

Хмельницький національний університет
Факультет інженерії, транспорту та архітектури
Кафедра машин і апаратів, електромеханічних та енергетичних систем

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА БАКАЛАВРА

Розробка лабораторного обладнання для дослідження параметрів асинхронних трифазних електродвигунів

Галузь знань 14 Електрична інженерія

Спеціальність 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

Шифр БРМА 25.00.00.000 ПЗ

Виконав студент
3 курсу групи ЕТс-22-2


Підпис

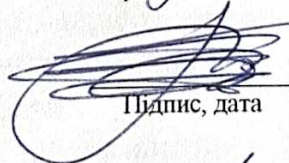
Мазур М.М.
Ініціали, прізвище

Керівник


Підпис, дата

д.ф., доц. Поліщук А.О.
Ініціали, прізвище

Нормоконтролер


Підпис, дата

к.т.н., доц. Тимощук О.
Ініціали, прізвище

До захисту допускаю:
Зав. кафедри МАЕЕС


Підпис, дата

к.т.н., доц. Неймак В.С.
Ініціали, прізвище

2 06 2025 р.

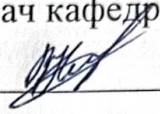
Хмельницький 2025

ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет інженерії, транспорту та архітектури
Кафедра машин і апаратів, електромеханічних та енергетичних систем
Освітній рівень бакалавр
Галузь знань 14 Електрична інженерія
Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»
Освітня програма Електропобутова техніка

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри МАЕЕС



2 . 06 . 2025

ЗАВДАННЯ НА БАКАЛАВРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Мазур Максим Миколайович

Прізвище, ім'я, по батькові студента

1. Тема роботи **Розробка лабораторного обладнання для дослідження параметрів асинхронних трифазних електродвигунів**
керівник роботи **Поліщук А.О., д.ф., доцент**

Прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання

Затверджено наказом ректора університету від 7 02 2025 р. № 23

2. Строк подання студентом роботи на кафедру 2 06. 25

3. Вихідні дані до роботи: **технічні характеристики асинхронних трифазних двигунів**

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

1 Огляд та аналіз існуючих технологічних та технічних рішень з тематики бакалаврської роботи

2 Розробка лабораторного обладнання для дослідження параметрів асинхронних трифазних електродвигунів

3 Експериментальне дослідження параметрів асинхронних двигунів

5. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслень)

Аркуш 1. Методи навантаження електродвигунів. Документ оглядовий (A1). Аркуш 2. Стенд для дослідження електродвигуна. Схема структурна (A1). Аркуш 3. Стенд для дослідження електродвигуна. Схема електрична (A1). Аркуш 4. Стенд для дослідження електродвигуна. Документ ілюстраційний (A1). Аркуш 5. Блок-діаграма віртуального приладу. Документ ілюстраційний (A1). Аркуш 6. Результати експерименту. Документ дослідницький (A1).

6. Консультанти розділів кваліфікаційної роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

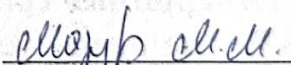
7. Дата видачі завдання 15.05.2025р

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

Назва етапів (розділів) кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1 Огляд та аналіз існуючих технологічних та технічних рішень з тематики бакалаврської роботи	20.05.25р.	
2 Розробка лабораторного обладнання для дослідження параметрів асинхронних трифазних електродвигунів	01.06.25р.	
3 Експериментальне дослідження параметрів асинхронних двигунів	07.06.25р.	
4 Оформлення пояснювальної записки і графічного матеріалу	15.06.25р.	

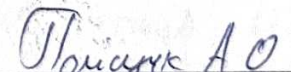
Студент


Підпис


Ініціали, прізвище

Керівник роботи


Підпис


Ініціали, прізвище

АНОТАЦІЯ

до бакалаврської кваліфікаційної роботи студента спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

1. Прізвище, ім'я та по батькові **Мазур Максим Миколайович**

2. Тема бакалаврської роботи **Розробка лабораторного обладнання для дослідження параметрів асинхронних трифазних електродвигунів**

