

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

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

до дипломного проекту (роботи)

магістр

(освітній ступінь)

на тему: **Дослідження роботи асинхронного двигуна при
несиметрії напруги мережі**

Виконав: студент (ка) 6 курсу, групи ЕЕм-61

напряму підготовки (спеціальності) 141 –

Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

(шифр і назва напряму підготовки, спеціальності)

Левицька О.А.

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Керівник

(підпис)

Буняк О.А.

(прізвище та ініціали)

Нормоконтроль

(підпис)

Вакуленко О.О.

(прізвище та ініціали)

Рецензент

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя
(повне найменування вищого навчального закладу)

Інститут, факультет, відділення _____ прикладних інформаційних технологій
та електроінженерії

Кафедра, циклова комісія Електричної інженерії

Освітньо-кваліфікаційний рівень _____ магістр

Напрямок підготовки 14 – електрична інженерія
(шифр і назва)

Спеціальність 141 – електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри, голова циклової
комісії _____ ЕІ

_____ д.т.н. проф. Тарасенко М.Г.

“ ___ ” _____ 2019 року

ЗАВДАННЯ НА ДИПЛОМНИЙ ПРОЕКТ (РОБОТУ) СТУДЕНТУ

_____ Левицькій Олені Андріївні _____

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проекту (роботи) _____ Дослідження роботи асинхронного двигуна при
несиметрії напруги мережі _____

керівник проекту (роботи) Буняк Олег Андронікович, к.т.н., доцент,
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від “23” серпня 2019 р. № 4/7-731

Строк подання студентом проекту (роботи) _____ 15 грудня 2019 року _____

3. Вихідні дані до проекту (роботи) Експериментальна установка для
моделювання. Асинхронний двигун із короткозамкненим ротором: АМП
90L4У3; $P_1=2,2$ кВт; Пристрій навантаження: двигун постійного струму (режим
генератора) ПЗ2М з незалежним збудженням.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно
розробити)

Вступ. 1. Аналітична частина. 2. Науково-дослідна частина. 3. Технологічна
частина. 4. Проектно-конструкторська частина. 5. Спеціальна частина. 6.
Обґрунтування економічної ефективності. 7. Охорона праці та безпека в
надзвичайних ситуаціях. 8. Екологія. Загальні висновки до дипломної роботи.
Перелік посилань.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)
Загальні положення, що виносяться на захист; Зведені дані досліджень та
графіки залежності електромеханічних характеристик асинхронного двигуна
від несиметрії напруги мережі; Зведені дані досліджень та графіки залежності
електромеханічних характеристик асинхронного двигуна від частоти
мережі; Вигляд дослідної установки та принципова схема; Загальні висновки до
дипломної роботи

6. Консультанти розділів проекту (роботи)

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Екологія	к.т.н., доцент Зварич Н.М.		
Охорона праці	к.т.н., доцент Гурик О.Я.		
Безпека в надзвичайних ситуаціях	старший викладач Стручок В.С.		
Обґрунтування економічної ефективності	д.е.н., доцент Мельник Л.М.		

7. Дата видачі завдання 02 вересня 2019 року

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проекту (роботи)	Строк виконання етапів проекту (роботи)	Примітка
1	Аналіз літературних джерел та патентний пошук	03.09.19 - 30.09.19	
2	Науково-дослідна частина	03.09.19 - 01.11.19	
3	Технологічна частина	15.09.19 - 01.11.19	
4	Проектно-конструкторська частина	01.10.19 - 01.11.19	
5	Спеціальна частина	15.09.19 - 01.11.19	
6	Обґрунтування економічної ефективності	01.10.19 - 01.11.19	
7	Заходи з охорони праці та безпеки в надзвичайних ситуаціях	01.10.19 - 10.10.19	
8	Заходи з екології	01.10.19 - 10.10.19	
9	Загальні висновки до дипломної роботи	01.12.19 - 10.12.19	
10	Формування пояснювальної записки та плакатів по дипломній роботі	01.11.19 - 10.12.19	
11	Попередній захист дипломної роботи	15.12.19 - 24.12.19	

Студент _____
(підпис)

Левицька О.А.
(прізвище та ініціали)

Керівник проекту (роботи) _____
(підпис)

Буняк О.А.
(прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

Дипломна робота. Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя. Факультет прикладних інформаційних технологій та електроінженерії. Кафедра електричної інженерії, група ЕЕм-61. – Тернопіль.: ТНТУ, 2019.

Стор. – 90; рис. – 20; табл. – 5; літературних джерел – 28.

У дипломній роботі розглянуто науково-дослідницьке завдання практичного спрямування щодо дослідження електромеханічних характеристик асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором при несиметрії напруги мережі.

Проведені розрахунки для моделювання несиметричних режимів при дослідженні електромеханічних характеристик асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором.

Розроблена схема та змодельована експериментальна установка для дослідження впливу несиметрії напруг та зміни частоти напруги на електромеханічні характеристики асинхронного двигуна.

Проведений аналіз систем діагностування та захисту асинхронного двигуна при аварійних режимах роботи визваних несиметрією напруги мережі.

Запропоновані заходи щодо експлуатації асинхронних двигунів та захисту персоналу при ураженні електричним струмом.

Ключові слова: несиметрія напруги, асинхронний двигун коефіцієнт прямої послідовності, коефіцієнт зворотної послідовності.

ANNOTATION

Diploma paper. Ternopil Ivan Puluj National Technical University. Faculty of Applied Information Technologies and Electrical Engineering. Department of electrical engineering, group EEM-61. – Ternopil.: 2019.

Page – 90; Figure – 20; Table – 5; literature – 28.

In diploma work deals with the scientific research problem of practical direction for the study of electromechanical characteristics of an asynchronous motor with a short-circuited rotor with asymmetry of the network voltage.

Calculations have been made to model asymmetric modes in the study of the electromechanical characteristics of an asynchronous motor with a short-circuited rotor.

A scheme is developed and a simulated experimental setup for investigating the effect of voltage asymmetry and changing the frequency of voltage on the electromechanical characteristics of an asynchronous motor.

Carried the analysis of systems of diagnostics and protection of the asynchronous motor during emergency modes of operation caused by the asymmetry of the network voltage.

Keywords: voltage asymmetry, asynchronous motor, coefficient of direct sequence, coefficient of reverse sequence.

ЗМІСТ

ВСТУП	7
1 АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА	9
1.1 Оцінка показників якості електроенергії та енергозбереження	9
1.2 Особливості роботи асинхронного електроприводу при несиметричних режимах	12
1.3 Висновки до першого розділу	19
2 НАУКОВО-ДОСЛІДНА ЧАСТИНА	21
2.1 Розрахунок коефіцієнтів несиметрії напруг	21
2.2 Висновки до другого розділу	32
3 ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА	33
3.1 Аналіз параметрів асинхронного двигуна для проведення досліджень ...	33
3.2 Проведення експериментальних досліджень та аналіз результатів	36
3.3 Висновки до третього розділу	44
4 ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСЬКА ЧАСТИНА	45
4.1 Опис експериментальної установки, приладів та обладнання для дослідження впливу несиметрії напруг	45
4.2 Опис обладнання для дослідження впливу частоти напруги мережі на роботу асинхронного двигуна.....	49
4.3 Висновки до четвертого розділу	53
5. СПЕЦІАЛЬНА ЧАСТИНА	54
5.1 Аналіз роботи асинхронних двигунів у складі частотного електроприводу при зміні параметрів мережі	54
5.2 Проведення експериментальних досліджень та аналіз результатів.....	59
5.3 Висновки до п'ятого розділу	63
6 ОБГРУНТУВАННЯ ЕКОНОМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ	64
6.1 Аналіз та вибір методики розрахунку втрат при несиметрії напруги мережі	65

6.2 Розрахунок додаткових втрат двигуна за методикою приведення вихідних даних до нечіткого узагальнення	67
7 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ	71
7.1 Заходи безпеки при обслуговуванні електродвигунів	71
7.2 Надання першої допомоги потерпілому при ураженні електричним струмом	73
7.3 Оцінка стійкості роботи електричних мереж та систем до дії проникаючої радіації і радіоактивного забруднення місцевості ядерного вибуху.....	76
8 ЕКОЛОГІЯ	81
8.1 Забруднення довкілля, що виникнуть у результаті роботи асинхронних двигунів	81
8.2 Заходи по зменшенні негативної дії на довкілля	82
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ ДО ДИПЛОМНОЇ РОБОТИ	85
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	87

ВСТУП

Актуальність теми. Розвиток сучасних технологій та застосування їх на виробництві вимагає використання електричних пристроїв різного промислового та інформаційного призначення. Електричні пристрої є критичними до показників якості електроенергії.

Для асинхронних двигунів промислового призначення використовується трифазна система електропостачання, яка характеризується тривалими несиметричними режимами, викликаними, в основному, нерівномірним навантаженням однофазних споживачів. Рядом експертних оцінок [1] встановлено що до 45% асинхронних двигунів виходить з ладу через виникнення неприпустимої несиметрії напруг фаз мережі та обриву фази.

Присутність несиметрії напруг у трифазній мережі характеризується наявністю напруги оберненої та нульової послідовностей [2]. В асинхронних двигунах напруга оберненої послідовності негативно впливає на складову основного моменту двигуна, а струм нульової послідовності призводить до додаткового нагрівання статора та ротора двигуна, що призводить до швидкого старіння ізоляції та скорочується термін використання двигунів. Крім цього, наявність несиметричних навантажень зумовлює додаткові втрати потужності двигуна, збільшуються втрати напруги на фазі, що призводить до зниження механічних і регулювальних характеристик асинхронного двигуна.

Пристрої контролю та захисту асинхронних двигунів є чутливі до змін струму в ланцюгах живлення [3]. Струмові перевантаження викликані несиметрією трифазної мережі призводять до вимкнення двигуна в момент запуску та при пікових навантаженнях.

Тому, дослідження впливу несиметрії напруги мережі на механічні та навантажувальні характеристики асинхронного двигуна є актуальною задачею.

Метою дипломної роботи є дослідження впливу несиметрії напруги мережі на роботу асинхронних двигунів з короткозамкненим ротором.

Завдання дослідження.

– розробити експериментальну установку для моделювання несиметрії напруги трифазної мережі та частоти мережі наближених до реальних умовах експлуатації асинхронного двигуна;

– провести дослідження впливу несиметричних режимів на регулювальні характеристики асинхронних двигунів з короткозамкненим ротором;

– провести аналіз впливу зміни частоти на регулювальні характеристики асинхронних двигунів з короткозамкненим ротором.

– визначити вплив несиметрії напруги мережі та зміну частоти мережі на споживану потужність в залежності від навантаження.

Об’єктом дослідження є несиметричні трифазні електричні мережі.

Предметом дослідження є дослідження впливу несиметрії напруги мережі на механічні та регулювальні характеристики асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором.

Наукова новизна одержаних результатів.

Обґрунтовано граничні значення коефіцієнта несиметрії напруги мережі при зміні завантаження і особливостей механічних характеристик асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором.

Практичне значення отриманих результатів.

Запропонована експериментальна установка дослідження роботи асинхронного двигуна при несиметрії напруги та частоти мережі дозволить проводити оптимальний вибір елементів захисту в залежності від експлуатаційних характеристик.

Апробація.

Результати досліджень за темою дипломної роботи були представлені на VIII Міжнародній науково-технічній конференції молодих учених та студентів „Актуальні задачі сучасних технологій“ (27-28 листопада 2019 року), Тернопільський національний університет імені Івана Пулюя.

1 АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА

1.1 Оцінка показників якості електроенергії та енергозбереження

Виходячи з завдання на дипломну роботу необхідно провести аналіз показників якості електроенергії (ПЯЕ): несиметрії напруги, відхилення напруги та частоти. Так як параметри енергії дають кількісну характеристику, необхідно провести оцінку означених показників якості енергії з позиції відповідності параметрів енергії їх встановленим значенням [4].

Показники якості електроенергії за напругою характеризують потужність відхилення напруги від своїх нормативних значень. В нашому випадку, згідно ГОСТ 13109-97, при живленні від електричних мереж трифазного струму здійснюється оцінка таких показників якості електричної енергії: відхилення частоти та напруги; розмах коливання напруги та частоти; коефіцієнт несиметрії напруги за оберненою послідовністю; коефіцієнт несиметрії напруги за нульовою послідовністю; коефіцієнт несинусоїдальності напруги [5].

Для проведення аналізу та дослідження необхідно зупинитися на окремих показниках якості електроенергії.

Відхилення напруги. Характеризується показником усталеного відхилення напруги, для якого встановлені такі норми: нормально допустимі та гранично допустимі значення усталеного відхилення напруги δU_y на виводах приймачів електричної енергії дорівнюють відповідно ± 5 та ± 10 % від номінальної напруги електричної мережі згідно з ГОСТ 721 та ГОСТ 21128; нормально допустимі та гранично допустимі значення усталеного відхилення напруги в точках загального приєднання навантажень електричної енергії до електричних мереж напругою 0,38 кВ та більше мають бути установлені в договорах на використання енергії між енергопостачальною організацією та споживачем з урахуванням необхідності виконання норм ГОСТ 13109–97 на виводах приймачів електричної енергії. Значення усталеного відхилення

напруги δU_y розраховують у відсотках за формулою $\delta U_y = 100(U_y - U_{\text{ном}}) / U_{\text{ном}}$, де $U_{\text{ном}}$ – номінальна міжфазна (фазна) напруга, В, кВ [4].

Несиметрія напруги. Характеризується такими показниками: коефіцієнтом несиметрії напруги по зворотній послідовності K_{2U} ; коефіцієнтом несиметрії напруги за нульовою послідовністю K_{0U} . Нормально допустимі та гранично допустимі значення коефіцієнта несиметрії напруги за зворотною послідовністю в точках загального приєднання до електричних мереж дорівнюють відповідно 2,0 та 4,0 %. Нормально допустимі та гранично допустимі значення коефіцієнта несиметрії напруги за нульовою послідовністю в точках загального приєднання до чотирьох провідних електричних мереж з номінальною напругою 0,38 кВ рівні, відповідно 2,0 та 4,0 % [4].

Враховуючи, що нами будуть розглянуті енергетичні процеси, що відбуваються при експлуатації асинхронних двигунів, наряду з нормативними показниками ПЯЕ необхідно враховувати додаткові складові, такі як [6, 7]: споживана активна потужність (P); споживана реактивна потужність (Q); характеристики взаємного впливу елементів системи для досягнення електромагнітної сумісності.

Як описано в ряді статей [8-10], відхилення ПЯЕ від свої нормованих значень призводить до впливу на такі фактори: зростання споживання активної та реактивної потужностей; зростання втрат активної потужності; зниження коефіцієнта потужності системи. Тобто, при визначенні економічних втрат при відхиленні несиметрії напруги мережі та частоти мережі від допустимих значень необхідно враховувати означені вище втрати.

У відповідності до характеру впливу відхилень ПЯЕ на електронне і електротехнічне обладнання розрізняють електромагнітну, технологічну та соціальну складові втрат [8, 9]. Перші дві можна оцінити економічно, остання пов'язана з впливом низької якості електроенергії на людину. Електромагнітна складова визначається в основному змінами втрат активної потужності та відповідними змінами терміну служби ізоляції електрообладнання.

Технологічна складова обумовлюється впливом якості електроенергії на продуктивність технологічних установок.

Проведемо оцінку втрат через погіршення досліджуваних параметрів ПЯЕ.

Втрати через відхилення напруги. Втрати через відхилення напруги мають електромагнітну та технологічну складові. Перша з них виникає через зростання споживання реактивної потужності, зростання втрат активної потужності в двигунах, трансформаторах, лініях електроживлення. Технологічна складова втрат виникає в першу чергу через зниження продуктивності електроенергетичного та електротехнологічного обладнання. Зменшення напруги призводить до зменшення світлового потоку освітлювальних приладів, що призводить до зниження продуктивності праці працівників.

Втрати через коливання напруги. Коливання напруги впливають як на самі джерела, так і на споживачів, обумовлюючи електромагнітну та технологічну складові втрат. Першу можна оцінити аналогічно складовій, обумовленій відхиленнями напруги. Технологічна складова втрат через коливання напруги обумовлена в основному впливом на зір людини миганням освітлювальних ламп. Крім того, коливання напруги можуть викликати передчасний вихід із ладу магнітних пускачів, конденсаторів, випрямлячів, пристроїв електронної техніки.

Втрати через несиметрію напруги. Електромагнітна складова втрат обумовлюється зростанням втрат активної потужності та споживанням активної і реактивної потужностей, прискоренням процесів старіння ізоляції електрообладнання, погіршенням освітлення робочих поверхонь та скороченням термінів служби світильників.

Як показує практика щодо аналізу та наступної оптимізації показників якості електроенергії мають реалізовуватися як для навантажень, що вносять збурення, так і для генераторів та інших навантажень системи. Важливу роль при цьому відіграють витрати (інвестиційні, експлуатаційні, повні річні тощо),

пов'язані з введенням обладнання, яке забезпечує задані рівні ПЯЕ. Вирішення зазначених проблем вимагає пошуку оптимальних для даного споживача (навантаження) структури системи електропостачання та значень ПЯЕ [9, 10].

1.2 Особливості роботи асинхронного електроприводу при несиметричних режимах

Для визначення методики досліджень за темою роботи необхідно провести аналіз причин виникнення несиметричних режимів в трифазних мережах та оцінити вплив на електромеханічні параметри асинхронних двигунів (АД).

В системах електропостачання промислових підприємств у більшості випадків використовуються чотирих провідні електричні мережі, як для живлення однофазних так і трифазних споживачів. Як було означено вище система електропостачання повинна забезпечувати вимоги до симетрії фазних напруг за міжнародним стандартом *Е02ГОСТ13109–97*, згідно з якими значення коефіцієнтів за зворотною та нульовою послідовностями не перевищують 2% [4].

Аналіз ряду літературних джерел [11, 12] показав, що число електроустановок з несиметричним навантаженням постійно зростає. Поряд з цим зростає число однофазних споживачів, що вносять несиметричну складову в трифазну мережу, причому, включення їх носить випадковий характер. Тому, вже при проектуванні розподільних мереж необхідно проводити аналіз несиметричного режиму.

Проведемо аналіз виникнення несиметрії фазних напруг при включенні несиметричного навантаження [11]. Якщо на вхід трансформатора надходить потужність з симетричними напругами фаз U_A, U_B, U_C з малими значеннями фазних опорів, а на виході підключене несиметричне навантаження з опорами на фазах $|Z_1| \neq |Z_2| \neq |Z_3|$ та опором нульового проводу Z_0 (рис. 1.1) то, напруга

між точками 0 та 0' визначаємо за формулою: $U_0 = I_0 \cdot Z_0$ як спад напруги на опорі Z_0 .

Тоді, за I законом Кірхгофа отримуємо:

$$I_1 + I_2 + I_3 = (U_A - U_0) \cdot Y_1 + (U_B - U_0) \cdot Y_2 + (U_C - U_0) \cdot Y_3 - U_0 \cdot Y_0 = 0,$$

звідки за схемою заміщення (рис.1.1, а) напруга між точками 0 та 0' становить:

$$U_0 = \frac{U_1 \cdot Y_1 + U_2 \cdot Y_2 + U_3 \cdot Y_3}{Y_1 + Y_2 + Y_3 + Y_0} = \frac{\sum_{i=1}^3 U_i \cdot Y_i}{\sum_{i=1}^3 Y_i + Y_0}. \quad (1.1)$$

За відсутністю нульового проводу $Y_0 = 0$ напруга між нейтральними точками буде визначатися за формулою:

$$U_0 = \frac{\sum_{i=1}^3 U_i \cdot Y_i}{\sum_{i=1}^3 Y_i}.$$

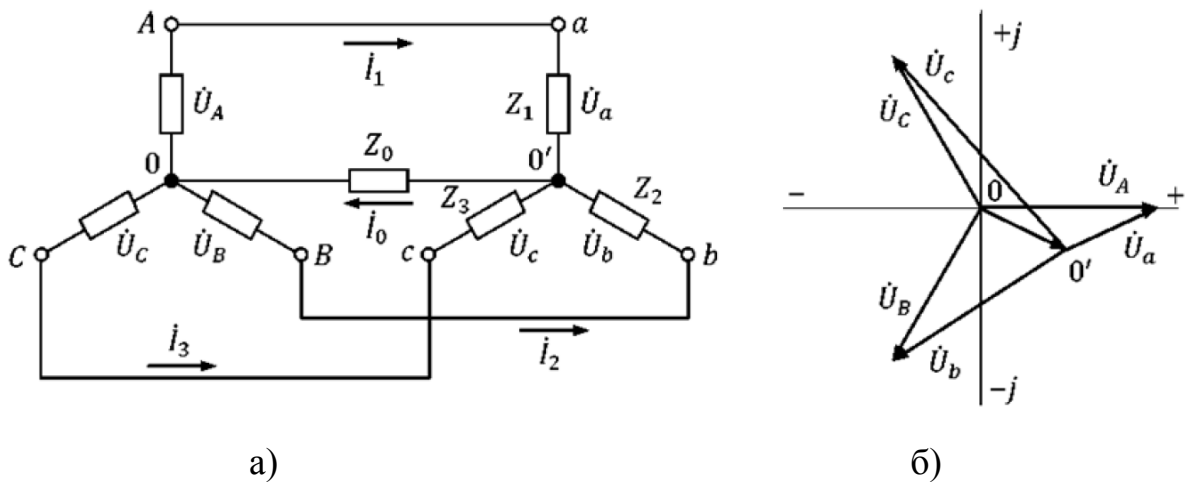


Рисунок 1.1 – До аналізу виникнення несиметрії фазних напруг на навантаженні: а) – схема заміщення; б) векторна діаграма.

З приведенного аналізу отриманої векторної діаграми (рис.1.1, б) можна зробити висновок, що ввімкнення несиметричного навантаження призводить до несиметрії фазних напруг.

Що стосовно асинхронного двигуна, який працює в різних режимах навантаження та робочих характеристик, аналіз проводиться за методом симетричних складових [12].

Аналіз джерел [12-14] показав, що при роботі асинхронного двигуна фазні струми є різними та залежать від несиметрії напруг мережі та повних опорів обмоток. В цьому випадку доцільно використовувати його середньоквадратичне значення фазного струму:

$$I_{cp.\phi} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n I_i^2}{n}} = \sqrt{\frac{I_A^2 + I_B^2 + I_C^2}{3}}, \quad (1.2)$$

а для повних опорів обмоток (згідно з класичною Г-подібною схемою заміщення) справедлива залежність: $I = f(U_1, U_2, Z_1, Z_2)$, причому для обертових машин $Z_1 > Z_2$:

$$Z_1 = \frac{Z_m(Z_s + Z_{r1})}{Z_m + Z_s + Z_{r1}}; \quad Z_2 = \frac{Z_m(Z_s + Z_{r2})}{Z_m + Z_s + Z_{r2}},$$

де,

$$Z_m = r_1 + j(x_1 + x_\mu); Z_s = r_1' + jx_1'; Z_{r1} = r_2''/s + jx_2''; Z_{r2} = r_2''/(2-s) + jx_2''.$$

Як відомо з теорії електричних машин [14] при аналізі електромеханічної характеристики, значення опорів фаз асинхронного двигуна є функцією величини ковзання s .

