та реактивною складовими, що у свою чергу вказує на ефективність використання енергії в системі.

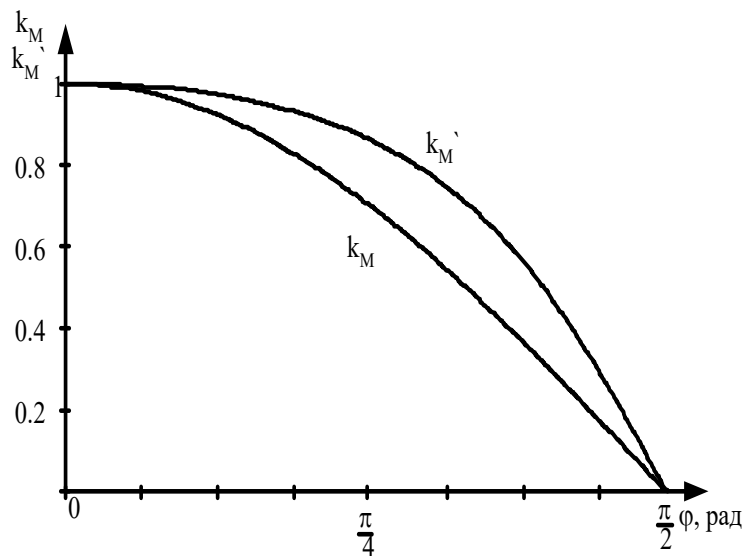


Рисунок 2.3- Криві зміни коефіцієнтів потужності:

k_M – графік загальноприйнятого коефіцієнта потужності; k'_M – графік коефіцієнта потужності, отриманий за параметрами миттєвої потужності.

Аналогічно, розділивши синусну знакозмінну складову P_b на косинусну P_a , отримуємо коефіцієнт реактивності. Коефіцієнт реактивності характеризує ступінь «неефективності» в процесі перетворення енергії, показуючи, наскільки значна частина потужності не використовується для виконання корисної роботи, а лише циркулює в системі.

За класичним поданням цей коефіцієнт відображає співставлення реактивної потужності до активної потужності в системі:

$$k_P = \frac{\sqrt{S^2 - P^2}}{P} = \operatorname{tg} \varphi. \quad (2.26)$$

Використовуючи рівняння миттєвої потужності отримуємо:

$$k'_P = \frac{\sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} (UI \sin \varphi \sin 2\Omega t)^2 d\Omega t}}{\sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} (UI \cos \varphi + UI \cos \varphi \cos 2\Omega t)^2 d\Omega t}}. \quad (2.27)$$

Виконавши математичні дії, отримаємо наступну залежність:

$$k_p' = \operatorname{tg} \varphi \frac{\sqrt{\int_0^{2\pi} (\sin 2\Omega t)^2 dt}}{\sqrt{\int_0^{2\pi} (1 + \cos 2\Omega t)^2 dt}}. \quad (2.28)$$

В кінцевому варіанті отримуємо:

$$k_p' = \frac{\sqrt{3}}{3} \operatorname{tg} \varphi. \quad (2.29)$$

Слід зауважити, що коефіцієнт реактивності показує, наскільки споживач впливає на мережу. Він відображає ступінь, в якому реактивна потужність споживається і повертається в мережу, що може впливати на напругу та загальну ефективність роботи електричної системи. Чим вище коефіцієнт реактивності, тим більше впливає споживач на стабільність та якість роботи мережі.

Нижче наведено графіки загальноприйнятого коефіцієнта реактивності k_p та коефіцієнта k_p' отриманого з використанням миттєвої потужності. Ці графіки дозволяють порівняти традиційне визначення коефіцієнта реактивності з більш точними результатами, заснованими на аналізі тимчасових змін миттєвої потужності, що може дати повніше уявлення про вплив споживача на мережу.

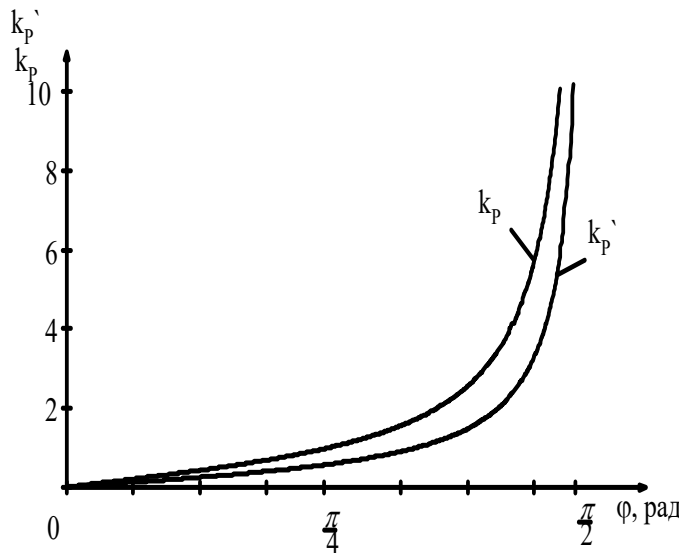


Рисунок 2.4 – Криві коефіцієнта реактивності:

k_p – графік загальноприйнятого коефіцієнта реактивності; k_p' – графік коефіцієнта реактивності, отриманого за параметрами миттєвої потужності

Коефіцієнт імперативних втрат визначає відношення втрат, що виникають через нагрівання ізоляції, до загальних втрат потужності в системі. Цей показник дозволяє оцінити, яку частину втрат потужності складає теплове навантаження, спричинене ізоляційними матеріалами, і наскільки це впливає на загальну ефективність роботи пристрою або системи.

$$K_{i,\epsilon} = \frac{\Delta P_{\epsilon 1} + \Delta P_{\epsilon 2}}{\Delta P_{\Sigma}} \quad (2.30)$$

Необхідність такого поділу очевидна, оскільки втрати, що викликають нагрівання ізоляції, безпосередньо визначають працездатність та довговічність ізоляції електричної машини. Тепловий вплив на ізоляцію може значно скоротити її термін служби.

Для обчислення коефіцієнта втрат, пов'язаних із нагріванням, необхідно мати спеціальне обладнання та технічні засоби, які дозволяють розділити загальні втрати на окремі компоненти, такі як втрати у провідниках, втрати у магнітних матеріалах та механічні втрати. Цей поділ є

важливим для точної оцінки впливу кожного типу втрат на ефективність роботи пристрою та його експлуатаційний термін.

Коефіцієнти нерівномірності струмового завантаження фаз та нерівномірності тепловиділення в обмотках.

Зазначені критерії відображають якісну сторону процесу перетворення енергії та дозволяють оцінити ефективність перетворення електричної енергії у двигуні. Нижче наведено критерії, які безпосередньо пов'язані з надійністю приводу та прогнозуванням його терміну служби:

- Коефіцієнт неефективності перетворення моменту;
- Коефіцієнт неефективності перетворення, що характеризує погіршення вібраційних характеристик електричної машини;
- Коефіцієнт збільшення навантаження за рахунок змінної складової моменту;
- Показник електромагнітної несиметрії, що враховується через аналіз параметра взаємної індуктивності, який відображає зазор;
- Показник, що враховує нелінійні характеристики елементів;
- Показник, що визначає нерівномірність розподілу втрат у магнітних матеріалах;
- Показник, що характеризує асиметрію магнітної системи машини.

Решта аспектів, що стосуються перерахованих показників якості перетворення енергії, будуть розглянуті більш детально в наступних розділах.

2.2. Визначення показників якості перетворення електроенергії для електротехнічного обладнання, що викривлює напругу.

Споживачі, враховуючи свої особливості, впливають на енергосистему, причому цей вплив залежить від показників якості перетворення енергії, як для окремих споживачів, так і для їх сукупного впливу.

Показники якості перетворення енергії, як і показники якості енергії, що споживається, не є фіксованими в кількісному плані. Натомість їх кількість та точні значення обумовлюються нормативними документами. Ця визначеність відповідає поточному рівню розвитку технологій, методів вимірювання енергетичних параметрів та математичного апарату, що описує ці процеси.

З розвитком виробничих процесів, удосконаленням існуючих та впровадженням нових технологій на промислових підприємствах все частіше використовуються вентильні перетворювачі, установки для однофазного та трифазного електрозварювання, потужні електродні печі, вольт-амперні характеристики яких є нелінійними. Точно такі ж нелінійні характеристики мають силові трансформатори, потужні магнітні підсилювачі і газорозрядні лампи. Особливістю цих пристроїв є те, що вони споживають з мережі несинусоїдальні струми, незважаючи на підведення напруги синусоїдальної.

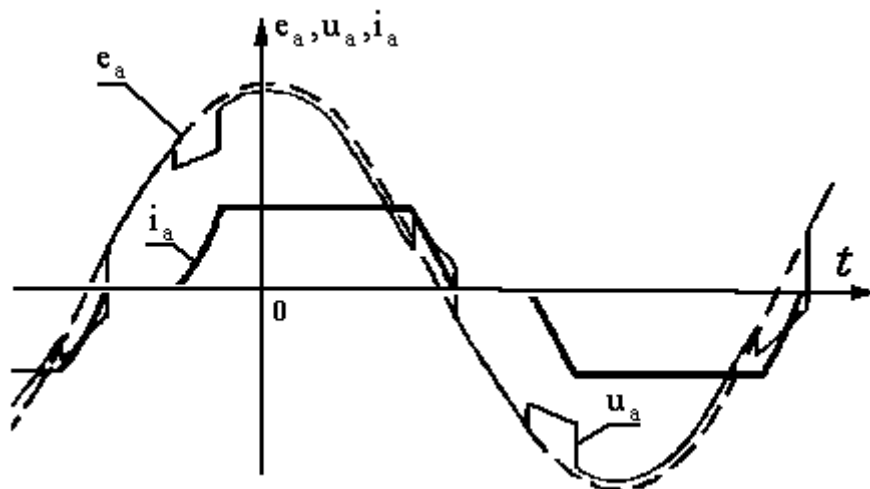


Рисунок 2.5 - Графіки ЕРС джерела живлення e_a , напруги на зажимах трбохфазного перетворювача u_a та струму i_a фази А

На рис.2.5 наведено криву струму у фазі трифазного вентильного перетворювача, яка демонструє несинусоїдальну форму. Такі криві струмів можна розглядати як складні гармонійні коливання, що складаються з комбінації простих гармонійних коливань із різними частотами.

Періодична функція зміни несинусоїдальних струмів задовольняє умовам Діріхле, що означає, що вона обмежена, шматково-безперервна і має кінцеву кількість екстремальних значень протягом одного періоду. У зв'язку з цим, таку функцію можна розкласти в ряд Фур'є, який є сумою синусоїдальних коливань, кожен з яких має свою амплітуду і частоту.

Розкладання в ряд Фур'є дозволяє детально аналізувати складові несинусоїдального сигналу, що важливо для дослідження характеристик і поведінки системи, включаючи оцінку впливу гармонік на мережу та обладнання:

$$f(\omega t) = A_0 + \sum_{v=1}^n (a_v \cos v\omega t + b_v \sin v\omega t), \quad (2.31)$$

де v — номер гармоніки за порядком; a_v, b_v — коефіцієнти ряду Фур'є; n — номер останньої гармоніки.

При $v=1$ із рівняння (2.31) визначається перша гармоніка, яка називається основною і має частоту 50 Гц. Решта членів ряду, відповідні вищим значенням v називають вищими гармоніками. Ці гармоніки є компонентами сигналу, що мають частоти, кратні основній частоті, і можуть впливати на параметри роботи системи, такі як якість живлення, втрати енергії та вплив на обладнання.

Коефіцієнти ряду Фур'є обчислюють за формулами:

$$a_v = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(\omega t) \cos v\omega t d\omega t; \quad (2.32)$$

$$b_v = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(\omega t) \sin v\omega t d\omega t; \quad (2.33)$$

Амплітуда v -ї гармоніки визначається за формулою:

$$A_v = \sqrt{a_v^2 + b_v^2}. \quad (2.34)$$

Початкова ν -ї гармоніки визначається за формулою:

$$\varphi_\nu = \arctg \frac{b_\nu}{a_\nu}. \quad (2.35)$$

Струми вищих гармонік, протікаючи через елементи мережі, викликають падіння напруги в опорах цих елементів. Ці падіння, накладаючись на основну синусоїду напруги, призводять до спотворення форми кривої напруги. Тому рівняння (2.31) - (2.35) застосовні і для кривої несинусоїдальної напруги.

При розкладанні струму на гармонійні складові внаслідок появи вищих гармонік виникають додаткові компоненти з вищими порядками. Ці вищі гармоніки мають частоти, кратні основній, та їх наявність впливає на форму сигналу, що погіршує якість напруги в мережі, а також може викликати додаткові втрати та підвищені електромагнітні дії:

$$\nu = kp \pm 1, \quad (2.36)$$

де p — кількість фаз випрямлення; k — послідовний ряд цілих чисел (1, 2, 3...).

Гармоніки з порядковими номерами $\nu = kp + 1$ утворюють системи ЕРС та струмів прямої послідовності, тоді як гармоніки з порядковими номерами $\nu = kp - 1$ утворюють системи ЕРС та струмів зворотної послідовності [4].

Нехай напруга на затискачах першого енергоприймача описується законом, який враховує як основну, і вищі гармоніки. Ці гармоніки, з одного боку, можуть впливати на форму напруги, а з іншого — на струми, які споживає пристрій, що призводить до додаткових спотворень і потенційних навантажень на електросистему. Таким чином, вплив кількох електроприймачів на режим роботи один одного можна охарактеризувати в такий спосіб:

$$U_1(t) = U_{01} + \sum_{n=1}^m U_{n1} \cos(\omega_n \cdot t + \varphi_{n1}),$$

На зажимах іншого приймача:

$$U_2(t) = U_{01} + \sum_{n=1}^m U_{n2} \cos(\omega_n \cdot t + \varphi_{n2}),$$

на зажимах N-го приймача:

$$U_N(t) = U_{0N} + \sum_{n=1}^m U_{nN} \cos(\omega_n \cdot t + \varphi_{nN}),$$

де n – кількість гармонійних складових, викликаних споживачем, N – кількість енергоприймачів.

Таким чином, напруга на виході електромережі, яка забезпечує живлення групи енергоприймачів, підтримуватиметься на рівні:

$$\bar{U}(t) = \bar{U}_1(t) + \bar{U}_2(t) + \dots + \bar{U}_N(t) \quad (2.37)$$

Накладення гармонійних складових напруги з однаковими частотами ω_n , як зазначено у виразі (2.37), призведе до формування нової форми напруги живлення, і сам вираз (2.37) набуде наступного вигляду:

$$U(t) = U_0 + \sum_{n=1}^m U_n \cos(\omega_n \cdot t + \varphi_n), \quad (2.38)$$

де частота n -ої гармонійної складової $\omega_n = n \cdot \omega$.

Струм на виході енергомережі можна виразити у вигляді залежності:

$$I(t) = I_0 + \sum_{n=1}^m I_n \cos(\omega_n \cdot t + \psi_n) \quad (2.39)$$

Оскільки миттєва потужність є ключовою функцією, що найбільш повно характеризує процеси енергообміну між джерелом та активним або реактивним навантаженням у системі, стає очевидною важливість завдання оцінки миттєвого споживання потужності енергоприймачів або їх груп. Це необхідно для подальшого визначення показників якості перетворення енергії.

Якщо миттєві значення напруги та струму підпорядковуються рівнянням виду (2.38) та (2.39), то, використовуючи вирази (2.32) та (2.33), можна уявити залежності для напруги та струму у формі ряду Фур'є:

$$u(t) = U_0 + \sum_{n=1}^m Ua_n \cos(n \cdot \omega \cdot t) + \sum_{n=1}^m Ub_n \sin(n \cdot \omega \cdot t), \quad (2.40)$$

$$i(t) = I_0 + \sum_{n=1}^m Ia_n \cos(n \cdot \omega \cdot t) + \sum_{n=1}^m Ib_n \sin(n \cdot \omega \cdot t), \quad (2.41)$$

де коефіцієнти Фур'є, після спрощення виразів (2.32) та (2.33), визначаються наступним чином:

$$Ua_n = U_n \cos \varphi_n, \quad (2.42)$$

$$Ub_n = -U_n \sin \varphi_n, \quad (2.43)$$

$$Ia_n = I_n \cos \psi_n, \quad (2.44)$$

$$Ib_n = -I_n \sin \psi_n. \quad (2.45)$$

Миттєва потужність визначається наступним чином:

$$P(t) = u(t) \cdot i(t) = \left(U_0 + \sum_{n=1}^m Ua_n \cos(n \cdot \omega \cdot t) + \sum_{n=1}^m Ub_n \sin(n \cdot \omega \cdot t) \right) \times \\ \times \left(I_0 + \sum_{n=1}^m Ia_n \cos(n \cdot \omega \cdot t) + \sum_{n=1}^m Ib_n \sin(n \cdot \omega \cdot t) \right) \quad (2.46)$$

Далі, згідно [5], після виконання математичних перетворень миттєва потужність представляється як сума окремих складових:

$$p(t) = P_0 + p_{\cos}(t) + p_{\sin}(t), \quad (2.47)$$

де P_0 – постійна складова миттєвої потужності визначається як сума всіх постійних членів у виразі для миттєвої потужності:

$$P_0 = U_0 \cdot I_0 + \sum_{n=1}^m (Ua_n \cdot Ia_n + Ub_n \cdot Ib_n); \quad (2.48)$$

$p_{\cos}(t)$ – знакозмінна косинусна складова миттєвої потужності визначається як частина виразу, що відображає коливання потужності з частотою, пов'язаною з основним режимом роботи системи:

$$P_{\cos}(t) = \sum_{n=1}^{2m} Pa_n \cdot \cos(n \cdot \omega \cdot t), \quad (2.49)$$

де Pa_n – амплітуда n -ої косинусної складової потужності;

$p_{\sin}(t)$ – знакозмінна синусна складова миттєвої потужності, яка визначається таким виразом:

$$P_{\sin}(t) = \sum_{n=1}^{2m} Pb_n \cdot \sin(n \cdot \omega \cdot t), \quad (2.50)$$

де Pb_n – амплітуда n -ої синусної складової потужності.

Активна потужність у цьому випадку визначається як сума постійної складової та всіх компонентів, пов'язаних з косинусними складовими миттєвої потужності:

$$P_a(t) = P_0 + P_{\cos}(t), \quad (2.51)$$

а знакозмінна синусна складова миттєвої потужності Pb_n зазвичай називається реактивної складової повної потужності.

Еквівалентна полігармонійна потужність визначається згідно з виразом (2.23), і після виконання математичних дій вона набуде наступного вигляду:

$$P_{\text{ср}} = \sqrt{P_0^2 + \frac{1}{2} \sum_{n=1}^{2n} Pa_n^2 + \frac{1}{2} \sum_{n=1}^{2n} Pb_n^2} \quad (2.52)$$

За відомою залежністю миттєвої потужності від часу, представленій у вигляді (2.47), або в іншому еквівалентному вигляді, миттєва потужність виражається як функція часу, що враховує всі складові, що впливають на енергообмін у системі:

$$P(t) = P_0 + \sum_{n=1}^{2m} [Pa_n \cdot \cos(n \cdot \omega \cdot t)] + \sum_{n=1}^{2m} Pb_n \cdot \sin(n \cdot \omega \cdot t) \quad (2.53)$$

Визначення коефіцієнта потужності.

Зазвичай визначати коефіцієнт потужності можна згідно з наступною формулою:

$$\cos \varphi = \frac{P}{S}, \quad (2.54)$$

де P – середня величина активної потужності,

S – діюча величина повної потужності.

При несумісному живленні $P = P_0 = \frac{1}{T} \int_0^T p(t) dt$, де миттєве значення повної потужності обчислюється як $p(t) = u(t) i(t)$ – добуток миттєвих значень напруги та струму.

