

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ПОЛІСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет інженерії та енергетики

Кафедра електрифікації, автоматизації виробництва та інженерної екології

Кваліфікаційна робота
на правах рукопису

Поліщук Віталій Юрійович

УДК 621.359.4

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

Розробка методу експериментального дослідження режимів роботи
асинхронних електродвигунів
(тема роботи)

141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

(шифр і назва спеціальності)

Подається на здобуття освітнього ступеня бакалавр

Кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

Поліщук В. Ю.

(підпис, ініціали та прізвище здобувача вищої освіти)

Керівник роботи

Островерхов Микола Якович

(прізвище, ім'я, по батькові)

д.т.н., професор кафедри електрифікації,
автоматизації виробництва та інженерної екології
(науковий ступінь, вчене звання)

Житомир – 2026

АНОТАЦІЯ

Поліщук В. Ю. Розробка методу експериментального дослідження режимів роботи асинхронних електродвигунів. Кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня бакалавр за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка – Поліський національний університет, Житомир, 2026.

Метою роботи є підвищення ефективності експлуатації електротехнічного комплексу з промисловим електродвигунним навантаженням за рахунок симетрування напруг.

Об'єктом дослідження являється електротехнічний комплекс, до складу якого входять асинхронні електродвигуни, що експлуатуються в розподільних мережах електропостачання 0,4 кВ.

Ключові слова: асинхронний двигун, електротехнічний комплекс, ефективність експлуатації.

ABSTRACT

Polishchuk V. Yu. Development of a method for experimental research of the operating modes of asynchronous electric motors. Qualification work for the degree of bachelor in specialty 141 – Electric power, electrical engineering and electromechanics – Polissia National University, Zhytomyr, 2026.

The purpose of the work is to increase the efficiency of operation of an electrotechnical complex with an industrial electric motor load due to voltage balancing.

The object of the study is an electrotechnical complex, which includes asynchronous electric motors operated in 0.4 kV power distribution networks.

Keywords: asynchronous motor, electrotechnical complex, efficiency of operation.

ЗМІСТ

ВСТУП	4
РОЗДІЛ 1. СКЛАДНІСТЬ РОБОТИ АСИНХРОННИХ ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ В ІСНУЮЧИХ УМОВАХ ЕКСПЛУАТАЦІ	6
1.1. Вимоги до рівня несиметрії напруг та фактичний стан проблеми несиметрії в електричних мережах	6
1.2. Складність роботи асинхронних електродвигунів в існуючих умовах експлуатації	9
Висновки по розділу 1	11
РОЗДІЛ 2. МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ПАРАМЕТРІВ ЕКСПЛУАТАЦІЇ НА РОБІТУ ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ	12
2.1. Розробка методів експериментального дослідження режимів роботи асинхронних електродвигунів	12
2.2. Реалізація комп'ютерної моделі дослідження режимів роботи асинхронних електродвигунів	16
2.3. Метод експериментального дослідження режимів роботи асинхронних електродвигунів, заснований на комп'ютерному моделюванні	21
Висновки по розділу 2	26
РОЗДІЛ 3. РЕАЛІЗАЦІЯ ФІЗИЧНОЇ МОДЕЛІ ДОСЛІДЖЕННЯ РЕЖИМІВ РОБОТИ АСИНХРОННИХ ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ	27
3.1. Метод експериментального дослідження режимів роботи асинхронних електродвигунів, заснований на фізичному моделюванні	28
3.2. Оцінка достовірності розробленої комп'ютерної моделі	32
Висновки по розділу 3	34
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	35
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	37

ВСТУП

Як відомо, ефективне функціонування електротехнічних комплексів (ЕТК) промислових підприємств залежить від безаварійної роботи окремих його елементів, зокрема асинхронних електродвигунів (АД). Дослідження низьковольтних асинхронних електродвигунів, що працюють на виробничих підприємствах, показують, що висока аварійність електродвигунів пов'язана з умовами експлуатації. Систематизація причин відмов АД дозволяє судити про те, що велика частина відмов відбувається внаслідок неякісної напруги живлення, при цьому ймовірність виходу з ладу через такий тип відмови оцінюється в 50% від усіх можливих варіантів поломок. Варто зауважити, що економічний збиток від поломок, потенційно пов'язаний з низькою якістю електричної енергії (ЯУУ), крім витрат на відновлення обладнання, включає в себе збиток від численних зупинок виробничого процесу підприємства та упущеного прибутку.

Комплексне вирішення зазначеної проблеми неможливе без вдосконалення методів, орієнтованих на оцінку та збільшення терміну бслужби АД, їх ефективної реалізації з використанням програмного забезпечення, що враховують експлуатаційні режими роботи асинхронних електродвигунів.

Дослідження в галузі розробки та впровадження методів оцінки терміну служби АД, головним чином, спрямовані на поліпшення ефективності та техніко-економічних показників роботи ЕТК, за допомогою забезпечення безаварійної роботи АД в умовах спільної дії експлуатаційних факторів. Дані дослідження є затребуваними інноваційними рішеннями, заснованими на інтегрованій інформації різних методів дослідження. Сказане вище визначає актуальність проблеми та основних напрямів даної роботи.

Об'єктом дослідження являється електротехнічний комплекс, до складу якого входять асинхронні електродвигуни, що експлуатуються в розподільних мережах електропостачання 0,4 кВ.

Предмет дослідження – розвиток методів оцінки параметрів експлуатації, які визначають термін служби низьковольтних асинхронних електродвигунів.

Мета роботи – підвищення ефективності експлуатації електротехнічного комплексу з промисловим електродвигунним навантаженням за рахунок симетрування напруг.

Методи досліджень. Реалізація поставлених задач дослідження здійснена з використанням положень теоретичної електротехніки, електричних машин, теорії ймовірності та математичної статистики, теорії надійності, методів економічної теорії, засобів об'єктно-орієнтованого програмування та методів комп'ютерного моделювання в пакеті «SimPowerSystems» середовища програмування MATLAB/Simulink.

Перелік публікацій автора за темою дослідження:

Поліщук В. Ю. ПРО СКЛАДНІСТЬ РОБОТИ АСИНХРОННИХ ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ В ІСНУЮЧИХ УМОВАХ ЕКСПЛУАТАЦІЇ Матеріали науково-практичної конференції факультету інженерії та енергетики «НАУКОВІ ЧИТАННЯ за підсумками I-го туру Всеукраїнського конкурсу студентських наукових робіт з галузей знань і спеціальностей» 29 квітня 2026 року. Житомир: Поліський національний університет, 2026.- С 195-198.

Поліщук В. Ю., Невмержицький М. М. РЕАЛІЗАЦІЯ КОМП'ЮТЕРНОЇ МОДЕЛІ ДОСЛІДЖЕННЯ РЕЖИМІВ РОБОТИ АСИНХРОННИХ ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ

Матеріали науково-практичної конференції факультету інженерії та енергетики «НАУКОВІ ЧИТАННЯ за підсумками I-го туру Всеукраїнського конкурсу студентських наукових робіт з галузей знань і спеціальностей» 29 квітня 2026 року. Житомир: Поліський національний університет, 2026.- С 195-198.

РОЗДІЛ 1

СКЛАДНІСТЬ РОБОТИ АСИНХРОННИХ ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ В ІСНУЮЧИХ УМОВАХ ЕКСПЛУАТАЦІ

1.1. Вимоги до рівня несиметрії напруг та фактичний стан проблеми несиметрії в електричних мережах

Якість електричної енергії (ЯЕЕ) в Україні нормується згідно з ДСТУ ІЕС 61000–2–12:2013 [3] і визначається ступенем відповідності параметрів напруги мережі регламентованим значенням.

Вказаний міждержавний стандарт є аналогом європейського регіонального стандарту ДСТУ EN 50160:2014 (EN 50160:2010, IDT) [15]. Слід зазначити, що в наведених нормативних документах несиметрія напруг входить до числа основних показників якості електричної енергії (ПЯЕЕ). Несиметрія напруг (voltage unbalance) – умови в багатофазній системі, за яких середньоквадратичні значення фазних напруг або кути зсуву між послідовними фазами не рівні [3]. Несиметрія напруг, головним чином, характеризується коефіцієнтами – коефіцієнтом несиметрії напруг за нульовою послідовністю (K_{0U}) та коефіцієнтом несиметрії напруг за зворотною послідовністю (K_{2U}). Так, згідно з нормативними вимогами [1] для K_{2U} та K_{0U} встановлено граничні значення в розмірі 2 % для 95% та 4% для 100 % часу вимірювань, інтервалом в один тиждень.

Невідповідність коефіцієнтів несиметрії вимогам ДСТУ ІЕС 61000–2–12:2013 призводить до негативних наслідків. З точки зору авторів [4,5], несиметрія напруг в низьковольтних електричних мережах вносить корективи в погіршення ПЯЕЕ, призводить до втрат потужності в елементах електричних мереж і зниження терміну експлуатації електромережевого обладнання, крім того, негативно відображається на енергетичних характеристиках електричних машин. Внаслідок малого опору зворотної послідовності обмоток АД, особливе значення набуває присутність напруги зворотної послідовності в електричній мережі. Переважно створює значні струми зворотної послідовності, породжуючи гальмівний електромагнітний момент, крім цього,

додатковий нагрів активних частин АД. У свою чергу, це призводить до зменшення коефіцієнта корисної дії та зниження терміну служби ізоляції обмоток електродвигунів.

Дослідженнями встановлено, що в електричних мережах України рівень несиметрії напруг суттєво перевищує допустимий і досягає значень, що становлять 8 – 9 % [4]. Проведений аналіз ЯЕЕ показує, що ПКЯЕ деяких регіонів не відповідають вимогам, встановленим ГОСТ 32144 – 2013. Порушення вимог стандарту мають масовий і систематичний характер, найбільші рівні спотворення ПКЯЕ зафіксовані в Забайкальській електроенергетичній системі. Електроенергетична система Забайкальського краю виділена, як найбільш проблематична з точки зору несиметричних режимів роботи електричних мереж.

Слід зазначити, що несиметричні режими роботи електричних мереж переважають не тільки в Україні. Проведені дослідження [4,16] вказують на недопустимі рівні несиметрії напруг в різних країнах (табл.1.1).

Таблица 1.1 – Рівень несиметрії напруг в різних країнах

Країна	Нормативний документ	Виміряне значення, %	Нормативне значення, %
Австралія	AS/NZS 61000.3.6 – 2001	2,6	2
Білорусь	ГОСТ 32144 – 2013	2,9	2 – 4
Німеччина	EN 50160 – 2010 /A3:2019	2,5	2 – 3
Італія	EN 50160 – 2010 /A3:2019	3,2	2 – 3
Китай	GB/T 15543 – 2008	2,3	2
Киргизстан	ГОСТ 32144 – 2013	4,2	2 – 4
Португалія	EN 50160 – 2010 /A3:2019	3	2 – 3
Росія	ГОСТ 32144 – 2013	8	2 – 4
США	IEEE Std 519 – 2022	2,4	2
Узбекистан	ГОСТ 32144 – 2013	3,1	2 – 4
Україна	ДСТУ ІЕС 61000 – 2 – 12:2013	5	2 – 3

Діаграми, зображені на (рис. 1.1, 1.2), ілюструють результати вимірювань та аналізу K_{2U} в діючих електричних мережах 0,4; 10; 35 кВ ОЕС України. Представлено узагальнені дані мінімальної та максимальної величин K_{2U} по

досліджуваних об'єктах протягом 95% та 100% часу вимірювань, з інтервалом в один тиждень.