3. Прізвище, ініціали, вчена ступінь та звання опонента _____

4. Об'єм магістерської роботи: креслень 6 арк., сторінок записки 78

5. Розробка сучасного лабораторного комплексу з інтеграцією програмного забезпечення типу LabVIEW та використанням цифрових вимірювальних пристроїв, дозволяє суттєво розширити можливості аналізу роботи асинхронного двигуна. Це особливо важливо для вивчення режимів запуску, самозапуску, зміни навантаження та живлення, що мають вирішальне значення для оптимізації електроприводних систем. Таким чином, запропонований підхід до створення лабораторного обладнання відповідає сучасним вимогам освіти, науки та промисловості й сприяє практичному засвоєнню знань з теорії електромашин, електроприводу та засобів діагностики. Виходячи з цього тема бакалаврської роботи є актуальною. В першому розділі проведено огляд існуючих технологічних і технічних рішень з тематики бакалаврської роботи. В другому розділі здійснено розробку лабораторного обладнання для дослідження параметрів асинхронних трифазних електродвигунів. В третьому розділі виконано експериментальне дослідження параметрів асинхронних двигунів.

Підпис студента _____

" 2 " 06 20 25 р.

РІШЕННЯ ЕК:

Протокол _____ 2 від " 17 " 06 20 25 р.

Оцінка проекту ЕК _____ 4,0 / с
Рекомендації ЕК _____

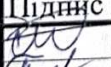


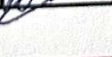
Особливі відмітки _____

Технічний секретар _____

" 17 " 06 20 25 р.

ЗМІСТ

		стор.
	Вступ	6
1	Огляд та аналіз існуючих технологічних та технічних рішень з тематики бакалаврської роботи	8
1.1	Основні відомості про асинхронні двигуни та їх засоби і способи дослідження	8
1.2	Загальні відомості про режими роботи асинхронних трифазних двигунів	9
1.3	Методи навантаження електродвигунів	16
1.4	Методи вимірювання механічних характеристик	27
1.5	Висновки до першого розділу	30
2	Розробка лабораторного обладнання для дослідження параметрів асинхронних трифазних електродвигунів	31
2.1	Аналіз факторів та вибір методу експериментальних досліджень при розробці стенду	31
2.2	Розробка структурної схеми стенду для дослідження параметрів асинхронних двигунів	33
2.3	Розробка принципової електричної схеми стенду та принцип її роботи	35
2.4	Розробка вузла комутації, безконтактного пускача	37
2.5	Розробка блоку живлення	41
2.6	Розрахунок вузла масштабних перетворювачів	45
2.7	Вибір вузла гальванічної розв'язки	47
2.8	Вибір вузла аналого-цифрового перетворення	51
2.9	Вибір електронно-обчислювальної машини	54

БРМА25.00.00.000 ПЗ				
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата
Виконав		Мазур		
Перевір.		Поліщук		
Н.контр.		Тимошук		
Затвер.		Неймак		
Розробка лабораторного обладнання для дослідження параметрів асинхронних трифазних електродвигунів Пояснювальна записка				
		Літера	Аркуш	Аркушів
		б	4	78
ХНУ гр. ЕТс-22-2				

ВСТУП

У сучасному промисловому виробництві асинхронні електродвигуни займають провідне місце серед усіх типів електромеханічних перетворювачів енергії завдяки ряду переваг: простоті конструкції, високій надійності, низькому рівню обслуговування, здатності до роботи в складних умовах експлуатації, а також економічній доцільності [1]. Вони становлять понад 90% від загальної кількості електродвигунів, що застосовуються у промисловості. Більшість технологічного обладнання - насосні установки, вентилятори, компресори, токарно-фрезерні верстати, транспортні системи, лінії автоматичного складання та інші механізми - працює на базі асинхронних машин, зокрема з короткозамкненим ротором.

Ефективна та безпечна експлуатація таких двигунів, а також своєчасна діагностика їх технічного стану, потребує глибокого розуміння електромагнітних, механічних та теплових процесів, що відбуваються в них під час запуску, зміни навантаження або порушення симетрії живлення. Особливо важливо досліджувати поведінку двигунів у перехідних режимах роботи - як-от пуск, реверсування, самозапуск після короткочасного зникнення напруги або перевантаження, - оскільки ці режими є найбільш динамічними і критичними для довговічності й ефективності електропривода.

У зв'язку зі стрімким розвитком систем автоматизованого керування, інтелектуальних приводів, впровадженням стандартів енергоефективності ІЕС 60034 та зростаючими вимогами до надійності промислового обладнання, актуальною є розробка універсального, функціонального й доступного лабораторного обладнання [2]. Таке обладнання повинно дозволяти моделювати різні режими роботи асинхронних машин, проводити вимірювання напруг, струмів, обертів, моменту, а також аналізувати часові характеристики цих сигналів за допомогою сучасних засобів збору та обробки даних.