Аналіз показав [11-14], що залежність величини ковзання від несиметрії напруг найбільш достовірно варто представляти рівнянням:

$$M_0 + (k_3 \cdot M_n - M_0) \left(\frac{1-s}{1-s_n} \right)^x = M_1 - M_2, \quad (1.3)$$

де, M_0 – момент холостого ходу двигуна, Н·м;

M_n – номінальний момент двигуна, Н·м;

s_n – номінальна величина ковзання;

k_3 – коефіцієнт завантаження;

x – механічний характеристичний коефіцієнт двигуна.

$$\text{тобто: } M_1 = \frac{s}{s_H} \left(\frac{U_1'}{U_{ном}} \right)^2 M_H.$$

В загальному випадку є справедлива залежність:

$$s = f(U_1, U_2, M_0, M_H, s_H, x) \quad (1.4)$$

Аналіз залежностей 1.1–1.4 дозволяє зробити висновок, що для проведення досліджень доцільно знати величини: значення фазних струмів; симетричні складові прямої та зворотної послідовностей, де, робочі ділянки механічних характеристик можливо визначати за моментами M_1 та M_2 :

$$M_1 = \frac{s}{s_H} \left(\frac{U_1'}{U_{ном}} \right)^2 \cdot M_H ; \quad (1.5)$$

$$M_2 = M_{П2} \cdot (\omega_0 - \omega) / \omega_0 = M_{П2} \cdot s, \quad (1.6)$$

$$\text{де } M_{П2} = \left(\frac{U_2'}{U_{ном}} \right)^2 \cdot M_{П}.$$

В реальному виробництві використовуються асинхронні двигуни різної потужності, типорозміру та режимів роботи. Крім цього електродвигуни працюють в різних екологічних умовах, що створює значні труднощі при експлуатації та діагностуванні режимів роботи [13].

Вказані особливості на ряду із несиметричними складовими мережі вносять істотний вплив при виборі захисту асинхронних двигунів при нормальних режимах експлуатації та при аварійних режимах роботи.

Аналіз літературних джерел показав [12, 14, 15], основною причиною аварійних режимів при експлуатації асинхронних двигунів, що породжує глибоку несиметрію напруги є обрив лінійного проводу, основними причинами чого є, в більшості випадків, механічне пошкодження проводів або пошкодження контактів автоматичного вимикача на одній із фаз.

Статистичний аналіз показав [14, 15], що присутність несиметрії напруг в межах 4% скорочує термін використання асинхронних двигунів вдвічі. Крім цього, несиметрія є причиною зменшення корисного моменту на валу, створенням протидіючого обертового моменту. Зворотна складова несиметрії напруги наводить на роторі електрорушійну силу подвійної частоти, що в кінцевому випадку призводить до несиметрії струму, що було проаналізовано вище. При експлуатації асинхронних двигунів навіть при нормальних режимах така ситуація призводить до додаткового нагріву обмоток статора та ротора.

Сучасна промисловість випускає асинхронні двигуни серії 4А, 4АМ, АІР, які відповідають усім вимогам міжнародних стандартів. Проте, як показує аналіз, аварійність електродвигунів залишається відносно велика. Щорічно виходить з ладу 15 ... 20% асинхронних двигунів, за іншими даними - 20 ... 25% [14-16]. Фактичний термін служби асинхронних двигунів знижується у два, три рази.

У переважній більшості випадків вихід з ладу асинхронних двигунів відбувається через пошкодження обмотки статора. Особливості пошкоджень, як правило такі: обрив фази, заклинювання та перевантаження, де на обрив фази припадає 40- 50% [16].

З вище сказаного можна зробити висновок, що несиметрії фазних напруг і обрив фазного проводу мережі є основними причинами створення аварійних режимів асинхронних двигунів.

Несиметрія напруги впливає на техніко-економічні характеристики асинхронних двигунів, основні з яких такі: зростання втрат електричної енергії, як за активною так і за реактивною потужністю, підвищення нагрівання складових частин, зниження експлуатаційної надійності та скорочення терміну роботи асинхронних двигунів [11-15].

Необхідно провести аналіз засобів та методів діагностування асинхронних двигунів, що дозволить обслуговуючому персоналу ефективно реагувати на аварійні ситуації та прогнозувати режимні параметри роботи.

Діагностика проводиться за такими електричними складовими асинхронних двигунів [17] (рис.1.2):

- за струмами прямої, зворотної та нульової послідовностей; кутом зсуву фаз за струмами; теплова дія струму;
- за напругою нульової та зворотної послідовностей;
- за температурою обмоток статора.

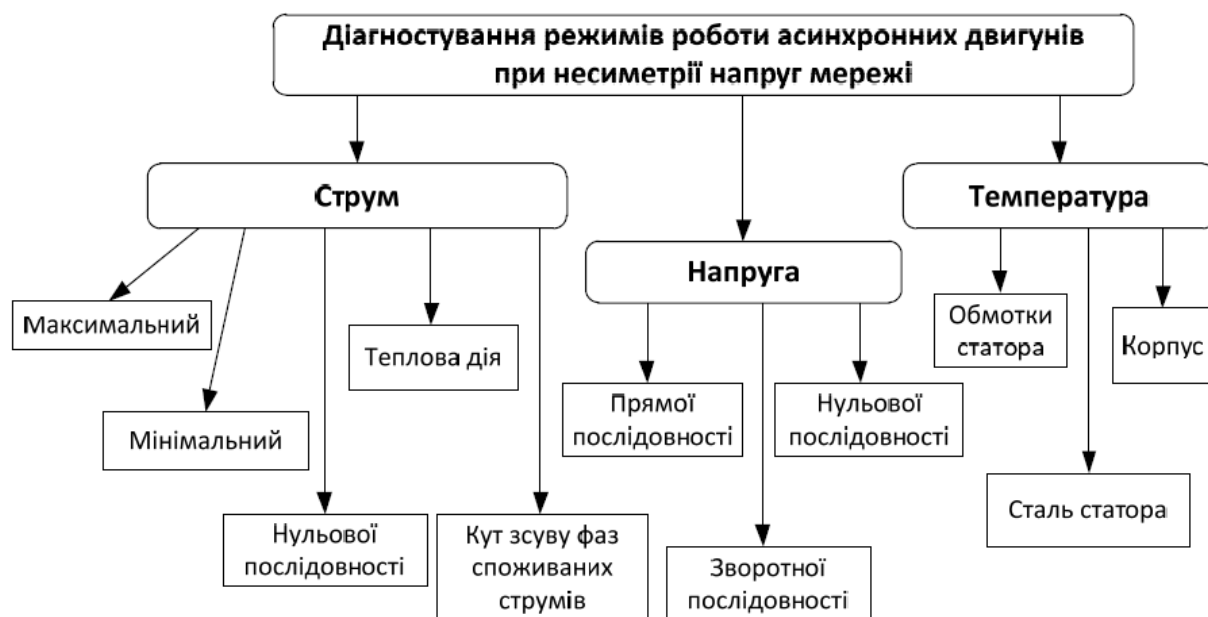


Рисунок 1.2 – Аналіз методик діагностування режимів роботи асинхронних двигунів при несиметрії напруги мережі.

Проведений аналіз діагностики асинхронного двигуна при несиметричних режимах та захисти по струму, напрузі та неповнофазних режимів роботи внаслідок обриву фази або нульового проводу [17-20] дозволило зробити такі висновки:

– пристрої діагностування, що відносяться до зміни величини струму та побудовані на основі електромагнітного та індукційного принципів як правило реагують на відключення двигуна при його запуску. В цьому випадку необхідне використання реле часу для уникнення відключення двигуна при нормальному запуску або на короткочасних піках навантаження;

– пристрої діагностування та захисту по напрузі, як і побудовані на основі фільтрів прямої та зворотної послідовності, є ефективними, але обмежені у

використанні, оскільки, при контролі напруги нульової послідовності при обриві фази спрацьовують виключно на стороні 0,4 кВ і не спрацьовують на стороні 10 кВ;

- для підвищення ефективності спрацювання струмового захисту необхідно встановлювати додаткові елементи, що враховують температуру обмоток статора;

- у загальному випадку для захисту асинхронного двигуна від аварійних режимів, які визвані несиметрією напруги мережі доцільно використовувати комбіновані пристрої діагностування та захисту в залежності від режимних параметрів згідно технологічних процесів.

Аналіз систем захисту асинхронного двигуна від несиметрії напруги мережі дозволив запропонувати оптимальну структурну схему захисту, на яку накладаються такі умови [12]:

- здійснення контролю несиметрії напруги мережі на статорі асинхронного електродвигуна;
- здійснення відключення двигуна при досягненні граничного значення несиметрії напруги (допустиме відхилення 2%);
- здійснення контролю перевищення температури обмоток статора асинхронного двигуна в номінальних та пікових режимах роботи;
- здійснення відключення асинхронного двигуна при досягненні граничного значення перевищення температури обмоток статора;
- забезпечення світлової сигналізації при аварійному режимі роботи;
- забезпечення звукової і світлової сигналізації при перевищенні значень фазних струмів на обмотках статора двигуна.

На рис. 1.3. представлена Оптимальна структурна схема захисту асинхронного двигуна при несиметрії напруги мережі. Принципову електричну схему необхідно розробляти в залежності від режимів роботи, типорозміру двигуна, класу ізоляції обмоток статора та величини контрольованого значення несиметрії.

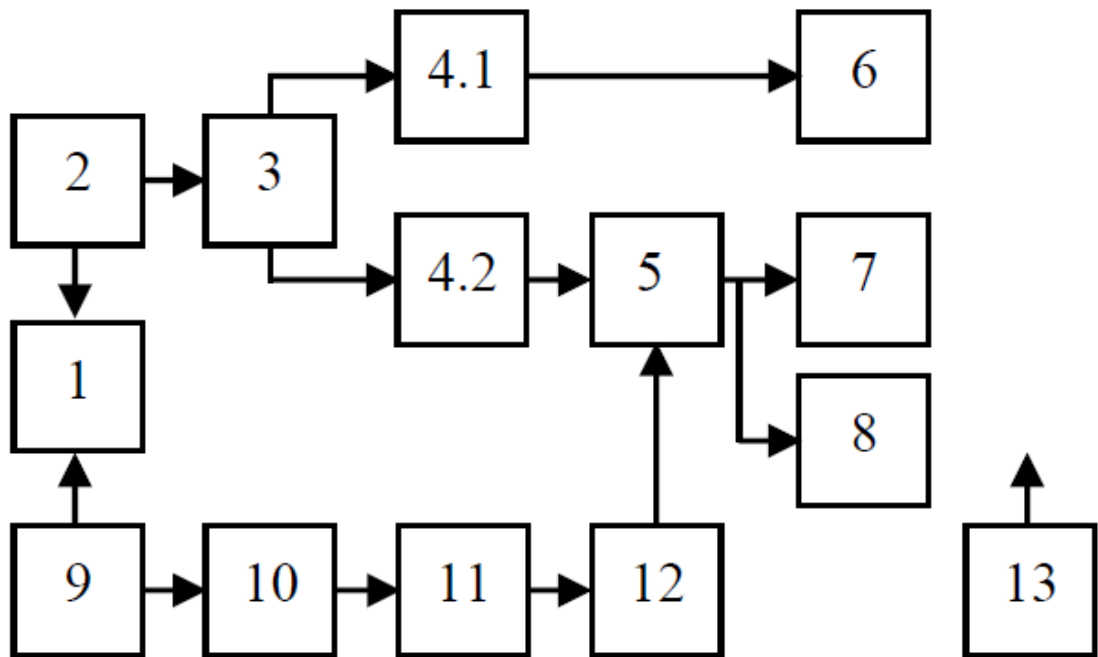


Рисунок 1.3 – Оптимальна структурна схема захисту асинхронного двигуна при несиметрії напруги мережі:

1 – асинхронний двигун; 2 – фільтр напруги зворотної послідовності; 3 – операційний підсилювач; 4.1 – світлова сигналізація при досягненні гранично допустимої несиметрії; 4.2 – світлова сигналізація при глибокій несиметрії (обрив фази); 5 – логічний елемент "АБО"; 6 – світлова сигналізація при відключенні двигуна; 7 – первинні перетворювачі температури обмоток статора; 8 – стабілізоване джерело струму; 9 – тригер Шмітта; 10 – логічний елемент "НІ", 11 – стабілізоване джерело живлення.

1.3 Висновки до першого розділу

Проведений аналіз показників якості електроенергії й енергозбереження та особливості роботи асинхронного електроприводу при несиметричних режимах.

Встановлено, що наряду з нормативними показниками несиметрії напруги мережі та відхилення напруги мережі, для проведення досліджень необхідно враховувати такі електричні складові: споживана активна та реактивна потужності, значення фазних струмів, симетричні складові прямої та зворотної послідовностей.

Встановлено необхідність моделювання несиметрії напруги трифазної мережі для проведення досліджень в межах нормально допустимого значення відхилення напруги за зворотною та нульовою послідовностями (2%). Дослідження роботи асинхронного двигуна при глибокій несиметрії вимагає використання складної принципіальної схеми.

Проведений аналіз показав, що ввімкнення несиметричного навантаження призводить до несиметрії фазних напруг. Дослідження впливу несиметричних режимів на роботу асинхронного двигуна необхідно проводити за значення механічних характеристик: лінійної швидкості обертання ротора, значення величини ковзання, характеристик моментів.

Проведений аналіз систем діагностування та захисту асинхронного двигуна показав, що у загальному випадку для захисту асинхронного двигуна від аварійних режимів, які визвані несиметрією напруги мережі доцільно використовувати комбіновані пристрої в залежності від режимних параметрів роботи асинхронного двигуна.

2 НАУКОВО-ДОСЛІДНА ЧАСТИНА

2.1 Розрахунок коефіцієнтів несиметрії напруг

Основою для розрахунку коефіцієнтів несиметрії напруг є значення лінійних та фазних напруг. Як було означено в аналітичній частині, несиметрія напруг характеризується такими параметрами: значеннями напруги оберненої послідовності та коефіцієнтом за нульовою послідовністю.

На значеннях виміру міжфазних напруг основної частоти $U_{AB(1)i}, U_{BC(1)i}, U_{CA(1)i}$ розраховуємо діюче значення напруги оберненої послідовності основної частоти $U_{2(1)i}$ за формулою [4]:

$$U_{2(1)i} = \sqrt{\frac{1}{12} \left[\left(\sqrt{3}U_{AB(1)i} - \sqrt{4U_{BC(1)i}^2 - \left(\frac{U_{BC(1)i}^2 - U_{CA(1)i}^2}{U_{AB(1)i}} \right)^2} \right)^2 + \left(\frac{U_{BC(1)i}^2 - U_{CA(1)i}^2}{U_{AB(1)i}} \right)^2 \right]} \quad (2.1)$$

Розраховуємо коефіцієнт оберненої послідовності K_{2Ui} для будь-якого спостереження за формулою:

$$K_{2Ui} = \frac{U_{2(1)i}}{U_{1(1)i}} \cdot 100 \quad (2.2)$$

Розрахунок $U_{2(1)i}$ будемо здійснювати за наближеною формулою:

$$U_{2(1)i} = 0,62(U_{нб(1)i} - U_{нм(1)i}), \quad (2.3)$$

де $U_{нб(1)i}, U_{нм(1)i}$ – найбільше та найменше діючі значення з трьох міжфазних напруг основної частоти для будь-якого дослідження, В.

Значення коефіцієнта несиметрії напруги оберненої послідовності K_{2U} (%) отримуємо як середнє значення кількості досліджень (N) за певний інтервал часу (T_{vs}) (в нашому випадку 3 с.) та розраховуємо за формулою [4]:

$$K_{2U} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N K_{2Ui}^2}{N}}. \quad (2.4)$$

Для визначення коефіцієнта несиметрії [4] нульової послідовності K_{0Ui} у чотирьох провідних мережах проводимо вимірювання одночасно трьох міжфазних та двох фазних напруг основної частоти $U_{AB(1)i}, U_{BC(1)i}, U_{CA(1)i}, U_{A(1)i}, U_{B(1)i}$ (В).

Розрахунок діючого значення напруги нульової послідовності основної частоти проводимо за формулою:

$$U_{0(1)i} = \frac{1}{6} \sqrt{\left(\frac{U_{BC(1)i}^2 - U_{CA(1)i}^2}{U_{AB(1)i}} - 3 \cdot \frac{U_{B(1)i}^2 - U_{A(1)i}^2}{U_{AB(1)i}} \right)^2 + \left(\sqrt{4U_{BC(1)i}^2 - \left(U_{AB(1)i}^2 - \frac{U_{BC(1)i}^2 - U_{CA(1)i}^2}{U_{AB(1)i}} \right)^2} - 3 \sqrt{4U_{B(1)i}^2 - \left(U_{AB(1)i}^2 - \frac{U_{B(1)i}^2 - U_{A(1)i}^2}{U_{AB(1)i}} \right)^2} \right)^2} \quad (2.5)$$

Використовуючи діюче значення напруги нульової послідовності проводимо розрахунок коефіцієнта нульової послідовності K_{0Ui} для будь-якого дослідження за формулою:

$$K_{0Ui} = \frac{\sqrt{3}U_{0(1)i}}{U_{1(1)i}} \cdot 100 \quad (2.6)$$

Значення коефіцієнта несиметрії напруги нульової послідовності K_{0U} (%) отримуємо як середнє значення кількості досліджень (N) за певний інтервал часу (T_{vs}) (в нашому випадку 3 с.) та розраховуємо за формулою [4]:

$$K_{0U} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N K_{0Ui}^2}{N}} \quad (2.7)$$

Для отримання достовірного результату кількість проведених досліджень у нашому випадку рівна дев'яти.

Як встановлено з ряду джерел за стандартами [4]: «Якість електричної енергії за показниками коефіцієнтів несиметрії напруг оберненої та нульової послідовностей в точках загального приєднання вважають такою, що відповідає

вимогам чинного стандарту, якщо найбільші з усіх значень коефіцієнтів несиметрії, виміряних протягом 24 год, не перевищують граничнодопустимого значення, а осереднені значення цих коефіцієнтів, які відповідають ймовірності 95%, не перевищують допустимого значення».

Допускається визначати відповідність нормам стандарту за сумарною тривалістю часу виходу розрахункових значень цих показників за нормально та граничнодопустимі величини, як і для попередніх показників.

Проведемо розрахунок коефіцієнтів оберненої послідовності при застосуванні змодельованої системи несиметричних складових на лабораторній установці (опис установки приведено в розділі 4).

Дослід 1

$$U_A = 200 \text{ B}; \quad U_B = 190 \text{ B}; \quad U_C = 190 \text{ B};$$

$$U_{AB.1} = \sqrt{3} \cdot U_A = 346,41 \text{ Bs}; \quad U_{BC.1} = \sqrt{3} \cdot U_B = 329,09 \text{ B}; \quad U_{CA.1} = \sqrt{3} \cdot U_C = 329,09 \text{ B};$$

$$U_{AB} = 380 \text{ B}; \quad U_{BC} = U_{AB} = 380 \text{ B}; \quad U_{CA} = U_{AB} = 380 \text{ B}; \quad U_{ном} = 380 \text{ B};$$

Розраховуємо діюче значення напруги оберненої послідовності за формулою 2.1.

$$U_{2.1} = \sqrt{\frac{1}{12} \left[\left(\sqrt{3} \cdot 346,41 - \sqrt{4(329,09)^2 - \left(346,41 + \frac{(329,09)^2 - (329,09)^2}{346,41} \right)^2} \right)^2 + \left(\frac{380^2 - 380^2}{380} \right)^2 \right]} = 11,65 \text{ B}.$$

За (2.2) розраховуємо коефіцієнт оберненої послідовності:

$$K_{2U1} = \frac{U_{2.1}}{U_{ном}} \cdot 100 = \frac{11,65}{380} \cdot 100 = 3,066.$$

Дослід 2

$$U_A = 200 \text{ B}; \quad U_B = 200 \text{ B}; \quad U_C = 190 \text{ B};$$

$$U_{AB.1} = \sqrt{3} \cdot U_A = 346,41 \text{ B}; \quad U_{BC.1} = \sqrt{3} \cdot U_B = 346,41 \text{ B}; \quad U_{CA.1} = \sqrt{3} \cdot U_C = 329,09 \text{ B};$$

Розраховуємо діюче значення напруги оберненої послідовності за формулою 2.1.

$$U_{2.1} = \sqrt{\frac{1}{12} \left[\left(\sqrt{3} \cdot 346,41 - \sqrt{4(346,41)^2 - \left(346,41 + \frac{(346,41)^2 - (329,09)^2}{346,41} \right)^2} \right)^2 + \left(\frac{380^2 - 380^2}{380} \right)^2 \right]} = 6,008 \text{ B.}$$

За (2.2) розраховуємо коефіцієнт оберненої послідовності:

$$K_{2U2} = \frac{U_{2.1}}{U_{ном}} \cdot 100 = \frac{6,008}{380} \cdot 100 = 1,581.$$

Дослід 3

$$U_A = 200 \text{ B}; \quad U_B = 210 \text{ B}; \quad U_C = 190 \text{ B};$$

$$U_{AB.1} = \sqrt{3} \cdot U_A = 346,41 \text{ B}; \quad U_{BC.1} = \sqrt{3} \cdot U_B = 363,731 \text{ B}; \quad U_{CA.1} = \sqrt{3} \cdot U_C = 329,09 \text{ B};$$

Розраховуємо діюче значення напруги оберненої послідовності за формулою 2.1.

$$U_{2.1} = \sqrt{\frac{1}{12} \left[\left(\sqrt{3} \cdot 346,41 - \sqrt{4(363,731)^2 - \left(346,41 + \frac{(363,731)^2 - (329,09)^2}{346,41} \right)^2} \right)^2 + \left(\frac{380^2 - 380^2}{380} \right)^2 \right]} = 0,868 \text{ B.}$$

За (2.2) розраховуємо коефіцієнт оберненої послідовності:

$$K_{2U3} = \frac{U_{2.1}}{U_{ном}} \cdot 100 = \frac{0,868}{380} \cdot 100 = 0,228.$$

Дослід 4

$$U_A = 200 \text{ B}; \quad U_B = 190 \text{ B}; \quad U_C = 200 \text{ B};$$

$$U_{AB.1} = \sqrt{3} \cdot U_A = 346,41 \text{ B}; \quad U_{BC.1} = \sqrt{3} \cdot U_B = 329,09 \text{ B}; \quad U_{CA.1} = \sqrt{3} \cdot U_C = 346,41 \text{ B};$$

Розраховуємо діюче значення напруги оберненої послідовності за формулою 2.1.

$$U_{2.1} = \sqrt{\frac{1}{12} \left[\left(\sqrt{3} \cdot 346,41 - \sqrt{4(329,09)^2 - \left(346,41 + \frac{(329,09)^2 - (346,41)^2}{346,41} \right)^2} \right)^2 + \left(\frac{380^2 - 380^2}{380} \right)^2 \right]} = 6,008 \text{ B.}$$

За (2.2) розраховуємо коефіцієнт оберненої послідовності:

$$K_{2U4} = \frac{U_{2.1}}{U_{ном}} \cdot 100 = \frac{6,008}{380} \cdot 100 = 1,581.$$

Дослід 5

$$U_A = 200 \text{ В}; \quad U_B = 200 \text{ В}; \quad U_C = 200 \text{ В};$$

$$U_{AB,1} = \sqrt{3} \cdot U_A = 346,41 \text{ В}; \quad U_{BC,1} = \sqrt{3} \cdot U_B = 346,41 \text{ В}; \quad U_{CA,1} = \sqrt{3} \cdot U_C = 346,41 \text{ В};$$

Розраховуємо діюче значення напруги оберненої послідовності за формулою 2.1.

$$U_{2,1} = \sqrt{\frac{1}{12} \left[\left(\sqrt{3} \cdot 346,41 - \sqrt{4(346,41)^2 - \left(346,41 + \frac{(346,41)^2 - (346,41)^2}{346,41} \right)^2} \right)^2 + \left(\frac{380^2 - 380^2}{380} \right)^2 \right]} = 0 \text{ В}.$$

За (2.2) розраховуємо коефіцієнт оберненої послідовності:

$$K_{2U5} = \frac{U_{2,1}}{U_{ном}} \cdot 100 = \frac{0}{380} \cdot 100 = 0.$$

Дослід 6

$$U_A = 200 \text{ В}; \quad U_B = 210 \text{ В}; \quad U_C = 200 \text{ В};$$

$$U_{AB,1} = \sqrt{3} \cdot U_A = 346,41 \text{ В}; \quad U_{BC,1} = \sqrt{3} \cdot U_B = 363,731 \text{ В}; \quad U_{CA,1} = \sqrt{3} \cdot U_C = 346,41 \text{ В};$$