За результатами проведених досліджень встановлено, що несиметрія напруг в діючих електричних мережах енергосистеми Житомирщини переважає як постійно діючий фактор. Виявлено, що K_{2U} в більшості випадків варіюється в діапазоні значень від 2,22% до 11,2% і в ряді випадків у 2 – 3 рази перевищує нормоване [5] значення.

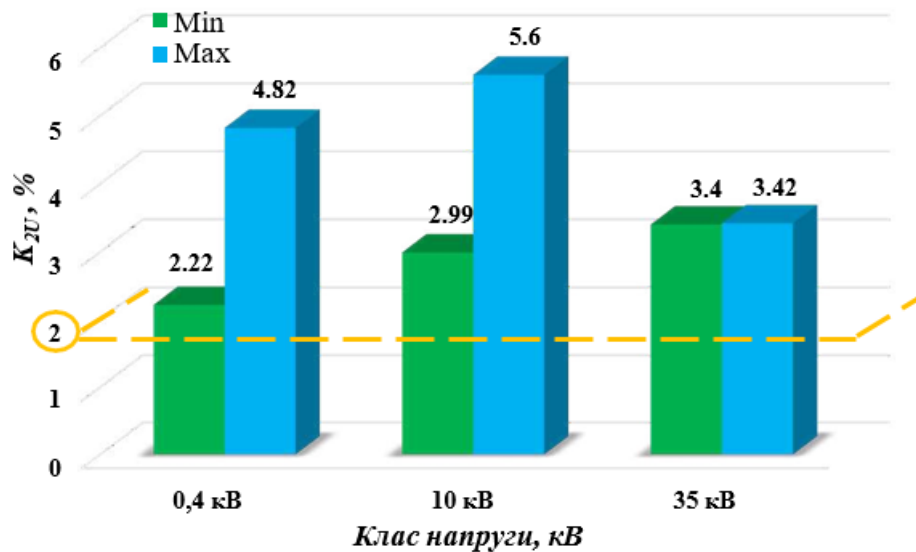


Рис. 1.1 – Результати експериментальних досліджень несиметрії напруг, при 95% часу вимірювань

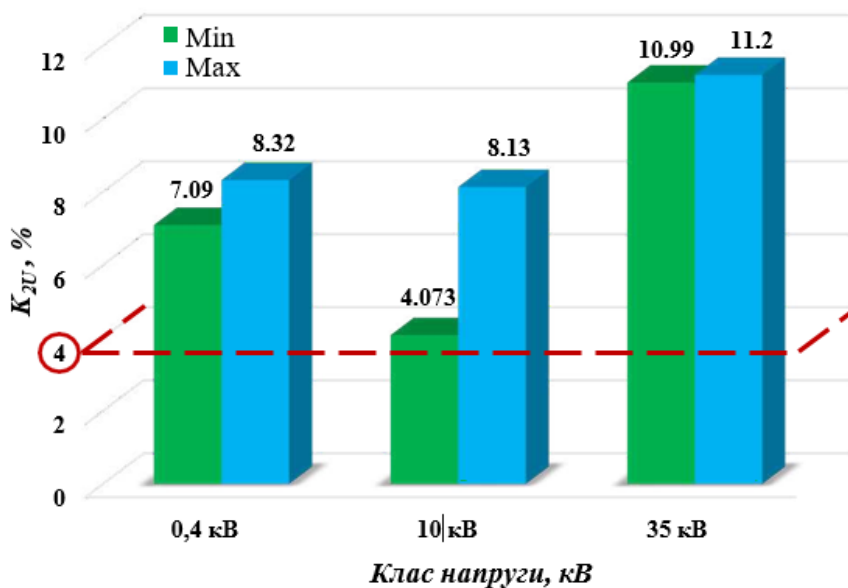


Рис.1.2 – Результати експериментальних досліджень несиметрії напруг, при 100% часу вимірювань

Відзначено, що зі зниженням класу напруги K_{2U} незначно покращується, перевищуючи встановлені нормативні вимоги [1].

1.2. Складність роботи асинхронних електродвигунів в існуючих умовах експлуатації

Проблеми роботи асинхронних електродвигунів, що полягають у зниженні їхньої ефективності та надійності, зумовлені основними факторами: якістю виготовлення деталей конструкції та умовами експлуатації. Якщо якість виготовлення деталей конструкції можливо розглядати як випадковий фактор, який повинен контролюватися заводом-виробником на стадії ВТК, то умови експлуатації, як фактор, вимагають детального вивчення та контролю з боку експлуатаційної організації на всьому періоді роботи АД.

Відповідно до [3], низьковольтні загальнопромислові АД призначені для роботи у певних режимах. В умовах правильної експлуатації термін служби АД до капітального ремонту досягає 15 років. Правильними умовами експлуатації вважаються номінальні умови, зазначені в паспорті електрообладнання, однак практика експлуатації АД показує вкрай низьку ймовірність відповідності фактичних умов експлуатації номінальним.

Вважається, що кожен АД має певні номінальні параметри, наведені в паспорті або на шильдику електрообладнання, які відповідають номінальному режиму роботи електродвигуна. Допустимі відхилення від номінального режиму мають суворий діапазон змін, встановлений у нормативних документах.

Номінальний режим роботи загальнопромислових асинхронних електродвигунів залежить, перш за все, від ряду факторів:

1) умов експлуатації (температури, вологості навколишнього середовища, атмосферного тиску, пилу, інею, параметрів рівня завантаження електродвигуна, кліматичного виконання і категорії розміщення, вибухонебезпечних і пожежонебезпечних зон виробничих приміщень);

2) режимів роботи електродвигунів. Згідно з ІЕС 50160-1-2014 [15] передбачено 10 номінальних режимів для електродвигунів (S1 – S10);

3) факторів впливу (тепловий, хімічний, механічний, електродинамічний, електрофактичний (вплив режиму напруги)).

На даний момент нормативною базою в області якості електроенергії, вимог до надійності електричних машин, орієнтованих на забезпечення безаварійної експлуатації електродвигунів, є наступні стандарти [1, 3].

Варто зазначити, що згідно з [5], щоб уникнути відмови АД при досягненні K_{2U} значень, що перевищують 1%, електродвигуни слід розвантажувати, а при досягненні K_{2U} значень, що перевищують 5%, потрібно виводити АД з експлуатації.

На підставі МЕК 892 допустиме повне завантаження АД залежить від величини K_{2U} . Так, повне (100%) завантаження АД можливе при $K_{2U} < 1\%$. В процесі експлуатації АД з постійним навантаженням, при досягненні величини $K_{2U} = 2\%$ завантаження доцільно зменшити до 96%, при $K_{2U} = 3\%$ знизити до 90%, при $K_{2U} = 4\%$ знизити до 83%, при $K_{2U} = 5\%$ знизити до 76%. Згідно з [6] оптимальна величина коефіцієнта завантаження становить в межах від 85% до 100% номінальної потужності АД. Незбалансована величина коефіцієнта завантаження впливає на величину струму в обмотках електродвигуна, відповідно і на величину потужності її тепловиділень.

Аналітичний огляд робіт авторів [8,9,16] показав, що на практиці розглянуті показники вкрай рідко відповідають нормованим значенням, відзначаються факти їх багаторазового перевищення. Практична неможливість переривання технологічного циклу підприємства, при перевищенні порогових значень розглянутих показників, і пов'язана з цим робота АД в ненормативних умовах неминуче веде до відмови АД.

Як відомо, при оцінці надійності асинхронних електродвигунів істотне значення має встановлення причин виникнення відмов. Згідно з [9], відмова – це часткова або повна втрата працездатного стану об'єкта.

Для визначення достовірного прогнозу реального терміну служби електродвигунів, а також оцінки їхньої надійності, доцільно брати до уваги сукупний вплив експлуатаційних факторів. Саме тому, для забезпечення

безаварійної експлуатації електродвигунів необхідний аналіз умов експлуатації, дослідження режимів роботи та процесів, що призводять до прискореного зносу деталей електродвигунів.

Згідно з проведеними аналізом, слід зазначити, що висока аварійність електродвигунів підприємств зумовлена особливостями їхньої експлуатації. При цьому варто зауважити, що домінуючим фактором відмов електродвигунів є пошкодження ізоляції обмоток статора внаслідок низької якості напруги живлення, а також незбалансованої величини завантаження АД.

Відомо, що недовантаження АД призводить до погіршення експлуатаційних показників електроприводу, оскільки при цьому зменшується ККД і коефіцієнт потужності електродвигуна [17]. При перевантаженнях АД під дією високої температури руйнується ізоляція обмоток статора, зменшується експлуатаційний термін служби електродвигуна, відбувається вихід його з ладу. У джерелі [8] відзначається, що при 2% несиметрії напруг термін служби АД скорочується на 10 % внаслідок додаткових втрат активної потужності.

Висновки по першому розділу

1. У результаті проведених досліджень низьковольтних асинхронних електродвигунів, що експлуатуються на підприємствах, виявлено найбільш характерні причини відмов та вразливі деталі АД.

2. Встановлено, що під час експлуатації АД в робочих і перехідних режимах роботи, основним фактором деградації ізоляції обмоток статора АД є тепловий вплив внаслідок низької якості напруги живлення. Відмови залежать від призначення електродвигунів та варіюються залежно від експлуатаційного режиму роботи АД.

РОЗДІЛ 2

МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ПАРАМЕТРІВ ЕКСПЛУАТАЦІЇ НА РОБІТУ ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ

2.1. Розробка методів експериментального дослідження режимів роботи асинхронних електродвигунів

Найбільш використовуваними в електротехнічному комплексі (ЕТК) промислових підприємств є асинхронні електродвигуни, які складають основу приводу більшості різноманітних механізмів.

Надійність є найважливішим техніко-економічним показником якості роботи АД, що визначає здатність безвідмовно працювати з незмінними технічними характеристиками протягом заданого проміжку часу за певних умов експлуатації [8]. Залежно від призначення об'єкта та умов його застосування включає в себе безвідмовність, довговічність, ремонтпридатність, збережуваність та інші їх поєднання.

Поняття «довговічність» передбачає розгляд працездатності об'єкта за весь період його експлуатації та враховує проведення заходів щодо підтримки та відновлення працездатності, що втрачається в процесі експлуатації. Відповідно до [10], показником довговічності є термін служби, що визначається як тривалість експлуатації об'єкта від початку його застосування до настання граничного стану.

Згідно з [11], термін служби АД загальнопромислового призначення становить 15 років при напрацюванні 40000 годин безперервної роботи. При цьому напрацювання активних частин обмотки статора – не менше 20000 годин, напрацювання підшипників – не менше 10000 годин, а ймовірність безвідмовної роботи АД становить 0,9 при 10000 годин напрацювання.

Прогнозування терміну служби АД зводиться до визначення кількісних показників надійності. На практиці, під час експлуатації АД ставиться задача зміни показників надійності в бік підвищення їх рівня.