					БРМА25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						6
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

Інтеграція цифрових технологій, зокрема віртуальних інструментів на базі середовища програмування LabVIEW, дозволяє реалізувати відкриті, масштабовані та багаторазово реконфігуровані лабораторні стенди [3]. Це забезпечує не лише високу точність і наочність експериментів, але й адаптацію комплексу до різних навчальних та наукових задач. Таким чином, розробка сучасного навчального стенда для дослідження параметрів асинхронних двигунів є актуальним завданням у контексті підготовки інженерів нового покоління, здатних працювати з інтелектуальними системами керування, цифровими діагностичними інструментами та засобами автоматизації виробництва.

Існуючі лабораторні стенди часто мають обмежений функціонал, морально застарілу елементну базу або не забезпечують необхідного рівня точності вимірювання перехідних процесів, що ускладнює проведення навчальних та наукових експериментів.

Розробка сучасного лабораторного комплексу з інтеграцією програмного забезпечення типу LabVIEW та використанням цифрових вимірювальних пристроїв, дозволяє суттєво розширити можливості аналізу роботи асинхронного двигуна [3]. Це особливо важливо для вивчення режимів запуску, самозапуску, зміни навантаження та живлення, що мають вирішальне значення для оптимізації електроприводних систем.

Таким чином, запропонований підхід до створення лабораторного обладнання відповідає сучасним вимогам освіти, науки та промисловості й сприяє практичному засвоєнню знань з теорії електромашин, електроприводу та засобів діагностики. Виходячи з цього тема бакалаврської роботи є актуальною.

1 ОГЛЯД ТА АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ТА ТЕХНІЧНИХ РІШЕНЬ З ТЕМАТИКИ БАКАЛАВРСЬКОЇ РОБОТИ

1.1 Основні відомості про асинхронні двигуни та їх засоби і способи дослідження

Асинхронні електричні машини належать до одних із найпоширеніших пристроїв у сучасних електротехнічних системах, становлячи переважну більшість серед безколекторних машин змінного струму [4-6]. Принцип роботи асинхронної машини ґрунтується на електромагнітній індукції, що забезпечує їй високу надійність та простоту конструкції. Важливою характеристикою асинхронних машин є їхня реверсивність, тобто здатність працювати в обох режимах – двигунному та генераторному, залежно від режиму експлуатації та способу підключення до електричної мережі. Однак найчастіше асинхронні машини застосовуються саме як електродвигуни, що складають основу більшості сучасних систем електроприводу завдяки своїй високій ефективності та економічності.

Області використання асинхронних двигунів охоплюють широкий спектр застосувань – від дрібних побутових приладів (пральні машини, пилососи, вентилятори, компресори) до великих промислових агрегатів, таких як насоси, конвеєри, ліфти, крани, гірничі машини, металургійне обладнання та інші потужні пристрої. Ця універсальність визначається широким діапазоном їхньої потужності – від часток ват до десятків тисяч кіловат, а також різноманітністю напруг живлення – від низьковольтних рівнів (десятки вольт) до високовольтних мереж (10 кВ і вище).

Найбільш поширеними серед асинхронних двигунів є трифазні машини, які призначені для роботи від електричної мережі промислової частоти (50 Гц). Ці двигуни відрізняються високою надійністю, простотою технічного обслуговування, довговічністю, низьким рівнем шуму та високою

					БРМА25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						8
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

ефективністю. Трифазні асинхронні двигуни знайшли широке застосування у промислових та комерційних секторах, забезпечуючи безперервність і стабільність технологічних процесів. Крім того, існують двигуни спеціального призначення, що працюють на підвищених частотах живлення (200, 400 Гц і вище), які використовуються в системах з підвищеними вимогами до швидкості обертання, точності та компактності конструкції.

Особлива увага у рамках цього дослідження приділяється саме трифазним асинхронним двигунам загального призначення, оскільки вони найбільш універсальні та затребувані у сучасних технічних системах. Проте для повного аналізу і формування широкого уявлення про клас асинхронних машин у дослідженні розглянуті також однофазні двигуни, які часто використовуються в побутовій сфері, а також двофазні (конденсаторні) двигуни, які застосовуються там, де немає можливості підключення до трифазних мереж. Крім того, розглянуті спеціалізовані асинхронні двигуни – лінійні, які використовуються у високоточних системах лінійних переміщень, виконавчі двигуни, що застосовуються в автоматизованих системах управління та точного позиціонування, а також спеціальні двигуни, призначені для роботи в особливих умовах, таких як підвищені температури, агресивні середовища або високі механічні навантаження.