Розраховуємо діюче значення напруги оберненої послідовності за формулою 2.1.

$$U_{2,1} = \sqrt{\frac{1}{12} \left[\left(\sqrt{3} \cdot 346,41 - \sqrt{4(363,731)^2 - \left(346,41 + \frac{(363,731)^2 - (346,41)^2}{346,41} \right)^2} \right)^2 + \left(\frac{380^2 - 380^2}{380} \right)^2 \right]} = 5,526 \text{ В}.$$

За (2.2) розраховуємо коефіцієнт оберненої послідовності:

$$K_{2U6} = \frac{U_{2,1}}{U_{ном}} \cdot 100 = \frac{5,526}{380} \cdot 100 = 1,454.$$

Дослід 7

$$U_A = 200 \text{ В}; \quad U_B = 190 \text{ В}; \quad U_C = 210 \text{ В};$$

$$U_{AB,1} = \sqrt{3} \cdot U_A = 346,41 \text{ В}; \quad U_{BC,1} = \sqrt{3} \cdot U_B = 329,09 \text{ В}; \quad U_{CA,1} = \sqrt{3} \cdot U_C = 363,731 \text{ В};$$

Розраховуємо діюче значення напруги оберненої послідовності за формулою 2.1.

$$U_{2.1} = \sqrt{\frac{1}{12} \left[\left(\sqrt{3} \cdot 346,41 - \sqrt{4(329,09)^2 - \left(346,41 + \frac{(329,09)^2 - (363,731)^2}{346,41} \right)^2} \right)^2 + \left(\frac{380^2 - 380^2}{380} \right)^2 \right]} = 0,868 \text{ В.}$$

За (2.2) розраховуємо коефіцієнт оберненої послідовності:

$$K_{2U7} = \frac{U_{2.1}}{U_{НОМ}} \cdot 100 = \frac{0,868}{380} \cdot 100 = 0,228.$$

Дослід 8

$$U_A = 200 \text{ В}; \quad U_B = 200 \text{ В}; \quad U_C = 210 \text{ В};$$

$$U_{AB.1} = \sqrt{3} \cdot U_A = 346,41 \text{ В}; \quad U_{BC.1} = \sqrt{3} \cdot U_B = 346,41 \text{ В}; \quad U_{CA.1} = \sqrt{3} \cdot U_C = 363,731 \text{ В};$$

Розраховуємо діюче значення напруги оберненої послідовності за формулою 2.1.

$$U_{2.1} = \sqrt{\frac{1}{12} \left[\left(\sqrt{3} \cdot 346,41 - \sqrt{4(346,41)^2 - \left(346,41 + \frac{(346,41)^2 - (363,731)^2}{346,41} \right)^2} \right)^2 + \left(\frac{380^2 - 380^2}{380} \right)^2 \right]} = 5,526 \text{ В.}$$

За (2.2) розраховуємо коефіцієнт оберненої послідовності:

$$K_{2U8} = \frac{U_{2.1}}{U_{НОМ}} \cdot 100 = \frac{5,526}{380} \cdot 100 = 1,454.$$

Дослід 9

$$U_A = 200 \text{ В}; \quad U_B = 210 \text{ В}; \quad U_C = 210 \text{ В};$$

$$U_{AB.1} = \sqrt{3} \cdot U_A = 346,41 \text{ В}; \quad U_{BC.1} = \sqrt{3} \cdot U_B = 363,731 \text{ В}; \quad U_{CA.1} = \sqrt{3} \cdot U_C = 363,731 \text{ В};$$

Розраховуємо діюче значення напруги оберненої послідовності за формулою 2.1.

$$U_{2.1} = \sqrt{\frac{1}{12} \left[\left(\sqrt{3} \cdot 346,41 - \sqrt{4(361,731)^2 - \left(346,41 + \frac{(361,731)^2 - (363,731)^2}{346,41} \right)^2} \right)^2 + \left(\frac{380^2 - 380^2}{380} \right)^2 \right]} = 11,457 \text{ В.}$$

За (2.2) розраховуємо коефіцієнт оберненої послідовності:

$$K_{2U9} = \frac{U_{2.1}}{U_{ном}} \cdot 100 = \frac{11,457}{380} \cdot 100 = 3,015.$$

За формулою (2.4) проведемо розрахунок значення коефіцієнта несиметрії напруги оберненої послідовності для дослідження змодельованого процесу несиметричних режимів:

$$K_{2U} = \sqrt{\frac{(3,066 + 1,581 + 0,238 + 1,581 + 0 + 1,454 + 0,228 + 1,454 + 3,015)^2}{9}} = 1,758.$$

Проведені розрахунки показали, що прийнята схема моделювання несиметрії трифазної напруги для проведення досліджень роботи асинхронного двигуна за коефіцієнтом оберненої послідовності не перевищує нормально допустимого значення в точках загального приєднання до електричних мереж 0,38 кВ, яке становить 2%.

Проведемо розрахунок коефіцієнтів нульової послідовності при застосуванні змодельованої системи несиметричних складових на лабораторній установці (опис установки приведено в розділі 4).

Дослід 1

$$U_A = 200 \text{ В}; \quad U_B = 190 \text{ В}; \quad U_C = 190 \text{ В};$$

$$U_{AB.1} = \sqrt{3} \cdot U_A = 346,41 \text{ В}; \quad U_{BC.1} = \sqrt{3} \cdot U_B = 329,09 \text{ В}; \quad U_{CA.1} = \sqrt{3} \cdot U_C = 329,09 \text{ В};$$

$$U_{AB} = 380 \text{ В}; \quad U_{BC} = U_{AB} = 380 \text{ В}; \quad U_{CA} = U_{AB} = 380 \text{ В}; \quad U_{ном} = 380 \text{ В};$$

Розраховуємо діюче значення напруги оберненої послідовності за формулою 2.5.

$$U_{0.1} = \frac{1}{6} \sqrt{\left(\frac{(329,09)^2 - (329,09)^2}{346,41} - 3 \cdot \frac{(190)^2 - (200)^2}{346,41} \right)^2 + \left(\sqrt{4 \cdot (329,09)^2 - \left((346,41)^2 - \frac{(329,09)^2 - (329,09)^2}{346,41} \right)^2} - 3 \sqrt{4 \cdot (329,09)^2 - \left((346,41)^2 - \frac{(329,09)^2 - (329,09)^2}{346,41} \right)^2} \right)^2} = 0,216$$

За (2.5) розраховуємо коефіцієнт нульової послідовності:

$$K_{0U1} = \frac{U_{0.1}}{U_{ном}} \cdot 100 = \frac{0,216}{380} \cdot 100 = 0,098.$$

Дослід 2

$$U_A = 200 B; \quad U_B = 200 B; \quad U_C = 190 B;$$

$$U_{AB.1} = \sqrt{3} \cdot U_A = 346,41 B; \quad U_{BC.1} = \sqrt{3} \cdot U_B = 346,41 B; \quad U_{CA.1} = \sqrt{3} \cdot U_C = 329,09 B;$$

Розраховуємо діюче значення напруги оберненої послідовності за формулою 2.5.

$$U_{0.1} = \frac{1}{6} \sqrt{\left(\frac{(346,41)^2 - (329,09)^2}{346,41} - 3 \cdot \frac{(200)^2 - (200)^2}{346,41} \right)^2 + \left(\sqrt{4 \cdot (346,41)^2 - \left((346,41)^2 - \frac{(346,41)^2 - (329,09)^2}{346,41} \right)^2} - 3 \sqrt{4 \cdot (346,41)^2 - \left((346,41)^2 - \frac{(346,41)^2 - (329,09)^2}{346,41} \right)^2} \right)^2} = 0,225$$

За (2.5) розраховуємо коефіцієнт нульової послідовності:

$$K_{0U2} = \frac{U_{0.1}}{U_{ном}} \cdot 100 = \frac{0,225}{380} \cdot 100 = 0,102.$$

Дослід 3

$$U_A = 200 B; \quad U_B = 210 B; \quad U_C = 190 B;$$

$$U_{AB.1} = \sqrt{3} \cdot U_A = 346,41 B; \quad U_{BC.1} = \sqrt{3} \cdot U_B = 363,73 B; \quad U_{CA.1} = \sqrt{3} \cdot U_C = 329,09 B;$$

Розраховуємо діюче значення напруги оберненої послідовності за формулою 2.5.

$$U_{0.1} = \frac{1}{6} \sqrt{\left(\frac{(363,73)^2 - (329,09)^2}{346,41} - 3 \cdot \frac{(210)^2 - (200)^2}{346,41} \right)^2 + \left(\sqrt{4 \cdot (329,09)^2 - \left((363,73)^2 - \frac{(363,73)^2 - (329,09)^2}{346,41} \right)^2} - 3 \sqrt{4 \cdot (363,73)^2 - \left((346,41)^2 - \frac{(363,73)^2 - (329,09)^2}{346,41} \right)^2} \right)^2} = 0,234$$

За (2.5) розраховуємо коефіцієнт нульової послідовності:

$$K_{0U3} = \frac{U_{0.1}}{U_{ном}} \cdot 100 = \frac{0,234}{380} \cdot 100 = 0,101.$$

Дослід 4

$$U_A = 200 B; \quad U_B = 190 B; \quad U_C = 200 B;$$

$$U_{AB.1} = \sqrt{3} \cdot U_A = 346,41 B; \quad U_{BC.1} = \sqrt{3} \cdot U_B = 329,09 B; \quad U_{CA.1} = \sqrt{3} \cdot U_C = 346,41 B;$$

Розраховуємо діюче значення напруги оберненої послідовності за формулою 2.5.

$$U_{0.1} = \frac{1}{6} \sqrt{\left(\frac{(329,09)^2 - (346,41)^2}{346,41} - 3 \cdot \frac{(190)^2 - (200)^2}{346,41} \right)^2 + \left(\sqrt{4 \cdot (329,09)^2 - \left((346,41)^2 - \frac{(329,09)^2 - (346,41)^2}{346,41} \right)^2} - 3 \sqrt{4 \cdot (329,09)^2 - \left((346,41)^2 - \frac{(329,09)^2 - (346,41)^2}{346,41} \right)^2} \right)^2} = 0,218$$

За (2.5) розраховуємо коефіцієнт нульової послідовності:

$$K_{0U4} = \frac{U_{0.1}}{U_{ном}} \cdot 100 = \frac{0,218}{380} \cdot 100 = 0,099.$$

Дослід 5

$$U_A = 200 B; \quad U_B = 200 B; \quad U_C = 200 B;$$

$$U_{AB.1} = \sqrt{3} \cdot U_A = 346,41 B; \quad U_{BC.1} = \sqrt{3} \cdot U_B = 346,41 B; \quad U_{CA.1} = \sqrt{3} \cdot U_C = 346,41 B;$$

Розраховуємо діюче значення напруги оберненої послідовності за формулою 2.5.

$$U_{0.1} = \frac{1}{6} \sqrt{\left(\frac{(346,41)^2 - (346,41)^2}{346,41} - 3 \cdot \frac{(200)^2 - (200)^2}{346,41} \right)^2 + \left(\sqrt{4 \cdot (329,09)^2 - \left((346,41)^2 - \frac{(346,41)^2 - (346,41)^2}{346,41} \right)^2} - 3 \sqrt{4 \cdot (346,41)^2 - \left((346,41)^2 - \frac{(346,41)^2 - (346,41)^2}{346,41} \right)^2} \right)^2} = 0,227$$

За (2.5) розраховуємо коефіцієнт нульової послідовності:

$$K_{0U5} = \frac{U_{0.1}}{U_{ном}} \cdot 100 = \frac{0,227}{380} \cdot 100 = 0,103.$$

Дослід 6

$$U_A = 200 B; \quad U_B = 210 B; \quad U_C = 190 B;$$

$$U_{AB.1} = \sqrt{3} \cdot U_A = 346,41 B; \quad U_{BC.1} = \sqrt{3} \cdot U_B = 363,73 B; \quad U_{CA.1} = \sqrt{3} \cdot U_C = 346,41 B;$$

Розраховуємо діюче значення напруги оберненої послідовності за формулою 2.5.

$$U_{0.1} = \frac{1}{6} \sqrt{\left(\frac{(363,73)^2 - (346,41)^2}{346,41} - 3 \cdot \frac{(210)^2 - (200)^2}{346,41} \right)^2 + \left(\sqrt{4 \cdot (363,73)^2 - \left((346,41)^2 - \frac{(363,73)^2 - (346,41)^2}{346,41} \right)^2} - 3 \sqrt{4 \cdot (363,73)^2 - \left((346,41)^2 - \frac{(363,73)^2 - (346,41)^2}{346,41} \right)^2} \right)^2} = 0,219$$

За (2.5) розраховуємо коефіцієнт нульової послідовності:

$$K_{0U6} = \frac{U_{0.1}}{U_{ном}} \cdot 100 = \frac{0,219}{380} \cdot 100 = 0,099.$$

Дослід 7

$$U_A = 200 B; \quad U_B = 190 B; \quad U_C = 210 B;$$

$$U_{AB.1} = \sqrt{3} \cdot U_A = 346,41 B; \quad U_{BC.1} = \sqrt{3} \cdot U_B = 329,09 B; \quad U_{CA.1} = \sqrt{3} \cdot U_C = 363,73 B;$$

Розраховуємо діюче значення напруги оберненої послідовності за формулою 2.5.

$$U_{0.1} = \frac{1}{6} \sqrt{\left(\frac{(329,09)^2 - (363,73)^2}{346,41} - 3 \cdot \frac{(190)^2 - (200)^2}{346,41} \right)^2 + \left(\sqrt{4 \cdot (329,09)^2 - \left((346,41)^2 - \frac{(329,09)^2 - (363,73)^2}{346,41} \right)^2} - 3 \sqrt{4 \cdot (329,09)^2 - \left((346,41)^2 - \frac{(329,09)^2 - (363,73)^2}{346,41} \right)^2} \right)^2} = 0,219$$

За (2.5) розраховуємо коефіцієнт нульової послідовності:

$$K_{0U7} = \frac{U_{0.1}}{U_{ном}} \cdot 100 = \frac{0,219}{380} \cdot 100 = 0,099.$$

Дослід 8

$$U_A = 200 \text{ B}; \quad U_B = 200 \text{ B}; \quad U_C = 210 \text{ B};$$

$$U_{AB.1} = \sqrt{3} \cdot U_A = 346,41 \text{ B}; \quad U_{BC.1} = \sqrt{3} \cdot U_B = 346,41 \text{ B}; \quad U_{CA.1} = \sqrt{3} \cdot U_C = 363,73 \text{ B};$$

Розраховуємо діюче значення напруги оберненої послідовності за формулою 2.5.

$$U_{0.1} = \frac{1}{6} \sqrt{\left(\frac{(346,41)^2 - (363,73)^2}{346,41} - 3 \cdot \frac{(200)^2 - (200)^2}{346,41} \right)^2 + \left(\sqrt{4 \cdot (346,41)^2 - \left((346,41)^2 - \frac{(346,41)^2 - (363,73)^2}{346,41} \right)^2} - 3 \sqrt{4 \cdot (346,41)^2 - \left((346,41)^2 - \frac{(346,41)^2 - (363,73)^2}{346,41} \right)^2} \right)^2} = 0,229$$

За (2.5) розраховуємо коефіцієнт нульової послідовності:

$$K_{0U8} = \frac{U_{0.1}}{U_{ном}} \cdot 100 = \frac{0,229}{380} \cdot 100 = 0,104.$$

Дослід 9

$$U_A = 200 \text{ B}; \quad U_B = 210 \text{ B}; \quad U_C = 210 \text{ B};$$

$$U_{AB.1} = \sqrt{3} \cdot U_A = 346,41 \text{ B}; \quad U_{BC.1} = \sqrt{3} \cdot U_B = 363,73 \text{ B}; \quad U_{CA.1} = \sqrt{3} \cdot U_C = 363,73 \text{ B};$$

Розраховуємо діюче значення напруги оберненої послідовності за формулою 2.5.

$$U_{0.1} = \frac{1}{6} \sqrt{\left(\frac{(363,73)^2 - (363,73)^2}{346,41} - 3 \cdot \frac{(210)^2 - (200)^2}{346,41} \right)^2 + \left(\sqrt{4 \cdot (363,73)^2 - \left((346,41)^2 - \frac{(363,73)^2 - (363,73)^2}{346,41} \right)^2} - 3 \sqrt{4 \cdot (363,73)^2 - \left((346,41)^2 - \frac{(363,73)^2 - (363,73)^2}{346,41} \right)^2} \right)^2} = 0,239$$

За (2.5) розраховуємо коефіцієнт нульової послідовності:

$$K_{0U9} = \frac{U_{0.1}}{U_{ном}} \cdot 100 = \frac{0,239}{380} \cdot 100 = 0,109.$$

За формулою (2.7) проведемо розрахунок значення коефіцієнта несиметрії напруги нульової послідовності для дослідження змодельованого процесу несиметричних режимів:

$$K_{ov} = \sqrt{\frac{(0,098 + 0,102 + 0,106 + 0,099 + 0,103 + 0,108 + 0,099 + 0,104 + 0,109)^2}{9}} = 0,103.$$

Проведені розрахунки показали, що прийнята схема моделювання несиметрії трифазної напруги для проведення досліджень роботи асинхронного двигуна за коефіцієнтом нульової послідовності не перевищує нормально допустимого значення в точках загального приєднання до електричних мереж 0,38 кВ, яке становить 2%.

Виходячи з проведеного моделювання запропоновано схема створення несиметричних режимів для проведення досліджень представлена на рис.2.1.

Таблиця 2.1 – Схема створення несиметричних режимів для проведення досліджень

<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>	U_a	U_b	U_c
0	-10	-10	200	190	190
0	0	-10	200	200	190
0	+10	-10	200	210	190
0	-10	0	200	190	200
0	0	0	200	200	200
0	+10	0	200	210	200
0	-10	+10	200	190	210
0	0	+10	200	200	210
0	+10	+10	200	210	210

Як видно з таблиці 2.1 умови симетрії напруги трифазної мережі для проведення досліджень будуть задаватися зміною напруги фаз *B* і *C*.

На практиці, для створення несиметрії напруги мережі (опис установки в розділі 4) застосовуємо 2-ва однофазні ЛАТРа, які встановлені в фази *B* та *C*.

2.2 Висновки до другого розділу

Проведені розрахунки для створення несиметрії трифазної мережі щодо проведення досліджень роботи асинхронного двигуна на основі значень коефіцієнтів оберненої та нульової послідовностей показали:

– прийнята схема моделювання несиметрії трифазної напруги для проведення досліджень роботи асинхронного двигуна за коефіцієнтами оберненої та нульової послідовності не перевищує нормально допустимого значення в точках загального приєднання до електричних мереж 0,38 кВ, яке становить 2%.

– умови симетрії напруги трифазної мережі для проведення досліджень будуть задаватися зміною напруг двох фаз: напруги фаз *B* і *C*. Це дозволить моделювати несиметрію напруги мережі наближену до реальних умов експлуатації асинхронного двигуна.

3 ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА

3.1 Аналіз параметрів асинхронного двигуна для проведення досліджень

Як показав аналіз літературних джерел (розділ 1), несиметрія напруги трифазної мережі впливає на енергетичні параметри асинхронного двигуна: споживану активну та реактивну потужності, що призводить до зростання втрат електричної енергії; зниження крутного моменту на валу та, відповідно, значення величини ковзання.

Тому, параметрами вимірювання при проведенні дослідження роботи асинхронного двигуна були:

- активні потужності двигуна за фазами: P_a , P_b , P_c , які вимірюються ватметрами PW_1, PW_2, PW_3 , відповідно;

- реактивні потужності двигуна за фазами: Q_a , Q_b , Q_c , які вимірюються ватметрами PW_1, PW_2, PW_3 , відповідно;

- фазні струми I_a , I_b , I_c , які вимірюються амперметрами, так як вироблена корисна потужність досліджуваного асинхронного двигуна залежить прямо пропорційно від величини фазних струмів на обмотках статора.

Приймаємо, що температура навколишнього середовища незмінна протягом експерименту. При аналізі будови асинхронного двигуна: фазних обмоток, рівномірності зазору, конструкції ротора, приймаємо, що двигун конструктивно симетричний.

- частота обертання двигуна $N_{\text{об}}$ та синхронна частота обертання двигуна $N_{\text{сх}}$ для розрахунку зміни значення величини ковзання як механічного параметра асинхронного двигуна.

Беручи до уваги паспортні дані досліджуваного асинхронного двигуна(тип АМП 90L4У3 потужністю 2,2 кВт) та привідного двигуна (двигун постійного струму ПЗ2М номінальною потужністю 5,3 кВт) величину

номінального моменту на валу асинхронного двигуна будемо визначати за формулою:

$$M_{нАД} = \frac{P_{2нАД}}{\omega_{нАД}},$$

де $P_{2нАД}$ – механічна потужність на валу асинхронного двигуна, Вт;

$\omega_{нАД}$ – номінальна кутова швидкість якоря ДПС, рад/с.,

тобто момент опору, створюваний робочою машиною, дорівнює моменту, що розвивається асинхронним двигуном, оскільки вони з'єднані муфтою.

З урахуванням коефіцієнта завантаження робочої машини, величину моменту, яка розвивається асинхронним двигуном, рівну моменту опору робочої машини, визначимо наступним чином:

$$M_{АД} = \kappa_3 \cdot M_{нАД},$$

де κ_3 – коефіцієнт завантаження асинхронного двигуна.

Для створення моменту опору на валу випробуваного асинхронного двигуна використовуємо двигун постійного струму з незалежним збудженням (в режимі генератора), якірну обмотку якої підключаємо через амперметр до навантажувального реостата.

Для визначення сили струму в якірному ланцюзі двигуна постійного струму (ДПС), яка забезпечує заданий момент опору робочої машини з урахуванням її коефіцієнта завантаження, за паспортними даними ДПС визначаємо номінальний опір якірного ланцюга, номінальний коефіцієнт корисної дії і опору якірної обмотки ДПС за такою схемою [21]:

$$R_n = \frac{U_n}{I_n}; \quad (3.1)$$

$$\eta_n = \frac{1000 \cdot P_{нДПС}}{U_n \cdot I_{ня}}; \quad (3.2)$$

$$R_я = 0,5 \cdot R_n (1 - \eta_n). \quad (3.3)$$

Величину коефіцієнта ЕРС (κ_E) за паспортними даними ДПС знаходимо з рівняння:

$$\kappa_E = \frac{U_n - I_{ня} \cdot R_{я}}{\omega_n} \quad (3.4)$$

Номінальний магнітний потік Φ_n , який створюється обмоткою збудження ДПС при номінальній напрузі, розраховуємо таким чином:

$$\Phi_n = \frac{U_n - I_{ня} \cdot R_{я}}{\kappa_M \cdot \omega_n}, \quad (3.5)$$

де κ_M – коефіцієнт пропорційності між моментом, струмом якоря і магнітних потоком, тобто $\kappa_E = \kappa_M$.

Величину номінального моменту, що розвивається робочої машиною (ДПС), знаходимо із співвідношення:

$$M_{н.рм} = \kappa_M \cdot \Phi_n \cdot I_{ня}. \quad (3.6)$$

З рівняння (3.6) визначаємо силу струму якорної обмотки, при якій забезпечується заданий момент опору робочої машини з урахуванням коефіцієнта її завантаження таким чином:

$$I_{я} = \frac{M_{н.рм} \cdot \kappa_z}{\kappa_M \cdot \Phi_n}. \quad (3.7)$$

Так як навантажувальним пристроєм для досліджуваного асинхронного двигуна є ДПС з незалежним збудженням, то даний пристрій навантаження можна віднести до механізмів з лінійно-зростаючою механічною характеристикою [21]. Отже, нами, надалі, будуть досліджуватися режими роботи асинхронного двигуна при несиметрії напруги для робочої машини з коефіцієнтом, що характеризує зміну моменту опору при зміні швидкості, що дорівнює одиниці ($x = 1$).