При вирішенні задач забезпечення безаварійної експлуатації електродвигунів, виявлення експлуатаційних режимів роботи АД, що

сприяють продовженню їх терміну служби, доцільний системний підхід, що складається з наступних етапів:

Етап 1. Аналіз причин відмов приводних низьковольтних електродвигунів, отриманих в реальних умовах експлуатації ЕТК підприємств, крім цього, аналіз технологічних параметрів процесу експлуатації АД.

Етап 2. Виявлення закономірностей факторів, що впливають на експлуатацію АД. Кількісна оцінка параметрів експлуатації, що визначають термін служби низьковольтних асинхронних електродвигунів.

Етап 3. Розробка заходів щодо усунення факторів, що негативно впливають на роботу АД в ЕТК промислових підприємств. Техніко-економічне обґрунтування ефективності розроблених заходів.

Кожному з розглянутих етапів концепції системного підходу характерний певний метод дослідження.

Виходячи з вищеперелічених етапів системного підходу, потрібно сформулювати систему методів, спрямовану на оцінку та збільшення терміну служби АД, що сприяє підвищенню ефективності та техніко-економічних показників роботи ЕТК, за допомогою забезпечення безаварійної роботи АД в умовах спільної дії експлуатаційних факторів.

Як відомо з [18], асинхронні електродвигуни відображаються системою, що містить відповідні деталі та вузли. В реальних умовах експлуатації АД можливість проведення експериментальних досліджень досить трудомістка та економічно не вигідна. Відповідно, в якості експериментальної системи використовують її модель. Саме тому, оцінка надійності та ефективності функціонування АД доцільна із застосуванням фізичних та математичних моделей дослідження. При цьому, достовірність виконання процесу оцінки кількісних показників безпосередньо обумовлена коректним та обґрунтованим вибором методу дослідження.

Аналітичний огляд методів оцінки та збільшення терміну служби електродвигунів [8,10] дозволив виявити найбільш раціональний підхід дослідження, який складається з кількох етапів, першим з яких є науковий

підхід, що базується на використанні ймовірнісно-статистичних методів, в силу того, що вони дають кількісну оцінку причин відмов, крім цього, використання методу експертних оцінок, дозволяє здійснити аналіз причин і масштабів відмов АД за участю фахівців, кількісне оцінювання допустимих значень експлуатаційних параметрів АД. На другому етапі найбільш доцільно застосувати фізико-статистичні та математичні методи дослідження, для реалізації математичного апарату, що дозволяє виявити закономірності впливу факторів, які впливають на експлуатацію АД. Крім цього, створення технічних рішень щодо усунення факторів, які негативно впливають на роботу електродвигунів в ЕТК підприємств.

Безсумнівно, що зазначені методи дослідження, є найбільш інформаційно забезпеченими, як з точки зору кількісних характеристик надійності, так і з точки зору якісних характеристик, що відображають взаємозв'язок впливу зовнішніх факторів, які використовують показники надійності як сполучну ланку при дослідженнях працездатності АД.

Розробку системи методів, спрямовану на оцінку та збільшення терміну служби електродвигунів, структурно розділимо на блоки:

Блок 1. Аналіз і синтез факторів, що впливають на експлуатацію АД:

- чисельні оцінки ступеня впливу різних факторів на експлуатацію електродвигунів.

Блок 2. Моделювання фізичних процесів, що протікають в АД. Дослідження і подальший аналіз якості функціонування та працездатності електродвигунів у різноманітних режимах роботи, при одночасному впливі зовнішніх факторів:

- створення математичного апарату, що дозволяє визначити допустимі значення параметрів експлуатації. Крім того, встановити діапазон експлуатаційних режимів роботи АД з урахуванням впливу факторів;

- кількісна оцінка факторів, що визначають безаварійну експлуатацію електродвигунів.

Блок 3. Конструювання проектних процедур:

- розробка програмного забезпечення проектування ЕТК з АД, що реалізує проектні процедури з підбору засобів симетрування, що знижують рівень несиметрії напруг.

Блок 4. Проектування ЕТК з електродвигуновим навантаженням:

- обґрунтування технічних рішень щодо вибору оптимального складу, місць розміщення пристроїв симетрування в ЕТК;
- оцінка техніко-економічної ефективності установки засобів симетрування для нормалізації рівня напруги в електричній мережі.

Виходячи з вищевикладеного, відзначимо, що комплексна система методів, орієнтована на оцінку та збільшення терміну служби АД, сформована сукупністю загальновідомих методів дослідження, особливістю якої є наявність зв'язків між ними, імпорті результатів дослідження одного методу до наступного, що виражаються в інтеграції підходів дослідження. Інтеграція відображає основну тенденцію ідеї дослідження, сутність якої полягає в об'єднанні інструментів дослідження – моделей, методів, програмних комплексів, за допомогою яких виконуються обчислювальні експерименти.

Структурна схема комплексної системи методів, орієнтована на оцінку та збільшення терміну служби АД, наочно представлена на (рис.2.1).

Підсумовуючи вищесказане, слід зазначити, що комплексна система методів дослідження сприяє виконанню актуальної науково-практичної задачі поліпшення техніко-економічних показників роботи ЕТК, а також підвищенню його ефективності шляхом забезпечення безаварійної експлуатації електродвигунів ЕТК промислових підприємств. Система методів дослідження, насамперед, спрямована на вирішення наступних завдань:

- виявлення основних експлуатаційних факторів, що впливають на експлуатацію електродвигунів, при їх роботі в ЕТК;
- кількісне оцінювання допустимих значень експлуатаційних факторів АД;
- визначення рекомендованих експлуатаційних режимів роботи АД;

- розробку та реалізацію технічних рішень, що забезпечують тривалу безаварійну експлуатацію АД в ЕТК підприємств;
- оцінку техніко-економічної ефективності розроблених технічних рішень.

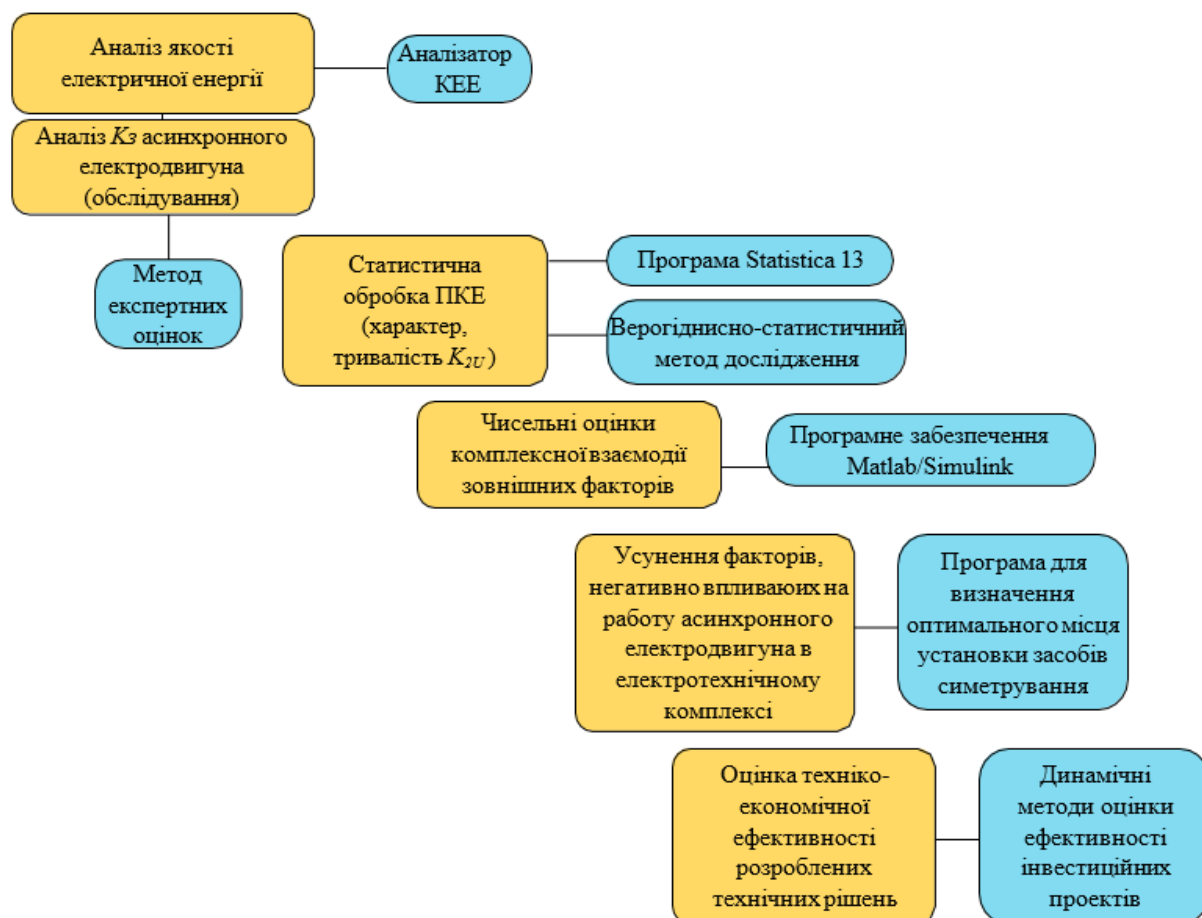


Рисунок 2.1 – Відображення зв'язків комплексної системи методів дослідження

2.2. Реалізація комп'ютерної моделі дослідження режимів роботи асинхронних електродвигунів

Досягнення задач дослідження працездатності електродвигунів у різноманітних режимах роботи ефективно проводити з використанням програмних продуктів, зокрема застосовуючи комп'ютерне моделювання на основі пакету «SimPowerSystems» інтерактивного середовища програмування MATLAB/Simulink.

При формуванні імітаційної моделі дослідження використано стандартну модель з бібліотеки Simulink з представленням величин у відносних одиницях.

Комп'ютерне моделювання фізичних процесів, що протікають в АД, можливо умовно розділити на етапи:

- 1) формування структурної схеми за допомогою підбору блоків моделі з бібліотеки Simulink середовища програмування MATLAB;
- 2) з'єднання елементів схеми моделі, узагальнення їх в єдину модель дослідження;
- 3) розрахунок параметрів схеми заміщення блоків моделі, наприклад, таких як асинхронний електродвигун.

Комп'ютерна модель дослідження, що базується на пакеті «SimPowerSystems» в середовищі MATLAB/Simulink, зображена на (рис.2.2).