1.2 Загальні відомості про режими роботи асинхронних трифазних двигунів

Під характеристикою асинхронного двигуна зазвичай розуміють функціональну залежність між величинами, що визначають його експлуатаційні властивості [7, 8]. Такі характеристики найчастіше представляються у вигляді наочних графіків, які дозволяють чітко і доступно оцінити основні параметри та режими роботи двигунів. У світовій практиці

					БРМА25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						9
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

існує значна кількість характеристик асинхронних двигунів, проте в цьому розділі ми розглянемо найбільш суттєві та поширені з них.

Характеристики, які визначають експлуатаційні можливості асинхронних двигунів, а також їхню ефективність, можуть бути отримані експериментальним шляхом або розраховані за допомогою спеціальних схем заміщення. Основні види характеристик наведені в таблиці 1.1 [9].

Таблиця 1.1 – Режими роботи електродвигунів та їх схеми заміщення

Режим	Характеристика	Залежність	Постійні величини
Генераторний	Зовнішня	$U=F(I)$	$\pi, i_B, \cos \varphi$
	Регульовальна	$i_B = F(I)$	$\pi, U, \cos \varphi$
	Навантажувальна	$U = F(i_B)$	$\pi, I, \cos \varphi$
Двигунний	Механічна*	$\pi = F(M)$	U, f
	Електромеханічна*	$I, \cos \varphi = F(M)$	U, f
	U – образна (для СМ)*	$I = F(i_B)$	U, P_2, f
Генераторний і двигунний	Енергетична	$P_1 = F(P_2)$	U, f
	ККД*	$\eta = F(P_2)$	U, f

* - входить до складу робочих характеристик за ДСТУ 17154-71.

Режими роботи двигунів поділяються на стабільні та нестабільні. Для стабільних режимів характерною є постійність основних параметрів роботи, зокрема корисною потужністю P_2 , що в рухомому режимі виступає як механічна потужність. До нестабільних режимів належать ситуації, коли параметри роботи змінюються в часі, наприклад зміна напруги $U = F(t)$ при різких змінах навантаження чи його знятті, а також поведінка струму під час раптового короткого замикання.

Нестабільні режими характеризуються такими показниками, як пусковий момент $M = F(t)$, зміна частоти обертання ротора $n = F(t)$, а також струму $I = F(t)$. Важливою характеристикою генераторів є якість електричної енергії, що оцінюється стабільністю напруги за амплітудою, формою кривої та ступенем пульсацій складових постійного струму.

Відповідно до принципу оборотності електричних машин, асинхронні машини можуть працювати як у режимі двигуна, так і генератора, а також у спеціальному режимі електромагнітного гальмування (противмиканням).