Тоді коефіцієнт потужності приймає вигляд:

$$\cos \varphi = \frac{P_0}{S}, \quad (2.55)$$

де повна (уявна) потужність визначається відповідно наступному виразу:

$$\begin{aligned} S &= U_e I_e = \sqrt{\frac{1}{T^2} \left(\int_0^T u^2(t) dt \right) \left(\int_0^T i^2(t) dt \right)} = \\ &= \frac{1}{T} \sqrt{\left(\int_0^T u^2(t) dt \right) \left(\int_0^T i^2(t) dt \right)} = \\ &= \frac{1}{T} \sqrt{\left[U_0^2 + \frac{1}{2} \left(\sum_{n=1}^n U_{a_n}^2 + \sum_{n=1}^n U_{b_n}^2 \right) \right] \cdot \left[I_0^2 + \frac{1}{2} \left(\sum_{m=1}^m I_{a_m}^2 + \sum_{m=1}^m I_{b_m}^2 \right) \right]}. \end{aligned} \quad (2.56)$$

Для точного обчислення коефіцієнта потужності даних формул недостатньо. До складу активної потужності, крім постійної компоненти, включаються змінні компоненти. При застосуванні методу Фур'є такими компонентами є косинусні складові. Отже, функція активної потужності набуде наступного вигляду:

$$P_a(t) = P_0 + \sum_{n=1}^{2n} P_n \cos(n\Omega t). \quad (2.57)$$

А це означає, що вираз для обчислення коефіцієнта потужності набуде наступного вигляду:

$$k_m = \frac{\sqrt{P_0^2 + \frac{1}{2} \sum_{n=1}^{2m} P_n^2}}{P_e}. \quad (2.58)$$

Визначення коефіцієнта реактивності.

Аналогічно коефіцієнту активної потужності необхідно визначити показник реактивної енергії, яка протікає в системі «електрична мережа — споживач». Це виражається через коефіцієнт реактивності чи реактивної потужності.

Зазвичай коефіцієнт реактивності називають $\tan \varphi$ та визначається наступним чином:

$$\tan \varphi = \frac{Q}{P}, \quad (2.59)$$

де Q визначається за формулою:

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2}. \quad (2.60)$$

Це твердження правильне для синусоїдальних навантажень, однак у разі несиметрії формула (2.60) не зможе точно відобразити реальний стан процесу в мережі реактивної потужності. Тому з урахуванням полігармонічного складу напруги, струму і, відповідно, потужності мережі коефіцієнт реактивності набуде наступного вигляду:

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{\sqrt{\frac{1}{2} \sum_{k=1}^k (P_{b_k})^2}}{\sqrt{P_0^2 + \frac{1}{2} \sum_{k=1}^k (P_{a_k})^2}} . \quad (2.61)$$

Визначення енергетичних характеристик асинхронного двигуна при полігармонійному живленні є завданням, вирішення якої дозволяє встановити параметри двигуна, оцінити якість перетворення енергії та визначити вплив електроприводу на електричну мережу.

При використанні методу Фур'є для аналізу миттєвих значень напруги, струму та потужності, а також їх творів слід враховувати обладнання, за допомогою якого вимірюються ці величини. Обмеженість сучасних технічних засобів та неможливість отримання повного спектру гармонік ставлять завдання визначення числа гармонік, які можна точно визначити і які значно впливають на енергопроцеси в системі «мережа — перетворювач — двигун».

Крім того, застосування перетворення Фур'є для кінцевого числа гармонік дає можливість точніше обчислити коефіцієнти активної та реактивної потужності. Ці коефіцієнти є ключовими параметрами при розрахунку споживаної активної та реактивної енергії, використовуваної користувачем. Уточнення їх значень не тільки сприяє більш ефективному та економному використанню енергоресурсів, а й допомагає точніше визначити розмір оплати за різні види потужності, що є важливим для оптимізації витрат та підвищення ефективності роботи всієї енергосистеми.

Таким чином, можна зробити висновок, що для досягнення необхідних параметрів впливу з боку групи або окремих електромеханічних систем необхідно реалізувати ряд заходів, спрямованих на вирішення задачі ефективного використання енергоресурсів:

- Оптимізація роботи технологічних установок електромеханічних систем;
- регулювання режимів споживання енергії перетворювальними пристроями та системами електроприводів;
- моніторинг роботи перетворювачів енергії з метою запобігання або мінімізації факторів, які можуть прискорити зношування та старіння електромеханічного обладнання.

2.3. Комплекс показників електротехнічних процесів, що визначають показники якості перетворення електроенергії.

Як було зазначено раніше, виходячи із даних, представлених на рис. 2.1, можна зробити висновок, що на основі показників якості перетворення енергії, і особливо їх складових, можна визначити техніко-економічні характеристики електричних машин та установок. Це дозволяє впровадити заходи для підвищення ефективності використання обладнання, а також здійснити оцінку його функціональності та прогнозувати надійність роботи.

До таких показників належать такі коефіцієнти:

Коефіцієнт енергетичних втрат чи коефіцієнт ефективності використання споживаної енергії. Цей показник фактично є коефіцієнтом корисної дії (ККД) і характеризує роботу машини як загалом, і по фазам. Детальне визначення даного коефіцієнта було викладено у першому пункті цього розділу.

Коефіцієнт імперативних втрат, що визначає відношення втрат, що нагрівають ізоляцію, до загальних втрат потужності. Для асинхронного двигуна цей коефіцієнт розраховується як:

$$K_{im} = \frac{\Delta P_{\epsilon\tau1} + \Delta P_{\mu\epsilon} + \Delta P_{\epsilon\tau2}}{\Delta P_{\epsilon\tau1} + \Delta P_{\mu\epsilon} + \Delta P_{\epsilon\tau2} + \Delta P_{\mu\kappa} + \Delta P_{\partial}} = \frac{\Delta P_{men}}{\Delta P_{\Sigma}}. \quad (2.62)$$

- *Коефіцієнт нерівномірності струмового завантаження фаз та*

нерівномірності тепловиділення в обмотках визначається згідно з таким виразом:

$$K_{ij} = \frac{\sqrt{I_{0j}^2 + \sum_{n=1}^m I_{nj}^2}}{\sqrt{\sum_j^{A,B,C} \left(I_{0j}^2 + \sum_{n=1}^m I_{nj}^2 \right)}}. \quad (2.63)$$

Зазначені критерії характеризують якісні аспекти процесу перетворення енергії. Вони дозволяють оцінити ефективність перетворення електричної енергії у двигуні.

Нижче наведені критерії, які безпосередньо пов'язані з надійністю приводу та прогнозуванням його терміну служби.

- Коефіцієнт неякісності перетворення моменту визначається як відношення середнього моменту до середньоквадратичного моменту:

$$K_{\text{нм}} = 1 - \frac{M_0}{M_\delta}, \quad (2.64)$$

де M_0 – величина постійної складової електромагнітного моменту, M_δ – величина середньоквадратичного моменту з періодом напруги живлення T :

$$M_\delta = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T \left(M_0 + \sum_{n=1}^{\infty} M_n \cos(n\omega t) \right)^2 dt} = \sqrt{M_0^2 + \sum_{n=1}^{\infty} M_n^2}. \quad (2.65)$$

Коефіцієнт неякісності перетворення, що показує погіршення вібраційних характеристик електричної машини, визначається як відношення середньоквадратичної змінної складової моменту до середньоквадратичного моменту:

$$K_{\text{нв}} = \frac{\sqrt{\sum_{k=1}^{\infty} M_n^2}}{\sqrt{M_0^2 + \sum_{k=1}^{\infty} M_n^2}}. \quad (2.66)$$

- Коефіцієнт збільшення навантаження шляхом змінної складової моменту:

$$k_m = \frac{\sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T M(t)^2 dt}}{\frac{1}{T} \int_0^T M(t) dt} . \quad (2.67)$$

Цей показник вібрацій електричної машини характеризує рівень та частотні складові вібрацій, виділяючи компоненти, викликані механічними причинами, такими як особливості роботи підшипників, а також вібрації, пов'язані з особливостями перетворення електричної енергії (наприклад, магнітної або електричної несиметрії машини). Обидві ці складові суттєво впливають на працездатність електромеханічного перетворювача; їх механічне прояв має схожий характер, проте способи усунення цих проблем принципово різняться.

- Рівень електромагнітної несиметрії може бути визначений через аналіз параметра взаємної індуктивності x_{μ} , що описує зазор:

якщо $x_{\mu A} \neq x_{\mu B} \neq x_{\mu C}$ - то існує конструктивна несиметрія:

$$x_{\mu cr} = \frac{1}{3} \sum_i^{A,B,C} x_{\mu i} , \quad (2.68)$$

де $\Delta x_{\mu i} = \frac{x_{\mu i} - x_{\mu cr}}{x_{\mu cr}} \cdot 100\%$ —пофазні відхилення.

Виникнення такої неякості здебільшого обумовлено або виробничими дефектами електричної машини, або її зносом, тобто фізичним старінням. Магнітна асиметрія є характеристикою, що сприяє появі змінної складової миттєвої потужності та електромагнітного моменту. Змінна складова моменту — це один із чинників, що спричиняє вібрацію електричних машин. Так само це стосується асиметрії електричних параметрів (опорів, індуктивностей тощо). Типи асиметрії важливо розрізняти, визначаючи

кожен окремо. У цьому контексті розглянутий показник якості перетворення енергії має інтегральний характер.

- *Показник, що враховує нелінійні властивості елементів, задіяних у механізмі перетворення, наприклад, нелінійну залежність потоку від струму збудження, дозволяє визначити рівень насичення сталі, в якій розміщені обмотки електричної машини. Цей показник ступеня насичення сталі є значущою характеристикою, що відображає якісні параметри процесу перетворення. Зазначимо, що цю характеристику важко висловити чисельно. Однак ефект нелінійних перетворень потужності стає помітний завдяки появі гармонік струму в кривій мережі живлення, викликаних нелінійною залежністю потоку в сталевому пакеті від струму, що протікає по обмотках. Насичення сталі машини неминуче змінює неоднозначні залежності втрат у сталі від індукції та частоти. Відомо, що за насичення сталі втрати збільшуються, досягаючи рівнів, у яких робота електричної машини стає неможливою. У зв'язку з цим при оцінці показника, що визначає нелінійні властивості механізму перетворення, необхідно дослідити залежності середнього значення індуктивності обмоток від напруги живлення та інших параметрів.*

- *Показник, що характеризує нерівномірність розподілу втрат у сталі, виявляється в електричних машинах, які пройшли ремонт із заміною обмоток або тривалий час на зберіганні з порушенням встановлених стандартів. Це явище виражається у вигляді локальних зон підвищених втрат у сталі, які можуть виникати вздовж зубця, в окремих його ділянках або включати кілька сусідніх зубців. Локальне збільшення втрат, зазвичай, не викликає значного загального підвищення температури машини, проте достатньо виникнення місцевого перегріву, що може призвести до пошкодження ізоляції. Визначити цей показник можна за допомогою тестування сталі розібраної машини, і отримані дані мають важливе значення для прогнозування якості процесів.*

3 ПРИНЦИПИ ПОБУДОВИ МІКРОПРОЦЕСОРНИХ МОДУЛІВ ДЛЯ ОЦІНЮВАННЯ ЯКОСТІ ПЕРЕТВОРЕННЯ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ

3.1. Вимоги до обладнання для вимірювання якості перетворення електроенергії.

Оскільки електротехнічні системи відрізняються високою швидкістю реагування, і перехідні процеси в них проходять швидко, для вивчення потрібно спеціалізоване вимірювальне обладнання. Таке обладнання має забезпечувати необхідну точність вимірювань як за значенням, так і за часом, а також мати можливість зберігати результати подальшої обробки. Тому традиційний підхід з використанням аналогових вимірювальних приладів та візуальною фіксацією результатів людиною вже не підходить [17] .

Цим вимогам відповідають цифрові вимірювальні комплекси. У загальному випадку (рис. 3.1), такий комплекс включає первинні перетворювачі, які встановлюються на досліджуваному об'єкті, вимірювальні перетворювачі, що наводять параметри сигналу у форму, зручну для подальшої обробки, блок аналого-цифрового перетворення (АЦП), що перетворює сигнал в цифрову форму, а також ПК, який за допомогою програмного забезпечення керує роботою комплексу та здійснює обробку даних, наводячи їх у зручний для досліджень вигляд.

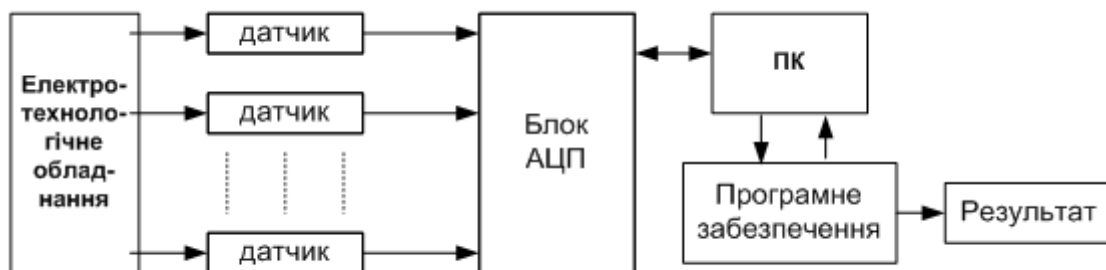


Рисунок 3.1- Схема цифрового вимірювального комплексу

Вибір *первинного перетворювача* залежить від необхідного класу точності, який відповідає промисловим стандартам та піддається повірці для підтвердження відповідності паспортним характеристикам. Використання первинного перетворювача вищого класу точності може призвести до покращення результатів лише за умови, що інші компоненти системи також мають відповідний рівень точності.

Виміррювальний перетворювач необхідний для того, щоб привести рівень сигналу первинного перетворювача до значень, які відповідають входу АЦП. Сучасні елементи дозволяють мінімізувати похибки вимірювань за дотримання відповідних схемотехнічних норм.

Для захисту інформаційних ланцюгів від флуктуаційних перешкод застосовується екранування та використання спеціальних схем, які коригують адитивні похибки, спричинені шумами та змінами у джерелах усунення нульових рівнів. Ці заходи допомагають знизити вплив зовнішніх та внутрішніх перешкод на точність вимірів.

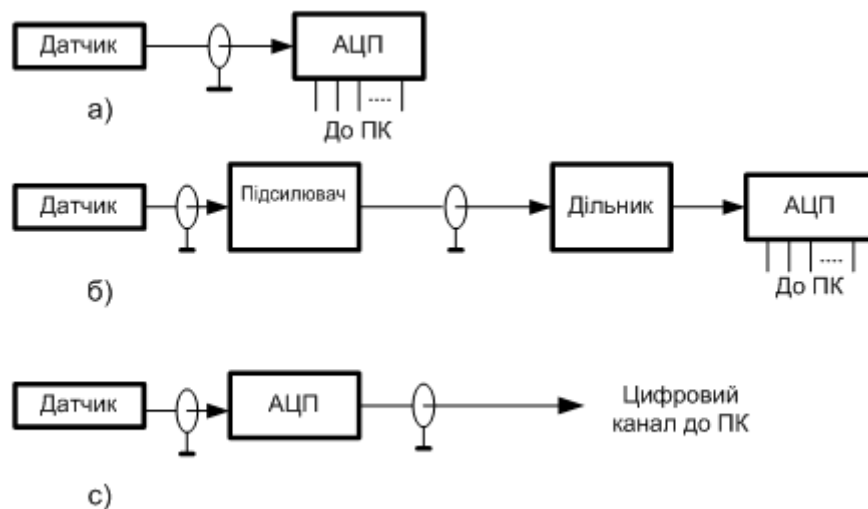


Рисунок 3.2 - Варіанти побудови тракту передачі.

Лінії передачі можуть вносити суттєвий внесок у загальну похибку вимірювань. Якщо рівень сигналу від датчика невисокий (вибір рівня сигналу визначається типом і довжиною лінії, і навіть впливом зовнішніх електромагнітних полів, імпульсних перешкод та інших чинників), рівень перешкод може перевищити корисний сигнал. Розглянемо кілька підходів до організації каналу передачі з погляду захисту від перешкод (рис. 3.2).

На рис. 3.2а зображений найпростіший варіант передачі сигнал з датчика подається безпосередньо на АЦП. При низькому рівні сигналу, навіть при хорошому екрануванні електромеханічні системи створюють значні перешкоди, що змушує застосовувати складні фільтри. Проте це завжди вирішує проблему, оскільки заздалегідь передбачити характеристики сигналу складно.

Більш складний та стійкий до перешкод варіант показаний на рис. 3.2б: тут сигнал посилюється безпосередньо поруч із датчиком рівня, який забезпечує оптимальне співвідношення сигнал/шум передачі. Перед блоком АЦП сигнал послаблюється до рівня.

На рис. 3.2с показана третя схема, де сигнал перетворюється на цифрову форму безпосередньо у датчика, а потім передається цифровими каналами. Передача можлива як у послідовному, так і в паралельному режимі, при цьому для надійної передачі даних використовуються надлишкові коди, які дозволяють контролювати та коригувати помилки. Цифрові канали передачі можуть бути провідними або оптоволоконними.

Для гальванічної розв'язки часто застосовуються оптоелектронні компоненти, проте їх використання не завжди можливе через відносно велику прохідну ємність та обмежену робочу напругу (десятки або сотні вольт). Для передачі імпульсних сигналів використовуються спеціалізовані імпульсні трансформатори, в яких вдається знизити прохідну ємність до сотих часток пікофаради, при цьому забезпечуючи практично ідеальне екранування обмоток.

Похибка *аналого-цифрового перетворення* легко піддається оцінці, і вибір перетворювачів здійснюється на основі потрібної точності дискретизації за часом та амплітудою.

Похибки перетворення величин у цифрову форму та похибки математичних обчислень залежать від типу чисел (цілі, з плаваючою точкою і т. д.) та їхньої розрядності. Прагнуть мінімізувати ці похибки, оскільки сучасні мікропроцесори мають високу розрядність, що сприяє більш точним обчисленням[17].

З урахуванням вищевикладеного, стає очевидною необхідність розробки систем та пристроїв, які забезпечували б автоматичне керування режимами роботи асинхронних двигунів (АТ), збирання та обробку отриманої інформації. Пристрій для визначення показників енергопроцесів має функціонувати як автоматизована система вимірювання та контролю параметрів електромеханічної системи. Такий комплекс наукових досліджень можна реалізувати на персональному комп'ютері (ПК).

Необхідність комп'ютеризації дослідницького комплексу пояснюється низкою причин:

- Для розрахунку діючих значень струмів та напруг в окремих фазах статора, а також для їх типового значення та гармонійного аналізу потрібно мати миттєві значення цих величин. Використання стрілочних приладів у дослідженнях частотних, несиметричних та інших спеціалізованих режимів є недоцільним з низки причин, включаючи значну похибку в області низьких частот та малу інформативність.

- На основі миттєвих значень струму та напруги статора розраховується закон зміни електромагнітного моменту в часі, що важливо для визначення динамічних механічних характеристик та максимальних ударних моментів. Ці моменти можуть досягати значень, які неприпустимі з точки зору механічної міцності механізмів та двигуна, що може негативно позначитися на довговічності та надійності електроприводу.

- Можливість комп'ютерної обробки та аналізу даних за допомогою відповідного програмного забезпечення значно підвищує ефективність роботи та суттєво скорочує час, необхідний для побудови необхідних залежностей.

3.2. Розробка структури модуля визначення якості перетворення електроенергії.

Структурна схема модуля визначення показників якості перетворення електроенергії представлена на рис. 3.3.

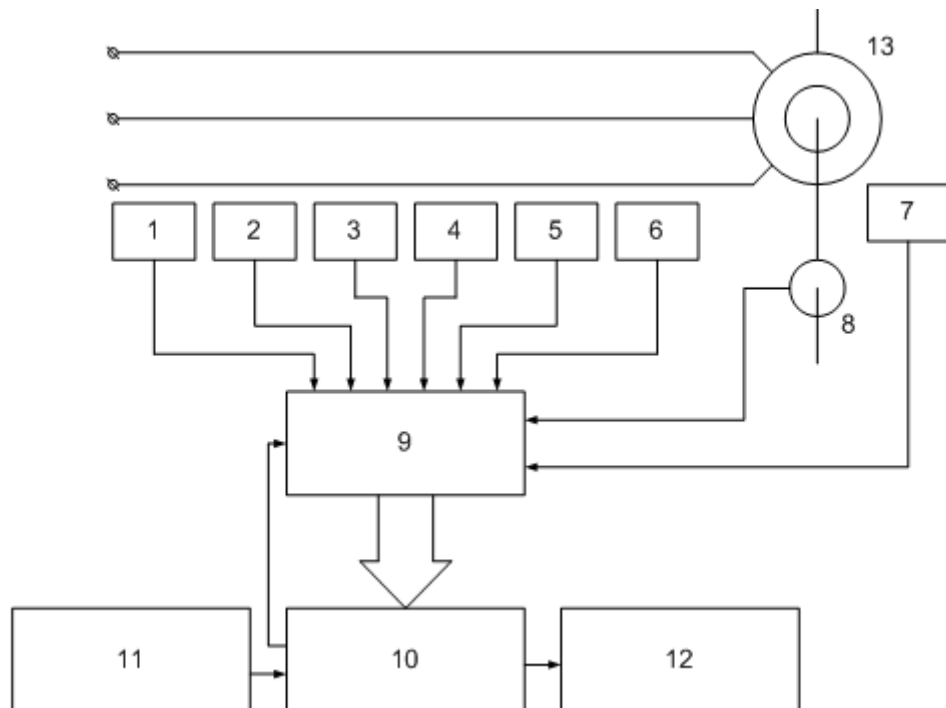


Рисунок 3.3 - Структурна схема модуля визначення показників якості перетворення електроенергії.