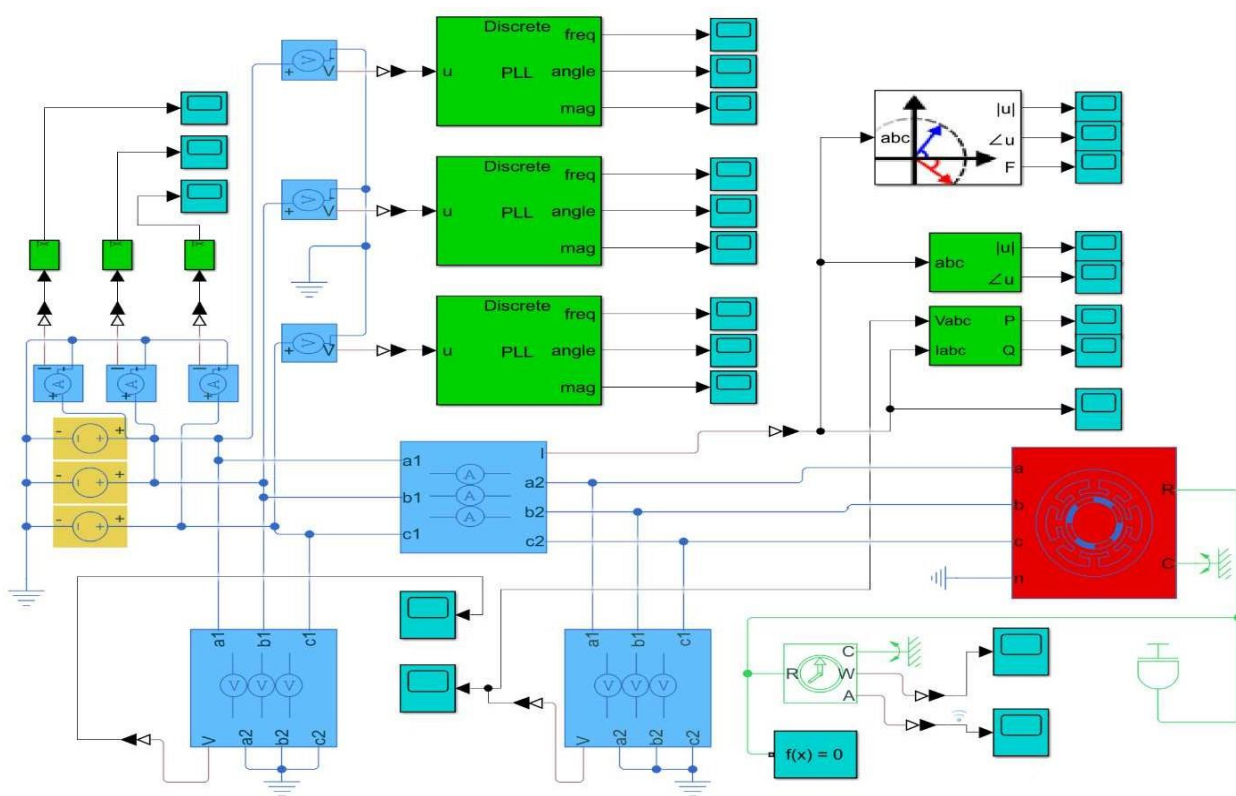


Рисунок 2.2 – Модель роботи АД при несиметричній напрузі живлення, сформована в середовищі MATLAB/Simulink

Розроблена модель дослідження (рис. 2.2) являє собою схему, що складається з елементів: асинхронного електродвигуна (блок Asynchronous Machine); трьох однофазних джерел напруги (блоки AC Voltage Source); блоків для вимірювання основних параметрів електродвигуна (блоки Power, Ideal Rotational Motion Sensor); блоку задання навантаження на валу електродвигуна

(блок Moment); вимірювачів напруги (блок Voltage Measurement) і струму (блок Current Measurement); осцилографів для вимірювання струму, напруги, моменту і швидкості (блок осцилографа Scope); графопобудовника для відображення механічної характеристики електродвигуна (блок XY Graph); блоків контролю форми синусоїди живлячої напруги (блоки Three-Phase Sequence Analyzer, Sequence Analyzer).

Реалізація розрахунку параметрів схеми заміщення блоків комп'ютерної моделі базується на використанні значень параметрів каталожних даних АД, крім того, розрахунку параметрів на основі цих даних. Для моделювання режимів роботи АД виконаємо розрахунок відсутніх даних за методикою професора І. В. Черних, викладеною в [9].

Як приклад розглянемо АД AIP90LA8Y3 з відповідними даними, наведеними в (табл. 2.1).

Таблиця 2.1 – Каталожні дані АД AIP90LA8Y3

№	Параметри асинхронного електродвигуна	Значення параметра
1	Номінальна потужність, P_n (кВт)	0,75
2	Частота живильної напруги, f_n (Гц)	50
3	Номінальна лінійної напруги, U_n (В)	380
4	Синхрона частота обертання, n_s (об/хв)	750
5	Коефіцієнт потужності, $\cos\varphi$	0,67
6	Коефіцієнт корисної дії при номінальному режимі, η_n (%)	70
7	Частота обертання в номінальному режимі n_n , (об/хв)	730
8	Трум статора номінальний I_n , (А)	2,6
9	Число пар полюсів, p	4
10	Кратність пускового моменту K_n , (в.о.)	1,6
11	Кратність пускового струму K_I , (в.о.)	3,5
12	Момент інерції, J (кг·м ²)	0,0063
13	Кратність максимального моменту K_{max} , (в.о.)	1,7

Розрахунок параметрів АТ здійснюється в наступній послідовності:

1. Критичне та номінальне ковзання АТ:

$$S_n = \frac{n_1 - n_n}{n_1} = \frac{750 - 730}{750} = 0,03 \text{ в.о.} \quad (2.1)$$

$$S_{kp} = S_n \left(K_{max} + \sqrt{K_{max}^2 - 1} \right) = 0,03 \cdot \left(1,7 + \sqrt{1,7^2 - 1} \right) = 0,09 \text{ в.о.} \quad (2.2)$$

2. Номінальна швидкість АД:

$$\omega_n = \frac{\pi n_1}{30} = \frac{3,14 \cdot 750}{30} = 78,5 \text{ рад/с} \quad (2.3)$$

$$n_1 = \frac{60 f_1}{p} = \frac{60 \cdot 50}{4} = 750 \text{ об/хв}$$

3. Номінальний момент АД:

$$M_n = \frac{P_n}{\omega_n} = \frac{750}{78,5} = 9,55 \text{ Нм} \quad (2.4)$$

4. Критичний момент АД:

$$M_{\max} = K_{\max} \cdot M_n = 1,7 \cdot 9,55 = 16,25 \text{ Нм} \quad (2.5)$$

5. Пусковий момент АД:

$$M_n = K_n \cdot M_n = 1,6 \cdot 9,55 = 15,98 \text{ Нм} \quad (2.6)$$

6. Активні опори статора та зведені ротора АД.

1) враховуючи, що діапазон величин конструктивного коефіцієнта $C = (1,01 - 1,05)$. При цьому менше значення якого відповідає АД більшої потужності. Отже, при розрахунку використаємо величину коефіцієнта $C = 1,05$.

2) беручи до уваги, що рекомендовані значення механічних втрат в асинхронному електродвигуні відповідають наступному діапазону величин $\Delta P_{\text{мех}} = (0,01 - 0,05) P_n$. При цьому, менше значення якого відповідає АД більшої потужності. Отже, при розрахунку використаємо значення механічних втрат в АД рівне $\Delta P_{\text{мех}} = 0,05 P_n$.

$$R_r = \frac{P_n - P_{\text{мех}}}{3I_n^2 \cdot \frac{1 - S_n}{S_n}} = \frac{750 + (0,05 \cdot 750)}{3 \cdot 2,6^2 \cdot \frac{1 - 0,03}{0,03}} = 1,2 \text{ Ом} \quad (2.7)$$

$$R_s = \frac{380 \cdot \cos \varphi (1 - \eta)}{\sqrt{3} \cdot I_n} - C^2 \cdot R_r - \frac{\Delta P_{\text{мех}}}{3I_n^2} \quad (2.8)$$

$$R_s = \frac{380 \cdot 0,67(1 - 0,7)}{\sqrt{3} \cdot 2,6} - 1,05^2 \cdot 1,2 - \frac{0,05 \cdot 750}{3 \cdot 2,6^2} = 14,157 \text{ Ом}$$

7. Індуктивність розсіювання статора та приведена до ротора:

$$L_s = L_r = \frac{\frac{U_{\text{лн}}}{\sqrt{3}}}{4\pi f_1 \cdot (1 + C^2) \cdot K_I \cdot I_n} = \frac{220}{4 \cdot 3,14 \cdot 50 (1 + 1,05^2) \cdot 3,5 \cdot 2,6} = 0,02 \text{ Гн} \quad (2.9)$$

$$L_1 = L_m + L_s = \frac{\frac{U_{\text{лн}}}{\sqrt{3}}}{4\pi f_1 \cdot I_n \cdot \sqrt{1 - (\cos \varphi)^2} - \frac{4\pi f_1 \cdot M_{\text{кр}} \cdot S_n}{1,7 \cdot U_{\text{лн}} \cdot p \cdot S_{\text{кр}}}} \quad (2.10)$$

$$L_1 = \frac{220}{2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 2,6 \cdot \sqrt{1 - (0,67)^2} - \frac{4 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 16,24 \cdot 0,03}{1,7 \cdot 380 \cdot 4 \cdot 0,09}} = 0,36 \text{ Гн}$$

8. Конструктивний коефіцієнт:

$$C1 = 1 + \frac{L_s}{L_m} = 1 + \frac{0,02}{0,36 - 0,02} = 1,05 \quad (2.11)$$

Виконаємо порівняння розрахункової величини конструктивного коефіцієнта з раніше прийнятим. Значення коефіцієнта $C1 = C = 1,05$, відповідно, розрахунки параметрів АД за методикою І.В. Черних показали задовільну збіжність результатів.

Після розрахунку параметрів виконується процес моделювання режимів роботи АД. Разом з тим, при реалізації моделювання необхідно внести розраховані дані у відповідні графі вікон задання параметрів АД.

Комп'ютерна імітація режимів роботи АД, із застосуванням розробленої моделі (рис. 2.2), дозволяє для кожної фази АД проводити вимірювання наступних величин: фазних і лінійних напруг, фазних струмів. Виконавши моделювання режимів роботи АД, знімаємо з блоків цифрових дисплеїв значення струмів і напруг електродвигуна.

Слід зазначити, що розроблена модель дослідження є універсальною, змінюючи вихідні (вхідні) параметри моделювання, відстежуємо зміни основних параметрів АД різних типорозмірів.

Таким чином, сформована імітаційна модель сприяє вирішенню задач експериментального дослідження фізичних процесів, що протікають в АД. В першу чергу, дозволяє проводити аналіз якості функціонування та працездатності електродвигунів в різних режимах його роботи. Крім того,

відстежувати кількісну зміну досліджуваних параметрів в результаті впливу зовнішніх факторів.

2.3. Метод експериментального дослідження режимів роботи асинхронних електродвигунів, заснований на комп'ютерному моделюванні

Використовуючи розроблену імітаційну модель (рис.2.2), виконаємо дослідження режимів роботи АД за сумісної дії експлуатаційних факторів. Експериментальне дослідження базується на моделюванні несиметричного режиму роботи електродвигуна шляхом зміни величин фазних напруг, з урахуванням зміни навантаження на валу електродвигуна. Виконаємо імітацію режимів роботи АД номінальною потужністю $P_n = 0,75$ кВт, частотою обертання $n = 750$ об/хв. Порядок виконання експерименту:

1. Здійснюємо введення, отриманих розрахунковим шляхом, параметрів електродвигуна. Встановлюємо значення параметрів АД у вікні завдання (блок Asynchronous Machine).