3.2 Проведення експериментальних досліджень та аналіз результатів

При виконанні експериментальних досліджень та обробці результатів отримана статистична інформація про вихідний інформаційний параметр – корисна механічна потужність асинхронного двигуна.

Обчислення проводились в програмному середовищі Microsoft Excel для таких параметрів:

1. Повна споживана потужність асинхронного двигуна:

– активна $P = P_a + P_b + P_c$;

– реактивна $Q = \frac{Q_a + Q_b + Q_c}{3}$;

2. Коефіцієнт ковзання двигуна: $S = \left(1 - \frac{N_{\text{об}}}{N_{\text{сх}}}\right) \cdot 100\%$.

Виходячи з умов симетрії двигуна (дані фаз B і C міняються місцями), проведено серію дослідів згідно даних таблиці 2.1. Також розподіляються серії даних по параметру навантаження двигуна: 1% (режим холостого ходу), 72%, 90% від номінального навантаження, 100% (номінальне навантаження).

Характеристика досліджуваного асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором представлена в розділі 4.

В таблицях 3.1 та 3.2 представлені результати вимірювання та розрахунку механічних та електричних параметрів асинхронного двигуна при різних значеннях несиметрії напруги та змінних параметрах навантаження.

Таблиця 3.1 – Результати вимірювання та розрахунку механічних та електричних параметрів асинхронного двигуна при різних значеннях несиметрії напруги

1 дослід	1%(х.х)	72%	90%	100%	2 дослід	1%(х.х)	72%	90%	100%
U_a	200	200	200	200	U_a	200	200	200	200
U_b	190	190	190	190	U_b	200	200	200	200
U_c	190	190	190	190	U_c	190	190	190	190
I_a	2	4,4	5,2	6	I_a	2,4	4,2	5	6
I_b	1	3,6	4,4	5,2	I_b	2	4	4,6	5,6
I_c	2	4	4,8	5,8	I_c	2	3,6	4,4	5,2
$I_{середнє}$	1,666	4	4,8	5,666	$I_{середнє}$	2,1333	3,9333	4,6666	5,6
P_{an}	150	720	900	1050	P_{an}	120	690	840	1020
P_{bn}	60	600	750	900	P_{bn}	120	690	840	990
P_{cn}	0	600	750	900	P_{cn}	0	510	660	810
$\sum P$	210	1920	2400	2850	$\sum P$	240	1890	2340	2820
Q_a	570	660	720	840	Q_a	720	840	900	990
Q_b	420	570	660	750	Q_b	480	540	600	690
Q_c	660	780	900	990	Q_c	540	690	780	900
Q	550	670	760	860	Q	580	690	760	860
f	25,49	23,9	23,4	22,7	f	25,482	24,1	23,6	23,1
$I_{с.а.}$	1,732	4,0133	4,8110	5,676854	$I_{с.а.}$	2,14165	3,941235	4,6733	5,6095
K_u	0,216	0,216	0,216	0,216	K_u	0,225	0,225	0,225	0,225
n	1493,55	1400,3	1371,09	1330,078	n	1493,0	1412,109	1382,813	1353,5
s	0,42968	6,6406	8,59375	11,32813	s	0,4609	5,8593	7,8125	9,7656

3 дослід	1%(х.х)	72%	90%	100%	4 дослід	1%(х.х)	72%	90%	100%
U_a	200	200	200	200	U_a	200	200	200	200
U_b	210	210	210	210	U_b	190	190	190	190
U_c	190	190	190	190	U_c	200	200	200	200
I_a	2,2	4	4,8	5,6	I_a	2	4,2	5,2	6
I_b	2	4,2	5	5,6	I_b	0,8	3,4	4,2	4,8
I_c	1,5	3,2	4	4,8	I_c	2,6	4	4,8	5,6
$I_{середнє}$	1,9	3,8	4,6	5,3333	$I_{середнє}$	1,8	3,8666	4,7333	5,4666
P_{an}	60	570	750	870	P_{an}	180	750	930	1020
P_{bn}	180	720	900	1050	P_{bn}	30	540	690	810
P_{cn}	0	480	660	750	P_{cn}	0	570	720	870
$\sum P$	240	1770	2310	2670	$\sum P$	210	1860	2340	2700
Q_a	750	870	960	1050	Q_a	630	660	720	780
Q_b	570	600	660	720	Q_b	450	510	600	690
Q_c	510	570	690	750	Q_c	720	870	990	1050
Q	610	680	770	840	Q	600	680	770	840
f	25,517	24,23	23,717	23,33	f	25,5	24,3	23,6	23,2
$I_{с.а.}$	1,9226	3,8244	4,62024	5,34665	$I_{с.а.}$	1,949359	3,88158	4,75114	5,4893
K_u	0,234	0,234	0,234	0,234	K_u	0,218	0,218	0,218	0,218
n	1495,1	1419,72	1389,66	1367,0	n	1494,141	1423,82	1382,81	1359,3
s	0,3242	5,35156	7,35546	8,8672	s	0,390625	5,07812	7,8125	9,375

5дослід	1%(х.х)	72%	90%	100%	6дослід	1%(х.х)	72%	90%	100%
<i>Ua</i>	200	200	200	200	<i>Ua</i>	200	200	200	200
<i>Ub</i>	200	200	200	200	<i>Ub</i>	210	210	210	210
<i>Uc</i>	200	200	200	200	<i>Uc</i>	200	200	200	200
<i>Ia</i>	2	4	4,8	5,6	<i>Ia</i>	2	3,8	4,6	5,2
<i>Ib</i>	2	3,6	4,4	5,2	<i>Ib</i>	2	3,8	4,4	5,2
<i>Ic</i>	2	3,8	4,6	5,4	<i>Ic</i>	2	3,6	4,4	5
<i>Ісереднє</i>	2	3,8	4,6	5,4	<i>Ісереднє</i>	2	3,733333	4,466666	5,1333
<i>Pan</i>	120	690	840	990	<i>Pan</i>	90	570	750	870
<i>Pbn</i>	60	600	750	900	<i>Pbn</i>	90	660	810	960
<i>Pcn</i>	30	600	780	900	<i>Pcn</i>	30	540	690	840
ΣP	210	1890	2370	2790	ΣP	210	1770	2250	2670
<i>Qa</i>	600	690	750	840	<i>Qa</i>	660	750	870	930
<i>Qb</i>	570	630	720	810	<i>Qb</i>	600	690	750	780
<i>Qc</i>	660	780	870	960	<i>Qc</i>	600	690	750	840
<i>Q</i>	610	700	780	870	<i>Q</i>	620	710	790	850
<i>f</i>	25,5	24,1	23,5	23,1	<i>f</i>	25,6	24,4	23,8	23,4
<i>Ic.a.</i>	2	3,80350	4,60289	5,4024	<i>Ic.a.</i>	2	3,73452	4,46766	5,13419
<i>Ku</i>	0,227	0,227	0,227	0,227	<i>Ku</i>	0,237	0,237	0,237	0,237
<i>n</i>	1494,141	1412,10	1376,95	1353,5	<i>n</i>	1500	1429,68	1394,53	1371,09
<i>s</i>	0,390625	5,85937	8,20312	9,7656	<i>s</i>	0	4,6875	7,03125	8,5937

7дослід	1%(х.х)	72%	90%	100%	8дослід	1%(х.х)	72%	90%	100%
<i>Ua</i>	200	200	200	200	<i>Ua</i>	200	200	200	200
<i>Ub</i>	190	190	190	190	<i>Ub</i>	200	200	200	200
<i>Uc</i>	210	210	210	210	<i>Uc</i>	210	210	210	210
<i>Ia</i>	2	4,2	5	5,6	<i>Ia</i>	2	4	4,6	5,2
<i>Ib</i>	1	3	3,8	4,4	<i>Ib</i>	2	3,4	4	4,6
<i>Ic</i>	2,4	4,2	5	5,6	<i>Ic</i>	2,4	2,2	5	5,6
<i>Ісереднє</i>	1,8	3,8	4,6	5,2	<i>Ісереднє</i>	2,13333	3,2	4,53333	5,1333
<i>Pan</i>	180	750	900	1020	<i>Pan</i>	120	690	810	930
<i>Pbn</i>	0	480	630	720	<i>Pbn</i>	0	540	690	780
<i>Pcn</i>	30	630	840	930	<i>Pcn</i>	60	660	840	960
ΣP	210	1860	2370	2670	ΣP	180	1890	2340	2670
<i>Qa</i>	540	510	600	660	<i>Qa</i>	570	600	690	720
<i>Qb</i>	510	600	690	750	<i>Qb</i>	600	690	780	870
<i>Qc</i>	810	960	1050	1110	<i>Qc</i>	750	870	930	990
<i>Q</i>	620	690	780	840	<i>Q</i>	640	720	800	860
<i>f</i>	25,5	24,19	23,6	23,4	<i>f</i>	25,5	24,15	23,7	23,9
<i>Ic.a.</i>	1,89385	3,84187	4,6346	5,2306	<i>Ic.a.</i>	2,14165	3,28633	4,55192	5,1497
<i>Ku</i>	0,219	0,219	0,219	0,219	<i>Ku</i>	0,229	0,229	0,229	0,229
<i>n</i>	1494,14	1417,38	1382,81	1371,1	<i>n</i>	1494,14	1415,03	1388,67	1400,4
<i>s</i>	0,39062	5,507813	7,8125	8,5937	<i>s</i>	0,39062	5,66406	7,42187	6,6406

9дослід	1%(х.х)	72%	90%	100%
<i>Ua</i>	200	200	200	200
<i>Ub</i>	210	210	210	210
<i>Uc</i>	210	210	210	210
<i>Ia</i>	2	4,8	4,6	5,2
<i>Ib</i>	2	3,6	4,4	4,8
<i>Ic</i>	2	4,2	4,8	5,4
<i>Iсереднє</i>	2	4,2	4,6	5,133333
<i>Pan</i>	90	540	780	900
<i>Pbn</i>	30	480	750	870
<i>Pcn</i>	90	570	870	960
$\sum P$	210	1590	2400	2730
<i>Qa</i>	630	660	720	780
<i>Qb</i>	690	720	810	900
<i>Qc</i>	690	750	870	900
<i>Q</i>	670	710	800	860
<i>f</i>	25,4	24,4	23,6	23,4
<i>Iс.а.</i>	2	4,228475	4,602898	5,13939
<i>Ku</i>	0,239	0,239	0,239	0,239
<i>n</i>	1488,281	1429,688	1382,813	1371,094
<i>s</i>	0,78125	4,6875	7,8125	8,59375

Таблиця 3.2 – Результати вимірювання та розрахунку механічних та електричних параметрів асинхронного двигуна при різних навантаження

1%	Ku_1	Ku_2	Ku_3	Ku_4	Ku_5	Ku_6	Ku_7	Ku_8	Ku_9
	3,066	1,581	0,228	1,581	0	1,454	0,228	1,454	1,758
<i>Icp</i>	1,732	2,141	1,922	1,949	2	2	1,893	2,141	2
<i>P</i>	210	240	240	210	210	210	210	180	210
<i>Q</i>	550	580	610	600	610	620	620	640	670
<i>n</i>	1493,55	1493,08	1495,13	1494,14	1494,14	1500	1494,14	1494,14	1488,281
<i>s</i>	0,429	0,46	0,324	0,39	0,39	0	0,39	0,39	0,781

72%	Ku_1	Ku_2	Ku_3	Ku_4	Ku_5	Ku_6	Ku_7	Ku_8	Ku_9
	3,066	1,581	0,228	1,581	0	1,454	0,228	1,454	1,758
<i>Icp</i>	4,013	3,941	3,824	3,881	3,803	3,734	3,841	3,286	4,228
<i>P</i>	1920	1890	1770	1860	1890	1770	1860	1890	1590
<i>Q</i>	670	690	680	680	700	710	690	720	710
<i>n</i>	1400,391	1412,11	1419,73	1423,83	1412,11	1429,69	1417,38	1415,04	1429,69
<i>s (%)</i>	6,64	5,859	5,351	5,078	5,859	4,687	5,507	5,664	4,687

90%	Ku_1	Ku_2	Ku_3	Ku_4	Ku_5	Ku_6	Ku_7	Ku_8	Ku_9
	3,066	1,581	0,228	1,581	0	1,454	0,228	1,454	1,758
<i>I_{cp}</i>	4,811	4,673	4,62	4,751	4,602	4,467	4,634	4,551	4,602
<i>P</i>	2400	2340	2310	2340	2370	2250	2370	2340	2400
<i>Q</i>	760	760	770	770	780	790	780	800	800
<i>n</i>	1371,09	1382,81	1389,67	1382,81	1376,95	1394,53	1382,81	1388,67	1382,81
<i>s (%)</i>	8,593	7,812	7,355	7,812	8,203	7,031	7,812	7,421	7,812

100%	Ku_1	Ku_2	Ku_3	Ku_4	Ku_5	Ku_6	Ku_7	Ku_8	Ku_9
	3,066	1,581	0,228	1,581	0	1,454	0,228	1,454	1,758
<i>I_{cp}</i>	5,676	5,609	5,346	5,489	5,402	5,134	5,23	5,149	5,139
<i>P</i>	2850	2820	2670	2700	2790	2670	2670	2670	2730
<i>Q</i>	860	860	840	840	870	850	840	860	860
<i>n</i>	1330,08	1353,52	1366,99	1359,38	1353,52	1371,09	1371,09	1400,39	1371,09
<i>s (%)</i>	11,328	9,675	8,867	9,375	9,765	8,593	8,593	6,64	8,593

Для проведення аналізу впливу несиметрії трифазної мережі на механічні та електричні параметри асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором побудовані графічні залежності представлені на рисунках 3.1-3.5.

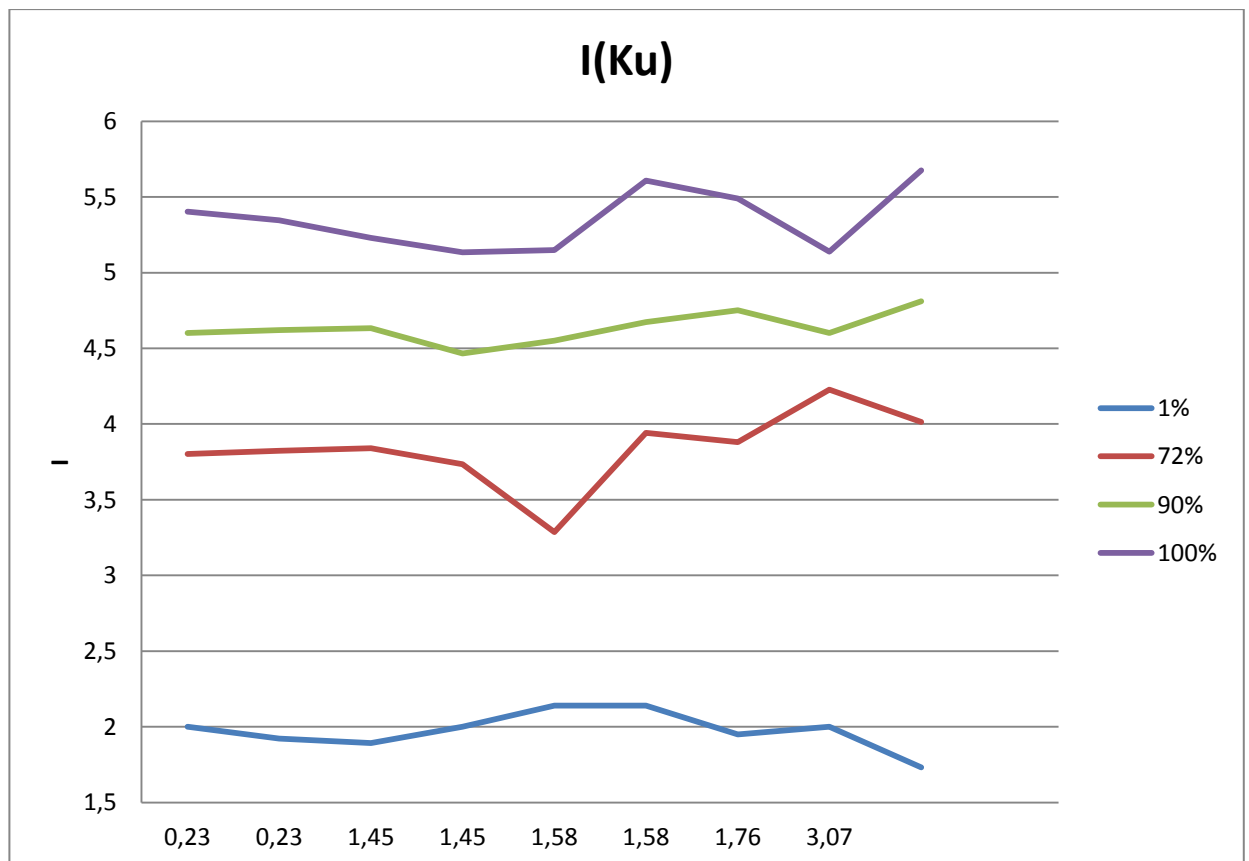


Рисунок 3.1 – Залежність струму двигуна від коефіцієнта несиметрії.

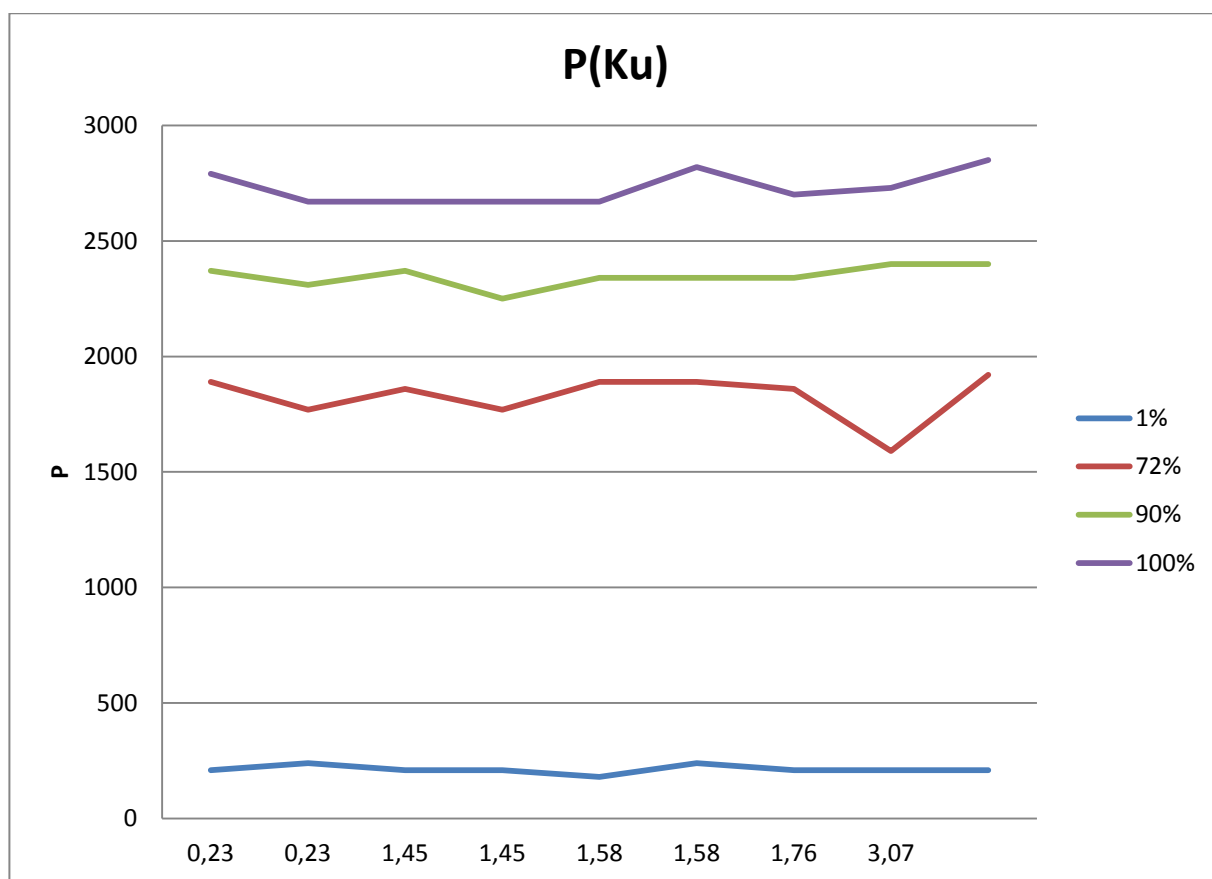


Рисунок 3.2 – Залежність активної потужності двигуна від коефіцієнта несиметрії.

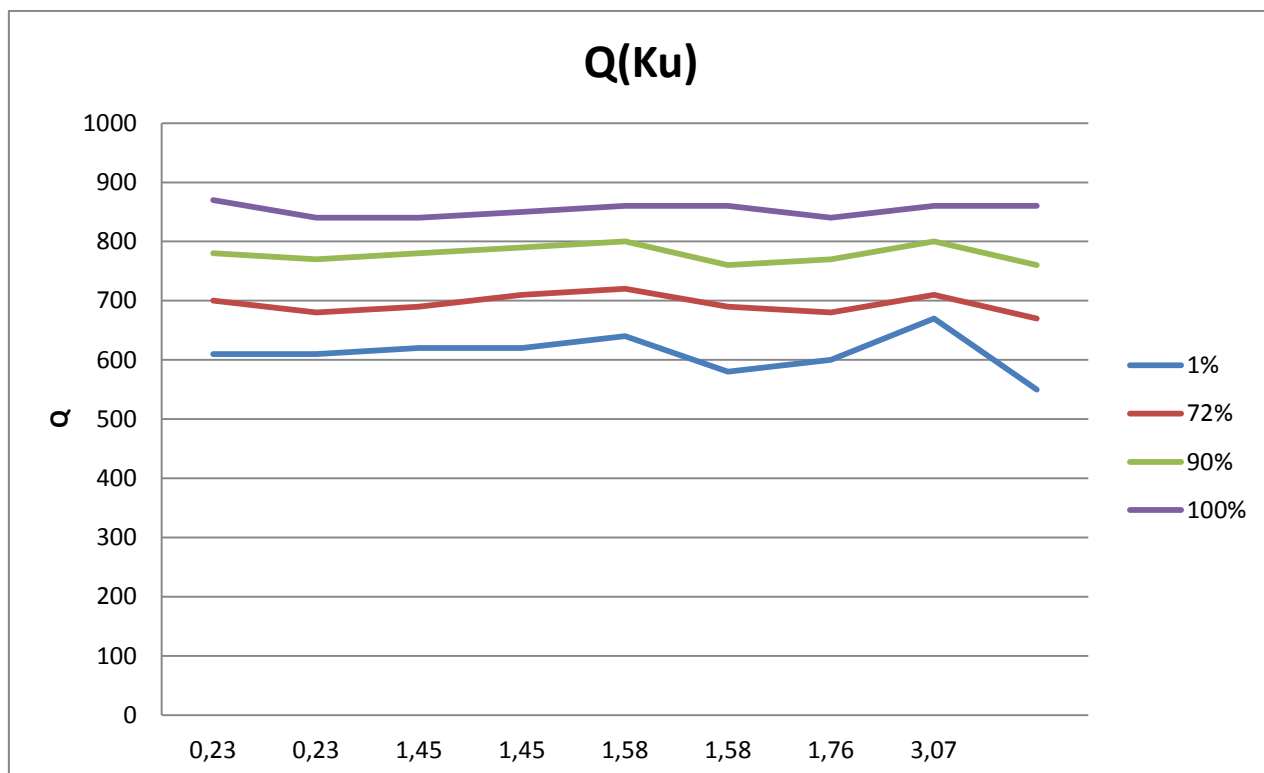


Рисунок 3.3 – Залежність реактивної потужності двигуна від коефіцієнта несиметрії.