- 1 – 3 – датчики миттєвих напруг;
- 4 – 6 – датчики миттєвих струмів;
- 7 – датчик вібрації;
- 8 – блок тахометра;
- 9 – аналого-цифровий перетворювач;
- 10 – блок обчислювальний;
- 11 – блок для введення інформації;
- 12 – блок для відображення інформації.

Для вимірювання параметрів енергоспоживання двигуна, а також візуального контролю за процесами в силових ланцюгах машини, використовується блок вимірювальних приладів (БВП), призначений для ланцюгів змінного і постійного струму. Швидкість обертання валу двигуна вимірюється за допомогою таховольтметра, який підключається до виходу тахогенератора машини постійного струму з постійними магнітами.

Перетворення аналогових сигналів, одержуваних від датчиків струму і напруги, цифрову форму виконує аналого-цифровий перетворювач (АЦП) моделі АОС1013. Функціональна схема цього АЦП показана на Рис. 3.4, а принципова схема — на Рис. 4.6. АОС1013 є функціонально повноцінним комплексом, що включає багатоканальний 10-розрядний аналого-цифровий перетворювач.

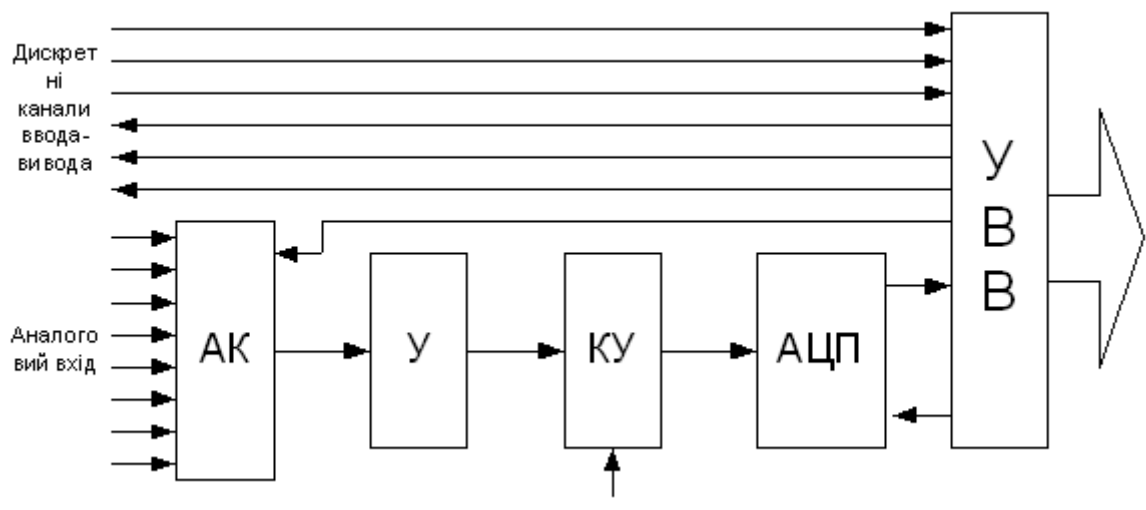


Рисунок 3.4 - Функціональна схема блоку аналогово-цифрового перетворювача

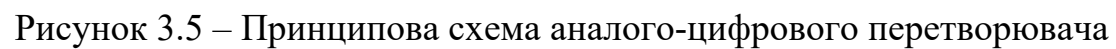
Плата АОС1013 виконана за стандартом IBM PC/AT та підключається до роз'єму комп'ютера. Для вибору каналу виміру використовується мультиплексор, який за допомогою програмного керування з'єднує 16 вхідних ліній із входом диференціального підсилювача. Посилений сигнал потім надходить у 10-розрядний аналого-цифровий перетворювач (АЦП). Результат перетворення передається в пам'ять комп'ютера через шину даних.

Комп'ютер керує процесом роботи плати АЦП та збором даних з необхідних каналів, по черзі задаючи адреси вхідних каналів, коефіцієнти посилення та відправляючи стартовий сигнал для початку перетворення.

Підключення плати АЦП через шину ISA забезпечує високу швидкість роботи системи. Загальний час перетворення включає етапи ініціалізації, перетворення та передачі даних через шину ISA.

Такий пристрій контрольно-вимірювального модуля (КВМ) дозволяє повністю автоматизувати процес вимірювання та інтегрувати роботу комп'ютера з обладнанням, при цьому ПК стає ключовим елементом комплексу.

Модуль вимірювальних датчиків (МВД) є частиною цієї системи і відповідає за перетворення вимірюваних величин в аналоговий сигнал. МВД використовується для вимірювання лінійних та фазних напруг та струмів у ланцюгах змінного струму по трьох незалежних каналах.



Сигнали, що надходять з датчиків струму і напруги, передаються в блок підсилювачів (БМП), що масштабують. У цьому блоці сигнали посилюються рівня, необхідного для роботи АЦП, що дозволяє досягти максимальної розрядності при перетворенні аналогового сигналу в цифровий код.

Вихідні сигнали блоку підсилювача, що масштабує, передаються через шестиканальну лінію з модуля вимірювальних датчиків і надходять на вхід комп'ютеризованого вимірювального комплексу.

3.3 Алгоритми для визначення якості перетворення електроенергії за параметрами миттєвої потужності.

На основі математичних методів, що використовують визначення складових миттєвої потужності з метою оцінки якості перетворення енергії та розрахунку залишкового терміну служби двигуна, а також з урахуванням структурної схеми, показаної на Рис. 3.3 був розроблений алгоритм роботи пристрою, представлений на Рис. 3.6.

Як видно з Рис. 3.6, після отримання миттєвих значень струму і напруги за період T ці дані піддаються розкладанню в ряд Фур'є, а потім виконується розрахунок складових миттєвої потужності. Наступним етапом є визначення рівня втрат у міді, потім втрат у сталі, які розраховуються на основі миттєвих значень струму контуру намагнічування. На основі цих даних обчислюється температура статора обмоток. Порівнявши розраховану температуру з номінальною для даного класу ізоляції, визначається коефіцієнт прискореного зношування ізоляції обмоток статора, викликаний температурними впливами.

Далі, на основі змінного моменту на валу двигуна, розраховується коефіцієнт неякості перетворення та коефіцієнт збільшення навантаження через змінну складову моменту. Виходячи з отриманих значень показників якості перетворення енергії, визначається вплив вібрації на прискорене зношування ізоляції обмоток статора. З урахуванням коефіцієнтів

прискореного зносу від температурних та вібраційних впливів, обчислюється чинний коефіцієнт прискореного зносу ізоляції.

Потім відбувається зняття миттєвих значень струму, напруги, вібрації та кутової швидкості за період T . Якщо дані, отримані з датчиків, збігаються з вимірюваннями за попередній період, система може прийняти рішення про подальший аналіз або завершення поточного циклу.

Надалі цей алгоритм стане основою для розробки програмного забезпечення, призначеного для управління роботою модуля, що проектується. Це ПЗ забезпечуватиме автоматичне виконання всіх етапів обробки даних, розрахунків та аналізів, описаних в алгоритмі, і буде інтегровано з вимірювальними та обчислювальними компонентами системи, забезпечуючи точну та своєчасну оцінку стану електродвигуна та його компонентів.

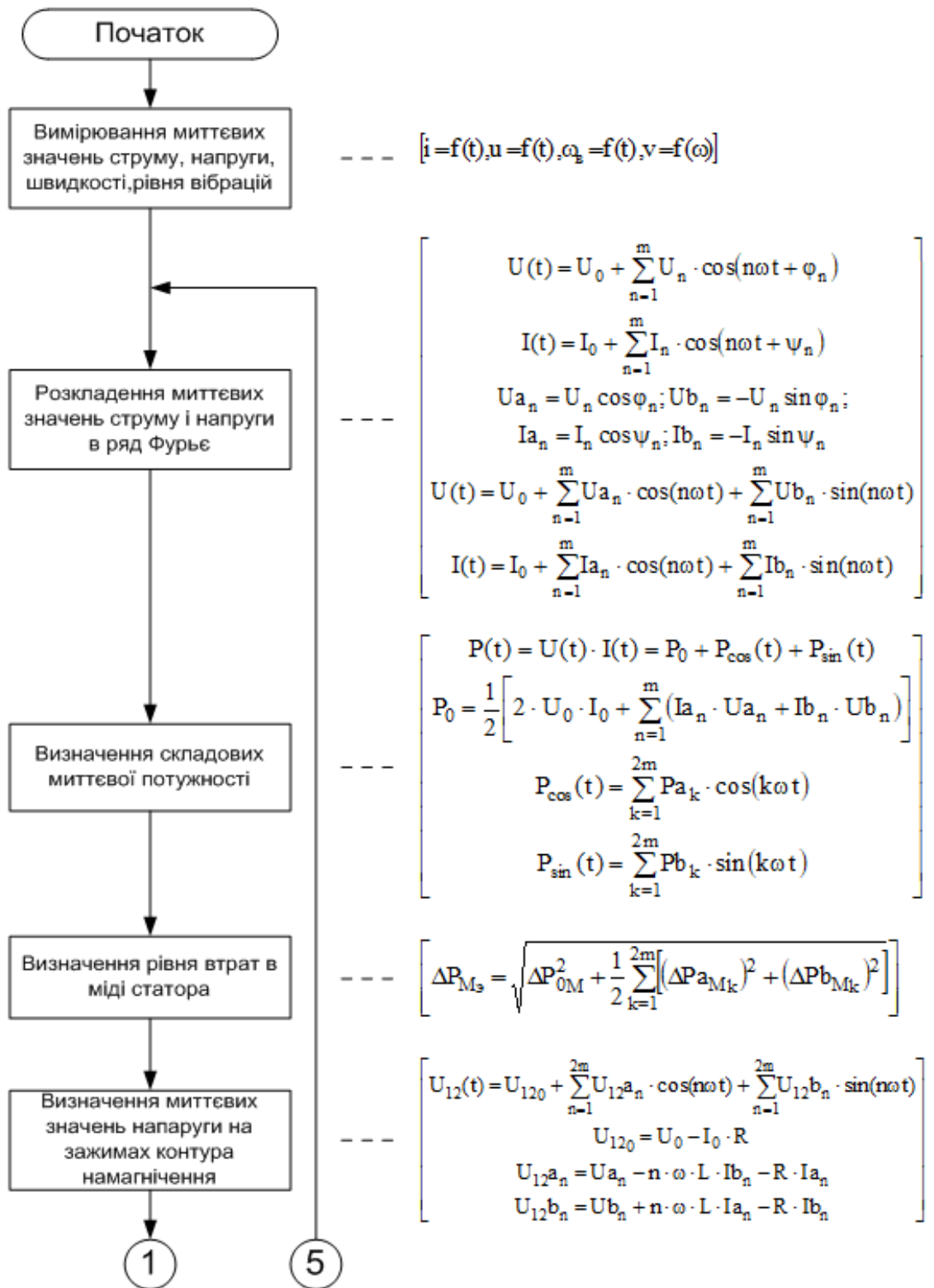
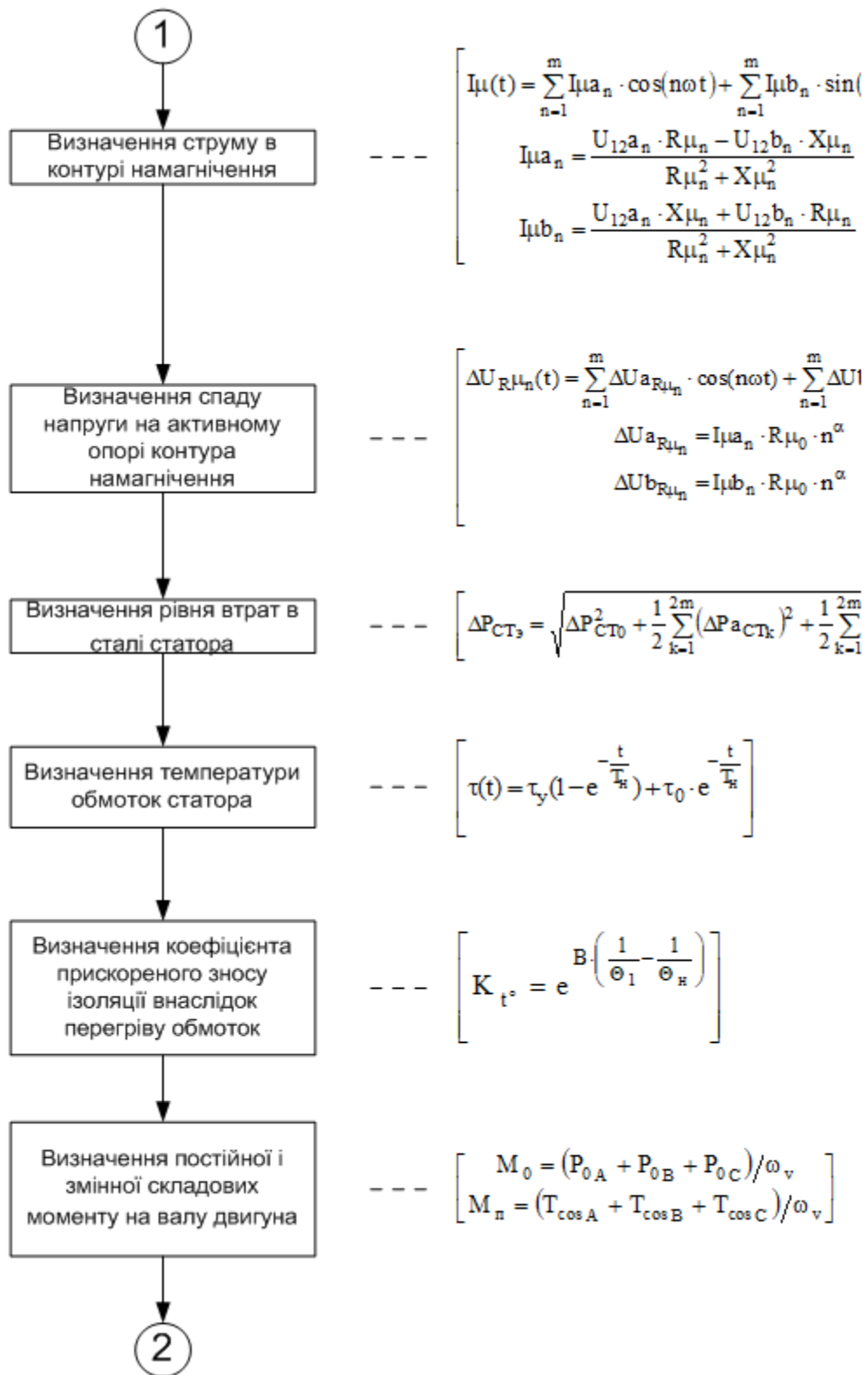
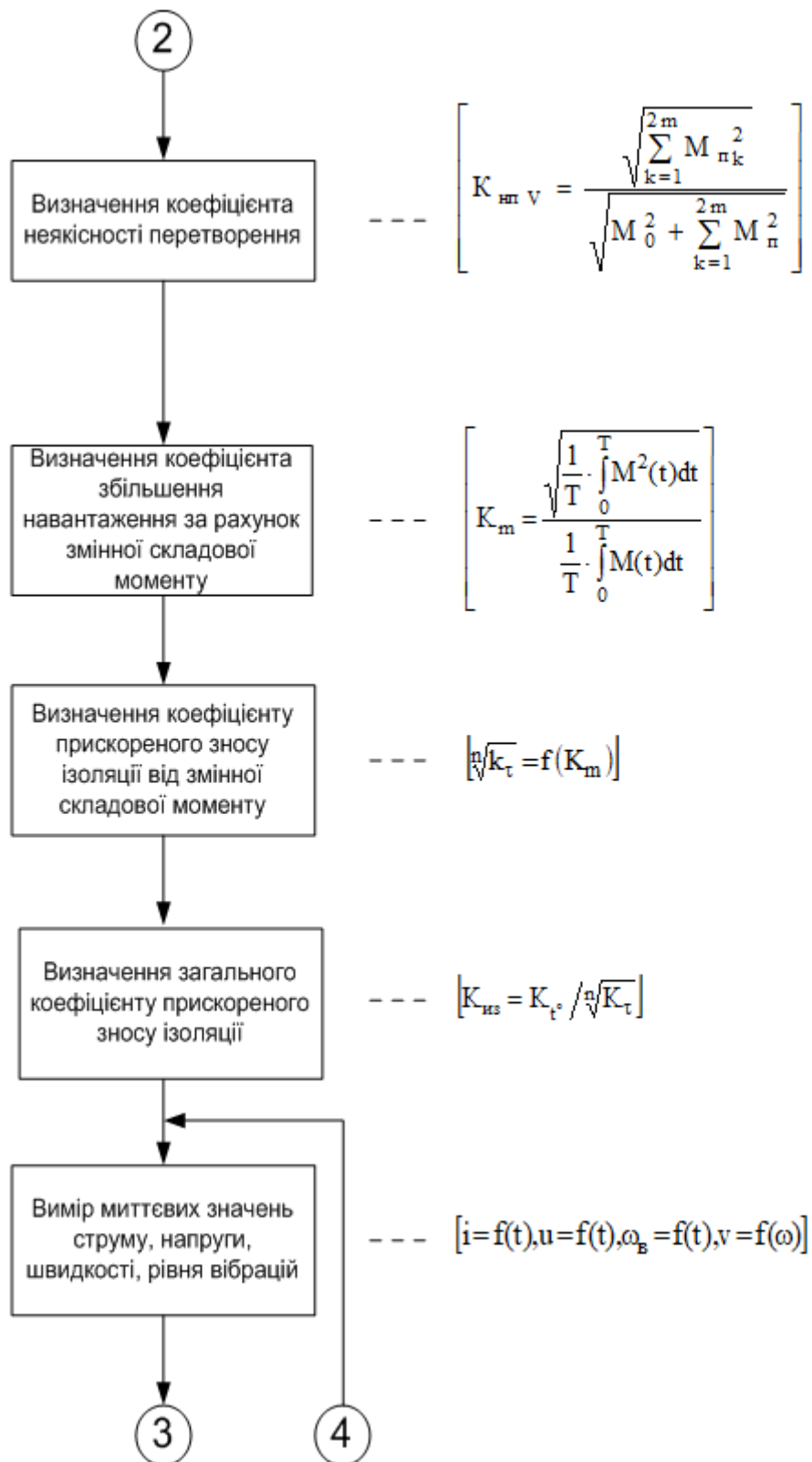


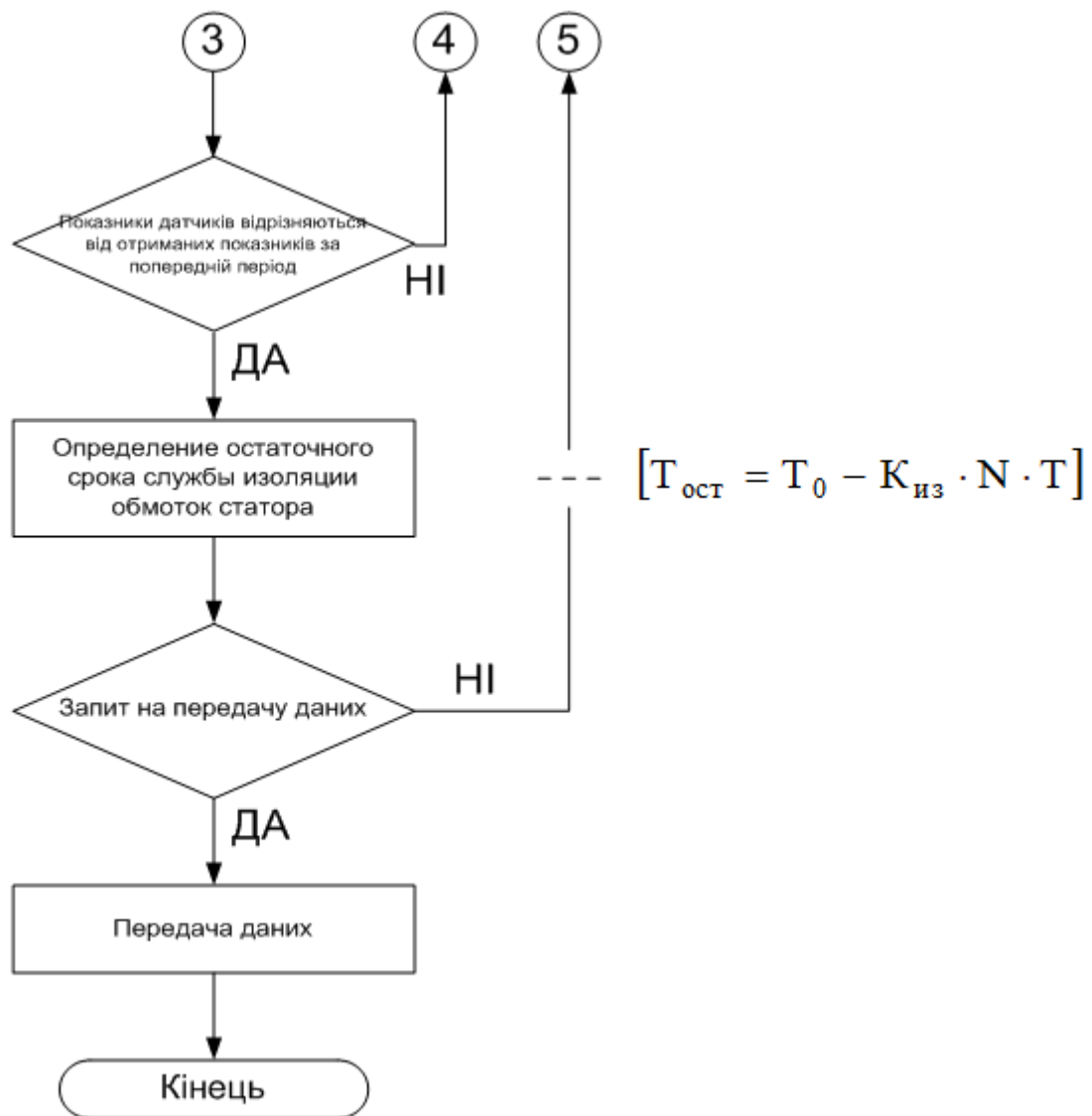
Рисунок 3.6 - Алгоритм роботи мікропроцесорного модуля.