2. Здійснюємо введення значень напруги на трьох стандартних однофазних джерелах змінної напруги (блоки AC Voltage Source). Початкова величина напруги становить 220 В, при цьому на кожному з джерел встановлюється певне значення напруги, штучно створюємо «перекіс фаз» – несиметричний режим роботи АД.

Встановлюємо напруги на джерелах в залежності від величини K_{2U} . Значення напруг, що встановлюються, визначаємо, використовуючи формулу (Б.18) ДСТУ 50160 :2023.

Відповідно до ДСТУ 13109 – 97, який діяв до прийняття чинного ДСТУ ІЕС 6100 –2–12:2013, величина діючого значення напруги зворотної послідовності $U_{2(1)}$ і при частоті 50 Гц визначається виразом:

$$U_{2(1)i} = \sqrt{\frac{1}{12} \left[\left(\sqrt{3}U_{AB(1)i} - \sqrt{4U_{BC(1)i}^2 - \left(\frac{U_{BC(1)i}^2 = U_{AC(1)i}^2}{U_{AC(1)i}} \right)^2} + U_{AC(1)i} \right)^2 + \left(\frac{U_{BC(1)i}^2 = U_{AC(1)i}^2}{U_{AC(1)i}} \right)^2 \right]} \quad (2.12)$$

де $U_{AB(1)i}$, $U_{BC(1)i}$, $U_{CA(1)i}$ – величини діючих значень лінійних напруг при частоті 50 Гц в i -му спостереженні, В.

Коефіцієнт несиметрії напруг K_{2Ui} :

$$K_{2Ui} = U_{2(1)i} / U_{1(1)i} \cdot 100 \%, \quad (2.13)$$

де $U_{2(1)i}$ – величина діючого значення напруги зворотної послідовності при частоті 50 Гц в i -му спостереженні, В;

$U_{1(1)i}$ – величина діючого значення напруги прямої послідовності при частоті 50 Гц в i -му спостереженні, В.

Фазна напруга:

$$U_A = \frac{U_{AB}}{\sqrt{3}} \quad (2.14)$$

Амплітудне значення фазної напруги:

$$U_{am} = \sqrt{2} U_A \quad (2.15)$$

Таким чином, розрахунок параметрів дозволив встановити на кожному з трьох однофазних джерел змінної напруги моделі певну амплітудну величину напруги.

Для кожної величини параметра K_{2U} розраховуються відповідні фазні напруги. Так, для $K_{2U} = 1\%$ напруги на однофазних джерелах напруги (блоки AC Voltage Source) схеми моделювання дорівнюють: $U_A = 221,49$ В, $U_B = 221,28$ В, $U_C = 215,1$ В.

Аналогічно виконаємо розрахунок значень напруги для $K_{2U} = 2;3;4 \%$. В (табл.2.2) наведено значення встановлюваних напруг, що використовуються в ході експерименту.

Таблиця 2.2 – Значення встановлюваних напруг на кожному з джерел схеми моделювання

$K_{2U}, \%$	$U_A, \text{В}$	$U_B, \text{В}$	$U_C, \text{В}$
0	220	220	220
1	221,49	221,28	215,1
2	223,58	223,48	210,79
3	225,78	225,79	206,3
4	228,1	228	201,9

3. Здійснюємо введення значень навантаження АД (блок Moment). Встановлюємо величину навантаження АД для експерименту «Холостий хід». Виконаємо експеримент електродвигуна для кожного значення $K_{2U} = (0 - 4) \%$.

4. Проводимо процес моделювання режиму роботи АД шляхом натискання кнопки «Пуск».

5. Після закінчення перехідного процесу в моделюючій схемі знімаємо показання лінійних і фазних напруг, фазних струмів з блоків вимірювання.

6. Фіксуємо отримані дані в таблицю вимірювань (табл. 2.3) при експерименті «Холостий хід».

7. Аналогічним способом виконуємо експеримент «Повне завантаження» електродвигуна. Встановлюємо величину навантаження АД для даного експерименту. Для задання величини механічного моменту на валу АД використовуємо наступну формулу:

$$M = 9,55 P_2 / n, \quad (2.16)$$

де P_2 – корисна потужність АД, Вт; n – частота обертання ротора АД, об/хв.

Величина завантаження досліджуваного АД в режимі 100% завантаження дорівнює $M = 9,55$ Нм. Виконаємо експеримент «Повне завантаження» електродвигуна для кожного значення $K_{2U} = (0 - 4) \%$.

8. Фіксуємо отримані дані в таблицю вимірювань (табл. 2.3) при експерименті «Повне завантаження» електродвигуна.

В результаті, експеримент виконано при двох значеннях завантаження електродвигуна – режим «Холостий хід» та «Повне завантаження» електродвигуна для кожного значення $K_{2U} = (0 - 4) \%$.

Використовуючи комп'ютерну модель (рис. 2.2) досліджено режими «Холостий хід» та «Повне завантаження» електродвигуна, отримані результати експериментів представлені в (табл. 2.3), графічна інтерпретація зміни струмів у фазах електродвигуна в залежності від значення K_{2U} приведена на (рис. 2.3, 2.4).

Зазначимо, що розроблений метод дослідження дозволив проаналізувати фізичні процеси, які відбуваються в АД, крім того, сприяє визначенню кількісних показників експлуатаційних факторів для прийняття рішень, спрямованих на забезпечення ефективної та безаварійної експлуатації електродвигунів.

Оцінка похибки реалізованої комп'ютерної моделі дослідження. Похибка комп'ютерної моделі оцінювалася виходячи з функціональної залежності, отриманої в результаті експерименту вихідних величин від ряду задаваних вхідних величин, похибка яких відома. Математичний характер взаємозв'язку кожного вихідного параметра з вхідними параметрами розглянуто як результат непрямого вимірювання:

$$y_j = f(x_{1j}, x_{2j}, x_{3j}, \dots, x_{zj}), \quad (2.17)$$

де y_j – вихідна величина комп'ютерної моделі; $x_{1j}, x_{2j}, x_{3j}, \dots, x_{zj}$ – вхідні величини комп'ютерної моделі.

Таблиця 2.3 – Результати дослідження

Параметри експерименту	Холостой хід						Повне навантаження				
Коефіцієнт несимметрії, %	K_{2U}	0	1	2	3	4	0	1	2	3	4
Фазні напруги, В	U_A	220	221,49	223,58	225,78	228,1	220	221,49	223,58	225,78	228,1
	U_B	220	221,28	223,48	225,79	228	220	221,28	223,48	225,79	228
	U_C	220	215,1	210,7	206,3	201,9	220	215,1	210,7	206,3	201,9
Линійні напруги, В	U_{AB}	380	383,3	387,1	391	394,7	380	383,3	387,1	391	394,7
	U_{AC}	380	378,2	376,4	374,4	372,7	380	378,2	376,4	374,4	372,7
	U_{BC}	380	378	376,1	374,3	372,5	380	378	376,1	374,3	372,5
Фазні струми, % до $I_{ном}$	I_A	68,39	67,03	66,12	63,22	65,22	100	102,36	104,85	107,29	110,33
	I_B	68,39	72,92	77,45	80,75	87,55	100	102,36	105,39	108,47	111,78
	I_C	68,39	65,22	62,05	58,15	57,34	100	95,11	94,97	85,46	80,8
Фазні струми, А	I_A	1,51	1,48	1,46	1,396	1,44	2,208	2,26	2,315	2,369	2,436
	I_B	1,51	1,61	1,71	1,783	1,933	2,208	2,26	2,327	2,395	2,468
	I_C	1,51	1,44	1,37	1,284	1,266	2,208	2,1	2,097	1,887	1,784

Оскільки комп'ютерна модель побудована на основі пакету програм «SimPowerSystems» системи MATLAB/Simulink з розділенням моделі на елементарні об'єкти, отже, отримати функціональні залежності для вихідних величин в явному вигляді є складним завданням, однак можливості системи MATLAB/Simulink дозволяють виявити похибку вихідних величин шляхом задання рандомізованих поправок певного діапазону до вхідних величин, моделюючи поведінку їх похибок.

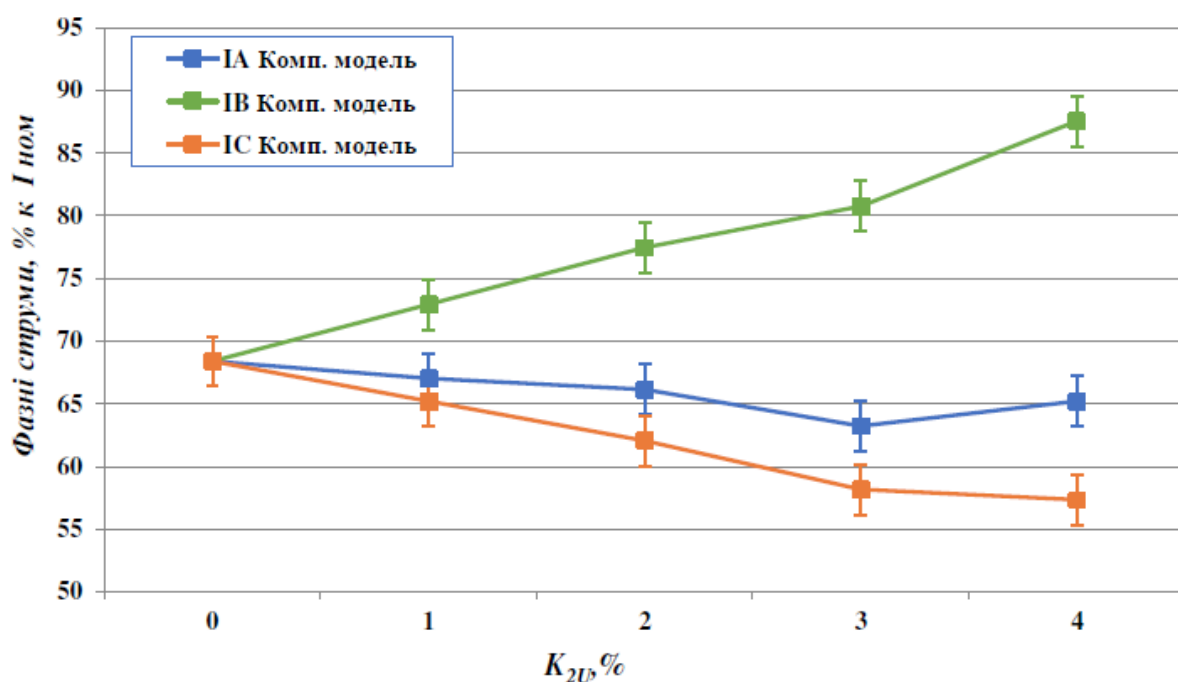


Рисунок 2.3 – Графічне відображення зміни струмів у фазах електродвигуна від K_{2U} АД $P_n = 0,75$ кВт (комп'ютерна модель при експерименті «Холостий хід»)