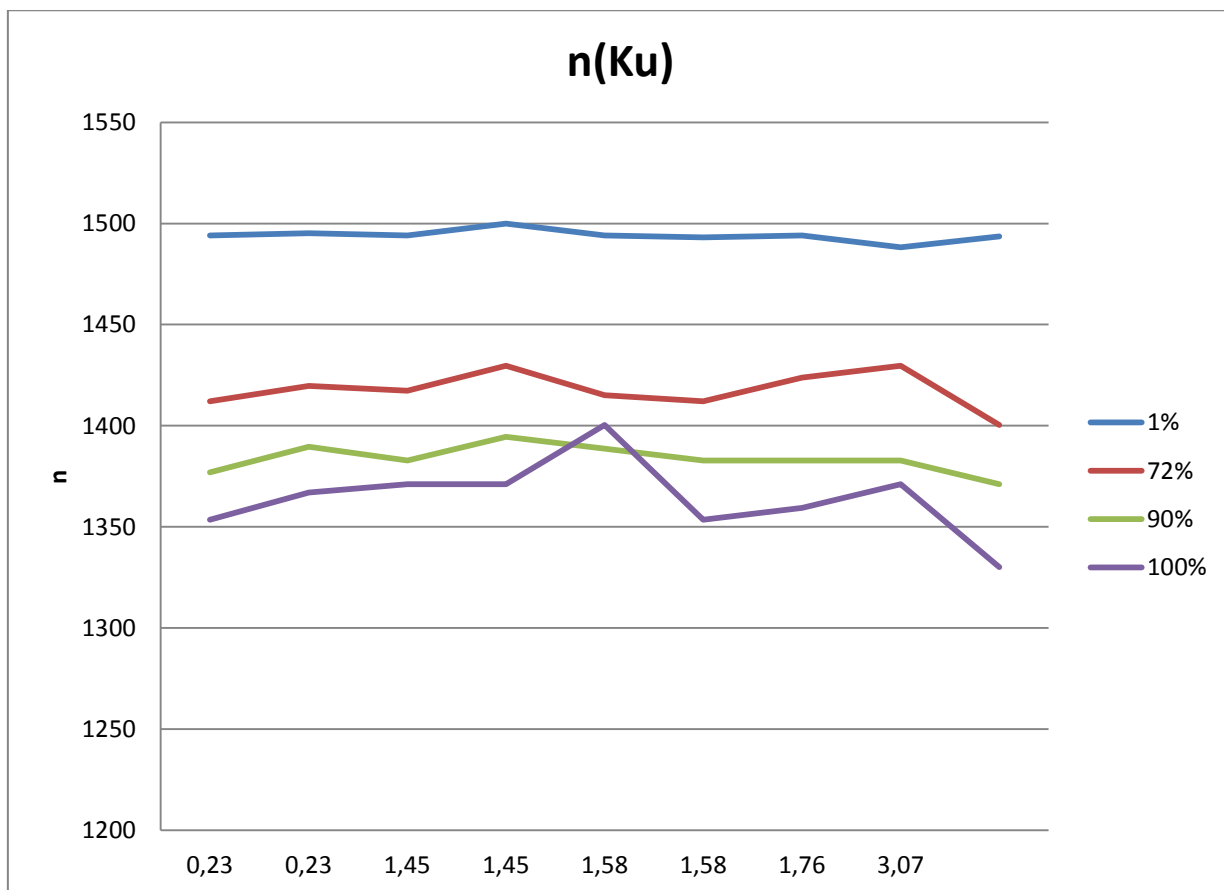


Рисунок 3.4 – Залежність частоти обертання двигуна від коефіцієнта несиметрії.

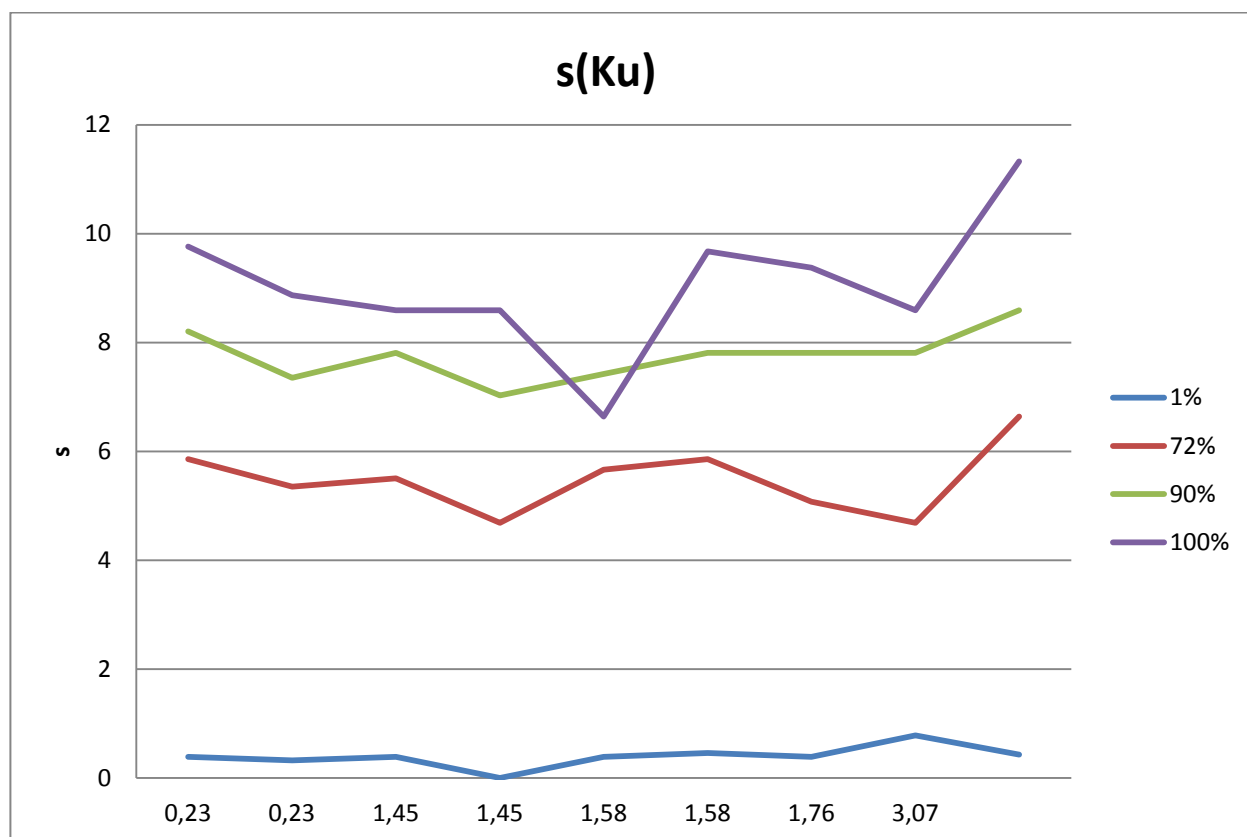


Рисунок 3.5 – Залежність коефіцієнта ковзання двигуна від коефіцієнта несиметрії

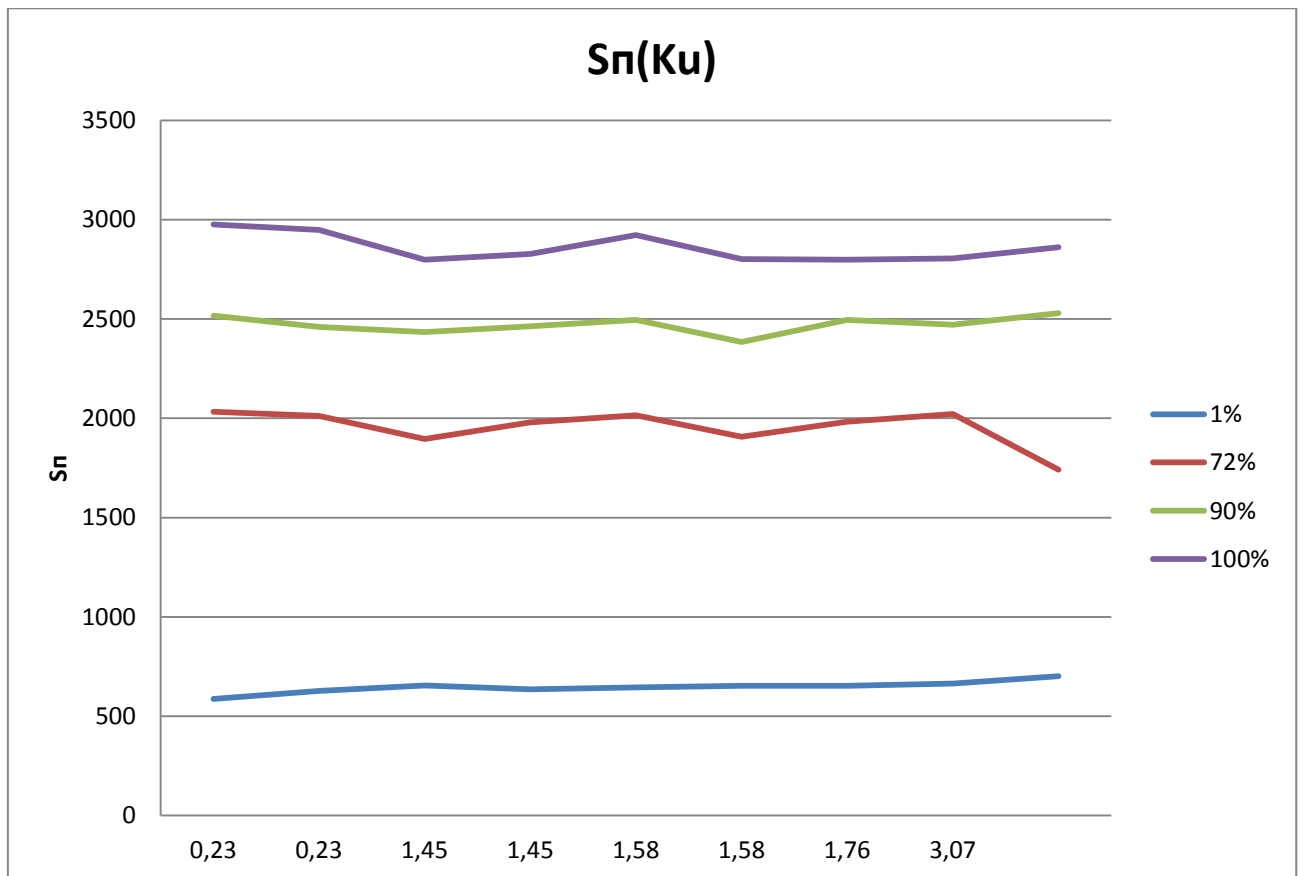


Рисунок 3.6 – Залежність повної потужності двигуна від коефіцієнта несиметрії.

На основі проведених вимірювань, результатів розрахунків та отриманих графічних залежностей встановлено, що споживання електроенергії асинхронним двигуном зростає при пониженому несиметричному живленні.

При несиметрії збільшується загальна кількість реактивної енергії, що нерівномірно розподіляється по фазах.

Експериментально підтверджено, що коефіцієнт ковзання зростає при зменшенні напруги живлення і спадає при її зростанні.

Встановлено, що коефіцієнт ковзання є нестабільним при несиметрії самої напруги живлення. Значення коефіцієнта ковзання обернено-пропорційне до кількості реактивної енергії виробленої електродвигуном.

3.3 Висновки до третього розділу

Досліджено вплив несиметрії напруги живлення трифазної мережі на споживання енергії асинхронним двигуном із короткозамкненим ротором.

На основі аналізу параметрів асинхронного двигуна розроблена методика проведення досліджень.

На основі проведених вимірювань, результатів розрахунків та отриманих графічних залежностей встановлено, що споживання електроенергії асинхронним двигуном зростає при пониженому несиметричному живленні.

При несиметрії збільшується загальна кількість реактивної енергії, що нерівномірно розподіляється по фазах.

Експериментально підтверджено, що коефіцієнт ковзання зростає при зменшенні напруги живлення і спадає при її зростанні.

Встановлено, що коефіцієнт ковзання є нестабільним при несиметрії самої напруги живлення. Значення коефіцієнта ковзання обернено-пропорційне до кількості реактивної енергії виробленої електродвигуном.

Отримані результати свідчать про можливість проводити оптимальний вибір елементів захисту в залежності від експлуатаційних характеристик електродвигуна.

4 ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСЬКА ЧАСТИНА

4.1 Опис експериментальної установки, приладів та обладнання для дослідження впливу несиметрії напруг

Створення експериментальної установки має моделювати ситуації, в яких можуть виявитися досліджувані електродвигуни в реальних умовах експлуатації.

В якості дослідження використовували асинхронний двигун із короткозамкненим ротором 4АМУ90L4 (M_1 на рис. 4.1) із характеристиками:

Потужність, кВт (P_1)	2,2
Частота обертання, об/хв (n_2)	1500
Напруга, В (U)	220/380
Номінальний струм, А (I_1) при напрузі 380 В	5,1
Коефіцієнт корисної дії, % (η)	81,5
Коефіцієнт потужності, ($\cos \varphi$)	0,8
Номінальне значення величини ковзання, s (%)	6,5
Клас ізоляції статора	F
Клас захисту	$IP54$

Принципова електрична схема якої представлена на рис. 4.1. Основні складові елементи: досліджуваний асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором M_1 , який механічно зв'язаний з генератором G_1 (кероване навантаження двигуна), два однофазні 9-ти амперні ЛАТРа, для формування зміщення фазних напруг (фази B та C ; фаза A не регульована). В силове (струмове) коло двигуна включені трансформатори струму ТА1÷ТА3 (клас точності 0,5) для гальванічної розв'язки силового та вимірювального кола, зменшення амплітуди струму через вимірювальні прилади (амперметри, ватметри, шунти) на час пуску двигуна. Напруга з клем двигуна подається на багатопозиційні перемикачі $SA1$ та $SA2$.

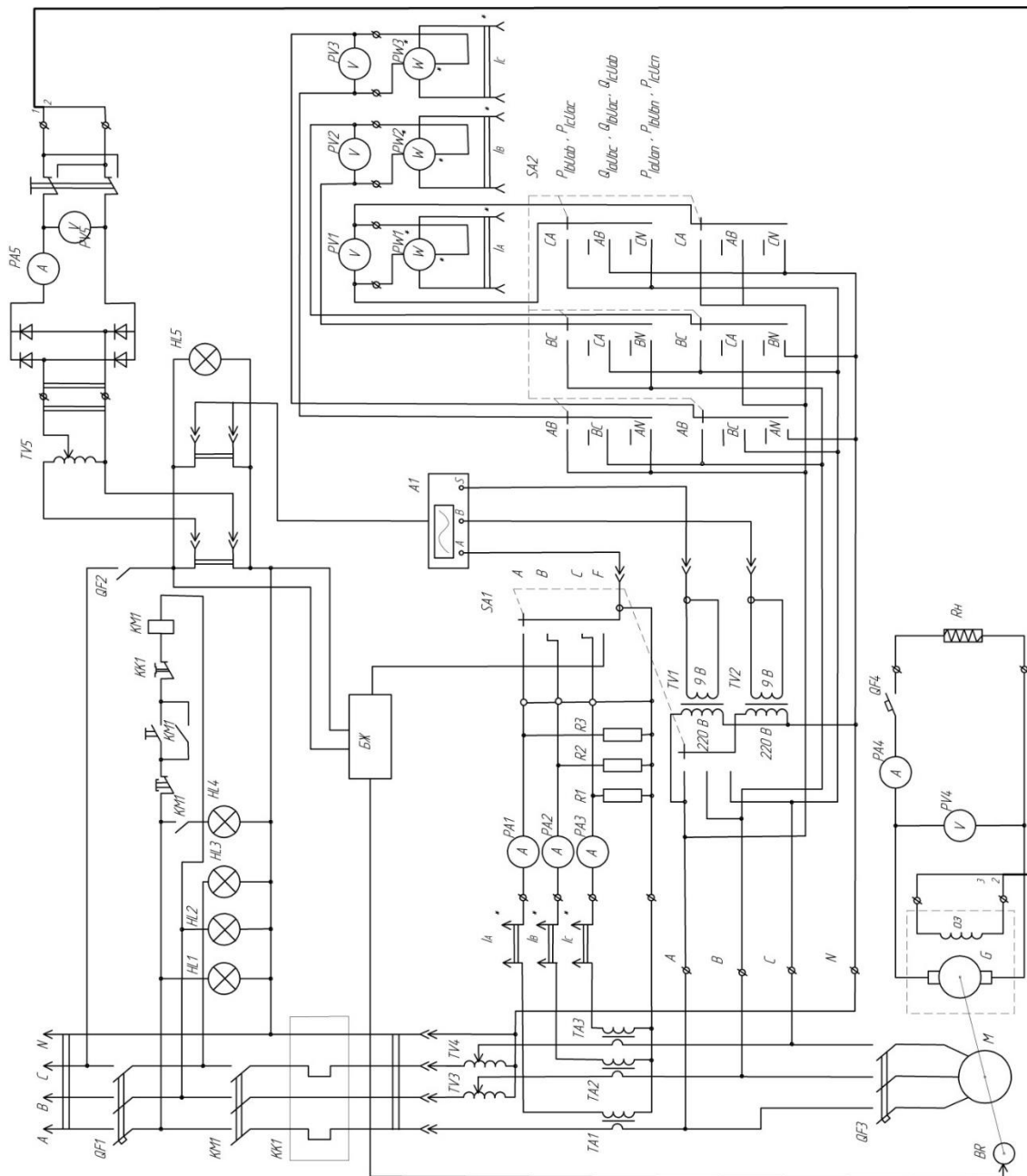


Рисунок 4.1 – Принципова електрична схема експериментальної установки

За допомогою $SA1$ синхронно перемикаються вимірювані фазні напруги для подачі на осцилограф ($U_a, U_{1a}; U_b, U_{1b}; U_c, U_{1c}$, відповідно). Також цей перемикач на канал U_1 подає сигнал від датча частоти обертання двигуна (1024 імп./об).

За допомогою перемикача $SA2$ здійснюється перемикання фазних напруг на вольтметри та ватметри в різні вимірювальні схеми, а саме:

- напруги: U_{ab}, U_{bc}, U_{ca} ; потужності: $P_{IeU_{ab}}, P_{IcU_{ac}}$;

- напруги: U_{ab} , U_{bc} , U_{ca} ; потужності: $Q_{IaU_{ec}}$, $Q_{IbU_{ac}}$, $Q_{IcU_{ab}}$;
- напруги U_{an} , U_{bn} , U_{cn} ; потужність $P_{IaU_{an}}$, $P_{IbU_{bn}}$, $P_{IcU_{cn}}$.

Для пропорційного масштабування і гальванічної розв'язки силового (фазних напруг) та вимірювального кола осцилографа використано трансформатор $TV1$. З метою синхронізації осцилограм використано трансформатор $TV2$, первинне коло якого постійно підключене до фази A . За допомогою ЛТРа $TV5$ через випрямляч $VD1$, перемикач полярності $SA3$ на обмотку збудження генератора подається живлення, напруга і струм контролюються вольтметром $PV5$ та амперметром $PA5$.

Вироблена енергія з генератора через вимикач $QF4$ подається на навантаження Rn (блок реостата з підключенням різних значень опорів), напруга і струм контролюються вольтметром $PV4$ та амперметром $PA4$.

У процесі досліджень проведені вимірювання таких величин:

- фазних струмів статорних обмоток – амперметр приладу $K50$ (клас точності 0,5);
- фазних напруг статорних обмоток – вольтметр приладу $K50$ (клас точності 0,5);
- осцилограм фазних струмів та напруг статорних обмоток – осцилограф;
- активної потужності, споживаної обмотками двигуна – ватметром приладу $K50$ (клас точності 0,5);
- реактивної потужності, споживаної обмотками двигуна – ватметром приладу $K50$ (клас точності 0,5);
- частоти обертання двигуна – осцилографом;

При проведенні експерименту реєструвалися такі величини:

- струми та напруги фазних обмоток статора;
- активна та реактивна потужність фазних обмоток статора;
- осцилограм фазних струмів та напруг статорних обмоток;
- частота обертання валу асинхронного двигуна;
- струми і напруги в обмотках збудження і якоря машини постійного струму.

Навантажувальним пристроєм для досліджуваного асинхронного двигуна служив двигун постійного струму (в режимі генератора) П-32М з незалежним збудженням, в якірній обмотці якого включався навантажувальний реостат.

Загальний вигляд експериментальної установки для дослідження режимів роботи асинхронного двигуна приведено на рис. 4.2. та рис. 4.3.



Рисунок 4.2 – Загальний вигляд експериментальної установки для дослідження режимів роботи асинхронного двигуна



Рисунок 4.3 – Загальний вигляд експериментальної установки для дослідження режимів роботи асинхронного двигуна

4.2 Опис обладнання для дослідження впливу частоти напруги мережі на роботу асинхронного двигуна

В спеціальній частині дипломної роботи згідно завдання необхідно провести дослідження впливу частоти напруги мережі на роботу асинхронного двигуна.

Для проведення досліджень було використано перетворювач частоти (ПЧ) Altivar 71 з трифазним мережевим живленням 200 – 240 В, для двигунів від 0,18 до 15 кВт (ATV 312HpppM3) [22].

Перетворювач Altivar 71 володіє можливістю використання програмного забезпечення Перетворювач Altivar 71 володіє можливістю використання програмного забезпечення SoMove з можливістю адаптації до комунікаційних мереж; застосування інтерфейсу користувача, який полегшує введення в експлуатацію; і прискорює адаптованість до різних застосувань; містить вбудовані комунікаційні протоколи Modbus і CANopen, доступні за допомогою роз'єднувача типу RJ45.

Перетворювач частоти Altivar 71 (рис. 4.4) володіє шістьма дискретними і трьома аналоговими входами, одним дискретним/аналоговим і двома релейними виходами. Функції частотного перетворювача які були використані при дослідженнях:

- захист двигуна та перетворювача;
- лінійні, *S*-, *U*-подібні та індивідуальні криві розгону-гальмування;
- робота в режимі «швидше-повільніше»;
- *PI*-регулятор і завдання для нього;
- автоматичний підхоплення обертання навантаження з пошуком швидкості і повторний запуск;
- збереження конфігурації в пам'яті ПЧ.

Вводити в роботу забезпечення електромагнітної сумісності не передбачалося.

Використання програмного забезпечення по введенню в експлуатацію SoMove дозволило конфігурувати, налагоджувати та налагоджувати привід за допомогою функції осцилографа, а також обслуговувати ПЧ Altivar 71.

Крім цього, програмне забезпечення SoMove, застосовувалося для підключення та роботи з персональним комп'ютером (ПК), призначене для введення в дію наступних пристроїв: плавного запуску і гальмування ATS 22, ATS 48; систем управління двигунами TeSys моделі T.



Рисунок 4.4 – Загальний вигляд Altivar 71.

За допомогою SoMove здійснювалося пряме підключення за допомогою кабелю USB/RJ45 до ПК.

Використання прикладних функцій:

1. Діапазон робочих швидкостей.

Функція використовувалась для того, щоб встановити дві межі частоти, які визначали діапазон швидкості механізму в реальних робочих умовах.

2. Час розгону і гальмування.

Дозволило призначити темпи розгону і гальмування залежно від виду застосування та кінематики механізму.

3. Профіль кривих розгону і гальмування.

Поступове зміна вихідної частоти відповідно із заданою швидкістю за лінійним законом.

4. Автопідстроювання.

Автопідстроювання здійснювалося за допомогою діалогових засобів локального управління, послідовного каналу зв'язку при кожному включенні напруги, при кожній подачі команди запуску та за командою дискретного входу.

5. Покрокова робота (JOG).

Використана робота перетворювача частоти в імпульсному режимі з часом відпрацювання завдання $(0,1с)$, з обмеженою заданою швидкістю та мінімальним часом між двома імпульсами.

4.3 Висновки до четвертого розділу

Проведений аналіз змодельованої експериментальної установки для дослідження впливу несиметрії напруг та зміни частоти напруги на електромеханічні характеристики асинхронного двигуна.

Здійснено аналіз приладів та обладнання для проведення дослідження та описано порядок проведення експерименту.