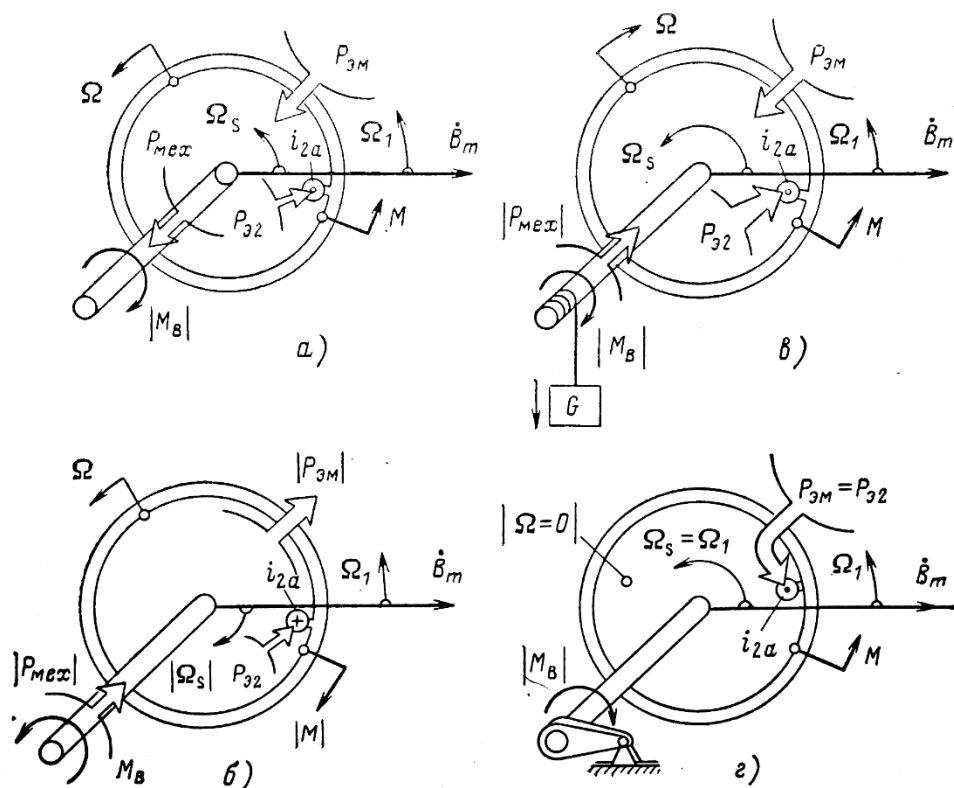
Режим двигуна характеризується тим, що при підключенні обмотки статора до мережі виникає обертове магнітне поле, яке індукуює електрорушійну силу (ЕРС) у короткозамкненій обмотці ротора. Внаслідок цього в провідниках ротора виникають струми, взаємодія яких з магнітним полем статора створює електромагнітні сили, формуючи крутний момент. Під дією цього крутного моменту ротор асинхронного двигуна обертається з частотою n_2 , меншою за синхронну частоту n_1 , у напрямку обертання поля статора. Якщо вал двигуна механічно з'єднаний з валом навантажувального механізму (наприклад, крана, верстата), то створений двигуном крутний момент M , перевищуючи навантажувальний момент $M_{\text{нав}}$, приводить механізм у рух. Таким чином, електрична енергія P_1 , яка надходить у двигун, перетворюється на механічну енергію P_2 , яка передається до механізму приводу (рисунок 1.1, а).

Одним із важливих параметрів роботи асинхронних двигунів є ковзання – це параметр, що характеризує відносну різницю швидкості обертання ротора порівняно зі швидкістю обертання магнітного поля статора [10]:

$$s = (n_1 - n_2) / n_1 \quad (1.1)$$

Ковзання асинхронного двигуна характеризує відносну різницю між швидкістю обертання ротора та синхронною швидкістю обертання

магнітного поля статора. Це значення може виражатися у двох формах: у відсотках або у частках одиниці. Якщо необхідно виразити ковзання у відсотках, то отримане за формулою (1.1) значення множать на 100.



а – двигунний; б – генераторний; в – гальмівний; г – трансформаторний (чи короткого замикання).

Рисунок 1.1 – Режимы работы асинхронной электромашини:

Із зростанням крутного моменту, який створює навантаження на вал асинхронного двигуна, частота обертання ротора n_2 знижується. Це пояснюється тим, що двигуну необхідно більший момент для подолання навантаження, відповідно, збільшується різниця між синхронною та фактичною швидкістю обертання ротора. Отже, ковзання прямо пропорційно залежить від величини механічного навантаження на валу і може варіюватися в межах від 0 до 1 ($0 < s \leq 1$). При цьому значення ковзання, що наближається до 0, відповідає холостому ходу двигуна, а значення, близьке до 1, характерне

Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата

для режиму, коли ротор практично нерухомий або має дуже низьку частоту обертання (наприклад, під час пуску двигуна) [3-6].

При початковому підключенні асинхронного двигуна до електричної мережі його ротор перебуває в нерухомому стані через дію інерційних сил, тобто частота його обертання n_2 дорівнює нулю. У такому випадку ковзання s має максимальне значення і дорівнює одиниці ($s=1$). Після запуску двигуна і встановлення режиму холостого ходу, ротор починає обертатися зі швидкістю, яка незначно менша за синхронну частоту обертання n_1 . В цьому режимі ковзання наближається до нуля, проте не стає рівним йому ($s \approx 0$).