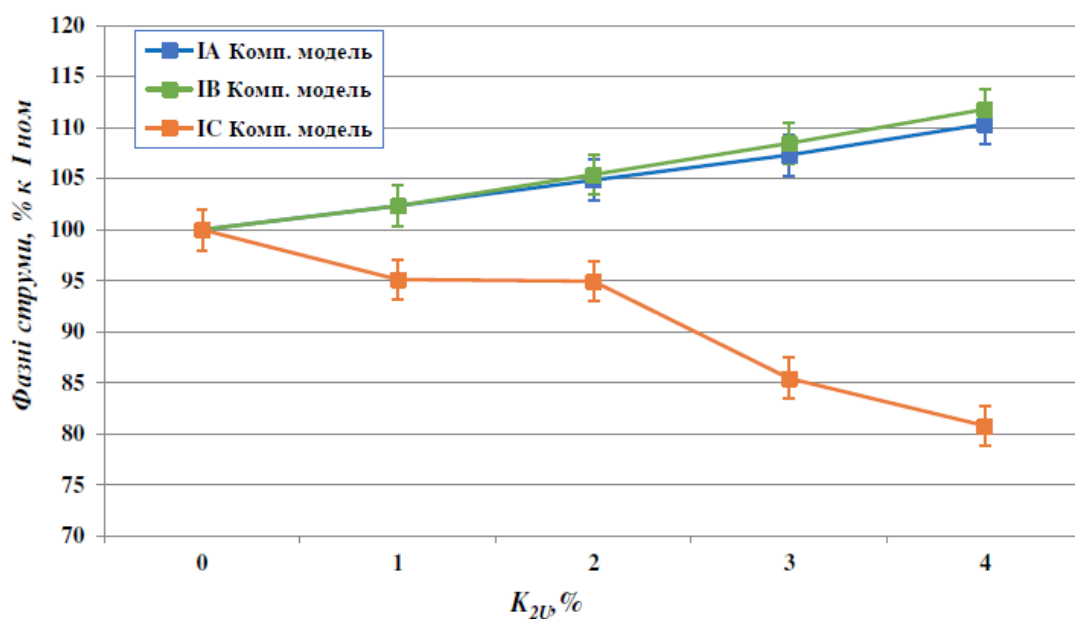


Рис. 2.4 – Графічне відображення зміни струмів у фазах електродвигуна від K_{2U} АД $P_n = 0,75$ кВт (комп'ютерна модель під час експерименту «Повне завантаження»)

Багаторазові обчислення вихідних величин розробленої моделі дозволяють отримувати масиви статистичних даних, які апріорі підпорядковуються

законам нормального розподілу, що дозволяє оцінити похибку вихідних величин через статистичну оцінку параметрів розподілу випадкових величин.

Зокрема, для вихідної величини – «Фазні струми в % до Іном», отримано значення абсолютної похибки, що становить ± 2 % при довірчій імовірності $p = 0,95$. При цьому, на (рис. 2.3 та 2.4) похибки моделі позначені відповідними планками.

Висновки по другому розділу

Багаторазові обчислення вихідних величин розробленої моделі дозволяють отримувати масиви статистичних даних, які апріорі підпорядковуються законам нормального розподілу, що дозволяє оцінити похибку вихідних величин через статистичну оцінку параметрів розподілу випадкових величин.

РОЗДІЛ 3

РЕАЛІЗАЦІЯ ФІЗИЧНОЇ МОДЕЛІ ДОСЛІДЖЕННЯ РЕЖИМІВ РОБОТИ АСИНХРОННИХ ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ

Верифікація комп'ютерної моделі виконана методом порівняння її результатів з результатами експериментального дослідження.

Експериментальне дослідження проводилося із застосуванням натурно-фізичної моделі, створеної на лабораторній базі ТОВ «АЛЬТЕРА ЖИТОМИР».

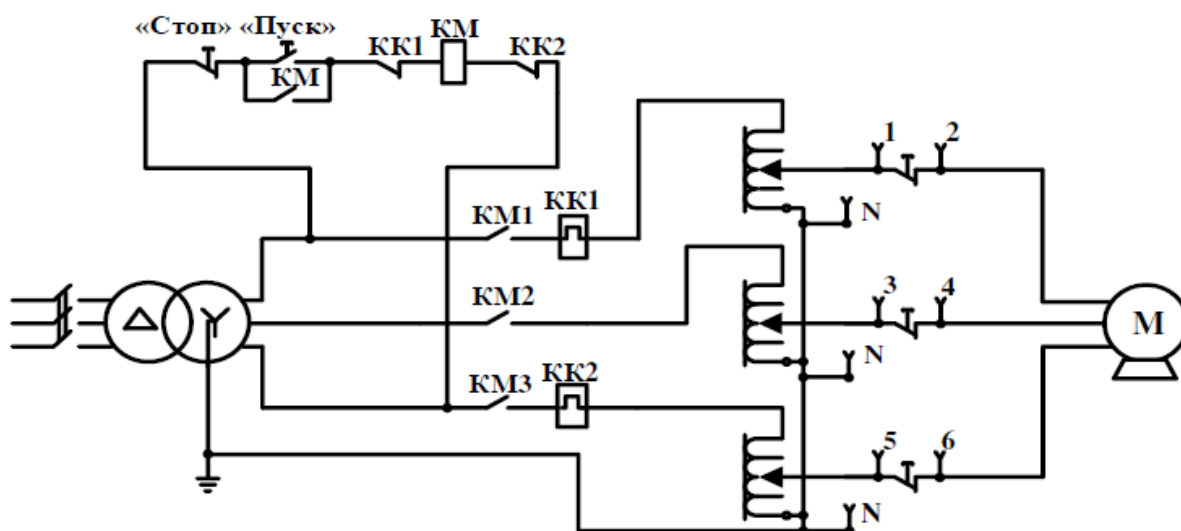


Рисунок 3.1 – Принципова схема експериментальної установки

Натурно-фізична установка функціонально відображає комп'ютерну модель і включає в себе основний елемент – асинхронний електродвигун, підключений через пристрої, що дозволяють регулювати входні параметри живильної електричної мережі. Принципова електрична схема експериментальної установки представлена на (рис. 3.1).

Реалізована експериментальна установка (рис. 3.2) складається з наступних основних елементів: розділового трансформатора, набору лабораторних автотрансформаторів (ЛАТР), асинхронного електродвигуна, мультиметра, пристрою імітації навантаження.



Рис.3.2 – Експериментальна установка

Згідно з принциповою схемою (рис. 3.1) гальванічна розв'язка ланцюгів здійснюється за рахунок розділового трансформатора. При цьому, плавне регулювання напруги, що моделює її «перекіс», здійснюється ЛАТРами для кожної з фаз АД (в діапазоні від 0 до 250 В). Електродвигун, в свою чергу, з'єднаний з основною частиною схеми через контакти 1 – 6, призначені для підключення вимірювальних приладів (мультиметра). Імітація навантаження проводилася за допомогою гальмівної колодки, що дозволяє регулювати режим навантаження АД (від режиму «Холостий хід» до 120%).

3. 1. Метод експериментального дослідження режимів роботи асинхронних електродвигунів, заснований на фізичному моделюванні

Дослідження асинхронного електродвигуна виконано на експериментальній установці (рис.3.2), що складається з основних елементів – розділового трансформатора потужністю 10 кВА, трьох лабораторних автотрансформаторів, АД з короткозамкненим ротором серії AIP90LA8Y3 з $P_n = 0,75$ кВт, частотою обертання $n = 750$ об/хв.

В процесі дослідження, з використанням натурно-фізичної моделі, необхідно розглянути динаміку зміни аналогічних параметрів, що і при комп'ютерному моделюванні.

Експеримент базується на створенні несиметричного режиму роботи АД, шляхом зміни величин фазних напруг з використанням ЛАТРів. Порядок виконання експерименту:

1. Реалізуємо несиметричний режим роботи АД. Моделювання несиметричного режиму роботи АД базується на зміні величини фазних напруг. ЛАТРами виставлялася вхідна напруга таким чином, щоб отримати певні значення фазних напруг, що відповідають певній величині коефіцієнта K_{2U} , при цьому зміна K_{2U} контролювалася в межах від 0 до 4%. Крок зміни K_{2U} в експерименті складав 1%. Вимірювання фазних струмів, фазних та лінійних напруг проводилося за допомогою мультиметра.

При виконанні експерименту кількісні значення вхідних параметрів встановлені за аналогією з параметрами комп'ютерного моделювання.

2. Реалізуємо зміну навантажувального режиму роботи за допомогою фізичного гальмування валу електродвигуна. Гальмування здійснювалося гальмівною колодкою, що забезпечує плавне регулювання навантаження при зміні сили притискання до шківів АД.

Після встановлення необхідного значення навантаження на валу АД вимірюємо величини фазних струмів шляхом перемикання з'єднувальних проводів. При підключенні проводів до затискачів:

- 1-2 визначимо величину струму у фазі А;
- 3-4 визначимо величину струму у фазі В;
- 5-6 визначимо величину струму у фазі С.

Подібним чином вимірюємо значення лінійних і фазних напруг на експериментальній установці.

В процесі дослідження значення K_{2U} змінюється в діапазоні від 0 – 4%, отже, для кожного значення K_{2U} виконано експеримент «Холостий хід» та «Повне завантаження» електродвигуна.

Використовуючи фізичну модель (рис.3.2) досліджено режими «Холостий хід» та «Повне завантаження» електродвигуна. Результати досліджень зведено в (табл. 3.1), їх графічна інтерпретація представлена на (рис. 3.3 і 3.4).

Таблиця 3.1 – Результати досліджень

Параметри експеримента	Холостой хід						Повне навантаження				
Коефіцієнт несиметрії, %	K_{2U}	0	1	2	3	4	0	1	2	3	4
Фазні напруги, В	U_A	220	223,6	224,9	226,7	229,5	220	223,6	224,9	226,7	229,5
	U_B	220	222,4	224,2	225,8	228,6	220	222,4	224,2	225,8	228,6
	U_C	220	215	210	204	199	220	215	210	204	199
Линійні напруги, В	U_{AB}	380	384,2	389,1	392,3	396,9	380	384,2	389,1	392,3	396,9
	U_{AC}	380	376,4	375,2	373,4	371,7	380	376,4	375,2	373,4	371,7
	U_{BC}	380	377,1	376	373,3	370,7	380	377,1	376	373,3	370,7
Фазні струми, % к I ном	I_A	67,93	65,67	63,41	62,95	63,41	100	102,27	104,55	110	115
	I_B	67,93	76,54	80,62	86,05	95,11	100	103,64	107,73	110,91	118,64
	I_C	67,93	64,31	61,59	54,35	53,89	100	98,18	90,91	81,82	78,18
Фазні струми, А	I_A	1,5	1,45	1,4	1,39	1,4	2,2	2,25	2,3	2,42	2,53
	I_B	1,5	1,69	1,78	1,9	2,1	2,2	2,28	2,37	2,44	2,61
	I_C	1,5	1,42	1,36	1,2	1,19	2,2	2,16	2	1,8	1,72

Зазначимо наступне, що розроблений метод дозволив виконати дослідження режимів роботи АД при впливі експлуатаційних факторів.

Однак, існує складність його застосування, яка полягає у дорожнечі фізичної моделі, оскільки, при виконанні досліджень для кожного типорозміру електродвигунів необхідно встановлювати конкретний АД. Крім того, при недостатній кваліфікації персоналу, що проводив експеримент, можливий вихід з ладу експериментальної установки. Саме тому, комп'ютерна модель позбавлена даних недоліків.