5 СПЕЦІАЛЬНА ЧАСТИНА

5.1 Аналіз роботи асинхронних двигунів у складі частотного електроприводу при зміні параметрів мережі

Згідно завдання на дипломну роботу в спеціальній частині передбачено провести дослідження впливу зміни частоти мережі на енергетичні параметри асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором.

Згідно з нормативними показниками якості електричної енергії мова йде про допустимі відхилення напруги від нормованих значень таких параметрів: частота, значення і форма напруги, присутність вищих гармонік, що відображається в сучасних вимогах згідно ГОСТ [2-4].

Означені параметри суттєво впливають на асинхронні двигуни. Виходячи з механічної характеристики асинхронного двигуна [21, 23], зміна напруги призводить до зміни обертового моменту на валу та значення величини ковзання і, відповідно, частоти обертання.

З достатньою точністю можна вважати, Крім цього, обертовий момент двигуна пропорційний квадрату напруги, тобто при зниженні напруги зменшується частота обертання ротора двигуна, так як зростає значення величини ковзання. Встановлено, що зниження частоти обертання залежить також від зміни моменту опору та від напруги, що представляється залежністю:

$$n = n_c \cdot \left(1 - k_s \cdot \frac{U_{ном}^2}{U^2} \cdot P_{ном} \right) \quad (5.1)$$

Із 5.1 можна зробити висновок, що при невеликих значеннях коефіцієнта завантаження двигуна (k_s) частота обертання ротора (n) буде більше номінальної частоти обертання (n_c). У цьому випадку зниження напруги мережі не призводять до зменшення продуктивності.

На противагу, робота асинхронного двигуна при номінальному навантаженні за умови пониженої напруги мережі призводить до зменшення

частоти обертання. Як висновок, продуктивність двигунів залежна від частоти обертання двигуна, що вимагає умову підтримування номінальної напруги.

В свою чергу, зниження напруги призводить до погіршення запуску та, відповідно, зниження пускового моменту [2–4].

При проведенні досліджень є важливим встановлення залежності споживаної двигуном активної та реактивної потужностей від напруги на його затискачах.

При зниженні напруги на вході асинхронного двигуна реактивна потужність намагнічування йде на спад (при зниженні напруги на 1% відбувається пониження на 2–3%), зростає струм на статорі двигуна при постійному значенні потужності, що призводить до нагрівання ізоляції та скорочення терміну роботи [19]:

$$T = \frac{T_{ном}}{R} \quad (5.2)$$

де, $T_{ном}$ – термін роботи двигуна за паспортними даними, рік.

Зростання напруги на затискачах асинхронного двигуна призводить до зростання реактивної потужності, особливо при малих значеннях коефіцієнта завантаження, що в свою чергу призводить до росту втрат активної потужності [19, 21].

У випадку роботи асинхронного двигуна з використанням частотного регулювання [21], напруга отримує несинусоїдальну форму, що вимагає при проведенні аналізу за методом накладання здійснювати розкладання сусоїди напруги в гармонійний ряд. В цьому випадку крім основної гармоніки необхідно розглядати гармоніки вищих порядків (непарні гармоніки). Із зростанням номера гармоніки її амплітуда зменшується в k раз, а частота зростає в k раз.

Якщо ротор асинхронного двигуна обертається зі швидкістю $\omega = \omega_1(1 - s)$, то значення величини ковзання по відношенню до поля гармоніки становить [13, 21]:

$$s_k = \frac{k \cdot \omega_1 \cdot m \cdot \omega_1 (1-s)}{k \cdot \omega_1} = m \frac{1}{k} (1-s) \quad (5.3)$$

Як приклад, при роботі асинхронного двигуна при номінальному режимі роботи величина ковзання ротора по відношенню до поля 1-ї гармоніки $s \approx (0.015 \div 0.05)$. Тоді, вважаючи $s \approx 0$, отримуємо:

$$s_k \approx m/k \quad (5.4)$$

Присутність вищих гармонік за напругою може виникнути через зростання електричних втрат в обмотках, що призводить до необхідності зниження потужності двигуна.

Проведений вище аналіз особливостей появи вищих гармонік пояснює структуру побудови сучасних частотних перетворювачів (рис. 5.1): випрямляч, згладжувальний фільтр, інвертор. Випрямляч перетворює енергію змінного струму на енергію змінного струму, фільтр згладжує пульсації вихідної напруги випрямляча, а інвертор здійснює зворотне перетворення, перетворюючи енергію постійного струму на енергію змінного струму з регульованим рівнем напруги та частоти [23].

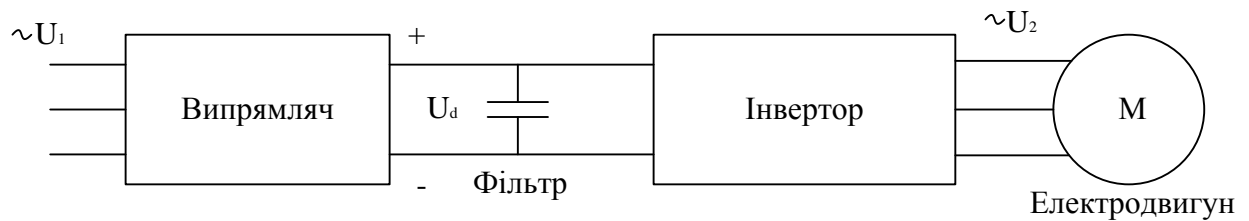


Рисунок 5.1 – Загальна структура перетворювача частоти.

За структурою та принципом роботи розділяють два класи перетворювачів частоти (рис. 5.2): із безпосереднім зв'язком та з проміжною ланкою постійного струму [23].

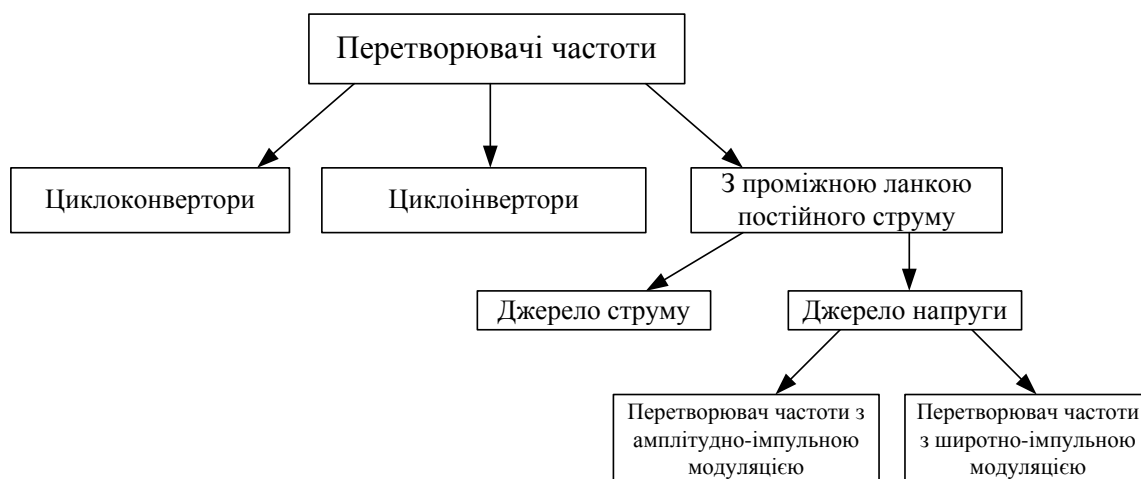


Рисунок 5.2 – Класифікація перетворювачів частоти.

Як показав аналіз джерел [13, 21, 23], найбільшого застосування набули частотні перетворювачі з вираженою проміжною ланкою постійного струму. У перетворювачах цього класу використовується подвійне перетворення електричної енергії: вхідна синусоїдна напруга з постійною амплітудою і частотою випрямляється у випрямлячі, фільтрується фільтром, згладжується, а потім знову перетворюється інвертором в змінну напругу змінної частоти. Як недолік, подвійне перетворення призводить до зниження коефіцієнта корисної дії асинхронного двигуна. Як позитивний момент: забезпечення плавного запуску, зупинки двигуна, та швидке формування реверсування.

При роботі частотного перетворювача використовують такі види імпульсної модуляції [23]: амплітудно-імпульсна (АІМ); широтно-імпульсна (ШІМ); тимчасову імпульсна модуляція (ТІМ).

Найбільш розповсюджена ШІМ-модуляція, де, відповідність параметрів імпульсів значенню модулюючого сигналу формують за [13, 23]:

- співвідношенням періодів модулюючого і несучого сигналів;
- співвідношенням знаків функції вихідного імпульсного сигналу;
- значеннями рівня вихідного імпульсного сигналу на напівперіоді несучої частоти.

За видом вхідного модулюючого сигналу: синусоїдальна, трапецеїдальна і «оптимальна».

За положенням змінних фронтів імпульсів на періоді несучої частоти: одностороння, двостороння.

За ступенем відповідності тривалості імпульсів значенням функції побудови – ШІМ першого, другого, третього та четвертого роду.

У нашому випадку при проведенні досліджень використовуємо перетворювач частоти першого роду.

Для проведення досліджень необхідно здійснити аналіз енергетичних показників при роботі електроприводу.

Враховуючи, що електропривод складається з електродвигуна, передавального і перетворювального пристроїв, то ККД електроприводу в цілому визначають як добуток ККД цих пристроїв:

$$\eta = \eta_{\text{дв}} \cdot \eta_{\text{пер}} \cdot \eta_{\text{перетв}} \quad (5.5)$$

Як показав аналіз [13, 19, 23], із зростанням потужності номінальний коефіцієнт корисної дії також зростає та може досягати значення 0,97. Коефіцієнт корисної дії електродвигунів обернено пропорційно залежить від навантаження на валу двигуна і для проведення аналізу варто використовувати метод поділу втрат ΔP на постійні (K) та змінні (V).

$$\Delta P = K + V \quad (5.6)$$

Встановлено [19, 21], що для нерегульованих за швидкістю двигунів постійні втрати складаються з: втрат в сталі; механічних втрат; додаткових втрат. Змінні втрати прямо пропорційно залежать від значення струму в обмотках.

Аналіз кривої залежності коефіцієнта корисної дії від навантаження показав, що експлуатаційні характеристики двигуна напряму залежать від встановленої потужності двигуна. Встановлено, що завищення потужності електроприводу призводить до суттєвого зростання втрати електричної енергії [13, 23]. Також суттєвим недоліком є присутність великої складової реактивної потужності при недовантаженні асинхронного двигуна, що призводить до зниження коефіцієнта потужності.

5.2 Проведення експериментальних досліджень та аналіз результатів

Отримані результати вимірювань зводяться в таблиці для їх систематизації та аналізу в програмному середовищі Microsoft Excel. Виходячи з умов симетрії двигуна, проведемо серію дослідів.

Обчислення проводились в програмному середовищі Microsoft Excel для таких параметрів:

1. Повна споживана потужність асинхронного двигуна:

$$- \text{активна } P = P_a + P_b + P_c;$$

$$- \text{реактивна } Q = \frac{Q_a + Q_b + Q_c}{3};$$

2. Коефіцієнт ковзання двигуна: $S = \left(1 - \frac{N_{\text{дв}}}{N_{\text{сх}}}\right) \cdot 100\%$.

В таблиці 5.1 представлені результати вимірювання та розрахунку параметрів асинхронного двигуна при різних значеннях частоти напруги та змінних параметрах навантаження.

Таблиця 5.1 – Результати вимірювання та розрахунку параметрів асинхронного двигуна при різних значеннях частоти напруги та змінних параметрах навантаження.

1%	$f1$	$f2$	$f3$	$f4$	$f5$
	49,6	49,8	50	50,2	50,4
$I_{\text{дв}}(\text{А})$	2,4	2,4	2,3	2,3	2,3
P (Вт)	210	210	210	210	210
Q (ВАр)	1800	2040	1680	1740	1680
n (об/хв)	2140,02	2294,063	2164,102	2283,96	2164,10
s	-42,668	-52,9375	-44,2735	-52,264	-44,273

72%	$f1$	$f2$	$f3$	$f4$	$f5$
	49,6	49,8	50	50,2	50,4
$I_{\partial\partial}(A)$	3,6	3,5	3,4	3,6	3,4
P (Вт)	1230	1170	1170	1020	1170
Q (ВАр)	1650	1620	1590	1620	1590
n (об/хв)	2074,043	2071,055	2095,84	2209,98	2095,84
s	-38,2695	-38,0703	-39,722	-47,332	-39,722

90%	$f1$	$f2$	$f3$	$f4$	$f5$
	49,6	49,8	50	50,2	50,4
$I_{\partial\partial}(A)$	4,3	4,3	4,3	4,3	4,3
P (Вт)	1560	1560	1560	1560	1560
Q (ВАр)	1740	1710	1680	1710	1680
n (об/хв)	2187,305	2181,035	2204,004	2060,39	2204,0
s	-45,8203	-45,4023	-46,9336	-37,359	-46,933

100%	$f1$	$f2$	$f3$	$f4$	$f5$
	49,6	49,8	50	50,2	50,4
$I_{\partial\partial}(A)$	5	4,9	4,8	4,8	4,8
P (Вт)	1740	1800	1680	1770	1680
Q (ВАр)	1860	1830	1770	2040	1770
n (об/хв)	2039,824	2036,191	2185,605	2053,71	2185,6
s	-35,9883	-35,7461	-45,707	-36,914	-45,7

Для проведення аналізу впливу частоти напруги трифазної мережі на механічні та електричні параметри асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором побудовані графічні залежності представлені на рисунках 5.1-5.5.

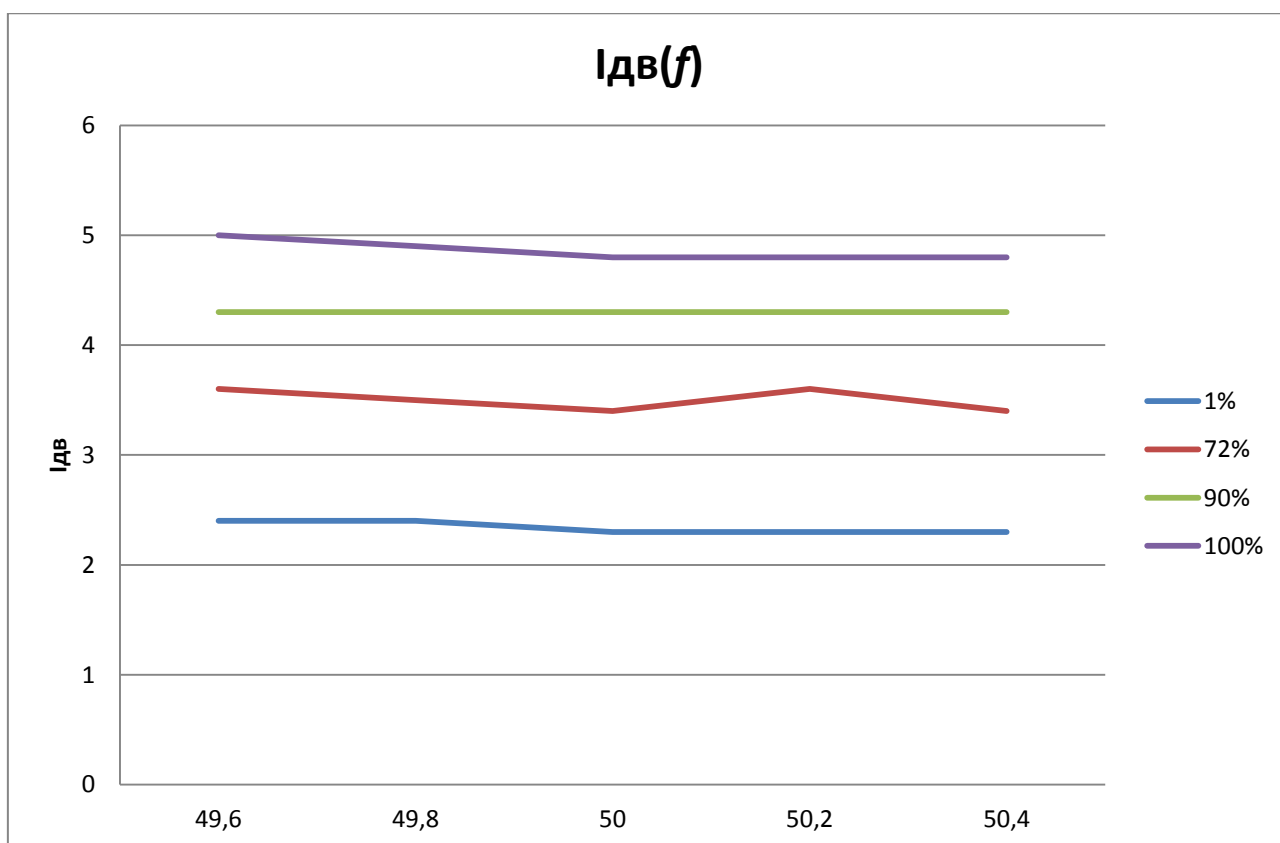


Рисунок 5.1 – Залежність струму від частоти напруги живлення при різних навантаженнях

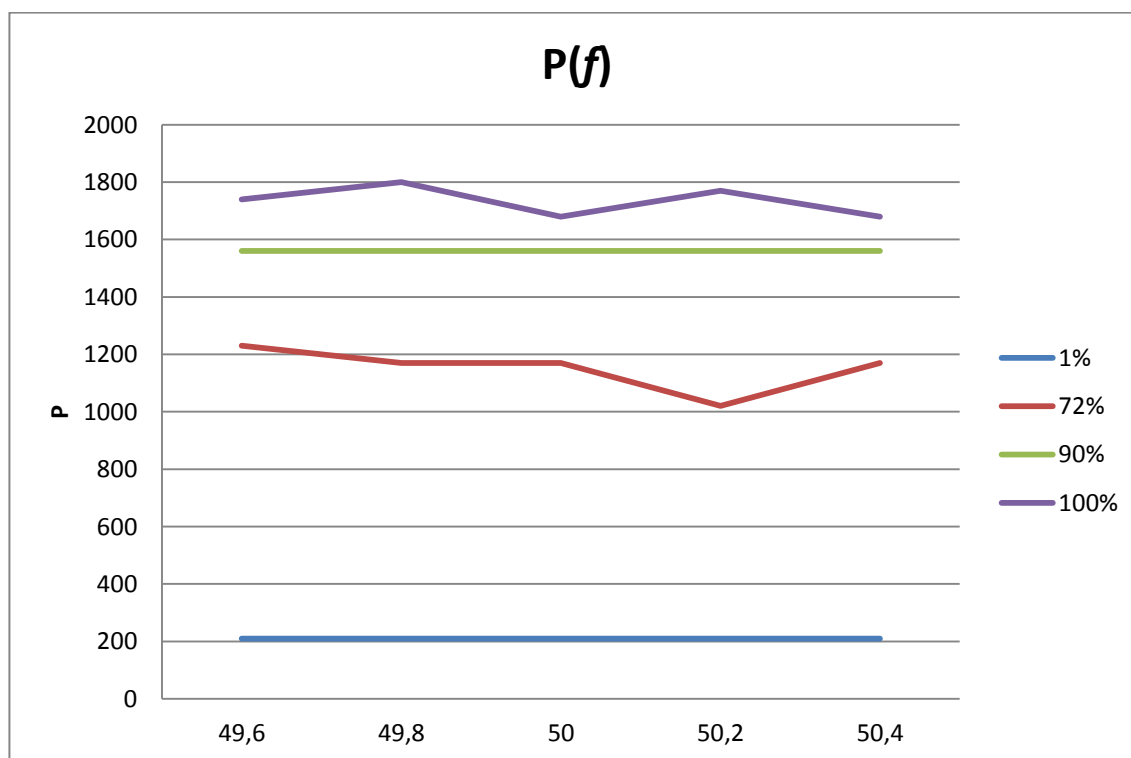


Рисунок 5.2 – Залежність активної потужності від частоти напруги живлення при різних навантаженнях

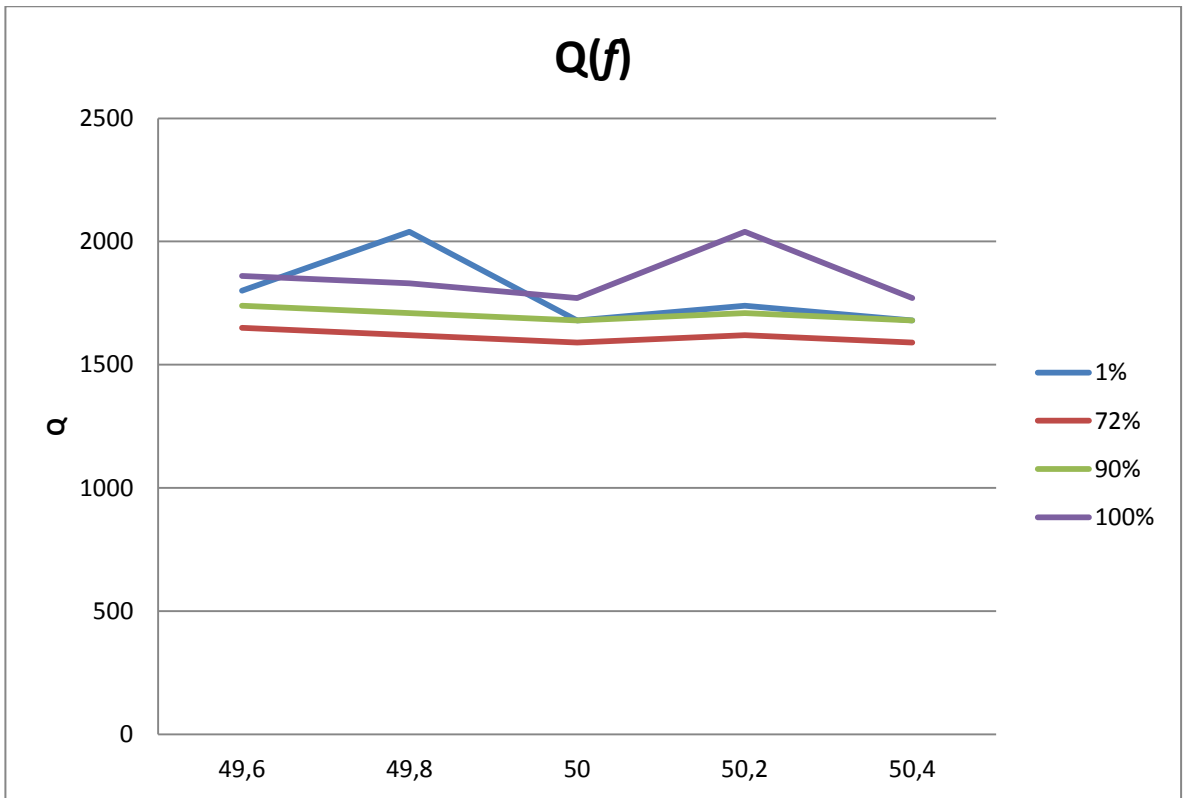


Рисунок 5.3 – Залежність реактивної потужності від частоти напруги живлення при різних навантаженнях