Продовження рисунку 3.6 - Алгоритм роботи мікропроцесорного модуля.



Продовження рисунку 3.6 - Алгоритм роботи мікропроцесорного модуля.



Продовження рисунку 3.6 - Алгоритм роботи мікропроцесорного модуля.

3.4. Система датчиків для визначення показників якості перетворення електроенергії.

З розвитком технологій з'являється можливість використання сучасних датчиків напруги та струму. Одним із таких рішень є вимірювальні датчики, вироблені швейцарською компанією LEM S.A. Для вимірювання струму використовуються датчики компенсаційного типу, що працюють на основі ефекту Холла, а для вимірювання напруги застосовуються датчики

компенсаційного типу, що також використовують ефект Холла, але без вбудованого первинного резистора.

3.4.1. Датчики струму.

Компенсаційні датчики струму, засновані на ефекті Холла, є пристроями зі 100% зворотним зв'язком, також відомі як датчики з нульовим потоком. Вони оснащені вбудованим компенсаційним ланцюгом і дозволяють вимірювати номінальні струми (IPN) від кількох ампер до десятків тисяч ампер із точністю близько 1%.

Основні характеристики та переваги компенсаційних датчиків ЛЕМ включають:

- Висока точність вимірів;
- Відмінна лінійність;
- Низький температурний дрейф;
- Швидкий час відгуку та широкий частотний діапазон;
- Відсутність додаткових втрат у вимірювальному ланцюзі;
- Гальванічна розв'язка, що дозволяє використовувати ці датчики для вимірювання постійного та змінного струму, а також струмів іншої форми;
- Стійкість до перешкод навколишнього середовища, а також можливість легко перетворювати вихідний сигнал на напругу;
- Здатність витримувати навантаження струму без пошкоджень.

Ці особливості роблять такі датчики ідеальними для застосування у різних системах, де важливі точність та надійність вимірів.

Ці датчики ідеально підходять для промислового використання, де потрібна висока точність та широкий частотний діапазон. Однак їх головним недоліком є споживання потужності компенсації струму. Крім того, для вимірювання високих струмів такі датчики дорожчі і мають більші розміри в порівнянні з аналогічними датчиками з прямим посиленням.

Працюючи практично при нульовому потоці (хоча в реальних умовах присутні розсіяні магнітні потоки), ці датчики мають відмінну лінійність за межами номінального діапазону перетворення. Номінальний діапазон залежить від потужності джерела живлення, яке забезпечує вторинний (вихідний) струм, з урахуванням падіння напруги в самому датчику та на резисторі навантаження.

Точність перетворення таких датчиків залежить від багатьох факторів. Це можуть бути як електричні параметри (наприклад, постійний струм, змінний струм, промислові частоти або високочастотні струми), так і зовнішні умови, такі як температура навколишнього середовища та інші параметри, що впливають на роботу пристрою.

Чинники, що впливають на точність вимірювань, залежать від температури навколишнього середовища та робочої температури пристрою. Основні їх такі:

Залежні від температури навколишнього середовища:

- Зміщення вихідного сигналу при $I_P = 0$. Температурні зміни можуть викликати усунення вихідного сигналу, коли вхідний струм дорівнює нулю. Це усунення може впливати на точність вимірювань за умов змінних температур.

- Нелінійність: Температурні коливання можуть спричинити зміну лінійності характеристик датчика, особливо в діапазоні високих струмів, що знижує точність перетворення сигналу.

Залежні від робочої температури:

- Дрейф початкового вихідного струму. Зі збільшенням робочої температури може відбуватися дрейф вихідного вихідного струму, що призводить до відхилень у вимірюваннях, особливо в динамічних режимах роботи пристрою.

Динамічні характеристики.

Частотна характеристика датчиків компенсаційного типу відрізняється високою продуктивністю завдяки двом ключовим факторам.

- Низькочастотний діапазон - для струмів низької частоти основним чинником, що визначає частотні характеристики, є електроніка з елементом Холла. Елемент Холла забезпечує точність та лінійність вимірювань навіть за зміни частоти струму в межах низькочастотного діапазону.

- Високочастотний діапазон - при високих частотах датчик працює як трансформатор струму. Це дозволяє йому ефективно працювати при струмах, що мають високу частоту, забезпечуючи при цьому точний вимір та мінімізацію втрат.

Мінімальна верхня межа частотної характеристики більшості датчиків компенсаційного типу становить близько 100 кГц. Деякі моделі можуть мати розширений діапазон, що досягає 150-200 кГц, що дозволяє використовувати їх у додатках, що вимагають вимірювання змінного струму на більш високих частотах.

Час відгуку та швидкість збільшення вихідного струму.

Час відгуку датчиків компенсаційного типу становить менше 1 мкс, що дозволяє ефективно реагувати на зміни вхідних сигналів. Якість повторення форми вхідного струму на резисторі навантаження залежить від декількох факторів, таких як внутрішня конструкція датчика і метод його монтажу в схемі. Це дозволяє досягти високої точності вимірювання, мінімізуючи спотворення форми сигналу.

Швидкість збільшення вихідного струму у датчиків компенсаційного типу варіюється в залежності від моделі і може становити від 50 А/мкс до декількох сотень А/мкс. Це робить їх придатними для роботи в умовах, де потрібне швидке реагування на зміни струму.

Області застосування цих датчиків дуже різноманітні. Вони активно використовуються у промислових установках для перетворення та контролю

електричного струму, а також знаходять широке застосування у лабораторних дослідженнях та тестовому устаткуванні. Це дозволяє проводити точні вимірювання та тести у різних галузях, від наукових експериментів до технічного контролю у виробничих умовах.

3.4.2. Датчики напруги.

Датчики напруги, що використовують ефект Холла, працюють за аналогічним принципом, як датчики струму, але з деякими конструктивними особливостями. На відміну від датчиків струму, датчики напруги обладнані первинною багатовитковою обмоткою, яка дозволяє ефективно вимірювати напругу. Ці датчики фактично є модифікацією датчиків струму з додаванням резистора R_1 , який може бути як вбудованим в конструкцію датчика, так і зовнішнім.

Для досягнення високої точності перетворення низьких напруг рекомендується використовувати датчики з меншою кількістю витків у первинній обмотці. Незважаючи на те, що такі датчики можуть споживати більше енергії та створювати велику розсіяну потужність у первинному ланцюзі, вони забезпечують кращі частотні характеристики. Це стає значною перевагою у випадках, коли важливо забезпечити точність вимірів при високих частотах.

4 РОЗРОБКА ІМІТАЦІЙНОЇ МОДЕЛІ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ПОКАЗНИКІВ ЯКОСТІ ПЕРЕТВОРЕННЯ ЕНЕРГІЇ

4.1. Моделювання електричних процесів в асинхронному двигуні при несинусоїдальності напруги живлення.

Несинусоїдальність напруги живлення виникає, коли до основної синусоїдальної хвилі додаються гармонійні складові вищих порядків. Це означає, що крім основної частоти присутні компоненти з частотами, кратними основній. Ці гармоніки можуть спотворювати форму ідеальної кривої синусоїдальної, збільшуючи спотворення напруги.

В результаті, напруга живлення стає нелінійною, що може впливати на роботу електричних пристроїв, викликаючи додаткові втрати, перегрів та зниження ефективності роботи обладнання.

Перша гармонійна складова напруги для фаз А, В і С трифазної системи зазвичай задається наступним чином:

$$\left. \begin{aligned} U_{A1}(t) &= U_1 \cdot \cos(\omega t), \\ U_{B1}(t) &= U_1 \cdot \cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right), \\ U_{C1}(t) &= U_1 \cdot \cos\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right); \end{aligned} \right\} \quad (4.1)$$

де U_1 – амплітуда гармонійної складової,

ω – частота напруги, $\omega = 2\pi f$, $f = 50$ Гц;

t – час, який задається з точністю 15000 точок за секунду. Така кількість точок дає можливість задати вищі гармоніки складових напруги з синусоїдою, що добре простежується (завдання десятої гармоніки з точністю 30 точок протягом періоду);

$\pm \frac{2\pi}{3}$ – зсув по фазі напруги.

Гармонічні складові напруги вищих порядків можуть бути виражені через наступні рівняння:

$$\left. \begin{aligned} U_{A2}(t) &= U_2 \cdot \cos(2\omega t + \varphi_2), \\ U_{B2}(t) &= U_2 \cdot \cos\left(2\omega t + \varphi_2 - \frac{2 \cdot 2\pi}{3}\right), \\ U_{C2}(t) &= U_2 \cdot \cos\left(2\omega t + \varphi_2 + \frac{2 \cdot 2\pi}{3}\right); \end{aligned} \right\} \quad (4.2)$$

$$\left. \begin{aligned} U_{A3}(t) &= U_3 \cdot \cos(3\omega t + \varphi_3), \\ U_{B3}(t) &= U_3 \cdot \cos\left(3\omega t + \varphi_3 - \frac{3 \cdot 2\pi}{3}\right), \\ U_{C3}(t) &= U_3 \cdot \cos\left(3\omega t + \varphi_3 + \frac{3 \cdot 2\pi}{3}\right); \end{aligned} \right\} \quad (4.3)$$

$$\left. \begin{aligned} U_{An}(t) &= U_n \cdot \cos(n\omega t + \varphi_n), \\ U_{Bn}(t) &= U_n \cdot \cos\left(n\omega t + \varphi_n - \frac{n \cdot 2\pi}{3}\right), \\ U_{Cn}(t) &= U_n \cdot \cos\left(n\omega t + \varphi_n + \frac{n \cdot 2\pi}{3}\right); \end{aligned} \right\} \quad (4.4)$$

де U_n – амплітуда n -ої гармонійної складової,

n – номер порядку гармонійної складової.

φ_n – фазовий зсув n -ої гармонійної складової щодо першої гармоніки напруги;

Множник n при фазовому зсуві напруги використовується для забезпечення правильної симетрії та однакової форми кривої напруги для різних фаз трифазної системи. На рисунку 4.1 наведено криві напруги, які задані виразом виду:

$$\left. \begin{aligned} U_{An}(t) &= U_n \cdot \cos(n\omega t + \varphi_n), \\ U_{Bn}(t) &= U_n \cdot \cos\left(n\omega t + \varphi_n - \frac{2\pi}{3}\right), \\ U_{Cn}(t) &= U_n \cdot \cos\left(n\omega t + \varphi_n + \frac{2\pi}{3}\right); \end{aligned} \right\} \quad (4.5)$$

У таблиці 4.1 наведено параметри заданої напруги.

Таблиця 4.1 – Параметри напруги

№ гармоніки	Амплітуда U_n , В	Фазовий зсув φ_n , рад
1-ша	$\sqrt{2} \cdot 220$	0,0
5-та	$0,07 \cdot \sqrt{2} \cdot 220$	2,0
7-ма	$0,05 \cdot \sqrt{2} \cdot 220$	1,0

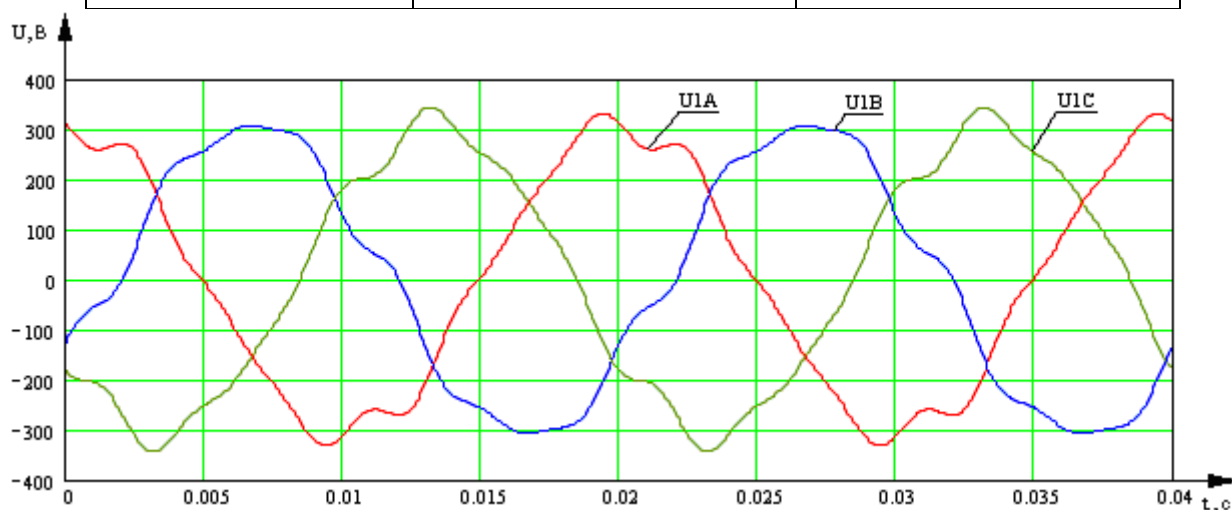


Рисунок 4.1- Графік залежності напруги фаз А, В, С від часу відповідно (4.5)

Як видно з рис. 4.1, криві напруги для фаз А, В, С мають різну форму. Щоб цього уникнути, необхідно врахувати множник, що залежить від номера гармоніки при розрахунку міжфазного зсуву (вираз (4.4)). Це дозволить забезпечити однакову форму кривої напруги для всіх фаз.

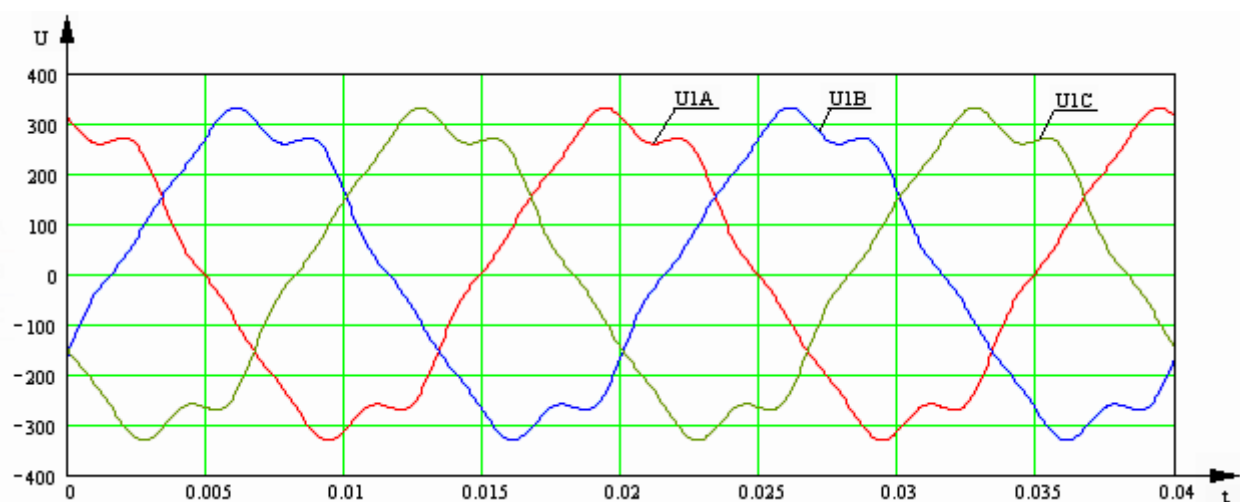


Рисунок 4.2 - Графік залежності напруги фаз А, В, С від часу при відповідно виразу (4.4).

Як показано на рис. 4.2, форми кривих напруги для різних фаз стають однаковими, якщо вони задаються згідно з виразом (4.4).

4.2. Моделювання електричних процесів в асинхронному двигуні із несиметричними параметрами фазних ланцюгів.

Кругове магнітне поле у повітряному зазорі може існувати у двофазних, а й у трифазних, чотирехфазних і багатофазних узагальнених електричних машинах. У разі симетричних багатофазних машин із синусоїдальними напругами на обмотках, для зручності аналізу такі машини часто зводять до двофазних моделей. Однак, при дослідженні асиметричних машин, обліку просторових гармонік або при несинусоїдальних напругах, недоцільно приводити таку машину до двофазної моделі, оскільки магнітні поля в повітряному зазорі двофазної та багатофазної машин у цих умовах істотно відрізнятимуться.

Візьмемо для прикладу трифазну ідеалізовану машину. Ця модель є дво полюсною машиною з гладким повітряним зазором, де всі параметри лінійні, а напруги на обмотках є синусоїдальними. У моделі є три обмотки на статорі з числом витків w_A, w_B, w_C і три обмотки на роторі з числом витків w_a, w_b, w_c , причому фази цих обмоток зрушені на 120° .

У неперетвореній системі координат, коли обмотки машини переміщуються, взаємні індуктивності між ними змінюються, а $d\theta/dt = \omega_r$.

Для трифазної машини в неперетвореній системі координат, де фази осей координат позначені як A, B, C , а також a, b, c (для ротора), диференціальні рівняння можуть бути записані таким чином:

$$\left. \begin{aligned} u_A &= R_A i_A + d\psi_A/dt, & u_a &= R_a i_a + d\psi_a/dt, \\ u_B &= R_B i_B + d\psi_B/dt, & u_b &= R_b i_b + d\psi_b/dt, \\ u_C &= R_C i_C + d\psi_C/dt, & u_c &= R_c i_c + d\psi_c/dt, \end{aligned} \right\} \quad (4.6)$$

$$\frac{d\omega_r}{dt} = \frac{p}{J}(M_s - M_c), \quad (4.7)$$

де u_i — напруги ($i = A, B, C, a, b, c$); i_i — струми; R_i — активні опори обмоток фаз статора та ротора; ψ_i — результуючі значення потокозчеплення.

Результуючі потокозчеплення трифазної машини мають досить складну структуру, оскільки в такій машині є шість контурів зі струмом. Потокозчеплення для фази А:

$$\psi_A = L_A i_A + M_{AB} i_B + M_{AC} i_C + M_{Aa} i_a + M_{Ab} i_b + M_{Ac} i_c \quad (4.8)$$

Аналогічним чином можна записати потокозчеплення для п'яти контурів, що залишилися.