Оцінка похибки реалізованої фізичної моделі дослідження.

Оскільки фізична модель побудована за принципом зв'язаної вимірювальної системи, оцінити похибку вимірювань моделі можливо через значення допустимих відносних похибок вимірювального обладнання, яке входить до складу моделі. У процесі вимірювання вихідних параметрів фізичної моделі беруть участь мультиметр з допустимою відносною похибкою 2% та ЛАТР, точність встановлення значень напруги на якому також оцінюється через допустиму відносну похибку в розмірі 3%. При цьому точність вимірювальної системи в такому випадку оцінюється через залежність:

$$\delta_{\text{доп}} = \delta_{\text{м}} + \delta_{\text{л}},$$

де δ_m та δ_l – допустима відносна похибка мультиметра та ЛАТРа відповідно, %.

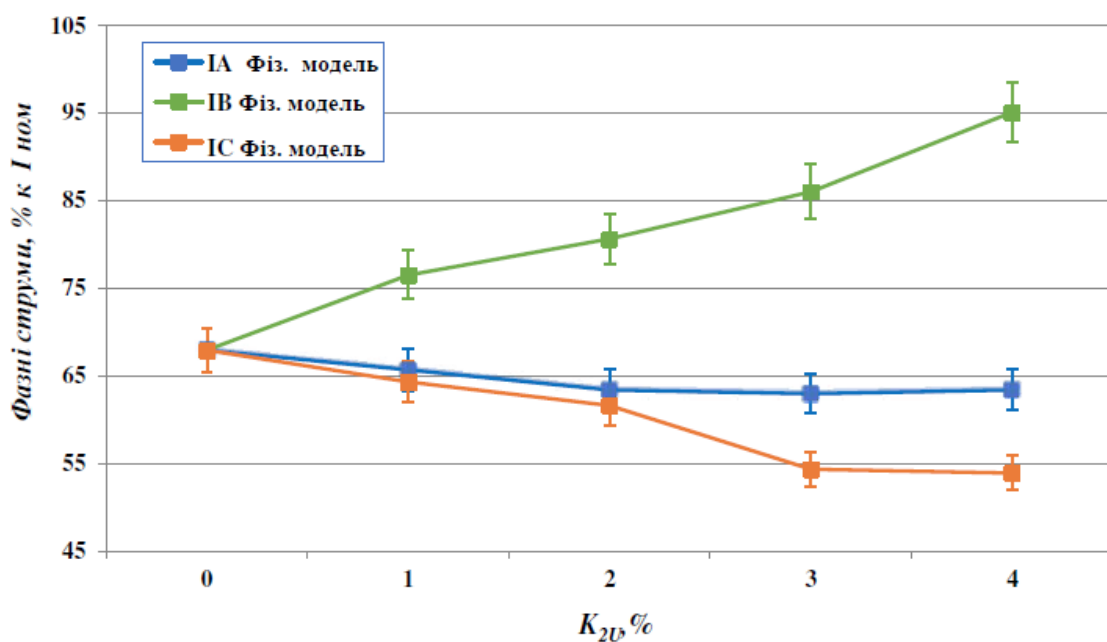


Рисунок 3.3 – Графічне відображення зміни струмів у фазах електродвигуна від K_{2U} АД $P_n = 0,75$ кВт (фізична модель під час експерименту «Холостий хід»)

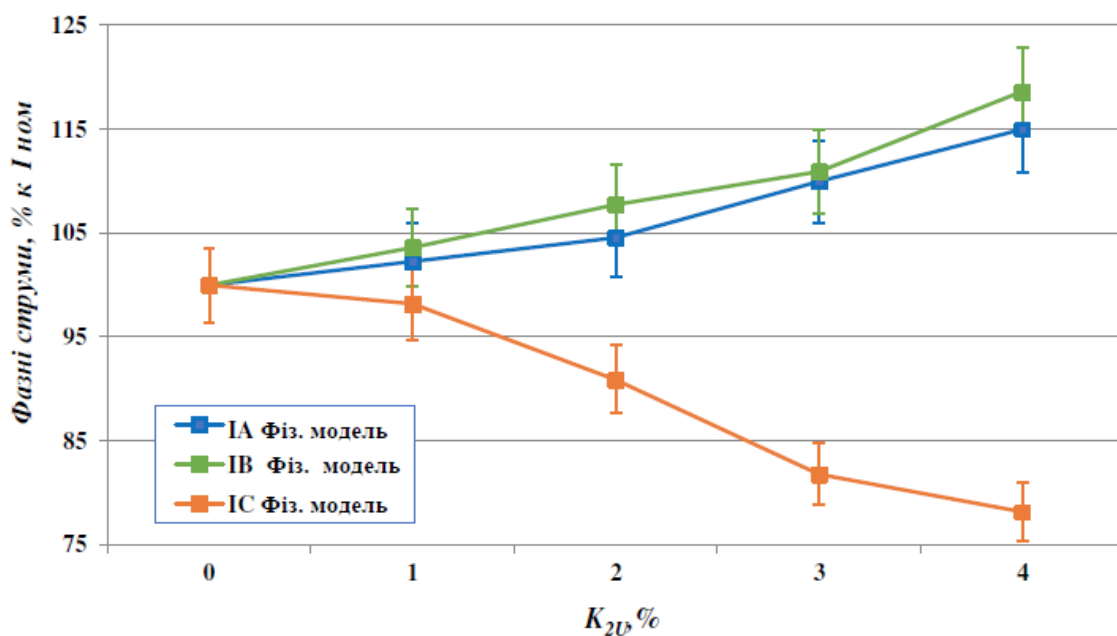


Рисунок 3.4 – Графічне відображення зміни струмів у фазах електродвигуна від K_{2U} АД $P_n = 0,75$ кВт (фізична модель під час експерименту «Повне завантаження»)

З урахуванням значень похибок обладнання, описаних вище, отримуємо відносну похибку вимірювальної системи фізичної моделі, що дорівнює 3,6 %. При цьому, на (рис. 3.3 та 3.4) похибки моделі позначені відповідними планками.

3.2. Оцінка достовірності розробленої комп'ютерної моделі

У процесі верифікації розробленої комп'ютерної моделі було проведено порівняння експериментальних результатів, отриманих за допомогою фізичної та комп'ютерної моделей. Накладання результатів (залежностей струмів у фазах АД від значення K_{2U}) двох типів моделей при експерименті «Холостий хід» відображено на (рис. 3.5), а при експерименті «Повне завантаження» АД – на (рис. 3.6).

Отримані розбіжності, що спостерігаються на представлених графічних залежностях (рис. 3.5, 3.6), можуть бути пояснені недостатньою точністю завдання вихідних даних при здійсненні експерименту на фізичній моделі. Причому, недостатня точність регулювання ЛАТРів та похибка вимірювання мультиметра, у поєднанні з втратами в електродвигуні, призводять до незначного спотворення досліджуваних значень.

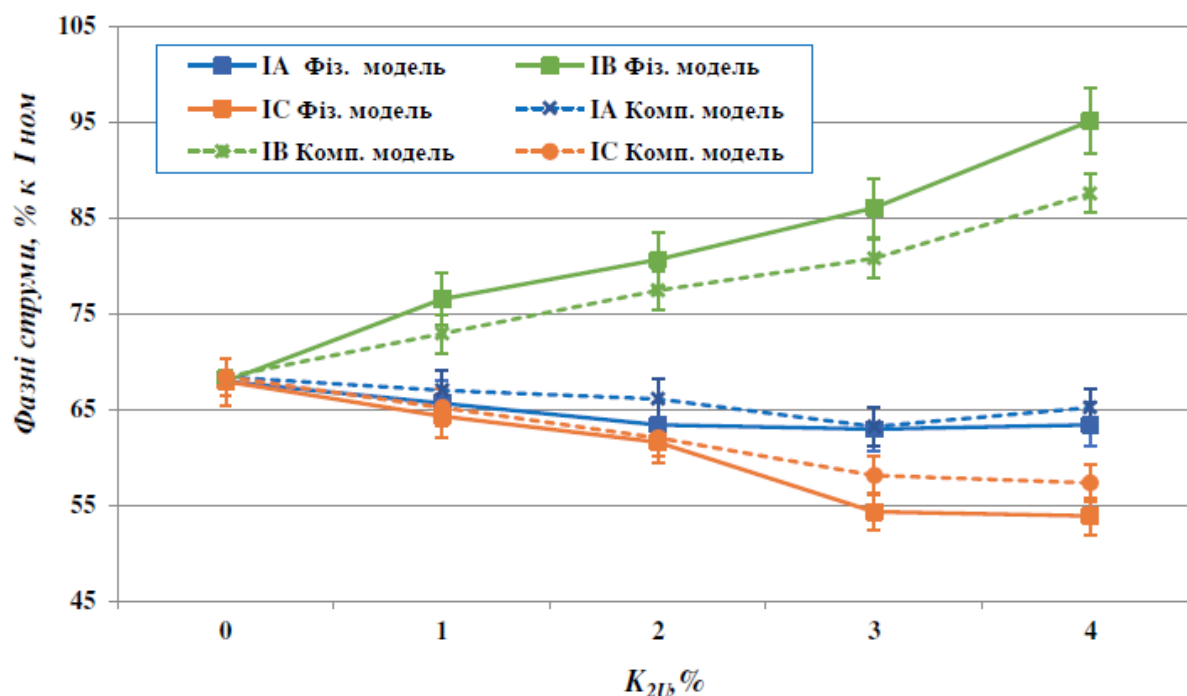


Рисунок 3.5 – Графічне відображення зміни струмів у фазах електродвигуна від K_{2U} (під час експерименту «Холостий хід»)

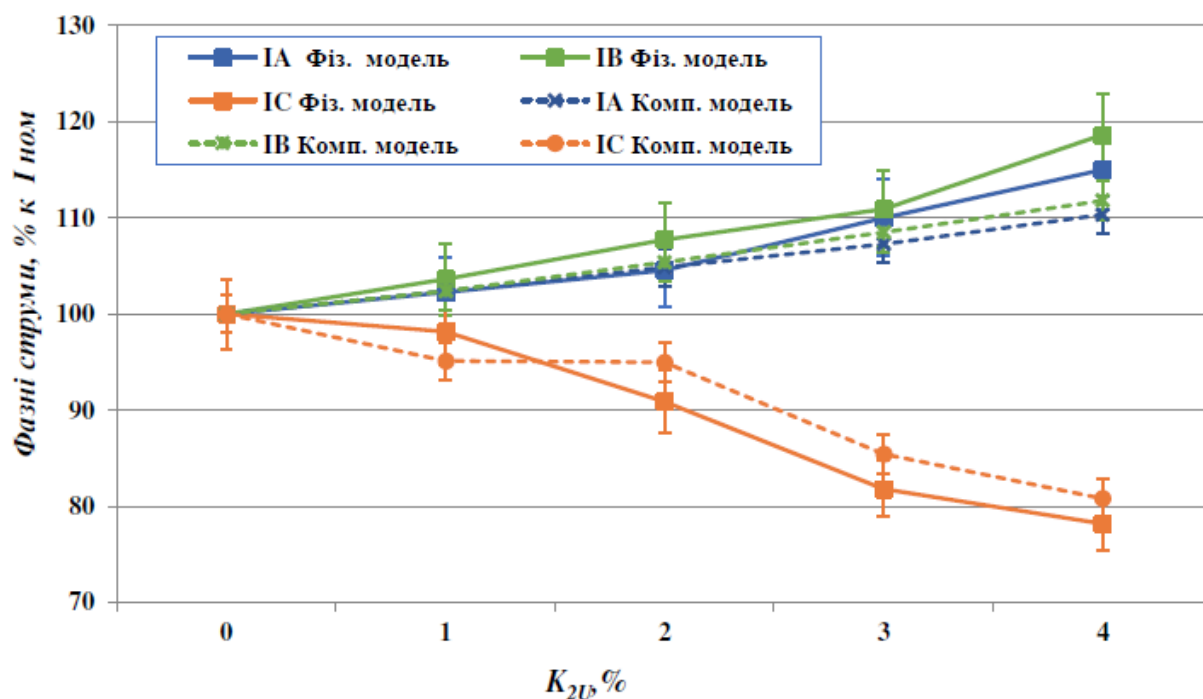


Рисунок 3.6 – Графічне відображення зміни струмів у фазах електродвигуна від K_{2U} (під час експерименту «Повне завантаження»)