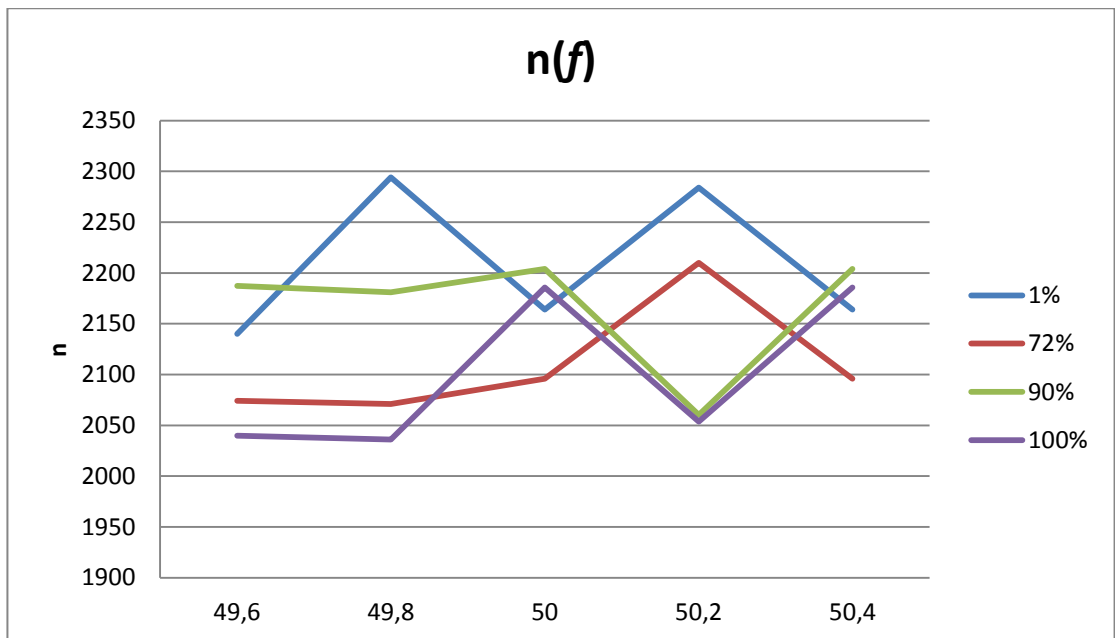


Рисунок 5.4 – Залежність швидкості обертання від частоти напруги живлення при різних навантаженнях

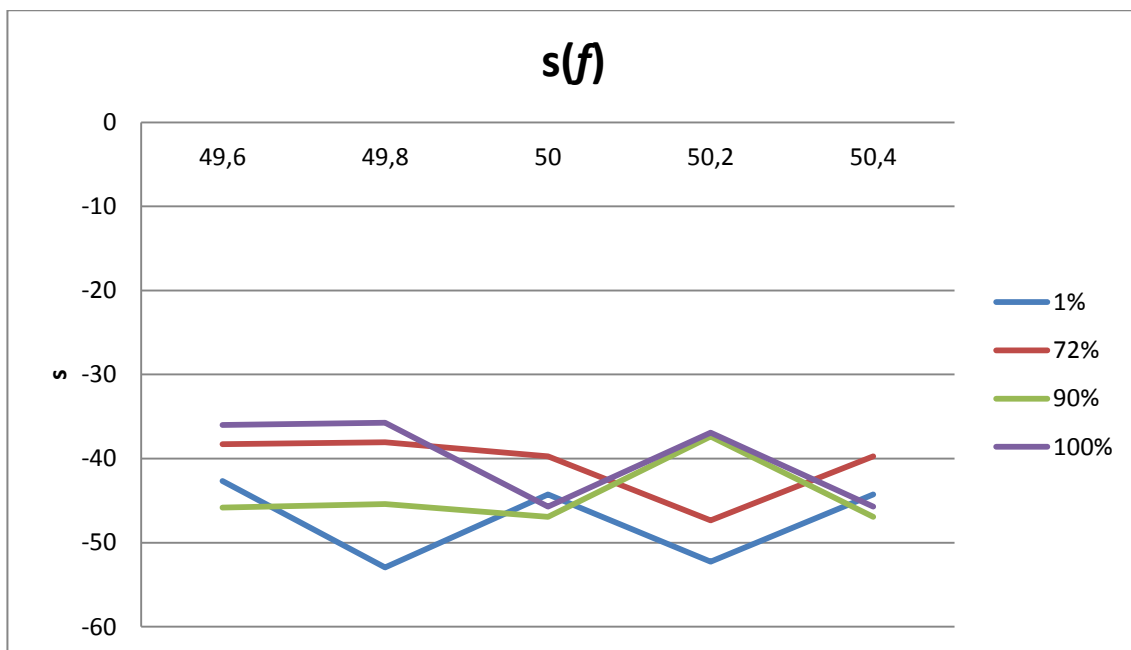


Рисунок 5.5 – Залежність значення величини ковзання від частоти напруги живлення при різних навантаженнях

5.3 Висновки до розділу

Проведений аналіз роботи асинхронних двигунів у складі частотного електроприводу при зміні параметрів та досліджено вплив частоти напруги живлення на робочі характеристики асинхронного двигуна.

Встановлено, що при збільшенні частоти напруги живлення до граничнодопустимих меж активні втрати в двигуні зменшують. При зростанні частоти напруги живлення зменшується активна потужність асинхронного двигуна.

6 ОБГРУНТУВАННЯ ЕКОНОМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ

Проблема зменшення втрат та підвищення якості електричної енергії дуже гостро стоїть у розподільних мережах 0,38 / 0,22 кВ [4].

Традиційні методи визначення втрат електроенергії базувались на визначенні величини струму навантажень і опору елемента мережі, наякому цей струм протікає, при цьому, як правило враховується, що показники якості електричної енергії знаходяться у встановлених нормативних стандартах [19,23].

В цей же час відхилення показників якості електричної енергії від нормованих значень практично завжди призводить до додаткових втрат електроенергії, як в елементах мережі, так і в електричному обладнанні електротехнічних об'єктів [7-10].

Володіючи значеннями величин та діапазонами відхилення показників якості електричної енергії від норм дозволить уточнювати рівень втрат і застосувати методи та заходи для їх зменшення.

Основні літературні джерела виділяють такі основні показники якості електричної енергії, погіршення яких призводить до різкого зростання втрат в мережах 0,38 / 0,22 кВ [4]: встановлене відхилення напруги, коефіцієнт спотворення синусоїдальної кривої напруги, коефіцієнт n -ої складової гармоніки, коефіцієнти несиметрії напруги за нульовою та зворотною послідовностями.

Крім збільшення втрат електроенергії, низька якість електричної енергії робить істотний вплив на техніко-економічні характеристики елементів мережі і електроприймачів [4, 5]. При погіршенні якості напруги, відбувається зниження експлуатаційної надійності електродвигунів, виникає ряд негативних електромагнітних явищ в мережах. Несинусоїдальність напруга призводить до прискореного старіння ізоляції електричних машин, трансформаторів, кабелів, погіршення коефіцієнта потужності комунально-побутових споживачів, погіршення або порушення роботи пристроїв автоматики, телемеханіки,

комп'ютерної техніки та інші пристрої з елементами електроніки. Несиметричні напруги негативно впливають на роботу практично всіх електроприймачів.

Як показали наші дослідження та аналіз при роботі асинхронних двигунів, в умовах несиметрії навантажень, спостерігається збій в системі автоматичного управління і контролю, зменшується крутний момент, з'являється вібрація, скорочується термін служби майже вдвічі.

6.1 Аналіз та вибір методики розрахунку втрат при несиметрії напруги мережі

Втрати електричної енергії в розподільних мережах та електротехнічному обладнанні неможливо виміряти безпосередньо, а можна лише визначити розрахунковим шляхом. Напрацьовані розрахункові методики в основному детерміновані і не дозволяють врахувати невизначеність вихідної інформації [4]. У різних джерелах літератури по-різному пропонують визначати втрати від неякісної електричної енергії [4-8]:

– визначати втрати на підставі виміряних струмів вищих гармонік і поправочних коефіцієнтів. Додаткові втрати активної потужності при живленні двигуна несиметричними, несинусоїдальними напругами визначаються за формулою:

$$\Delta P_{АД} = \Delta P_{M1ном} \cdot I_{II}^2 \left(2,41\varepsilon_U^2 + \sum_{v=3}^{\infty} U_v^2 \frac{\sqrt{v} + \sqrt{v \pm 1}}{v^2} \right), \quad (6.1)$$

де, $\Delta P_{M1ном}$ – втрати в міді статора при номінальному струмі основної частоти;

I_{II} – кратність пускового струму при номінальній напрузі основної частоти;

ε_U – коефіцієнт несиметрії напруги;

U_v – відносна напруга v -ої гармоніки;

v – порядковий номер гармоніки.

– метод визначення додаткових втрат в двигуні від вищих гармонік $\Delta P_{\Sigma v}$ за кривими, на яких представлені відношення втрат ΔP_v при напрузі, що дорівнює 1% напруги основної частоти, до сумарних номінальним втрат $\Delta P_{ном}$;

– метод визначення додаткових втрат асинхронного двигуна через коефіцієнт, який враховує параметри двигуна, наприклад:

$$k_{AD} = \frac{\Delta P_{M1ном} \cdot I_{II}^2}{P_{ном}}, \quad (6.2)$$

де, $P_{ном}$ – номінальна активна потужність двигуна.

Згідно з проведеними розрахунками, значення коефіцієнта k_{AD} для двигунів з номінальною потужністю до 5 кВт знаходяться в діапазоні 3,0 – 4,5 [4].

Оцінка додаткових втрат здійснюється за формулою:

$$\Delta P = k_{AD} \left(2,41 \cdot \varepsilon_U^2 + 2 \sum_{v=2}^{\infty} \frac{U_v^2}{v\sqrt{v}} \right) P_{ном}. \quad (6.3)$$

Усі запропоновані методи не можуть визначати діапазон зміни втрат електричної енергії. Означені загальноприйняті підходи засновані на принципі детермінізму [4]. Вихідні дані при цьому підвертаються процедурам детермінації, таким чином, як усереднення, фільтрація та інші. [27]. Тому, в середньому отримані залежності правильно описують закономірності утворення втрат, але в конкретних випадках точність розрахунків, як правило, низька. Невизначеність вихідної інформації може бути представлена в рамках теорії нечітких множин [27].

Методика перетворення детермінованих залежних розподілів втрат у залежності від якості електроенергії до нечіткому вигляду [27].

При реалізації пропонованої методики використовується детермінована залежність. Якщо результати дослідження будуть не детерміновані, то результат буде не єдиним рішенням, а великим. Якщо ж вихідні дані

представити у вигляді нечітких множин, а це можливо, оскільки ступінь довіри до окремих значень може бути визначена експериментально, то в результаті розрахунків, згідно з принципом нечіткого узагальнення Заде [28], можна отримати нечітку множину. Отриманий таким чином результат буде володіти більшою інформативністю в порівнянні з детермінованим, оскільки він враховує всі доступне різноманіття вихідних даних, дає уявлення про діапазон зміни визначених втрат.

Невизначеність у першому наближенні відображається на різних показниках якості електроенергії.

6.2 Розрахунок додаткових втрат двигуна за методикою приведення вихідних даних до нечіткого узагальнення

Проведемо розрахунок додаткових втрат в обмотці статора електродвигуна від струмів зворотній послідовності, обумовленій несиметрією підведеної напруги, за формулою [27]:

$$\Delta P_{2AD} = \alpha_{2\Delta p} \cdot \Delta P_{ном} \cdot K_{2U}^2 \quad (6.4)$$

де, $\alpha_{2\Delta p}$ – коефіцієнт пропорційності (для асинхронного двигуна 2,2 кВт $\alpha_{2\Delta p} = 0,0072$ кВт);

$\Delta P_{ном}$ – номінальні втрати потужності (для асинхронного двигуна 2,2 кВт $\Delta P_{ном} = 0,028$ кВт)

K_{2U} – коефіцієнт оберненої послідовності.

Вимірювання значення коефіцієнта несиметрії напруги за зворотною послідовністю K_{2U} (%) проводимо згідно детермінованої методики [4], яка представлена в розділі 2 дипломної роботи, та отримуємо як середнє значення кількості досліджень (N) за певний інтервал часу (T_{vs}) (в нашому випадку 3 с. на протязі 24 годин).

Отримані значення апроксимуємо нечіткою множиною ΔK_{2U} з функцією приналежності [27]:

$$\mu_{\Delta K_{2U}} = \max \left\{ 0, \min \left\{ \frac{K_{2U} - K_{2U \min}}{K_{2Um} - K_{2U \min}}, \frac{K_{2U \max} - K_{2U}}{K_{2U \max} - K_{2Um}} \right\} \right\}, \quad (6.5)$$

де,

$$\begin{aligned} K_{2U \max} &= \max_{\Delta K_{2U}} \{ K_{2Uj} \}, \quad K_{2U \min} = \min_{\Delta K_{2U}} \{ K_{2Uj} \}, \\ K_{2Um} &= \frac{\sum_{j=1}^9 \mu_{K_{2Uj}} \cdot K_{2Uj}}{\sum_{j=1}^9 \mu_{K_{2Uj}}}, \end{aligned} \quad (6.6)$$

де, $\mu_{K_{2U}}$ – функція приналежності (ступінь довір'я) K_{2Uj} множині ΔK_{2U} . Діапазон вимірних значень при представленні в сумі – це 9 проведених досліджень при різних модифікаціях несиметрії (розділ 2).

Тоді в нечіткій формі:

$$K_{2U} = \prec K_{2Um}, K_{2Um} - K_{2U \min}, K_{2U \max} - K_{2Um} \succ. \quad (6.7)$$

Використовуючи представлену методику для визначення додаткових втрат асинхронного двигуна за формулою (6.4) та використовуючи (6.5), (6.6) отримуємо:

$$\Delta P_{2Ad} = \prec \Delta P_{2Adm}, \Delta P_{2Ad-}, \Delta P_{2Ad+} \succ \quad (6.8)$$

$$\begin{aligned} \Delta P_{2Adm} &= \alpha_{2\Delta p} \cdot \Delta P_{ном} \cdot K_{2Um}^2, \\ \Delta P_{2Ad+} &= \alpha_{2\Delta p} \cdot \Delta P_{ном} \cdot (K_{2Um}^2 - K_{2U \min}^2), \\ \Delta P_{2Ad-} &= \alpha_{2\Delta p} \cdot \Delta P_{ном} \cdot (K_{2U \max}^2 - K_{2Um}^2). \end{aligned} \quad (6.9)$$

Як видно з формули (6.8) значення $\Delta P_{ном}$ представлене у вигляді чіткого задання параметра.

Ступінь відповідності нечітких значень показника якості електроенергії (ПЯЕ) нечітким нормам якості електроенергії (ЯЕ) в [28] запропоновано

оцінювати за їх перетином. Чисельний перетин нечітких чисел можна оцінити за площею фігур, утвореної функціональною приналежністю перетину. Тоді функціональну приналежність можна представити у вигляді:

$$\mu_{\text{ЯЕ}} = \frac{S}{S_{\text{ПЯЕ}}}, \quad (6.10)$$

де, S – площа пересічення фігур, які обмежені функціями приналежності ПЯЕ та ЯЕ.

Використовуючи (6.10) можливо більш точно оцінити втрати в асинхронному двигуні від струмів зворотної послідовності, які викликані відхиленнями несиметрії підведених напруг від їх допустимих значень з формули (6.9):

$$\begin{aligned} \Delta P_{2\text{АДм}} &= (1 - \mu_{K_{2U}}) \cdot \alpha_{2\Delta p} \cdot \Delta P_{\text{ном}} \cdot K_{2U\text{м}}^2, \\ \Delta P_{2\text{АД}+} &= (1 - \mu_{K_{2U}}) \cdot \alpha_{2\Delta p} \cdot \Delta P_{\text{ном}} \cdot (K_{2U\text{м}}^2 - K_{2U\text{мін}}^2), \\ \Delta P_{2\text{АД}-} &= (1 - \mu_{K_{2U}}) \cdot \alpha_{2\Delta p} \cdot \Delta P_{\text{ном}} \cdot (K_{2U\text{макс}}^2 - K_{2U\text{м}}^2). \end{aligned} \quad (6.11)$$

Використовуючи розрахункові значення коефіцієнта несиметрії за зворотною послідовністю та паспортними даними нормованих втрат при симетричній трифазній мережі за формулами (6.8) – (6.9), знаходимо значення додаткових втрат для асинхронного двигуна потужністю 2,2 кВт:

$$\begin{aligned} \Delta P_{2\text{АДм}} &= 0,003975 \text{ кВт}, \\ \Delta P_{2\text{АД}-} &= 0,003504 \text{ кВт}, \\ \Delta P_{2\text{АД}+} &= 0,20033 \text{ кВт}, \\ \Delta P_{2\text{АД}} &= \langle 0,003975, 0,003504, 0,20033 \rangle. \end{aligned}$$

Відповідно, втрати в обмотці статора електродвигуна від струмів зворотної послідовності, які викликані відхиленнями несиметрії підведених напруг від їх допустимих значень використовуючи (6.11) отримаємо:

$$\Delta P_{2ADm} = 0,001257 \text{ кВт},$$

$$\Delta P_{2AD-} = 0,001108 \text{ кВт},$$

$$\Delta P_{2AD+} = 0,063249 \text{ кВт},$$

$$\Delta P_{2AD} = \langle 0,001257, 0,001108, 0,063249 \rangle.$$

Висновок. Проведені розрахунки при використанні описаної методики дозволило визначити втрати від неякісної електроенергії та фіксувати фактор близькості показників якості до гранично допустимих значень і, відповідно, планувати заздалегідь заходи щодо запобігання погіршенню якості електроенергії.

7 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

7.1 Заходи безпеки при обслуговуванні електродвигунів

Під час роботи, пов'язаної з контактом зі струмопровідними частинами електродвигуна або його обертовими частинами, необхідно зупинити електродвигун і на його пусковому пристрої або ключі керування вивісити плакат «Не вмикати! Працюють люди» [24].

Під час роботи на електродвигуні заземлення встановлюється на кабелі (з від'єднанням або без від'єднання його від електродвигуна) або на його приєднанні до розподільчого пристрою.

Перед допуском до роботи на електродвигунах перекачувальних насосів, вентиляторів, якщо можливе обертання електродвигунів від з'єднаних з ними механізмів, слід зачинити і замкнути на замок засувки і шибери цих механізмів, а також вжити заходів щодо гальмування роторів електродвигунів.

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

Обслуговувати щітковий апарат електродвигуна, що працює, допускається одноособово оперативному працівнику або виділеному для цього навченому працівнику з групою III. В цьому разі необхідно дотримуватися таких заходів безпеки [24]:

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

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

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

Під час експлуатації електродвигуна заземлення може бути встановлене на будь-якій ділянці кабельної лінії, що з'єднує електродвигун з розподільчим пристроєм. Під час роботи на механізмі, не пов'язаним з доторканням до обертових частин, і, у випадку роз'єднання з'єднувальної муфти, заземлювати кабельну лінію немає необхідності.

Якщо на відключеному електродвигуні роботи не провадять або їх перервано на кілька днів, то від'єднана від нього кабельна лінія має бути заземлена з боку електродвигуна. В тих випадках, коли перетин жил кабелю не дозволяє застосовувати переносні заземлення, допускається у електродвигунів напругою до 1000 В заземлювати кабельну лінію мідним провідником, перетином не меншим від перетину жили кабелю, чи з'єднувати між собою жили кабелю та ізолювати їх. Таке заземлення і з'єднання жил кабелю слід враховувати в оперативному журналі на рівні з переносним заземленням [24].

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

Випробування електродвигуна спільно з виконавчим механізмом слід проводити з дозволу начальника зміни цеху, в якому вони встановлені.

Під час видавання дозволу робиться запис в оперативному журналі технологічного цеху, а про отримання цього дозволу – в оперативному журналі цеху, що проводиться випробування.

Ремонт і налагоджування електросхем електроприводів, не з'єднаних з виконавчим механізмом, регулювальних органів і запірної арматури, можна проводити за розпорядженням. Дозвіл на їх випробування дає працівник, який дав розпорядження на виведення електроприводу в ремонт, налагодження. Про це слід зробити запис під час оформлення розпорядження [24].

Вмикання електродвигуна для випробування до повного закінчення роботи здійснюється після виведення бригади з робочого місця. Після випробування проводиться повторний допуск з оформленням у наряді.

Під час виконання роботи за розпорядженням на повторний допуск розпорядження надається повторно.

7.2 Надання першої допомоги потерпілому при ураженні електричним струмом

Під час дослідження впливу несиметричних режимів мережі на показники якості електроенергії на базі асинхронних двигунів може бути ураження електричним струмом [24].

Послідовність надання першої допомоги:

- усунути вплив на організм ушкоджуючих факторів, котрі загрожують здоров'ю та життю потерпілих, оцінити стан потерпілого;
- визначити характер та важкість травми, найбільшу загрозу для життя потерпілого і послідовність заходів щодо його рятування;
- виконати необхідні заходи з рятування потерпілих в послідовності терміновості (відновити прохідність дихальних шляхів, здійснити штучне дихання, провести зовнішній масаж серця);
- підтримати основні життєві функції потерпілого до прибуття медичного працівника;
- викликати швидку медичну допомогу або вжити заходів щодо транспортування потерпілого до найближчого лікувального закладу.

Рятування потерпілих від впливу електричного струму залежить від швидкості звільнення його від струму, а також від швидкості та правильності надання йому допомоги. Зволікання може зумовити загибель потерпілого. При ураженні електричним струмом смерть часто буває клінічною, тому ніколи не слід відмовлятися від надання допомоги потерпілому і вважати його мертвим через відсутність дихання, серцебиття, пульсу.

Якщо вимкнути установку швидко не можна, слід вжити заходів щодо звільнення потерпілого від струмоведучих частин, до котрих він торкається. У всіх випадках той, хто надає допомогу, не повинен доторкатися до потерпілого без належних запобіжних заходів, оскільки це небезпечно для життя. Він також повинен слідкувати, щоб самому не опинитися в контакті з струмоведучою частиною або під кроковою напругою [24].

Для звільнення потерпілого від струмоведучих частин або провода напругою до 1000 В слід скористатись канатом, палицею, дошкою або будь-яким сухим предметом, що не проводить електричного струму.

Потерпілого можна також відтягнути за його одяг (якщо він сухий та відстає від тіла), уникаючи дотику до оточуючих металевих предметів та частин тіла. З метою ізоляції рук той, хто надає допомогу, повинен одягнути діелектричні рукавиці або обмотати руку шарфом, натягнути , на руку рукав піджака або пальто, накинути на потерпілого гумовий килимок, прогумований матеріал (плащ) або просто сухий матеріал. Можна також ізолювати себе, ставши на гумовий килимок, суху дошку або непровідну підстилку, жмут одягу. При відділенні потерпілого від струмопровідних частин рекомендується діяти однією рукою.

Для звільнення потерпілого від струмоведучих частин під напругою понад 1000 В слід одягнути діелектричні рукавиці та боти і діяти штангою або ізольованими кліщами, розрахованими на відповідну напругу.

На лініях електропередачі, коли їх не можна швидко вимкнути, слід з цією метою здійснити замикання проводів накоротко, накинувши на них гнучкий провід. Провід повинен бути відповідного поперечного перетину, щоб він не перегорів при проходженні через нього струму короткого замикання. Перед накиданням проводу один кінець слід заземлити (приєднати його до металевої опори, до заземлювального спуску). З метою забезпечення зручності накидання на вільний кінець провідника бажано прикріпити вантаж.

Заходи долікарської допомоги залежать від стану, в якому знаходиться потерпілий після звільнення від електричного струму. У всіх випадках

ураження електричним струмом необхідно обов'язково викликати лікаря незалежно від стану потерпілого.

Для визначення стану потерпілого потрібно покласти його на спину й перевірити наявність дихання і серцевих скорочень.

Наявність дихання в потерпілого визначають за підйомом і опусканням грудної клітки під час самостійного вдиху й видиху. При порушенні дихання потерпілого необхідно зробити штучне дихання.

При наявності серцевих скорочень пульс найкраще перевіряти по сонній артерії. Відсутність пульсу на ній свідчить, як правило, про припинення руху крові в організмі.

Про відсутність кровообігу в організмі можна судити за станом очних зіниць, які в цьому випадку розширені. При відсутності пульсу необхідний зовнішній масаж серця.

Перевірка стану потерпілого, включаючи надання його тілу відповідного положення, перевірку дихання, пульсу і стану зіниць, повинна виконуватися швидко – протягом 15...20 с.

У період клінічної смерті протягом 4...5 хв. зміни на останньому рівні життєзабезпечення людини ще оборотні й її можна врятувати. Отже, допомога потерпілому повинна бути зроблена кваліфіковано, протягом перших 4...5 хв. Основні методи долікарської допомоги включають: штучне дихання «рот у рот», «рот у ніс», а також непрямий масаж серця [24].