У вихідних природних координатах індуктивності, а також взаємні індуктивності в потокозчепленнях рівняння (4.8) є періодичні коефіцієнти, які змінюються за гармонічним законом при обертанні ротора. Рівняння (4.6) - (4.7) після підстановки в них виразів результуючих потокозчеплень дають складні рішення, що включають десятки членів з періодичними коефіцієнтами. Щоб унеможливити вплив цих періодичних коефіцієнтів, потрібно перейти до загальмованої системи координат і виконати відповідні перетворення.

Модель трифазної машини у загальмованій системі координат (α, β, γ) . У трифазній системі координат α, β, γ , так само як і в двофазній системі координат α, β, γ поле в повітряному зазорі є круговим і може бути представлено результуючими векторами. Проеціюючи результуючі вектори струмів ротора, напруг і потокозчеплень на осі α, β, γ статора, отримують вирази для перетворених значень. Матриця перетворень для трифазної системи буде мати вигляд:

$$M = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2/3 \cos \theta & 2/3 \cos(\theta + \rho) & 2/3 \cos(\theta - \rho) \\ 0 & 0 & 0 & 2/3 \cos(\theta - \rho) & 2/3 \cos \theta & 2/3 \cos(\theta + \rho) \\ 0 & 0 & 0 & 2/3 \cos(\theta + \rho) & 2/3 \cos(\theta - \rho) & 2/3 \cos \theta \end{bmatrix} \quad (4.9)$$

Де $\rho = 2\pi/3$

У трифазній машині при кожному обороті ротора взаємні індуктивності тричі змінюють амплітуди. Ці пульсації формують струми та напруги нульової послідовності.

Напруги нульової послідовності формуються залежно кількості фаз машини. Частота струмів цієї послідовності відповідає числу фаз: для трифазної машини вона дорівнює трьом, для чотирифазної - чотирма і так далі.

Число рівнянь N для напруг можна визначити як $N = nm/2$, де n - це кількість рівнянь напруги двофазної системи, а m - число фаз машини.

Використовуючи матрицю перетворення, наведену в рівнянні (4.9), запишемо рівняння (4.6) у перетвореній трифазній системі координат:

$$\left. \begin{aligned} u_{s\alpha} &= r_{s\alpha} i_{s\alpha} + d\psi_{s\alpha}/dt, \\ u_{s\beta} &= r_{s\beta} i_{s\beta} + d\psi_{s\beta}/dt, \\ u_{s\gamma} &= r_{s\gamma} i_{s\gamma} + d\psi_{s\gamma}/dt, \\ -u_{r\alpha} &= r_{r\alpha} i_{r\alpha} + d\psi_{r\alpha}/dt + (\psi_{r\beta} - \psi_{r\gamma})\omega_r/\sqrt{3}, \\ -u_{r\beta} &= r_{r\beta} i_{r\beta} + d\psi_{r\beta}/dt + (\psi_{r\gamma} - \psi_{r\alpha})\omega_r/\sqrt{3}, \\ -u_{r\gamma} &= r_{r\gamma} i_{r\gamma} + d\psi_{r\gamma}/dt + (\psi_{r\alpha} - \psi_{r\beta})\omega_r/\sqrt{3}. \end{aligned} \right\} \quad (4.10)$$

Для потокозчеплень у рівняннях (4.10) маємо такі вирази:

$$\psi_{s\alpha} = L_{s\alpha} i_{s\alpha} - \frac{1}{2} M i_{s\beta} - \frac{1}{2} M i_{s\gamma} + M \left(i_{r\alpha} - \frac{1}{2} i_{r\beta} - \frac{1}{2} i_{r\gamma} \right); \quad (4.11)$$

$$\psi_{s\beta} = L_{s\beta} i_{s\beta} - \frac{1}{2} M i_{s\alpha} - \frac{1}{2} M i_{s\gamma} + M \left(i_{r\beta} - \frac{1}{2} i_{r\alpha} - \frac{1}{2} i_{r\gamma} \right); \quad (4.12)$$

$$\psi_{s\gamma} = L_{s\gamma} i_{s\gamma} - \frac{1}{2} M i_{s\alpha} - \frac{1}{2} M i_{s\beta} + M \left(i_{r\gamma} - \frac{1}{2} i_{r\alpha} - \frac{1}{2} i_{r\beta} \right); \quad (4.13)$$

$$\psi_{r\alpha} = L_{r\alpha} i_{r\alpha} + M \left(i_{s\alpha} - \frac{1}{2} i_{s\beta} - \frac{1}{2} i_{s\gamma} \right) - \frac{1}{2} M i_{r\beta} - \frac{1}{2} M i_{r\gamma}; \quad (4.14)$$

$$\psi_{r\beta} = L_{r\beta} i_{r\beta} + M \left(-\frac{1}{2} i_{s\alpha} + i_{s\beta} - \frac{1}{2} i_{s\gamma} \right) - \frac{1}{2} M i_{r\alpha} - \frac{1}{2} M i_{r\gamma}; \quad (4.15)$$

$$\psi_{r\gamma} = L_{r\gamma} i_{r\gamma} + M \left(-\frac{1}{2} i_{s\alpha} - \frac{1}{2} i_{s\beta} + i_{s\gamma} \right) - \frac{1}{2} M i_{r\alpha} - \frac{1}{2} M i_{r\beta}; \quad (4.16)$$

Ці рівняння описують перетворені потокозчеплення для трифазної системи координат .

Підставляючи вирази потокозчеплень (4.11) - (4.16) в рівняння (4.10), ми отримуємо рівняння напруги для узагальненої машини в загальмованих трифазних координатах. Ці рівняння дозволяють вирішувати широке коло завдань, тоді як аналогічні рівняння двофазної машини вимагають значних припущень.

Для трифазної машини електромагнітний момент та електромагнітна енергія обчислюються за такими формулами:

$$M_e = p \frac{\partial W_e}{\partial \theta}; \quad (4.17)$$

$$W_e = \frac{1}{2} (\psi_{s\alpha} i_{s\alpha} + \psi_{s\beta} i_{s\beta} + \psi_{s\gamma} i_{s\gamma} + \psi_{r\alpha} i_{r\alpha} + \psi_{r\beta} i_{r\beta} + \psi_{r\gamma} i_{r\gamma}) \quad (4.18)$$

Підставляючи вирази струмів у рівняння трифазної машини у загальмованих координатах, отримуємо:

$$M_e = p \frac{\sqrt{3}}{2} M [(i_{s\alpha} i_{r\gamma} + i_{s\beta} i_{r\alpha} + i_{s\gamma} i_{r\beta}) - (i_{s\alpha} i_{r\beta} + i_{s\beta} i_{r\gamma} + i_{s\gamma} i_{r\alpha})] \quad (4.19)$$

Вираз (4.19) охоплює всі можливі пари творів струмів, які визначають електромагнітний момент трифазної машини.

Система рівнянь для напруги та руху описує процеси електромеханічного перетворення енергії. Ці рівняння можуть бути розширені і багатофазних електричних машин. Однак, коли для завдання допустимо використовувати спрощену модель, доцільно перетворити багатофазну систему на двофазну [5].

Модель електричної машини в трифазній системі координат корисна для аналізу режимів як при несинусоїдальній напрузі, так і при асиметрії фазних ланцюгів двигуна.

Для зміни активного опору у фазі асинхронного двигуна необхідно внести відповідні корективи до рівняння (4.10), а зміна індуктивностей фаз виконується з використанням виразів (4.11) – (4.16).

4.3. Визначення залишкового терміну служби ізоляції обмоток двигуна.

Для обчислення загального коефіцієнта прискореного зносу ізоляції обмоток двигуна застосовується формула:

$$K_{\text{заг}} = K_f / \sqrt[n]{K_t} \quad (4.20)$$

Для розрахунку залишкового терміну служби ізоляції обмоток вводяться такі позначення:

T_0 - Термін служби ізоляції на момент початку вимірювань;

$T_{\text{зал}}$ - Залишковий термін служби ізоляції;

T - тривалість періоду, протягом якого отримують інтегральні характеристики асинхронного двигуна (АД);

N - кількість періодів, у яких вимірювані величини залишаються незмінними.

Відповідно, залишковий термін служби ізоляції обмоток статора можна визначити за допомогою наступного виразу:

$$T_{\text{ост}} = T_0 - K_{\text{заг}} \cdot N \cdot T \quad (4.21)$$

Якщо значення вимірюваних величин змінюються щодо різних періодів розкладання, то залишковий термін служби АТ визначається так:

$$T_{ост} = T_0 - T \cdot \sum_{i=1}^N K_{D_i} \quad (4.22)$$

Ці рівняння враховують зміни умов експлуатації, такі як температура, напруга та інші параметри, які впливають швидкість зносу ізоляції.

4.4. Визначення показників якості перетворення енергії за результатами моделювання при несинусоїдальній напрузі живлення двигуна.

4.4.1. Визначення ПЯПЕ при перехідному процесі.

Порядок розрахунку ПКПЕ та залишкового терміну служби ізоляції обмоток статора наведено у пункті 4.3.

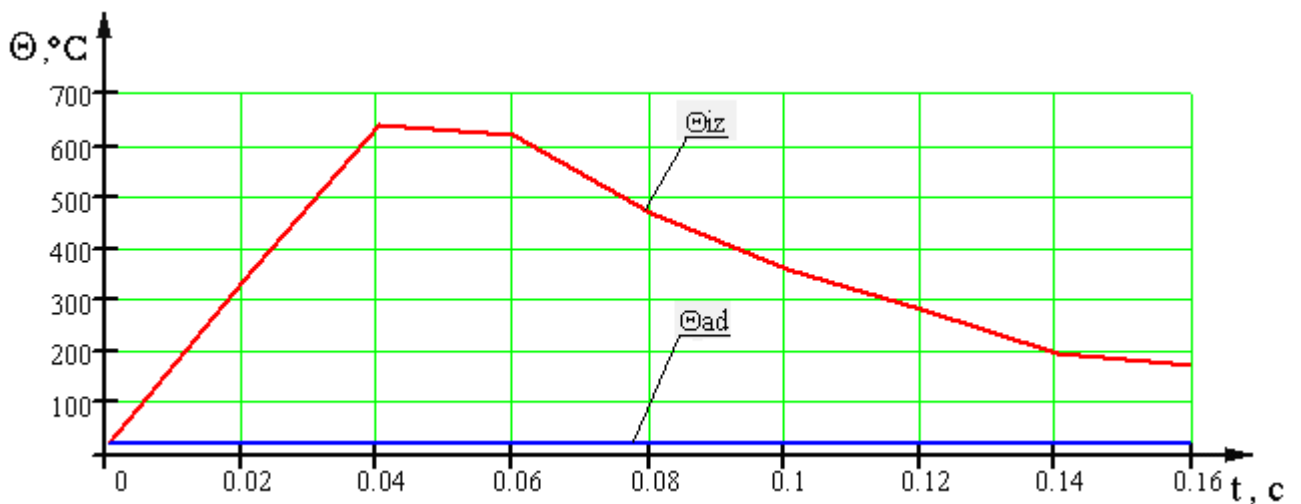


Рисунок 4.3 - Графік залежності температури обмотки та температури АТ від часу

Таблиця 4.2 містить значення коефіцієнта прискореного зносу ізоляції, обумовленого перегрівом статора обмоток, для N-го періоду розкладання. Ці коефіцієнти дозволяють оцінити вплив підвищених температур на швидкість старіння ізоляції кожен окремий період експлуатації.

Таблиця 4.2 - Значення коефіцієнта прискореного зношування ізоляції
внаслідок перегріву обмоток статора

№ періода	1	2	3	4	5	6	7	8
$K_{t^{\circ}}$	$9,8 \cdot 10^3$	$2,6 \cdot 10^6$	$2,11 \cdot 10^6$	$2 \cdot 10^5$	$1,7 \cdot 10^4$	$2,0 \cdot 10^3$	300,0	69,0

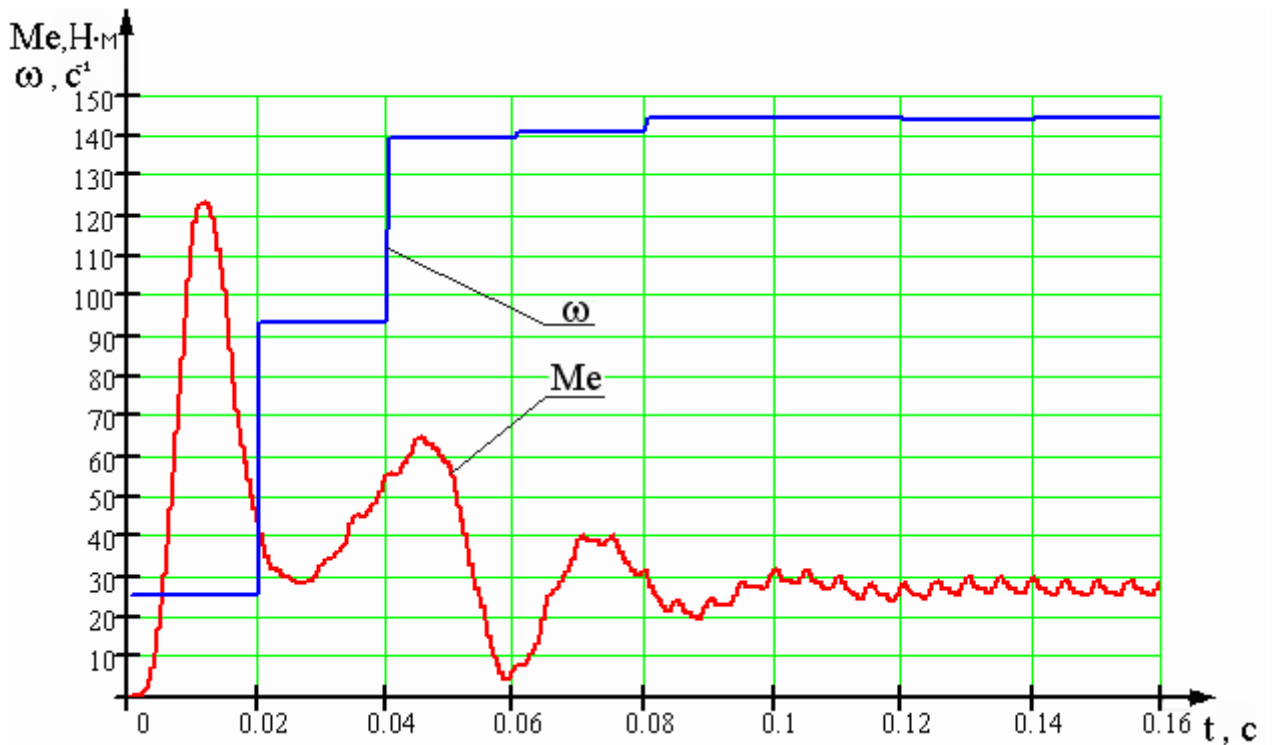


Рисунок 4.4 - Графік залежності моменту на валу АД та середньої кутової
швидкості АД від часу за період Т

Таблиця 4.3 містить значення коефіцієнта неякісності перетворення та коефіцієнта збільшення навантаження через змінну складову моменту для N-го періоду розкладання. Коефіцієнт неякісності перетворення показує втрати ефективності перетворення енергії, що може призводити до додаткового нагрівання та зносу ізоляції. Коефіцієнт збільшення навантаження враховує вплив змінних навантажень, які створюють додаткову механічну та термічну напругу в обмотках, прискорюючи знос ізоляційного матеріалу.

Таблиця 4.3 - Значення коефіцієнта неякісності перетворення та коефіцієнта збільшення навантаження

Період Т	1	2	3	4	5	6	7	8
$K_{нпВ}$	0,5596	0,1999	0,455	0,338	0,1239	0,073	0,0506	0,0481
K_m	1,2066	1,0205	1,1229	1,0625	1,0077	1,0026	1,0012	1,0011

Таблиця 4.4 містить значення коефіцієнта прискореного зносу ізоляції, викликаного змінною складовою моменту N-го періоду.

Коливання моменту призводять до змінного механічного та теплового впливу, що прискорює процес деградації ізоляції.

Значення коефіцієнта таблиці 4.4 використовуються при розрахунку загального прискореного зносу ізоляції, що дозволяє враховувати змінні навантаження при прогнозуванні залишкового терміну служби.

Таблиця 4.4 – Значення коефіцієнта прискореного зносу ізоляції за рахунок змінної складової моменту

№ періода	1	2	3	4	5	6	7	8
$\sqrt[n]{K_\tau}$	1,2065	1,0204	1,1228	1,0624	1,0076	1,0025	1,0011	1,001

Таблиця 4.5 містить значення коефіцієнта прискореного зносу ізоляції за N-й період.

Ці значення являють собою інтегральні показники, що враховують сукупний вплив факторів, таких як температурні навантаження, змінні навантаження та нестабільність моменту на знос ізоляції обмоток. Чинний коефіцієнт прискореного зношування є підсумковим параметром, який відображає ступінь зношування ізоляції в умовах експлуатації за цей період.

Враховуючи зміни коефіцієнта за періодами, можна більш точно спрогнозувати термін служби та ухвалити рішення про технічне обслуговування або заміну ізоляції в майбутньому.

Таблиця 4.5 - Значення діючого коефіцієнта прискореного зносу ізоляції.

Період Т	1	2	3	4	5	6	7	8
$K_{из}$	$1,2 \cdot 10^4$	$2,59 \cdot 10^6$	$2,4 \cdot 10^6$	$2,51 \cdot 10^5$	$1,7 \cdot 10^4$	$2,0 \cdot 10^3$	300,0	69,0

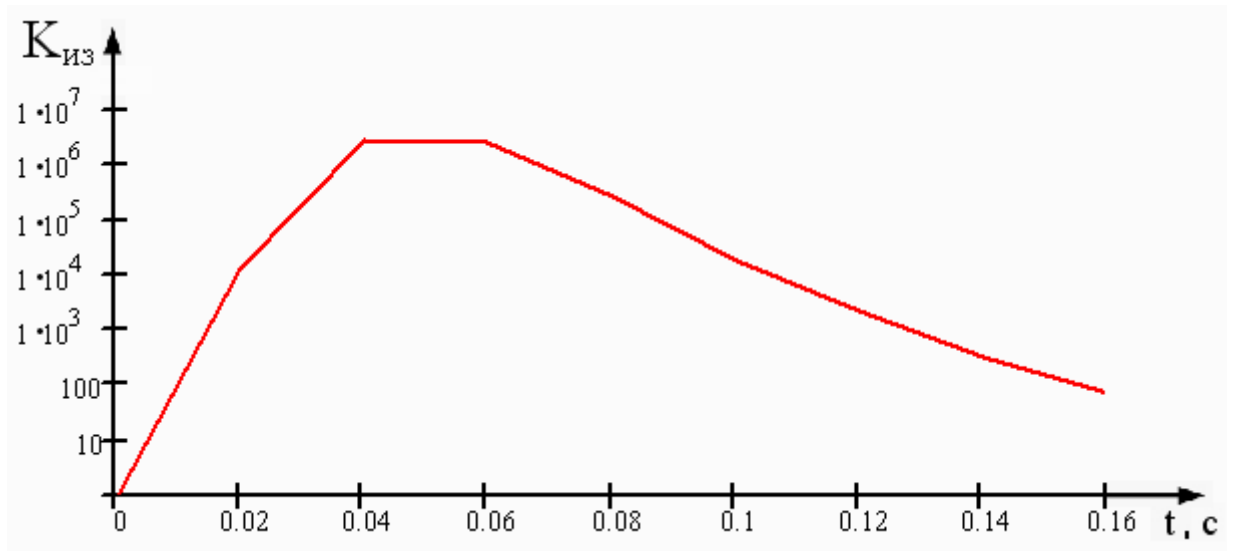


Рисунок 4.5 - Залежність діючого коефіцієнта прискореного зносу ізоляції обмоток двигуна від часу.

Оскільки значення струму і напруги статора змінювалися з часом, для розрахунку залишкового терміну служби асинхронного двигуна (АТ) слід застосовувати вираз (4.22):

$$T_{ост} = T_0 - T \cdot \sum_{i=1}^N K_{из i}$$

В даному випадку за період часу 0,16 з перехідного процесу термін служби ізоляції зменшився на 105 с (або 29 годин).

Це скорочення пов'язане з тимчасовими навантаженнями та нестабільністю параметрів, які призвели до прискореного зношування ізоляції обмоток статора.

4.4.2. Визначення ПЯПЕ у встановленому режимі.

Порядок розрахунку ПЯПЕ та залишкового терміну служби ізоляції обмоток статора описаний у пункті 4.3.