Як видно з графічних залежностей (рис. 3.5, 3.6), у всіх точках області допустимих значень пари даних фізичної моделі та комп'ютерної моделі або повністю об'єднані, або перетинаються одна з одною, а характер поведінки пар залежностей повторює одна одну. Оцінка кореляційних зв'язків між комп'ютерною моделлю та фізичною моделлю проведена на основі методики визначення коефіцієнта кореляції Пірсона згідно зі стандартною залежністю:

$$r = \frac{\sum(x_i - \bar{x}) \cdot (y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum(x_i - \bar{x})^2 \cdot \sum(y_i - \bar{y})^2}}, \quad (3.1)$$

де x_i – i -ий параметр з вибірки x ; y_i – i -ий параметр з вибірки y ; $\bar{x}$ та $\bar{y}$ – середні значення вибірок x та y відповідно. Для умов зіставлення моделей до вибірки x віднесено вихідні параметри фізичної моделі, до вибірки y – вихідні параметри комп'ютерної моделі. Результати оцінки коефіцієнта кореляції Пірсона представлені в (табл. 3.2).

Таблиця 3.2 – Коефіцієнти кореляції досліджуваних залежностей

Парні масиви досліджуваних даних	Коефіцієнт кореляції
I _A фіз. модель / комп. модель (при експерименті «Холостий хол»)	0,97
I _B фіз. модель / комп. модель (при експерименті «Холостий хол»)	0,99
I _C фіз. модель / комп. модель (при експерименті «Холостий хол»)	0,99
I _A фіз. модель / комп. модель (при експерименті «Повне завантаження»)	0,98
I _B фіз. модель / комп. модель (при експерименті «Повне завантаження»)	0,99
I _C фіз. модель / комп. модель (при експерименті «Повне завантаження»)	0,96

Інтерпретуючи отримані дані (табл.3.2), відзначимо високу кореляцію між даними комп'ютерної моделі та фізичної моделі.

Відхилення даних експериментального дослідження комп'ютерної моделі від фізичної оцінювалося за наступними двома метриками: середньоквадратичною помилкою (RMSE) та середньою абсолютною помилкою (MAE). RMSE визначається за наступною залежністю:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum (x_i - y_i)^2}{n}}, \quad (3.2)$$

де n – кількість вимірювань.

MAE визначається наступною залежністю:

$$MAE = \frac{|(x_i - y_i)|}{n} \quad (2.21)$$

В результаті оцінки метрик отримано значення RMSE, що дорівнює 3,15 % при експерименті «Холостий хід» та 3% при експерименті «Повне завантаження» АД. Оцінка MAE при експерименті «Холостий хід» склала 2,39 %, при експерименті «Повне завантаження» – 2,27 %.

Висновки по третьому розділу

Для досягнення поставлених цілей нашого дослідження та для умов реального практичного використання відхилення моделей показує задовільний результат, що свідчить про успішну верифікацію створеної комп'ютерної моделі на основі пакету «SimPowerSystems» системи MATLAB/Simulink.

ВИСНОВКИ

1. Розроблено комплексну систему методів дослідження, спрямовану на оцінку та збільшення терміну служби АД, що базується на використанні ймовірнісно-статистичних методів дослідження, оскільки вони дають кількісну оцінку причин відмов. Крім цього, використання методу експертних оцінок дозволяє здійснити аналіз причин та масштабів відмов АД за участю фахівців, а також кількісно оцінити допустимі значення експлуатаційних параметрів АД. Застосування фізико-статистичних та математичних методів дослідження необхідне для реалізації математичного апарату, що дозволяє виявити закономірності впливу факторів на експлуатацію АД, а також розробку технічних рішень щодо усунення факторів, які негативно впливають на АД ЕТК промислових підприємств.

2. Реалізовано комп'ютерну модель, призначену для дослідження впливу параметрів експлуатації (K_{2U} , K_3) на електродвигуни різних серій та потужностей. Розроблена комп'ютерна модель дозволила реалізувати метод експериментального дослідження АД, відмінною особливістю якого є моделювання роботи АД в несиметричних режимах з урахуванням зміни навантаження на валу електродвигуна.

3. Розроблено експериментальну установку, що реалізує комп'ютерну модель роботи АД. Проведення експерименту дозволило підтвердити достовірність та обґрунтованість сформованої комп'ютерної моделі. Результат порівняння даних експериментального дослідження роботи АД, отриманих з використанням комп'ютерного та натурно-фізичного моделювання, показав високу кореляцію між даними комп'ютерної моделі та фізичної моделі. Оцінка RMSE відповідає значенню 3,15 % при експерименті «Холостий хід» та 3% при експерименті «Повне завантаження» АД. Оцінка MAE при експерименті «Холостий хід» склала 2,39 %, а при експерименті «Повне завантаження» АД – 2,27 %. Значення метрик задовольняють вимоги до точності моделей для проведеного дослідження.

4. Результати, отримані в процесі виконання експериментів, показали, що для вирішення задач дослідження впливу експлуатаційних параметрів (K_{2U} , K_3) на АД необхідні експерименти, виконані як на фізичній, так і на комп'ютерній моделях. У підсумку, сукупність отриманих результатів дозволить оцінити вплив зовнішніх факторів на працездатність електродвигунів у різноманітних режимах його роботи.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. ДСТУ EN 62586-2:2018 Вимірювання якості електроенергії в системах електроживлення. Частина 2. Функційні випробування та вимоги щодо невизначеності (EN 62586-2:2017, IDT; IEC 62586-2:2017, IDT)
2. ДСТУ EN 50160:2023 «Характеристики напруги електропостачання в електричних мережах загального призначення (EN 50160:2022, IDT)»
3. ДСТУ IEC 61000-2-12:2013 Електромагнітна сумісність. Частина Електромагнітна обстановка. Рівні сумісності для низькочастотних кондуктивних збурень та сигналів у системах електропостачання середньої напруги загальної призначеності (IEC 61000-2-12:2003, IDT)
4. Про затвердження Технічного регламенту щодо вимог до екодизайну для електродвигунів/ Постанова Кабінету Міністрів України від 27 лютого 2019 р. № 157
5. Жежеленко И.В., Саенко Ю.Л., Горпинич А.В., Швецова И.А. Надёжность работы электрооборудования при пониженном качестве электроэнергии // Вісник Приазовського державного технічного університету: зб. наук. праць. – Маріуполь: Изд-во ПДТУ, 2005, Вып. 15, Ч. 2, С. 25 – 29.
6. Пинчук О.Г. Энергетические показатели асинхронного двигателя при различных параметрах несимметрии питающего напряжения / О.Г. Пинчук // Наукові праці Донецького національного технічного університету, серія: «Електротехніка і енергетика». – Донецьк: Изд-во ДонНТУ, 2008, Вып.8 (140), С. 201 – 205.
7. Schemmel F., Bauer K., Kaufhold M. Reliability and statistical lifetimeprognosis of motor winding insulation in low-voltage power drive systems. IEEE Electrical Insulation Magazine. 2009, Vol. 25, №. 4, pp. 6 – 13. DOI: <https://doi.org/10.1109/MEI.2009.5191411>.
8. Romanova V.V. Multi-factor analysis of external effects influencing the operational reliability of asynchronous electric motors / V.V. Romanova, K.V. Suslov, S.V. Khromov // E3S Web of Conferences, 2020, Vol. 216 (01084), p.4. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202021601084>.

9. Sayenko Yu. L. Identification and assessment of the influence of unbalance voltage sources in three-phase three-wire electric networks / Yu. L. Sayenko, D. N. Kalyuzhniy, V. A. Bolgov // Technical Electrodynamics, 2019, № 6, pp. 65 – 73.

10. В.М.Рибалко; Н.В.Матухно; І.М.Сівак; І.В.Дудченко. Проектування приводів сільськогосподарських машин//Національний університет біоресурсів і природокористування України. – Київ, 105с.

11. Овчаров В.В., Рижков А.О. Діагностування експлуатаційних режимів роботи і захист асинхронного двигуна за температурою сталі та кратністю сили струму // Наукові доповіді НАУ. – 2006. – № 3.– С. 21–28.

12.https://xn80addceesnhi0axzh6mb.com.ua/ua/faq/?srsltid=AfmBOorx_MTb_XTXjfZyMPDpNZ4i9toABAJZARrXcmo-Qc24mULKQ2Mq

13. Електричні машини. Навчальний посібник / Г.Г.Півняк, Ф.П.Шкрабець, В.П.Довгань. -Дніпропетровськ,Видавництво Національного гірничого університету, 2003, -330 с.

14. Електричні машини. Курс лекцій [Електронний ресурс] : навчальний посібник для здобувачів ступеня бакалавра за освітньою програмою «Електромеханічні системи автоматизації, електропривод та електромобільність» спеціальності 141 Електроенергетика електротехніка та електромеханіка / Ю. А. Гайденок ; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові дані (1 файл: 12,47 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2024. – 211 с.

15, ДСТУ EN 50160:2014 Характеристики напряжения в системах электроснабжения общего назначения (EN 50160:2010, IDT)/ Приказ от 20.05.2014 № 573 О принятии национальных стандартов Украины, гармонизированных с международными и европейскими стандартами, утверждении национальных стандартов Украины, отмене национальных стандартов Украины и межгосударственных стандартов в Украине.

16. 13. Nagata E., Ferreira D., Bollen M., et al. Real-Time Voltage Sag Detection and Classification for Power Quality Diagnostics. Measurement, 2020, Vol.164 (4), p.15. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2020.108097>.

17. Enrique C. Quispe, Ivan D. Lopez, Fernando J. T. E. Ferreira, Vladimir Sousa. Unbalanced Voltages Impacts on the Energy Performance of Induction Motors, International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE). 2018, Vol. 8, № 3, pp. 1412 – 1422.

18. Копилов І. П. Математичне моделювання електричних машин. –Х: Наука, 2001. – 327 с.