Для проведення штучного дихання потерпілого потрібно покласти на спину на тверду основу, розстебнути одяг і забезпечити прохідність верхніх дихальних шляхів, які можуть бути закриті запалим язиком, сторонньою речовиною або предметом у порожнині рота. Голову потерпілого треба повернути набік, очистити рот пальцем, обгорненим марлею або хусткою. Після цього той, хто надає допомогу, одну руку підсуває потерпілому під шию, а долонею іншої надавлює на чоло, максимально закидаючи голову назад. При цьому корінь язика відходить від задньої стінки гортані, відкриваючи вільний доступ повітря в легені, а рот відкривається.

Штучне дихання виконують в такий спосіб. Глибоко вдихнувши, той, хто надає допомогу, робить енергійний видих у рот потерпілого. Як тільки грудна клітка потерпілого піднялася, наповнення повітря припиняють. Після цього у потерпілого відбувається пасивний видих. Якщо пульс у потерпілого визначається добре, то інтервал між вдуванням повітря повинен складати 5 с (12 дихальних циклів на хвилину).

При зупинці серця, не втрачаючи ні секунди, потерпілого треба укласти на тверду основу і звільнити від одягу, оголити груди. Далі прощупуванням потрібно визначити місце натиснення: воно повинне знаходитися на два пальці вище м'якого кінця грудини. Після цього той, хто надає допомогу, повинен покласти на це місце долоню однієї руки, а поверх неї під кутом 90° – долоню другої руки. Надавлювати треба швидким поштовхом, злегка допомагаючи нахилом усього корпусу. Нижня частина грудини у потерпілого при натисненні повинна зміститися вниз на 3...5 см. Тривалість натиснення – не більше 0,5 с, з інтервалом 0,5 с. З появою самостійного пульсу, що свідчить про відновлення серцевої діяльності, потрібно негайно припинити масаж серця, але продовжувати проведення штучного дихання.

Штучне дихання і непрямий масаж серця необхідно проводити до відновлення стійкого самостійного дихання й діяльності серця в потерпілого або до передачі його медичному персоналу [24].

7.3 Оцінка стійкості роботи електричних мереж та систем до дії проникаючої радіації і радіоактивного забруднення місцевості ядерного вибуху

Основою впливу на стійкість електричних мереж та систем до дії проникаючої радіації і радіоактивного забруднення місцевості ядерного вибуху є: електромагнітного імпульсу ядерного вибуху на роботу вимірювального трансформатора і заходи захисту такі: гамма-випромінювання, гамма-кванти, альфа-частинки і бета-частинки. Тому в даному розділі магістерської роботи

розглянуто питання оцінка стійкості роботи електричних мереж та систем до дії проникаючої радіації і радіоактивного забруднення місцевості ядерного вибуху [25].

Вплив проникаючої радіації на виробничу діяльність підприємств проявляється головним чином через її дія на людей, матеріали та прилади, чутливі до радіації.

Враження людей проникаючою радіацією залежить від дози випромінювання. Загальна доза проникаючої радіації визначається сумою дози гамма-випромінювання і дози нейтронів. Однак вражаюча дія проникаючої радіації визначається в більшості випадків дією гамма-квантів, так як на однакових відстанях від центру вибуху доза гамма-випромінювання зазвичай у декілька разів перевищує дозу нейтронів,

Захистом від проникаючої радіації служать перепони та укриття із різних матеріалів, що ослаблюють потік гамма-квантів і нейтронів.

При вирішенні питання захисту слід враховувати, що одні й ті ж матеріали по-різному послаблюють гамма-кванти і нейтрони. Гамма-випромінювання сильніше всього послаблюється важкими матеріалами, які мають високу електронну щільність (свинець, сталь, бетон). Потік нейтронів краще послаблюється легкими матеріалами, що містять ядра легких елементів, наприклад, водню (вода, поліетилен).

Дія проникаючої радіації на матеріали і обладнання залежить, в основному від виду випромінювань, дози випромінювань, природи опромінюваної речовини і умов навколишнього середовища. Найбільш схильне до дії проникаючої радіації електронне обладнання.

В матеріалах і елементах електронної техніки при короткочасній дії проникаючої радіації виникають тимчасові і залишкові зміни електричних параметрів. Гамма-кванти викликають зазвичай тимчасові зміни, а нейтрони – залишкові [24].

Проходячи через елементи радіоелектронної апаратури, потік гамма-квантів створює в них вільні носії електричних зарядів - електрони та іони. В

результаті цього підвищується провідність матеріалів, збільшується витік струму і знижується опір, в газорозрядних приладах зменшується напруга запалювання. Ці зміни існують декілька секунд, викликаючи тимчасову відмову в роботі апаратури. Але в ряді випадків вони можуть надовго вивести апаратуру з ладу (короткі замикання, пробої).

Вражаюча дія радіоактивного зараження пов'язана з зараженням та опроміненням людей. Перебуваючи на зараженій місцевості, люди піддаються опроміненню так само, як і при дії проникаючої радіації, що викликає радіаційне ураження людей.

Радіоактивні речовини випромінюють гамма-кванти, альфа-частинки і бета-частинки. Оскільки альфа-частинки легко затримуються, а дія бета-частинок значно послаблюється одягом та засобами захисту шкіри, найбільшу небезпеку при зовнішньому опроміненні мають гамма-кванти, що володіють високою проникаючою здатністю [24].

На відміну від проникаючої радіації ядерного вибуху, що діє протягом декількох секунд, гамма-випромінювання на місцевості, зараженої радіоактивними речовинами, діє на організм довший час - практично до тих пір, поки люди не будуть виведені з зараженого району або укриті в захисних спорудах.

Доза випромінювань, отримана людьми на зараженій радіоактивні γ ми речовинами місцевості в результаті зовнішнього опромінення, залежить від рівня радіації і часу перебування в зоні зараження.

Радіаційне ураження людей залежить не тільки від дози випромінення, але і від часу, протягом якого отримана ця доза. Опромінення невеликими порціями протягом тривалого часу буде менш шкідливим.

Для захисту від радіоактивного зараження використовуються сховища і укриття, будівлі та споруди, що ослабляють гамма-випромінювання і захищають від зараженого повітря. Захист від радіаційного враження людей через органи дихання може бути забезпечена за допомогою засобів індивідуального захисту.

Радіоактивне зараження і проникаюча радіація можуть вплинути на виробничу діяльність об'єкта переважно через вплив на людей. Загроза захворювання променевою хворобою може викликати необхідність зупинки або обмеження функціонування підприємства на певний час, за який рівень радіації в результаті природного розпаду радіоактивних речовин зменшиться до значень, що не представляють небезпеки для людей. Отже, головна мета оцінки вразливості об'єкта від впливу іонізуючого випромінювань полягає в тому, щоб виявити ступінь небезпечності радіаційного ураження людей в конкретних умовах роботи на зараженій місцевості.

Умови роботи можна характеризувати очікуваною радіаційною обстановкою на території об'єкта, тобто початком зараження після ядерного вибуху, рівнем радіації і місцем роботи.

Оцінка вразливості об'єкта від проникаючої радіації і радіоактивного зараження починається з визначення максимальних очікуваних значень дози проникаючої радіації і рівня радіоактивного зараження.

Вихідними даними для вирішення задачі визначення максимального значення рівня радіоактивного зараження і дози проникаючої радіації, очікуваних на об'єкті, є: відстань від вірогідної точки прицілювання до об'єкта; потужність ядерного боєприпасу; ймовірне максимальне відхилення боєприпасу від точки прицілювання; швидкість середнього вітру; напрям середнього вітру.

За критерій стійкості роботи об'єкта при дії проникаючої радіації і радіоактивного зараження приймається допустима доза випромінювання, яку можуть отримати люди за час роботи зміни в конкретних умовах.

З огляду на те, що умови роботи в різних цехах можуть відрізнятися, при оцінці стійкості розраховуються дози випромінювання для кожної групи робочих і службовців, що перебувають в однакових умовах. За дозою оцінюються можливість продовження роботи або необхідність припинення її на визначений час, надійність захисту від впливу радіації. Отримані висновки

дозволяють визначити заходи щодо забезпечення захисту від проникаючої радіації і радіоактивного зараження.

При розрахунках будемо виходити з того, що в момент ядерного вибуху виробничий персонал об'єкта знаходиться в сховищах, а при радіоактивному зараженні - на робочих місцях протягом максимальної тривалості роботи зміни.

Вихідними даними для оцінки стійкості є: максимальна доза проникаючої радіації і максимальний рівень радіації через 1 годину після вибуху очікуваний на об'єкті при ядерному вибуху; характеристика виробничих ділянок (конструкція будівель, кількість поверхів, місце розташування); характеристика сховищ (тип, матеріал і товщина кожного захисного шару перекриття і виступи над поверхнею землі стін); характеристика технологічного обладнання, приладів, апаратури і використовуваних матеріалів.

Критерієм стійкості роботи електронних і електронно-оптичних систем і приладів при дії проникаючої радіації і радіоактивного зараження є максимально допустимий потік нейтронів, експозиційна доза або потужність експозиційної дози гамма-випромінювань, при яких починаються зміни параметрів елементів, але робота систем ще не порушується.

Отже, стійкість роботи електричних систем та мереж до дії проникаючої радіації і радіоактивного забруднення місцевості ядерного вибуху залежить від дози проникаючої радіації, території забруднення місцевості, вразливості об'єкта. Для захисту від проникаючої радіації і радіоактивного забруднення слід використовувати перепони та укриття із різних матеріалів, що ослабляють потік гамма-квантів і нейтронів, сховища, будівлі та споруди, що ослабляють гамма-випромінювання і захищають від зараженого повітря [24].

8 ЕКОЛОГІЯ

8.1 Забруднення довкілля, що виникнуть у результаті роботи асинхронних двигунів

В Україні щороку продовжує зростати антропогенне та техногенне навантаження на навколишнє середовище. Наша держава має найвищий в Європі рівень розораності сільськогосподарських угідь, споживання водних ресурсів, вирубки лісів. Близько 15% території України з населенням понад 10 млн. осіб знаходиться в критичному екологічному стані. В Україні близько 70% поверхневих вод і значна частка запасів підземних, втратили своє значення як джерела питної води. Занепокоєність викликає стан басейну р. Дніпро, який забезпечує питною водою понад 75% (35 млн.) населення країни. Якість води Дніпровського басейну поступово погіршується. Збільшуються середньорічні показники вмісту у воді амонійного азоту, нітратів, фосфатів та підвищення мінералізації води, забруднення водних об'єктів фенолами та нафтопродуктами. Погіршується і якість підземних вод внаслідок інтенсивної експлуатації продуктивних водоносних горизонтів. Виявлено понад 290 сформованих осередків забруднення підземних вод в основних водоносних горизонтах [26].

При несиметрії напруги на трансформаторних підстанціях, а також на заводах де використовуються обертові машини (асинхронні та синхронні двигуни) виникає підвищений рівень шуму (шумове забруднення) [26].

Шумове забруднення атмосфери – одна з форм хвильового, фізичного забруднення, адаптація організму до нього є неможливою. Шум – це сукупність звуків різноманітної частоти та інтенсивності, що виникають у результаті коливального руху частинок у пружних середовищах (твердих, рідких, газоподібних). Інтенсивність шумового забруднення (тиску) вимірюється в децибелах (дБ). Шуми інтенсивністю 30-80 дБ не наносять шкоди людському організму. Водночас шуми інтенсивністю 85 дБ і більше призводять до

фізіологічних і психологічних негативних наслідків на нервову систему, сон, емоції, працездатність. На сьогодні проблема шумового забруднення є дуже актуальною, оскільки воно зростає з часом все більше, особливо у містах [26].

Шумове завжди вважалося менш небезпечною формою забруднення, ніж інші види екологічного забруднення, а люди практично не хвилюються про те, як шум впливає на їх здоров'я. Проте дані Бюро національної статистики Великобританії показують, що кількість скарг на шум в країні в останні 20 років зросла в 5 разів. Виходить, що таким чином шум дійсно стає для людей все більш серйозною загрозою, повідомляє УНІАН.

8.2 Заходи по зменшенні негативної дії на довкілля

В даний час розроблено багато методик, що дозволяють зменшити або усунути деякі шуми. Шумове забруднення від будь-якого об'єкту можна до певної міри зменшити, якщо на етапі розробки проекту цього об'єкта змодельовати з урахуванням різних зовнішніх умов (наприклад, топологія і погодні умови місцевості) характер шумів, які будуть виникати і потім відшукати шляхи їх усунення або хоча б зменшення. В даний час цей спосіб став набагато простіше і доступніше за рахунок розвитку електронно-обчислювальної техніки. Це найбільш дешевий і раціональний спосіб зниження шумів [26].

Шум негативно впливає на різні системи організму: серцево-судинну, нервову, порушує сон, увагу, збільшує роздратованість, депресію, неспокій, подразнення, може впливати на дихання і травну систему; ушкоджує слухові функції з тимчасовою або постійною втратою слуху; порушує здатності передавати та сприймати звуки мовного спілкування; відволікає увагу від звичайних занять; змінює фізіологічних реакцій людини на стресові сигнали; впливає на психічне і соматичне здоров'я; діє на трудову діяльність і продуктивність праці. Дослідження свідчать про несприятливий вплив шуму на центральну нервову, серцево-судинну систему і органи травлення. Порушення

стану функціонування центральної нервової системи під впливом шуму призводить до ослаблення уваги і працездатності, особливо розумової.

Але шум може впливати і позитивно. Такий вплив на людину чинить, наприклад, шелест листя дерев, помірний стукіт дощових крапель, рокіт морського прибою, Позитивний та лікувальний вплив спокійної приємної музики відомий з давніх часів. Нерідко шум несе важливу інформацію. Автомобіліст уважно прислухається до звуків, які видає мотор, шасі, інші частини автомобіля, що рухається, бо будь-який сторонній шум може попередити аварію. Також за допомогою шуму, спричиненого рухом кораблів та підводних човнів, їх виявляють і пеленгують. Шум відіграє велику роль в акустиці, радіотехніці, радіоастрономії і навіть медицині. Шумове забруднення навколишнього середовища увесь час зростає. Особливо це стосується великих міст. Опитування жителів міст довело, що шум турбує більше 50% опитаних. Причому, в останні десятиліття рівень шуму зріс у 10-15 разів. Зменшення рівня шуму поліпшує самопочуття людини і підвищує продуктивність праці. З шумом необхідно боротися як на виробництві так і в побуті. Уміння дотримуватися тиші – показник культури людини і її доброзичливого ставлення до навколишніх. Тиша потрібна людям так само, як сонце і свіже повітря [26].

На сьогодні спостерігається тенденція до розширення площ акустичного дискомфорту на забудованих територіях. Недосконалість законодавчо-нормативної бази, відсутність економічних важелів регулювання допустимих рівнів звуку є причиною зростання акустичного забруднення міст [26].

Значна кількість обладнання, устаткування, приладів на підприємствах за вібро-акустичними параметрами не відповідає встановленим нормативам.

Рівні акустичного забруднення у містах можуть справляти негативний вплив на здоров'я і самопочуття населення, у тому числі збільшувати кількість серцево-судинних захворювань.

Шумове забруднення швидко викликає порушення природного балансу в екосистемах. Шумове забруднення може призводити до порушення орієнтування в просторі, спілкування, пошуку їжі і т. д. У зв'язку з цим деякі

тварини починають видавати більше гучні звуки, через що вони самі будуть ставати в ролі вторинних звукових забруднювачів, ще сильніше порушуючи рівновагу в екосистемі [26].

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ ДО ДИПЛОМНОЇ РОБОТИ

У дипломній роботі розглянуто науково-дослідницьке завдання практичного спрямування щодо дослідження електромеханічних характеристик асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором при несиметрії напруги мережі.

Результати аналізу та проведені дослідження дозволили встановити таке:

1. Проведений аналіз показав, що при проведенні досліджень необхідно враховувати такі електричні параметри асинхронного двигуна: споживана активна та реактивна потужності, значення фазних струмів, симетричні складові прямої та зворотної послідовностей.

2. Встановлено необхідність моделювання несиметрії напруги трифазної мережі для проведення досліджень в межах нормально допустимого значення відхилення напруги за зворотною та нульовою послідовностями. Дослідження роботи асинхронного двигуна при глибокій несиметрії вимагає використання складної принципіальної схеми.

3. Проведені розрахунки для моделюванні несиметричних режимів показали, що прийнята схема моделювання несиметрії трифазної напруги для проведення досліджень роботи асинхронного двигуна за коефіцієнтами зворотної та нульової послідовності не перевищує нормально допустимого значення в точках загального приєднання до електричних мереж 0,38 кВ, яке становить 2%.

4. Розроблена схема та змодельована експериментальна установка для дослідження впливу несиметрії напруг та зміни частоти напруги на електромеханічні характеристики асинхронного двигуна. В результаті проведених досліджень встановлено:

– споживання електроенергії асинхронним двигуном зростає при пониженому несиметричному живленні.

– при несиметрії зростає загальна кількість реактивної енергії, що нерівномірно розподіляється по фазах.

– експериментально підтверджено, що коефіцієнт ковзання зростає при зменшенні напруги живлення і спадає при її зростанні. Коефіцієнт ковзання є нестабільним при несиметрії напруги живлення. Значення коефіцієнта ковзання обернено-пропорційне до кількості реактивної енергії виробленої електродвигуном.

– встановлено, що при зростанні частоти напруги живлення до граничнодопустимих меж активні втрати в двигуні спадають, при зменшенні активної потужності асинхронного двигуна.

5. Проведені дослідження та аналіз систем діагностування та захисту асинхронного двигуна дозволяє стверджувати, що при аварійних режимах, які визвані несиметрією напруги мережі, доцільно використовувати комбіновані пристрої в залежності від режимних параметрів роботи асинхронного двигуна.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Сыромятников И. А. Режимы работы асинхронных и синхронных двигателей / И. А. Сыромятников. – Под ред. Л. Г. Мамиконянца. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 240 с.
2. Дрехслер Р. Измерение и оценка качества электроэнергии при несимметричной и нелинейной нагрузке. / Р. Дрехслер. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 112 с.
3. Овчаров В. В. Эксплуатационные режимы работы и непрерывная диагностика электрических машин в сельскохозяйственном производстве / В. В. Овчаров. – К.: Изд-во УСХА, 1990. – 168 с.
4. Денисюк С.П. Системи гарантованого електропостачання та питання економії електроенергії / С.П, Денисюк. – К.: Семинар «Синапс / НБУ - 2004». – 2004. – 21 с.
5. Дрехслер Р. Измерение и оценка качества электроэнергии при несимметричной и нелинейной нагрузке. / Р. Дрехслер. – М.: Энергоатомиздат, – 1985. – 112 с.
6. Денисюк С.П. Загальні властивості енергетичних характеристик систем з перетворювачами електричної енергії / С.П. Денисюк // Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України. Електроенергетика. – Київ: ІЕД НАНУ, – 1999. – С. 46 – 59.
7. Денисюк С.П. Оптимизация электропотребления для энергосбережения в системах с преобразователями / С.П. Денисюк // Пробл. энергосбережения. – 1989. – Вып. 2. – С. 49 – 52.
8. Жежеленко И.В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий. / И.В. Жежеленко. – М.: Энергоатомиздат. –1984. – 160 с.
9. Железко Ю.С. Влияние потребителя на качество электроэнергии в сети и технические условия на его присоединение / Ю.С. Железко // Промислова енергетика. – 1991. – № 8.
10. Железко Ю.С. Стратегия снижения потерь и повышения качества

электроэнергии в электрических сетях / Железко Ю.С. // Электричество. – 1992. – № 5. – С. 6 – 12.

11. Черкашин В.П. Дослідження впливу несиметричного навантаження на режим системи електропостачання / В.П.Черкашин // Матеріали XII Всеукраїнської студентської науково-технічної конференції «Сталий розвиток міст» (84-я студентська науково-технічна конференція ХНУМГ ім. О. М. Бекетова) 23-25 квітня 2019 р. – Ч.2. – С. 23-25.

12. Попова І. О. Контроль режимів роботи асинхронних двигунів при несиметрії напруг мережі: автореф. дис. на здобуття наук, ступеня канд. техн. наук: спец. 05.09.16 "Електротехнології та електрообладнання в агропромисловому комплексі" / І. О. Попова. – Мелітополь, 2003. – 20 с.

13. Соркин М. Асинхронные электродвигатели 0,4 кВ. Аварийные режимы работы / М. Соркин // "Новости Электротехники", –№ 2 (32). –2005.

14. Закладний О. М. Захист як складник системи функціонального діагностування асинхронних електродвигунів / О. М. Закладний, В. В. Прокопенко, О. О. Закладний // Промелектро. – 2010. – № 4. – С.36- 40.

15. Закладний О. М. Захист як складник системи функціонального діагностування асинхронних електродвигунів / О. М. Закладний, В. В. Прокопенко, О. О. Закладний // Промелектро. – 2010. – № 4. – С. 36-40.

16. Кондратюк О.Ю. Анализ аварийных режимов работы асинхронных двигателей к вопросу выбора их эффективной защиты./ О.Ю. Кондратюк, Егоров А.Б. //Системи обробки інформації. – 2006. – Вип. 4(53). – С.79-86.

17. Кобзистый О. В. Совершенствование защиты электродвигателей от несимметрии питающего напряжения: автореф. дис. канд. техн. наук. Азово-Черноморская Государственная агроинженерная академия / О. В. Кобзистый. – Зеленоград, – 2000. – 24 с.

18. Сырых Н. Н. Определение параметров асинхронного электродвигателя при обрыве фазы / Н. Н. Сырых, А. И. Некрасов, Н. Е. Кабдин // Техника в сельском хозяйстве. – 2001. – № 2. – С. 20–23.

19. Сыромятников И. А. Режимы работы асинхронных и синхронных

двигателей / И. А. Сыромятников; под ред. Л. Г. Мамиконянца. – 4-е изд., перераб. и доп. – М. : Энергоатомиздат, – 1984. – 240 с.

20. Гольдберг О. Д. Автоматизация контроля параметров и диагностика асинхронных двигателей / О. Д. Гольдберг, И. М. Абдуллаев, А. Н. Абиев; под ред. О. Д. Гольдберга. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 160 с.

21. Копылов И.П. Электрические машины / И.П. Копылов. – М.: Высшая школа. – 2004. – 607 с.

22. Altivar 71. Краткое руководство пользователя. – Schneider Electric. – 2014. – 28 с.

23. Лавріненко Ю.М., Савченко П.І., Синявський О.Ю., Войтюк Д.Г., Савченко В.В., Голодний І.М. Основи електропривода: підручник / Ю.М. Лавріненко, П.І. Савченко, О.Ю. Синявський, Д.Г. Войтюк, В.В. Савченко, І.М. Голодний. – К.: Видавництво Ліра. – 2017. – 524 с.

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

25. Бедрій Я. І. Безпека життєдіяльності. Навчальний посібник. / Я. І. Бедрій. – Кондор. – 2004. – 286 с. [Електронний ресурс]: Навчальні матеріали в онлайн: ISBN978-966-351-196-2. Режим доступу: <https://pns.hneu.edu.ua> > mod > resource > view.

26. Сухарев, С.М. Техноекоекологія та охорона навколишнього середовища [Текст]: навч. посібник / С.М. Сухарев. – Л.: Новий світ. – 2004. – 256 с.

27. Тимчук С. А., Мирошник А. А. Определение потерь электроэнергии в зависимости от её качества в нечёткой форме в сельских распределительных сетях / С. А. Тимчук, А. А. Мирошник // Восточно-Европейский журнал передовых технологий (ISSN 1729-3774). Энергосберегающие технологии и оборудования. – Выпуск 73(73) – 2015. – С. 1–9.

28. Tymchuk, S. A. Quality assessment of power in distribution networks 0.38/0.22 kV in the fuzzy form [Text]: Materials of the II inter. scien. conf. / S. A.

Tymchuk, A. A. Miroshnyk // Global Science and Innovation. – Chicago, USA. – 2014. – Vol. II. – P. 288–299.