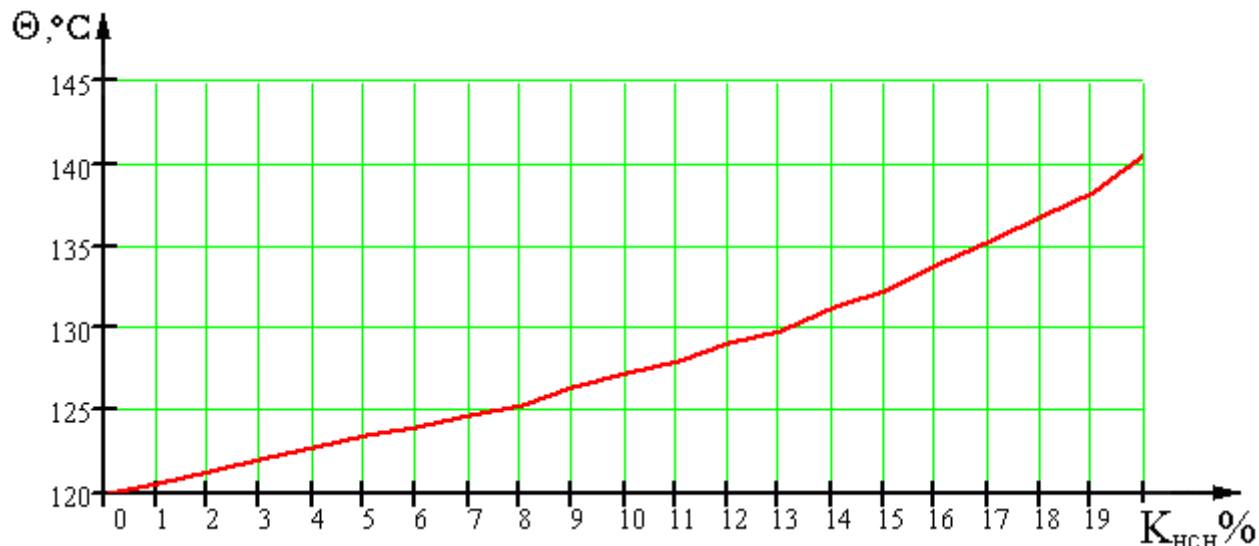


Рисунок 4.6 - Графік залежності температури обмоток статора від коефіцієнта несинусоїдальності $K_{нch}$

Таблиця 4.6 містить значення коефіцієнта прискореного зносу ізоляції, викликаного перегріванням обмоток статора, при різних коефіцієнтах несинусоїдальності.

Ці значення показують, як несинусоїдальні компоненти напруги та струму впливають на знос ізоляції. Несинусоїдальні форми сигналу, пов'язані з гармонійними спотвореннями, призводять до додаткових втрат і перегріву, що збільшує швидкість старіння обмоток ізоляційного матеріалу. $K_{нch}$.

Таблиця 4.6 – Коефіцієнт прискореного зносу ізоляції внаслідок перегріву обмоток статора

$K_{нch}$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
K_t°	1,0348	1,0842	1,1381	1,1874	1,2444	1,3013	1,3641	1,407	1,5031	1,592
$K_{нch}$	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
K_t°	1,6857	1,789	1,8945	2,0565	2,1859	2,4149	2,6641	2,8908	3,1771	3,6599

Таблиця 4.7 - Коефіцієнт неякісності перетворення та коефіцієнт зростання навантаження за рахунок змінної складової моменту

$K_{нчн}$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$K_{нчнB}$	0	0,0175	0,0235	0,0346	0,0394	0,0480	0,0561	0,0657	0,0701	0,0785
K_m	1,0001	1,0003	1,0004	1,0007	1,0009	1,0013	1,0017	1,0023	1,0026	1,0032
$K_{нчн}$	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
$K_{нчнB}$	0,0872	0,096	0,1046	0,1129	0,1215	0,1299	0,1385	0,147	0,1554	0,1596
K_m	1,0039	1,0047	1,0056	1,0065	1,0076	1,0086	1,0098	1,0111	1,0124	1,0131

Таблиця 4.8 містить значення коефіцієнта прискореного зносу ізоляції, зумовленого змінною складовою моменту, для різних коефіцієнтів несинусоїдності $K_{нчн}$.

Ці значення відображають вплив гармонічних спотворень, що призводять до появи несинусоїдальних складових у моменті. Змінна складова моменту при наявності несинусоїдності підвищує навантаження на ізоляцію обмоток, що сприяє її прискореному старінню.

Таблиця 4.8 - Коефіцієнт прискореного зносу ізоляції за рахунок змінної складової моменту

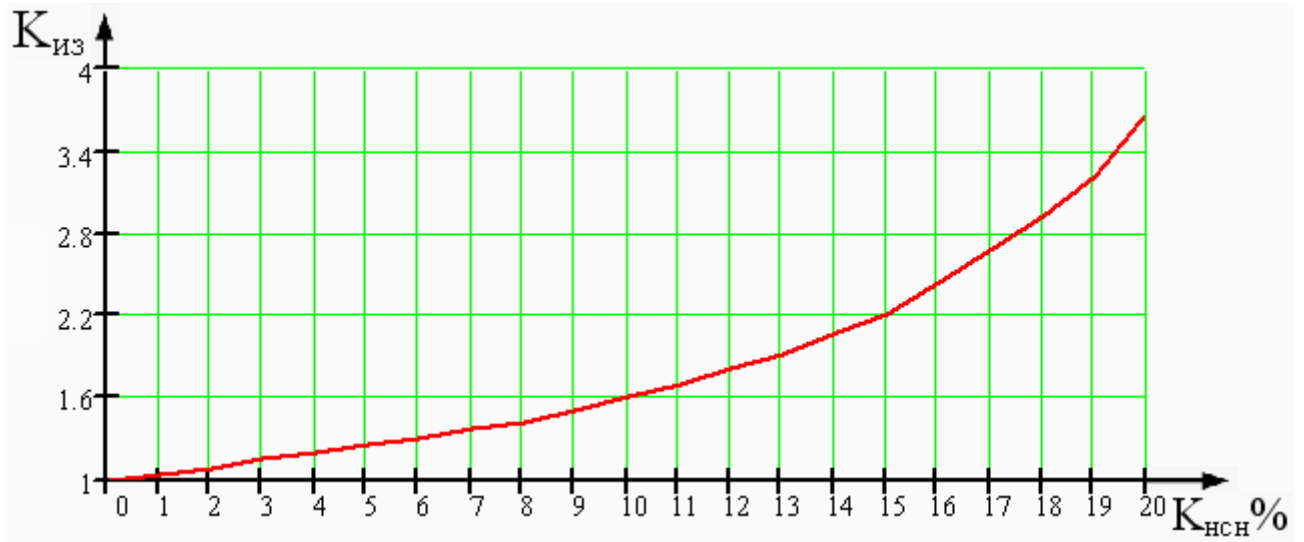
$K_{нчн}$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$\sqrt[n]{K_\tau}$	1	1,0002	1,0004	1,0007	1,0009	1,0013	1,0017	1,0025	1,0026	1,0033
$K_{нчн}$	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
$\sqrt[n]{K_\tau}$	1,004	1,0053	1,006	1,0071	1,0082	1,0099	1,0111	1,0126	1,0143	1,0154

Таблиця 4.9 містить значення чинного коефіцієнта прискореного знесення ізоляції для різних коефіцієнтів несинусоїдності $K_{нчн}$.

Ці значення показують, як рівень несинусоїдальності впливає на загальний темп знесення ізоляції обмоток. Вищі коефіцієнти несинусоїдності вказують на наявність гармонічних спотворень у струмі та напрузі, що збільшує теплові навантаження та прискорює деградацію ізоляційного матеріалу.

Таблиця 4.9 – Діючий коефіцієнт прискореного зносу ізоляції

$K_{нсн}$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$K_{из}$	1,035	1,0846	1,1386	1,1883	1,2455	1,303	1,3665	1,4094	1,5071	1,5973
$K_{нсн}$	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
$K_{из}$	1,6926	1,7964	1,9058	2,071	2,2039	2,435	2,6935	2,9273	3,2225	3,7132

Рисунок 4.7 - Залежність діючого коефіцієнта прискореного зносу ізоляції обмоток двигуна від коефіцієнта несинусоїдності $K_{нсн}$

Оскільки значення струму та напруги статора залишаються постійними з плином часу, для визначення залишкового терміну служби асинхронного двигуна (АТ) слід використовувати вираз (4.21):

$$T_{ост} = T_0 - K_{из} \cdot N \cdot T$$

У цьому випадку завдяки стабільності експлуатаційних параметрів розрахунок залишкового терміну служби можна виконати на основі фіксованих умов. Вираз (4.21) дозволяє точно оцінити термін служби ізоляції з огляду на відсутність змін у навантаженнях та температурних умовах. Це спрощує прогнозування та забезпечує більш стабільний підхід до планування обслуговування двигуна.

4.5. Визначення показників якості перетворення енергії за результатами моделювання при зменшенні індуктивності статора фази.

4.5.1. Визначення ПЯПЕ при перехідному процесі.

Порядок розрахунку ПЯПЕ та залишкового терміну служби ізоляції обмоток статора викладено у пункті 4.4.1. Методика розрахунку враховує різні експлуатаційні фактори, такі як перегрів, змінні навантаження та зміни електричних параметрів, які прискорюють зношування ізоляції обмоток.



Рисунок 4.8 - Графік залежності температури обмоток статора та температури двигуна від часу.

Таблиця 4.10 містить значення коефіцієнта прискореного зносу ізоляції, викликаного перегріванням обмоток статора, N-го періоду розкладання. Ці значення відображають, як температурні навантаження впливають прискорення зносу ізоляції. Перегрів обмоток веде до додаткової деградації ізоляційного матеріалу, що скорочує термін служби.

Коефіцієнти з таблиці 4.10 застосовуються при розрахунку загального прискореного зносу і залишкового терміну служби ізоляції, враховуючи вплив температурних умов у кожному періоді роботи. Це дозволяє точніше прогнозувати ресурс ізоляції та планувати її заміну чи обслуговування.

Таблиця 4.10 – Коефіцієнт прискореного зносу ізоляції внаслідок перегріву обмоток статора

№ періода	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
K_{t^p}	$4,06 \times 10^3$	$1,13 \times 10^7$	$1,34 \times 10^7$	$2,12 \times 10^6$	$2,39 \times 10^5$	$2,08 \times 10^4$	$2,15 \times 10^3$	320,2	66,95	20,11

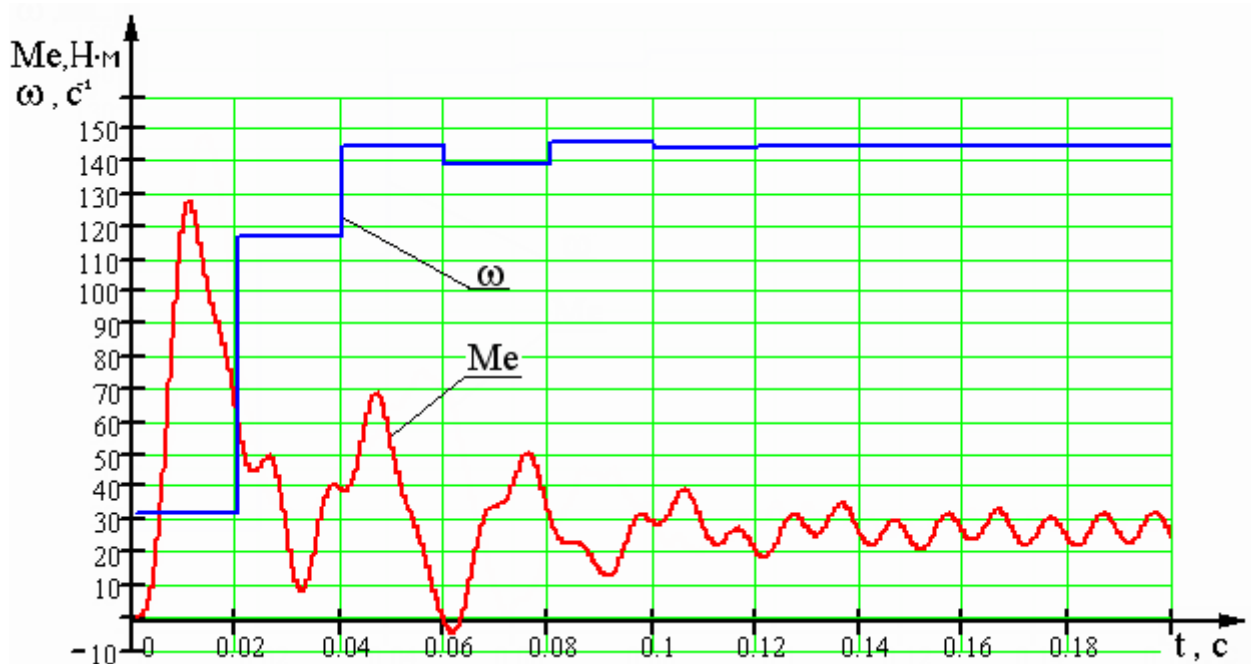


Рисунок 4.9 - Графік залежності моменту на валу двигуна та середньої кутової швидкості АД від часу за період T .

Таблиця 4.11 містить значення коефіцієнта неякісності перетворення та коефіцієнта збільшення навантаження, викликаного змінною складовою моменту, для N -го періоду розкладання.

Значення коефіцієнта неякісності перетворення показують втрати ефективності у процесі перетворення енергії, що призводить до додаткових навантажень на двигун та прискореного зносу ізоляції. Коефіцієнт збільшення навантаження враховує вплив змінних навантажень на ізоляцію обмоток, створюючи підвищені механічні та теплові напруги, які прискорюють її деградацію.

Таблиця 4.11 - Коефіцієнт неякісності перетворення та коефіцієнт збільшення навантаження за рахунок змінної складової моменту

№ періода	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$K_{нв}$	0,8579	0,4959	0,6149	0,5709	0,2269	0,2069	0,1809	0,1299	0,1259	0,1329
K_m	1,9479	1,1519	1,2679	1,2179	1,0269	1,0219	1,0169	1,0089	1,0079	1,0089

Таблиця 4.12 містить значення коефіцієнта прискореного зносу ізоляції, викликаного змінною складовою моменту, N-го періоду. Ці значення відображають вплив змін у моменті, що виникають через змінні навантаження, на знос ізоляції обмоток. Змінна складова моменту призводить до додаткових механічних та теплових навантажень, що прискорює старіння ізоляції.

Таблиця 4.12 – Коефіцієнт прискореного зносу ізоляції за рахунок змінної складової моменту

Период Т	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$\sqrt[n]{K_\tau}$	11,9619	1,1719	1,3499	1,2669	1,0269	1,0219	1,0169	1,0089	1,0079	1,0089

Таблиця 4.13 містить значення чинного коефіцієнта прискореного зносу ізоляції для N-го періоду. Цей коефіцієнт враховує сукупний вплив різних факторів, таких як перегрів, змінні навантаження та зміни електричних параметрів, що призводять до прискореного зношування ізоляції обмоток. Діючий коефіцієнт прискореного зносу є підсумковим значенням, яке дозволяє більш точно оцінити ступінь деградації ізоляції за конкретний період експлуатації.

Таблиця 4.13 - Діючий коефіцієнт прискореного зносу ізоляції

№ пер.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$K_{із}$	$4,7 \cdot 10^4$	$1,31 \cdot 10^7$	$1,8 \cdot 10^7$	$2,71 \cdot 10^6$	$2,35 \cdot 10^5$	$2,11 \cdot 10^4$	$2,2 \cdot 10^3$	323,0	67,51	20,3

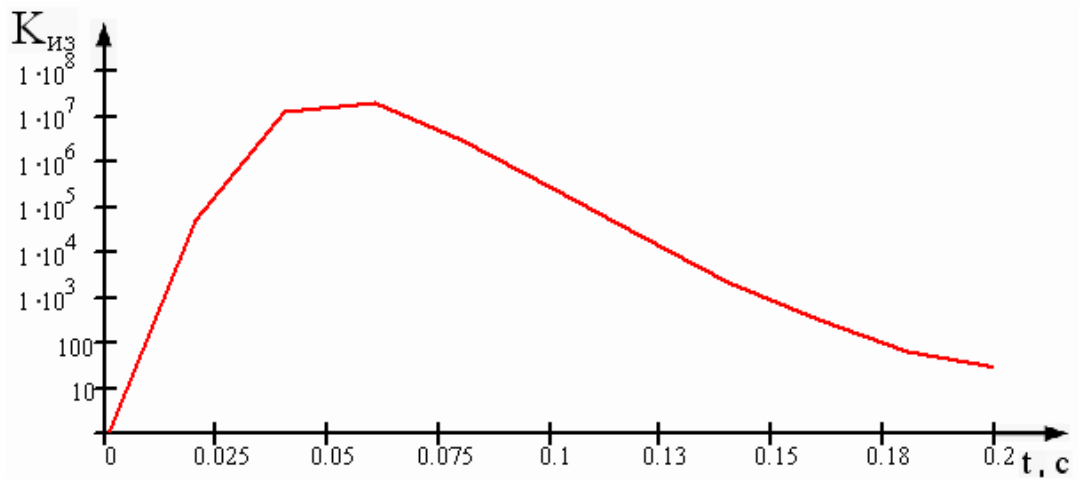


Рисунок 4.10 - Залежність діючого коефіцієнта прискореного зносу ізоляції обмоток двигуна від часу

Оскільки вимірювані величини струму і напруги статора змінювалися з часом, для розрахунку залишкового терміну служби асинхронного двигуна необхідно використовувати вираз (4.22):

$$T_{ост} = T_0 - T \cdot \sum_{i=1}^N K_{из i}$$

В даному випадку, за період часу 0,16 з перехідного процесу термін служби ізоляції скоротився на 105 с, що еквівалентно 29 годин.

Це скорочення пов'язані з впливом перехідних процесів на ізоляцію, що прискорює її знос. Такий розрахунок допомагає більш точно прогнозувати ресурс ізоляції з огляду на вплив змінних експлуатаційних умов на її довговічність.

4.5.2. Визначення ПЯПЕ у встановленому режимі.

Порядок розрахунку ПЯПЕ та залишкового терміну служби ізоляції обмоток статора викладено у пункті 4.3.

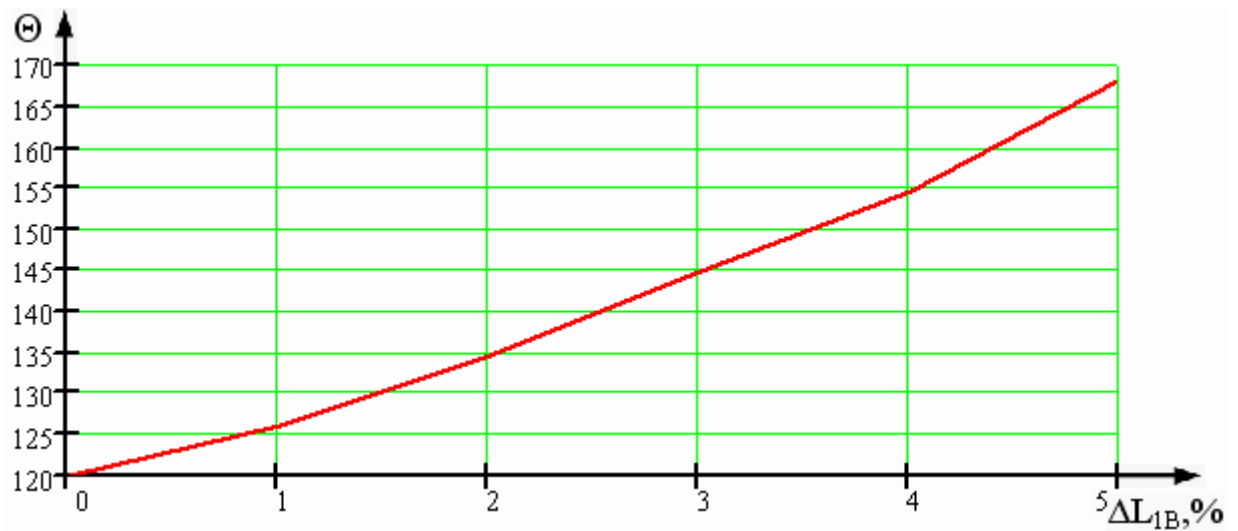


Рисунок 4.11 - Графік залежності температури обмотки та температури АД від зниження індуктивності фази статора.

Таблиця 4.14 містить значення коефіцієнта прискореного зносу ізоляції, викликаного перегріванням обмоток статора, при різних значеннях зменшення індуктивності фази статора. Ці значення показують, як зміни в індуктивності фази впливають на теплові процеси в обмотках статора. Зменшення індуктивності фази може призвести до збільшення струму у відповідній фазі, що, у свою чергу, викликає перегрів та прискорює знос ізоляції.

Таблиця 4.14 – Коефіцієнт прискореного зносу ізоляції внаслідок перегріву обмоток статора

$\Delta L_{1B}, \%$	1	2	3	4	5
K_{τ}	1,4903	2,4948	4,6475	8,2525	17,286

Таблиця 4.15 містить значення коефіцієнта неякісності перетворення і коефіцієнта збільшення навантаження, викликаного змінної складової моменту, при різних значеннях зменшення індуктивності фази статора.

Ці значення показують, як зменшення індуктивності в одній із фаз (у даному випадку фази) впливає на ефективність перетворення енергії і на збільшення навантаження, створюване змінними складовими моменту.

Зменшення індуктивності фази може призвести до незбалансованості у розподілі струму та моменту, що, у свою чергу, знижує ефективність перетворення та збільшує навантаження на двигун.

Таблиця 4.15 - Коефіцієнт неякісності перетворення та коефіцієнт збільшення навантаження за рахунок змінної складової моменту

$\Delta L_{1B}, \%$	1	2	3	4	5
K_{npB}	0,058	0,127	0,205	0,292	0,383
K_m	1,001	1,007	1,021	1,045	1,082

Таблиця 4.16 містить значення коефіцієнта прискореного зносу ізоляції, викликаного змінної складової моменту, при різних значеннях зменшення активного опору фази статора.

Ці значення показують, як зниження активного опору в одній із фаз (фазі В) впливає на прискорене зношування ізоляції. Зменшення опору може призвести до збільшення струму, що протікає через фазу, що, своєю чергою, викликає додаткове нагрівання та прискорює деградацію ізоляції обмоток.

Таблиця 4.16 – Коефіцієнт прискореного зносу ізоляції за рахунок змінної складової моменту

$\Delta L_{1B}, \%$	1	2	3	4	5
$\sqrt[n]{K_\tau}$	1,0019	1,0093	1,0271	1,063	1,1325

Таблиця 4.17 відображає значення діючого коефіцієнта прискореного зносу ізоляції при різних значеннях зменшення індуктивності фази В статора.

Таблиця 4.18 – Діючий коефіцієнт прискореного зносу ізоляції

$\Delta L_{1B}, \%$	1	2	3	4	5
K_{i3}	1,4928	2,5175	4,6893	8,7716	19,5743

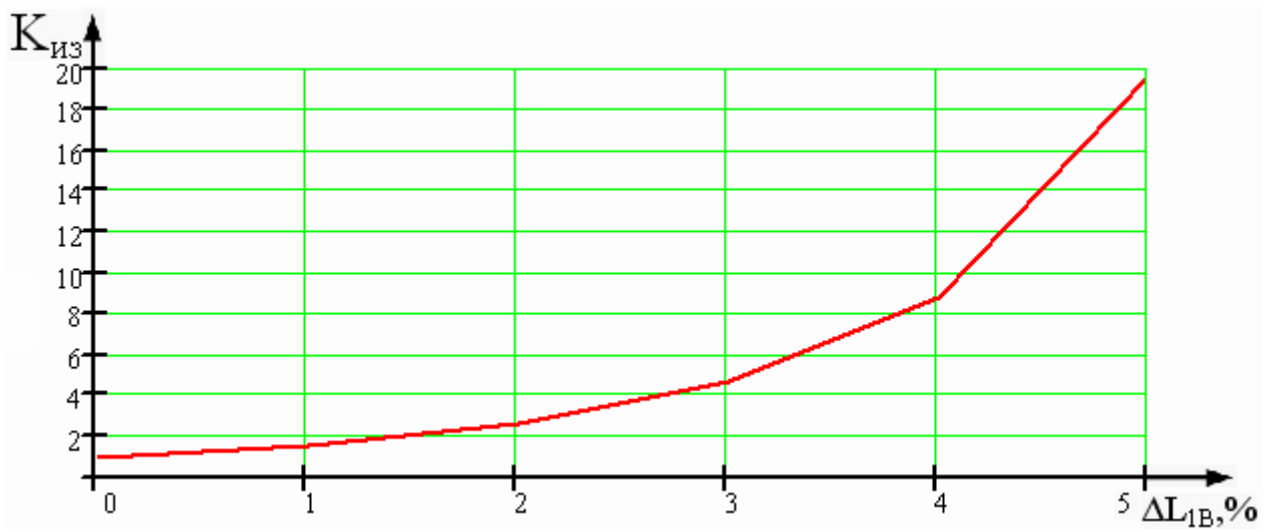


Рисунок 4.12 - Залежність діючого коефіцієнта прискореного зносу ізоляції обмоток двигуна від зниження індуктивності фази статора

Оскільки вимірювані величини струму і напруги статора залишаються постійними в часі, для розрахунку залишкового терміну служби асинхронного двигуна слід використовувати вираз (4.21):

$$T_{ост} = T_0 - K_{из} \cdot N \cdot T$$

Цей вираз дозволяє визначити залишковий термін служби ізоляції обмоток статора при постійних умовах експлуатації, коли немає змін у струмах і напругах.

Розроблена математична модель асинхронного двигуна дозволяє аналізувати показники енергопроцесів в умовах несинусоїдності напруги живлення і несиметрії фазних ланцюгів. В результаті моделювання отримано дані про миттєві значення струму і напруги на статорі, що дає можливість за методикою розрахунку виділити складові миттєвої потужності, включаючи постійну та знакозмінну (косинусну та синусну) компоненти при різних режимах роботи АД.

За допомогою розрахунку показників якості перетворення енергії та температурного режиму роботи двигуна було оцінено швидкість зносу ізоляції обмоток статора. Знос ізоляції залежить від декількох факторів,

таких як підвищення температури статора обмоток вище номінальної і вплив вібрацій на ізоляцію обмоток.

Результати дослідження, засновані на математичній моделі, показали, що температурний фактор має найбільший вплив на швидкість зносу ізоляції. Наприклад, при коефіцієнті несинусоїдності напруги $K_{нch} U = 4\%$, що відповідає допустимим нормам ДЕСТ 13109-87, термін служби ізоляції скорочується на 19% з урахуванням лише температурного впливу. При зменшенні активного опору фази асинхронного статора двигуна на 5% термін служби ізоляції зменшується на 64%. Погіршення вібраційних якостей двигуна незначним чином впливає на швидкість зносу ізоляції в порівнянні з температурним впливом.

5 ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ ДОЦІЛЬНОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ ЗАСОБІВ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ПОКАЗНИКІВ ЯКОСТІ ПЕРЕТВОРЕННЯ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ

5.1. Обґрунтування застосування системи оцінювання якості перетворення енергії АД.

Якість електричних машин включає набір характеристик, які визначають їх експлуатаційну придатність. В умовах активного використання цих машин у системах електроприводів та автоматичного керування, а також у виробничих процесах, надійність машин стає одним із ключових факторів, що впливають на технічний рівень виробництва. Будь-які несправності або відмови електричних машин можуть призвести до серйозних матеріальних збитків, що робить проблему оцінки їхнього ресурсу вкрай важливою.

При розробці продукції закладється певний запас міцності, що забезпечувало її довговічність. Однак це також призводить до збільшення витрат матеріалів, а також зростання розмірів, ваги і вартості виробів.

Останнім часом в електромашинобудуванні акцент було зроблено на підвищення ефективності експлуатації машин, збільшення навантаження на активні матеріали та скорочення маси машини за збереження потужності. Одночасно з цим розроблялися нові типи активних, конструкційних та ізоляційних матеріалів, покращувалася система вентиляції, а також впроваджувалися сучасніші методи охолодження. Однак такий підхід призводить до зниження запасу міцності та стійкості до перевантажень, що, у свою чергу, позначається на зниженні загальної надійності електричних машин.

Збільшення застосування активних і конструктивних матеріалів виправдане лише до того часу, поки це призводить до зниження надійності електричних машин [10].

Для ефективного діагностування параметрів із високою точністю необхідно зробити проміжні висновки за результатами досліджень. Разом з параметрами експлуатаційних характеристик слід враховувати такі параметри схеми заміщення, як:

- розподіл втрат за якісними та іншими параметрами (втрати у міді, сталі, механічні втрати), їх розподіл за фазами, залежність від частоти, ступеня насичення сталі тощо;

- показники симетрії або асиметрії електричної машини (механічної, магнітної, вібраційної);

- визначення робочих паспортних даних та умов, за яких електрична машина функціонуватиме найбільше економічно.

Важливим аспектом є вивчення працездатності відремонтованих асинхронних двигунів та впливу технологічного процесу їх ремонту на ресурс та характеристики. Це питання, незважаючи на свою актуальність, недостатньо досліджене і потребує більш глибокої перевірки для виявлення та усунення причин відмов, пов'язаних з операціями у процесі ремонту.

Робочі параметри асинхронних електродвигунів, такі як індуктивні та активні опори, втрати в сталі, симетрія конструкції та якість напруги мережі живлення, відіграють важливу роль у їх працездатності в певних експлуатаційних умовах. Однак питання точного визначення параметрів цих двигунів досі залишаються невирішеними з наукової та технічної точок зору. Це з тим, що багато параметри електричної машини залежить від частоти струму у відповідному контурі. Наприклад, через витіснення струму в роторі не можна вважати активний опір постійним, а індуктивний опір контуру намагнічування змінюється в залежності від струму в цьому контурі, тобто від ступеня насичення сталі.

Таким чином, до попередніх завдань для досягнення необхідного результату належать такі кроки:

1) розробка математичних інструментів та технічних засобів, необхідних для визначення параметрів та характеристик електричних машин;

2) створення математичного апарату, який дозволить оцінити працездатність машини за заданих характеристик та умов експлуатації.

Важливим є також необхідність іншого підходу – розробка механізмів для продовження терміну служби електричного обладнання. Це можна досягти через оцінку його поточної працездатності та реалістичну стратегію переозброєння, орієнтовану на довгострокову перспективу [10]. На рис. 5.1 представлена діаграма, що ілюструє тенденції у взаємодії зазначених напрямів.

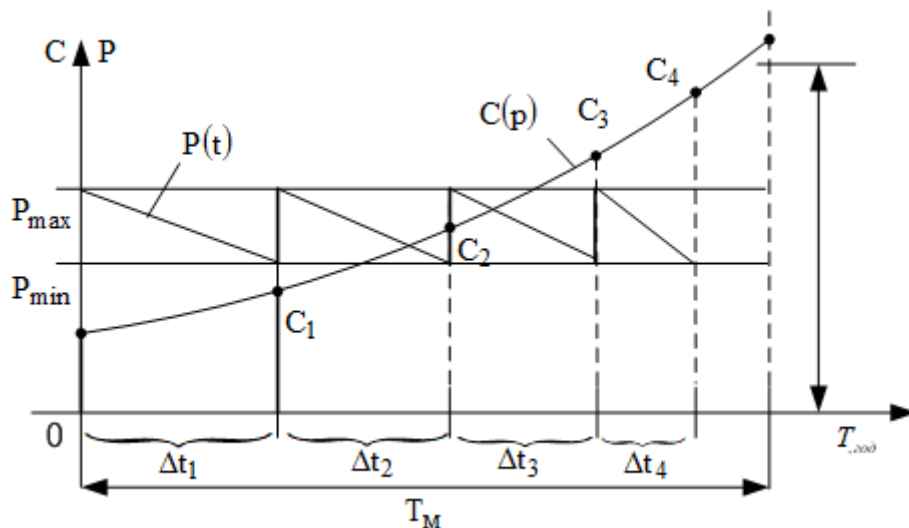


Рисунок 5.1 - Графік формування вартісних показників ремонту двигуна

Залежність $P(t)$ відображає зміни ресурсу між двома послідовними ремонтами, вважаючи, що черговий ремонт проводиться при досягненні мінімально допустимого ресурсу $P_{\min}$. Після ремонту ресурс відновлюється до $P_{\max}$ рівня, а процесі експлуатації змінюється по кривую $P(t)$. Через появу незворотних дефектів, що виникають у процесі роботи та знижують працездатність обладнання, інтервали між ремонтами скорочуватимуться, а

вартість цих ремонтів — T_m можливо зростатиме. У міру накопичення дефектів в ході експлуатації протягом часу обладнання поступово втрачає можливість Δt нормального функціонування, оскільки інтервали між ремонтами скорочуються на час, витрати на заміну обладнання та експлуатаційні витрати зростають, при цьому знижується якість роботи, насамперед енергетична ефективність. Для обліку цих факторів використовується наступний функціонал:

$$C_{ne} \leq K_p \cdot C_p(t) + \xi(t) C_z \cdot K_p + \varepsilon(t) C_e T_m - C_m + C_i \cdot S$$

де: K_p - кількість ремонтів обладнання за період T_m ;

$C_p(t)$ - залежність вартості ремонту в часі в рамках терміну експлуатації;

C_z - збитки, спричинені тимчасовою недоступністю обладнання;

C_e - витрати на експлуатацію;

$\varepsilon(t)$ - залежність, що відображає зростання експлуатаційних витрат;

$\xi(t)$ - залежність, що враховує збільшення збитків через дефіцит ремонтних матеріалів;

C_m - вартість утилізованого обладнання;

S - витрати на додаткові роботи, пов'язані із заміною обладнання, виведеного з експлуатації.

Аналіз показав, що, поряд з іншими факторами, ключове значення має точне визначення можливого ресурсу працездатності P_{max} після чергового ремонту та P_{min} в процесі експлуатації. Важливо також зважати на зміни експлуатаційних втрат, спричинені незворотними дефектами. Ці параметри необхідно вимірювати інструментально, як під час приймально-здавальних випробувань на ремонтних підприємствах, і при моніторингу стану електрообладнання під час експлуатації [8].

5.2. Розрахунок терміну служби АД.

Як уже зазначалося, термін служби двигуна залежить від ряду несприятливих факторів, серед яких: якість напруги живлення, конструктивні дефекти (наприклад, незбалансованість ротора і еліпс цапфи валу), а також електромагнітні відхилення, такі як зміна активного опору та індуктивності фазних ланцюгів асинхронного двигуна (АД) у процесі ремонту.

Для оцінки економічної доцільності використання проектного пристрою враховуються числові значення цих факторів, типових для вітчизняної енергосистеми та парку електричних машин [7,8]:

- коефіцієнт несинусоїдності напруги живлення встановлюється на рівні $K_{нch} = 4\%$;
- зниження активного опору фази В обмотки статора - $\Delta R_{1B} = 10\%$;
- зменшення індуктивності фази обмотки статора - $\Delta L_{1B} = 1\%$.

Коефіцієнт прискореного зносу ізоляції обмоток статора залежно від різних причин, згідно з даними таблиць 4.9, 4.17 та 4.25, має наступні значення:

- через несинусоїдність напруги живлення - $K_{31} = 1,1882$;
- через зниження активного опору фази обмотки статора - $K_{32} = 2,26$;
- через зменшення індуктивності фази обмотки статора - $K_{33} = 1,493$.

Сумарний коефіцієнт прискореного зносу при поєднанні всіх зазначених негативних факторів:

$$K_{iz} = \prod K_{izi} = 1,188 \cdot 2,262 \cdot 1,493 = 4,15$$

Таким чином, при коефіцієнті несинусоїдності напруги живлення $K_{нch} = 4\%$, зменшенні активного опору фази В обмотки статора на $\Delta R_{1B} = 10\%$ і зниженні індуктивності фази В обмотки на $\Delta L_{1B} = 1\%$, очікуваний термін служби АТ скоротиться приблизно в 4,15 рази в порівнянні з проектною кількістю робочих годин.

5.3. Економічні збитки внаслідок аварійного виходу з ладу асинхронного двигуна.

Прикладом цього виду збитків може бути двигун, встановлений на конвеєрі №1 ділянки великого дроблення ДФ ПрАТ «Полтавський ГЗК». Розмір збитків від аварійного виходу з ладу асинхронного двигуна розраховується за такою формулою:

$$Y_A = Z_p + P_T + Y_{пр}, \quad (5.1)$$

де: Z_p - витрати на ремонт двигуна;

P_T - технологічні витрати, що виникають через аварійний вихід АТ з ладу;

$Y_{пр}$ - збитки від простою обладнання, задіяного в даному технологічному процесі.

5.3.1 Визначення річних витрат на ремонт АТ

Річні витрати на ремонт АТ розраховуються за такою формулою:

$$Z_p = (t_{рем} \cdot N_{рб} \cdot Ч_c \cdot K_d \cdot K_n + C_{мат}) \cdot K_{тр}, \quad (5.2)$$

де: $t_{рем}$ - трудомісткість ремонту двигуна, у годинах;

$N_{рб}$ - кількість осіб у ремонтній бригаді;

$Ч_c$ - годинна тарифна ставка працівника у гривнях за годину;

K_d - коефіцієнт надбавок до заробітної плати;

K_n - коефіцієнт нарахувань на заробітну плату;

$C_{мат}$ - вартість матеріалів, необхідних для ремонту двигуна, у гривнях;

$K_{тр}$ - коефіцієнт, що враховує витрати на транспортування двигуна.

Ця формула враховує сукупні витрати, пов'язані з виконанням ремонтних робіт, від оплати працівників до вартості матеріалів і логістики.

Двигун, встановлений на конвеєрі №1, експлуатується з 2002 року. У період його роботи сталося три аварійні відключення, кожне з яких вимагало ремонтних робіт різного ступеня:

- у квітні 2009 року було здійснено середній ремонт.
- у серпні 2015 року проведено капітальний ремонт.

– у вересні 2020 року знову здійснено середній ремонт.

Дані про витрати та характеристики проведених ремонтів були отримані з звітної документації та занесені до таблиці 5.1, де відображено відомості про тип ремонту, обсяги витрат, трудомісткість, а також використані матеріали.

Таблиця 5.1- Балансні дані з ремонтів за 2002р., 2009р., 2020р.

	$t_{\text{рем}}$	$N_{\text{рб}}$	Ч_c	K_d	K_n	$C_{\text{мат}}$
Сер. рем. 2002г.	130,0	3	64	1,2	1,37	9250
Кап. рем. 2009г.	270,0	4	64	1,2	1,37	21350
Сер. рем. 2020г.	140,0	3	64	1,2	1,37	11800

Для розрахунку вартості ремонтів двигуна за роками за формулою (5.2) нам знадобляться дані з таблиці 5.1:

$$Z_{\text{с.р.2002}} = (130 \text{ год} \cdot 3 \cdot 64 \text{ грн/год} \cdot 1,2 \cdot 1,37 + 9250) \cdot 1,01 = 50284 \text{ грн}$$

$$Z_{\text{к.р.2009}} = (130 \text{ год} \cdot 3 \cdot 64 \text{ грн/год} \cdot 1,2 \cdot 1,37 + 21350) \cdot 1,01 = 62191 \text{ грн}$$

$$Z_{\text{с.р.2020}} = (130 \text{ год} \cdot 3 \cdot 64 \text{ грн/год} \cdot 1,2 \cdot 1,37 + 11800) \cdot 1,01 = 53362,6 \text{ грн}$$

Загальна вартість ремонтних робіт двигуна з моменту його введення в експлуатацію склала 165838 грн., включаючи витрати на середній ремонт у 2009 році, капітальний ремонт у 2015 році та ще один середній ремонт у 2020 році:

$$Z_{\text{р.}\Sigma} = Z_{\text{с.р.2002}} + Z_{\text{к.р.2009}} + Z_{\text{с.р.2020}} = 165838 \text{ грн.}$$

Оскільки двигун експлуатується протягом 18 років, наведені річні витрати на його ремонт можна розрахувати як: $Z_p = 165838 / 18 = 9213,2 \text{ грн./рік}$.

5.3.2. Визначення технологічних витрат виробництва

Технологічні витрати, що виникають через аварійний вихід асинхронного двигуна (АТ) з ладу, пов'язані з необхідністю ручного очищення (розбутування) конвеєра від руди перед його повторним запуском. Вартість цієї операції розраховується за формулою:

$$P_m = N_p \cdot C_c \cdot t_{\text{раз}} \cdot K_d \cdot K_n, \quad (5.3)$$

де N_p – кількість працюючих, чол.;

$t_{\text{раз}}$ – час, що витрачається на розбутовку, год.

Відповідно до звітів дробильної фабрики за 2002–2005 роки, середній час розбутування складає 6 годин, і у процесі беруть участь 64 особи (одна бригада). Витрати одну розбутовку рівні:

$$P_{\text{т.роз.}} = 64 \text{чол} \cdot 64 \text{грн/год} \cdot 6 \text{год} \cdot 1,2 \cdot 1,37 = 40402,9 \text{грн}$$

За 18 років експлуатації двигуна внаслідок аварійних відключень було проведено три розбутовки. Відповідно, середньорічні технологічні витрати становлять:

$$P_{\text{т}} = 3 \cdot P_{\text{т.роз.}} / 18 = 6733,8 \text{грн/рік}$$

5.3.3. Збитки, спричинені простоем обладнання

Збитки, пов'язані з простоем обладнання, розраховуються за формулою:

$$V_{\text{пр}} = t_{\text{пр}} \cdot Z_o \cdot O_n, \quad (5.4)$$

де $t_{\text{пр}}$ – час простою обладнання (година);,

Z_o – питома величина технологічних збитків (грн/година);,

O_n – кількість одиниць обладнання (шт.).

Середній час запуску резервного конвеєра становить 4 хвилини (або 0,0667 годин). Розрахуємо питому величину технологічних збитків.

При собівартості продукції $C_6 = 225,8$ грн/тон. і надбавці в 20%, оптова ціна продукції дорівнюватиме::

$$C_{\text{опт}} = C_6 \cdot 1,2 = 225,8 \cdot 1,2 = 270,96 \text{ грн/тон}$$

З урахуванням обсягу руди, що пройшла через конвеєр №1 за рік (7148,92 тис. тонн), та пропрацьованого часу $T_{\text{рік}} = 5746$ год., продуктивність конвеєра за годину становитиме:

$$Pr_{\text{ккд1}} = 7148920 \text{тон.} / 5746 \text{час.} = 1244 \text{тон.} / \text{час.}$$

Відповідно, питома величина технологічних збитків дорівнює:

$$З_0 = Ц_{\text{опт}} \cdot Пр_{\text{ккд1}} = 270,96 \cdot 1244 = 337074,2 \text{ грн/год}$$

Для одного аварійного відключення двигуна збитки від простою становитимуть:

$$З^1_{\text{пр}} = 0,0667 \cdot 337074,2 \cdot 1 = 22482,8 \text{ грн}$$

Оскільки за 18 років експлуатації сталося три аварійні відключення, відносні річні збитки від простою становлять::

$$З_{\text{пр}} = 3 \cdot З^1_{\text{пр}} / 18 = 3 \cdot 22482,8 / 18 = 3747,1 \text{ грн}$$

Нарешті, загальний відносний річний збиток від аварійних виходів двигуна з ладу за формулою (5.1) буде:

$$З_A = 337074,2 + 224,86 + 3747,1 = 341046,2 \text{ грн/рік}$$

5.4. Економічний ефект при безаварійному вимкненні асинхронного двигуна

Зниження терміну служби асинхронного двигуна (АТ) внаслідок несприятливих умов експлуатації викликає прискорене зношування ізоляції обмотки статора, при цьому коефіцієнт прискореного зносу $K_z = 4,15$.

Якщо термін служби ізоляції у стандартних умовах становить $T = 112000$ годин, то при даному коефіцієнті зношування ізоляції настане швидше, і час роботи двигуна до першого виходу з ладу скоротиться до:

$$T_{\text{рем.}} = T / \gamma = 112000 / 4,15 = 26990 \text{ год.}$$

або, враховуючи річне завантаження двигуна $T_{\text{год}} = 5746$ год, очікуваний термін служби складе:

$$T_{\text{рем.}} = 26990 / 5746 = 4,7 \text{ років}$$

Для визначення наведених річних витрат на ремонт двигуна з урахуванням даних пункту 3.5 щодо вартості середніх та капітальних ремонтів використовуємо розрахунок:

$$З_{\text{рем}} = (165838 / 3) \cdot 4,7 = 259812,9 \text{ (грн/рік)}$$

Використання системи контролю ресурсу двигуна дозволяє уникнути аварійних відключень і, отже, витрат, що з цими подіями, обмежуючись поточними ремонтами.

На підставі даних про вартість середнього ремонту визначаємо:

$$З_{\text{тек.р.}} = 0,15 \cdot З_{\text{ср.р.}} = 0,15 \cdot (9250 + 11800) / 2 = 1578,75 \text{ грн}$$

Згідно з бухгалтерським кошторисом за 2004 рік, загальні витрати на поточні ремонти становили 155840 грн., при цьому планові ремонти проводяться щоквартально, відтак вартість одного поточного ремонту:

$$T_{\text{рем.}} = T / \gamma = 112000 / 4,15 = 26990 \text{ год.}$$

З урахуванням терміну служби двигуна 4,7 року, наведена річна вартість поточних ремонтів складе:

$$З_{\text{тек.р.}} = 39000 / 4 = 9750 \text{ грн}$$

На підприємстві ПрАТ «Полтавський ГЗК» запроваджено систему планово-попереджувальних ремонтів, яка передбачає поточний ремонт електричних машин кожні три місяці. Введення системи контролю якості перетворення енергії в АТ дозволить скоротити кількість таких ремонтів, уникаючи чотирьох планових ремонтів на рік, що призведе до економії коштів у розмірі:

$$E_{\text{пл.рем}} = 155840 \text{ грн.}$$

Таким чином, застосування системи контролю ресурсу та оптимізація графіка ремонтів створять значну економію на ремонті обладнання, підвищуючи ефективність експлуатації двигуна:

$$E = З_{\text{рем}} + У_{\text{А}} + E_{\text{пл.рем.}} - З_{\text{пот.рем.}} \quad (5.5)$$

Підставивши значення формулу (5.5), визначаємо річний економічний ефект впровадження системи контролю ресурсу двигуна:

$$E = 259812,9 + 341046,2 + 39000 - 9750 = 630109 \text{ грн/рік}$$

Термін окупності капітальних вкладень у нове обладнання визначається за такою формулою:

$$T_{ок}=K/E_p \quad (5.6)$$

де K – капітальні витрати.

Передбачувана вартість системи становить від 5 до 7 тис. доларів США, що за поточного курсу складе орієнтовно 294000 грн

Підставивши значення капітальних витрат та річного економічного ефекту, знаходимо термін окупності:

$$T_{ок}=294000/630109=0,47 \text{ року}$$

Отже, термін окупності капітальних вкладень у цю систему становить приблизно 0,47 року або трохи менше 6 місяців.

Отримане значення терміну окупності капітальних витрат за впровадження модуля контролю якості перетворення електроенергії підтверджує доцільність встановлення цієї системи двигунах великої потужності. Це пов'язано з тим, що вартість таких двигунів вища, а отже, економічний ефект від зниження частоти ремонтів та аварій буде більшим, оскільки вартість ремонту зростає разом з потужністю обладнання.

Крім того, розрахунок економічної ефективності повинен враховувати конкретні умови виробництва, де використовуватиметься розроблений пристрій. Це важливо, оскільки значну частину економічного ефекту становлять скорочення технологічних втрат, включаючи збитки від простою та витрати на усунення збоїв, спричинених аварійними відключеннями. Таким чином, перед впровадженням системи необхідно ретельно оцінити виробничі процеси та потенційні технологічні ризики, щоб досягти максимальної ефективності від використання пристрою.

6 ОХОРОНА ПРАЦІ

6.1. Технічні заходи для безпеки робіт із зняттям напруги.

Технічні заходи спрямовані на забезпечення безпечних умов на робочому місці. Після отримання дозволу від старшого чергового, відповідального за обладнання, яке планується відключити, виконують дії в такій послідовності:

- відключають потрібні струмопровідні частини і вживають заходів, що запобігають випадковій подачі напруги на місце роботи або самовільному включенню комутаційної апаратури;
- перевіряють відсутність напруги на частині установки, відключеній для виконання робіт; якщо напруги немає, негайно встановлюють переносне заземлення на знеструмлені струмопровідні частини.

Кількість працівників, задіяних у підготовці робочого місця, а також їхня кваліфікація з електробезпеки визначаються Правилами техніки безпеки, з урахуванням рівня напруги в електроустановці та характеру виконуваних робіт.

Обладнання, яке підлягає ремонту, а також усі струмопровідні частини, до яких під час робіт можна випадково доторкнутися або наблизитися на небезпечну відстань, вимикають. Відключені ділянки ізолюють з усіх боків від струмопровідних елементів, які можуть підвести напругу. Для запобігання зворотному переносу напруги також вимикають силові, вимірювальні й спеціальні трансформатори з обох сторін — високої та низької напруги.

Для забезпечення видимого розриву з кожного боку використовують відключені роз'єднувачі й вимикачі навантаження, роз'єднувачі без автоматичного включення, зняті запобіжники, від'єднані перемички або елементи ошиновки.

Щоб уникнути випадкового або мимовільного ввімкнення, приводи роз'єднувачів, віддільників та вимикачів навантаження механічно блокують за допомогою навісного або блокувального замка, спеціального болта або штифта. У випадку дистанційного керування знімають запобіжники обох полюсів у силовому колі приводу.

Якщо поблизу місця робіт є струмопровідні частини, які неможливо вимкнути, їх ретельно ізолюють та захищають. Після зняття напруги необхідно перевірити її відсутність, а потім негайно заземлити вимкнені струмопровідні частини.

Після встановлення попереджувальних плакатів і тимчасових огорожень знімають постійні огороження біля місця робіт. Переносне заземлення з'єднують з одного боку з металевую шиною, що пов'язана із заземлюючим пристроєм, а вільні кінці заземлення підключають до відключеної струмопровідної частини після підтвердження відсутності на ній напруги.

Перевірку відсутності напруги здійснюють за допомогою покажчика. Перед використанням перевіряють працездатність покажчика за допомогою спеціального приладу. Якщо такого приладу немає, то щуп покажчика наближають до струмопровідної частини під напругою на відстань, достатню для того, щоб з'явилося свічення лампи. Якщо лампа починає світитися, покажчик є справним і готовим до роботи.

Після того, як відсутність напруги перевірено, відключені струмопровідні частини негайно заземлюють за допомогою переносного заземлення, один кінець якого вже під'єднано до заземлювальної магістралі. Для цього за допомогою ізолюючої штанги затискачі переносного заземлення накладають на відключені струмопровідні частини, а потім закріплюють їх тією ж штангою або вручну, використовуючи діелектричні рукавички. Зняття заземлення здійснюють у зворотній послідовності.

Заземлення встановлюють з усіх боків, звідки можлива подача напруги, щоб ділянка або обладнання, відключене для робіт, знаходилося між точками заземлення. Це створює надійний захист для працівників, унеможливаючи випадкову появу напруги на робочій ділянці.

6.2. Пожежна безпека.

При проектуванні та зведенні промислових об'єктів слід враховувати специфіку виробництва щодо пожежної небезпеки та застосовувати матеріали, які відповідають вимогам займистості й вогнестійкості.

Матеріали та конструкції класифікуються за рівнем займистості на три групи: незаймисті, важкозаймисті та легкозаймисті. Стійкість будівельних конструкцій до вогню вимірюється за межею вогнестійкості.

Межа вогнестійкості визначається часом у годинах з моменту початку тестування конструкції до появи одного з таких ознак: наскрізних тріщин, зростання температури на необігріваній поверхні в середньому більш ніж на 140°C чи на 180°C у будь-якій точці цієї поверхні порівняно з початковою температурою, або понад 210°C незалежно від початкової температури; втрати здатності конструкції витримувати навантаження (обвалення).

Стійкість будівель до дії вогню залежить від групи займистості та меж вогнестійкості їхніх конструктивних елементів і визначається як міра вогнестійкості. За цим показником будівлі поділяються на п'ять класів, від найдорожчих, де всі частини виконані з незаймистих матеріалів із максимальною вогнестійкістю (1-4 години), до більш економних, у яких усі елементи є займистими.

Для оптимального вибору класу вогнестійкості необхідно враховувати призначення будівлі та характер майбутнього виробництва, щоб уникнути зайвих витрат і врахувати наявний рівень пожежної небезпеки.

Залежно від рівня пожежної небезпеки, виробництва класифікуються так:

- Категорія А – виробництва з речовинами, які можуть зайнятися або вибухнути через контакт з водою або киснем, а також з рідинами з температурою займання 28°C і нижче, горючими газами з вибухонебезпечним порогом менше 10% у повітрі. Використання цих речовин у великих обсягах створює вибухонебезпечні суміші.

- Категорія Б – виробництва, де використовують рідини з температурою займання $28-120^{\circ}\text{C}$ або горючі гази з вибухонебезпечним порогом понад 10%. Також включає процеси, в яких з'являються горючі волокна або пил у кількості, достатній для утворення вибухонебезпечної суміші з повітрям.

- Категорія В – виробництва з горючими твердими речовинами і матеріалами, а також рідинами з температурою займання вище 120°C .

- Категорія Г – виробництва з обробкою негорючих речовин у гарячому, розжареному або розплавленому вигляді, що супроводжується виділенням тепла, іскр чи полум'я, а також спалювання твердого, рідкого або газоподібного палива.

- Категорія Д – виробництва, пов'язані з обробкою негорючих речовин і матеріалів у холодному стані.

Електричні машини та апарати, які використовуються в електроустановках, мають забезпечувати належний захист обмоток від несприятливого впливу зовнішнього середовища, а також відповідати вимогам пожежної та вибухобезпеки на випадок можливих несправностей.

ВИСНОВКИ

У даній магістерській роботі вирішено кілька важливих та взаємопов'язаних завдань, спрямованих на покращення управління експлуатацією асинхронних двигунів (АД) та оптимізацію їх технічного обслуговування. У процесі роботи було виконано такі ключові кроки:

Обґрунтування необхідності розробки пристрою визначення залишкового ресурсу АД. Існуючі методи діагностики стану двигунів часто не дозволяють своєчасно визначити момент, коли необхідно вивести двигун з експлуатації, що може призвести до аварійних поломок та значних витрат. У зв'язку з цим було запропоновано рішення, що ґрунтується на показниках якості перетворення енергії, яке дозволяє з високою точністю передбачити залишковий термін служби асинхронного двигуна, забезпечивши тим самим можливість планування технічного обслуговування та мінімізації аварійних ситуацій.

Розробка математичного моделювання для оцінки зношування ізоляції обмоток статора. Цей апарат дозволяє більш точно прогнозувати термін служби двигуна і його компонентів, що особливо важливо для забезпечення надійності і довговічності обладнання в умовах інтенсивної експлуатації.

Створення алгоритму визначення залишкового терміну служби АД. На основі розробленого математичного апарату було створено алгоритм, який дозволяє ефективно та точно визначати залишковий ресурс асинхронного двигуна. Цей алгоритм враховує як поточні параметри роботи двигуна, а й можливі відхилення, викликані зовнішніми впливами, що значно покращує точність передбачень.

Моделювання різних режимів роботи електричної машини. Були проведені чисельні та аналітичні дослідження, що моделюють різні робочі режими асинхронних двигунів. Особлива увага була приділена ситуаціям з асиметричними параметрами фазних ланцюгів і впливом несинусоїдальної

напруги живлення. Ці дослідження дозволили виявити особливості роботи двигунів у нестандартних умовах та оцінити вплив таких факторів на їх експлуатаційні характеристики.

Визначення показників якості перетворення енергії з використанням гармонійного аналізу. Були розраховані показники якості перетворення енергії за допомогою гармонійного аналізу компонентів миттєвої потужності, що споживається асинхронним двигуном у різних робочих режимах. Це дозволило не тільки покращити розуміння роботи двигунів у різних умовах, а й запропонувати нові підходи для їхньої діагностики та оптимізації.

Методика оцінки впливу негативних факторів на старіння ізоляції статора обмоток. В рамках роботи було запропоновано методику, яка дозволяє оцінити вплив таких факторів, як нестабільність напруги, перевантаження та інші негативні на процес старіння ізоляції обмоток статора. Цей підхід дозволяє більш точно прогнозувати термін служби двигуна та уникнути несподіваних поломок.

Наприкінці роботи було проведено розрахунок економічної ефективності використання запропонованого пристрою в реальних виробничих умовах. Результати показали, що використання пристрою, що дозволяє оцінювати залишковий термін служби асинхронних двигунів, може суттєво знизити витрати на технічне обслуговування, підвищити надійність роботи обладнання та скоротити кількість аварійних ситуацій.

Таким чином, у роботі запропоновано нові підходи та методи для діагностики та прогнозування стану асинхронних двигунів, що відкриває можливості для підвищення їх експлуатаційної надійності та економічної ефективності.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Кваліфікаційна робота магістра : метод. рекомендації до змісту, структури та оформлення кваліфікаційної роб. : для студ. спец. 141 - Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка / [уклад. П. Г. Плешков, К. Г. Петрова, Н. Ю. Гарасьова та ін.] ; М-во освіти і науки України, Центральноукраїн. нац. техн. ун-т. - Кропивницький : ЦНТУ, 2023. - 74 с.
2. Володарський Є.Т. Система моніторингу якості електричної енергії в децентралізованих системах електропостачання / Є.Т. Володарський, А.В. Волошко // Східно-Європейський журнал передових технологій. – 2014. – №. 318 (69). – С. 10–18.
3. КОДЕКС систем розподілу. Постанова НКРЕКП 14.03.2018 № 310.
4. Закладний О.О. Якість перетворення електроенергії вентильним двигуном / О.О.Закладний, В.В.Прокопенко, Т.В.Гребенюк // Електротехнічні та комп'ютерні системи. - 2017. - № 25. - С. 154-160.
5. Характеристики напруги електропостачання в електричних мережах загальної призначеності: ДСТУ EN 50160:2014 (EN 50160:2010, IDT). – [Чинний від 2014-10-01]. – К.: Держстандарт України, 2014. – 27 с.
6. Автоматизований комплекс визначення показників якості електроенергії / В. О.Мандзій, С. М. Бабюк, І. М. Сисак, В. В. Липницький. // Метрологія та прилади. – 2011. – №1. – С. 34–38.
7. Основи ефективного використання електричної енергії в системах електроспоживання промислових підприємств : навч. посіб. / [Соловей О. І., Розен В. П., Плешков П.Г. та ін.] ; М-во освіти і науки України, Кіров. нац. техн. ун-т. – Кіровоград : КНТУ, 2015. – 287 с. ISBN 978-966-402-076-0
8. Плешков, С. П. Енергоефективний електропривод у промисловості та сільськогосподарському виробництві: навч. посіб. / Плешков С. П., Серебренніков С.В. - Кіровоград: КНТУ, 2016.- 156 с.
9. «Інтелектуальні системи в електроенергетиці. Теорія та практика:

навчальний посібник. / Стаднік М.І., Видмиш А.А., Штуць А.А., Колісник М.А. Вінниця: ТОВ «ТВОРИ», 2020. 332 с.

10. Кириленко О.В. Аналіз стійкості енергетичних систем за напругою [Текст] // Кириленко О.В., Павловський В.В., Лук'яненко Л.М., Зорін Є.В., // Технічна електродинаміка. – К.: ІЕД НАНУ, – 2010. – № 3. – С. 59 – 67.

11. Енергозбереження та енергетичний аудит : навчальний посіб. / В.А. Маляренко , І.А. Немировський. – 2–е вид., перероб. і доп. – Харків : НТУ «ХПІ», 2010. – 344 с.

12. П.Г.Плешков, Ю.І.Казанцев, А.Ю.Орлович. Основи енергозбереження та енергозберігаючі режими в системах електропостачання промислових підприємств. – Кіровоград: РВЛ КНТУ 2007.

13. <https://www.nerc.gov.ua/sferi-diyalnosti/elektroenergiya/yakist-elektropostachannya/yakist-elektrichnoyi-energiyi>

14. Електромагнітна сумісність у системах електропостачання : Підручник / І.В. Жежеленко, А.К. Шидловський, Г.Г. Півняк, Ю.Л. Саєнко. – Д. : Національний гірничий університет, 2009. – 319 с. : іл.

15. 1. Олійник Ю. С. Якість електричної енергії / Ю. С. Олійник // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. - 2018. - Вип. 196. - С. 113-115. - Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vkhdtusg_2018_196_42

16. Особливі режими електричних мереж : Навчальний посібники / Г.Г. Півняк, А.К. Шидловський, Г.А. Кігель, А.Я. Рибалко, О.І. Хованська. – Д. : Національний гірничий університет, 2009. – 376 с.

17. Методи і засоби вимірювань електричних та неелектричних величин: навчальний посібник / Д.М.Нестерчук, С.О.Квітка, С.В.Галько. – Мелітополь: Виданвико-поліграфічний центр «Люкс», 2017. - 206 с.