Для умов, коли двигун працює з номінальним навантаженням, використовують поняття номінального ковзання $s_{ном}$. Значення номінального ковзання залежить від конструктивних особливостей двигуна та його потужності. Для асинхронних двигунів загального призначення номінальне ковзання $s_{ном}$ перебуває в межах від 1 до 8%. Зокрема, двигуни великої потужності характеризуються низьким номінальним ковзанням близько 1%, тоді як двигуни малої потужності можуть мати номінальне ковзання до 8%.

Виконавши математичні перетворення формули (1.1), отримаємо вираз, який дозволяє визначити асинхронну частоту обертання ротора двигуна в обертах за хвилину (об/хв) [10]:

$$n_2 = n_1(1 - s). \quad (1.2)$$

Режим генератора. У генераторному режимі асинхронної машини її ротор примусово приводиться в обертання із частотою, яка перевищує синхронну швидкість обертання магнітного поля статора ($n_2 > n_1$), завдяки зовнішньому приводу, наприклад, двигуну внутрішнього згорання, турбіні або іншим механічним пристроям. При цьому напрямок відносного руху ротора стосовно поля статора є протилежним до того, що спостерігається у

двигунному режимі, оскільки ротор випереджає магнітне поле статора. В результаті ковзання набуває негативних значень. Індукована електрорушійна сила (ЕРС), яка виникає в роторі, змінює свій напрямок, і створений електромагнітний момент M спрямований протилежно напрямку обертання ротора, тобто гальмує його відносно привідного двигуна (рисунок 1.1, б). Внаслідок цього механічна енергія, яка надходить від привідного двигуна, перетворюється переважно на електричну активну потужність P_2 змінного струму. Важливою особливістю роботи асинхронного генератора є те, що для створення обертового магнітного поля необхідна реактивна потужність Q , що отримується з мережі, до якої генератор підключений. Отже, стабільна робота асинхронного генератора можлива лише за наявності зовнішнього джерела змінного струму, яке забезпечує створення магнітного поля. Ковзання асинхронної машини в генераторному режимі може змінюватися в діапазоні від $-\infty$ до 0.

Режим електромагнітного гальмування. У випадку, коли трифазний асинхронний двигун перебуває у робочому стані, а потім змінити місцями будь-які дві фази у статорних обмотках, напрямок обертання магнітного поля статора змінюється на протилежний. Через дію інерційних сил ротор продовжує обертатися у попередньому напрямку, що призводить до виникнення протилежних напрямків обертання полів ротора і статора. За таких умов виникає електромагнітний момент, спрямований проти напрямку руху ротора, що забезпечує гальмування машини (рисунок 1.1, в). Цей режим роботи називають електромагнітним гальмуванням противмиканням. При цьому частина активної потужності, що надходить із мережі, витрачається на подолання механічної енергії ротора, тобто на його гальмування. У режимі електромагнітного гальмування частота обертання ротора має напрямок, протилежний напрямку магнітного поля статора, тому ковзання набуває позитивних значень, більших за одиницю ($s > 1$).

$$s = [n_1 - (-n_2)]/n_1 = (n_1 + n_2)/n_1 > 1. \quad (1.3)$$

Ковзання асинхронної машини у режимі електромагнітного гальмування противмиканням змінюється в межах $1 < s < +\infty$, що вказує на можливість прийняття ним позитивних значень, більших за одиницю.

Узагальнюючи режими роботи асинхронних машин, можна виділити основну їх особливість – відмінність між синхронною частотою обертання магнітного поля статора n_1 та частотою обертання ротора n_2 , що призводить до виникнення ковзання. Саме завдяки наявності ковзання можливе створення обертового магнітного поля, яке індукує електромагнітні сили в обмотці ротора, формуючи таким чином електромагнітний крутний момент. Кожному з режимів роботи асинхронної машини відповідає певний інтервал значень ковзання i , відповідно, частоти обертання ротора. Серед розглянутих режимів найширше практичне застосування має двигунний режим, завдяки якому асинхронні двигуни стали невід'ємною складовою сучасних електроприводів. Ці двигуни вигідно вирізняються серед інших типів електродвигунів високою надійністю, експлуатаційною простотою, невибагливістю в обслуговуванні та економічністю.

Окремий інтерес становить трансформаторний режим, що виникає тоді, коли статорна обмотка двигуна приєднана до електромережі, а ротор залишається нерухомим ($s=1$) [8-10]. Цей режим також називають режимом короткого замикання двигуна. У такому режимі струм двигуна значно перевищує його номінальне значення, а охолодження двигуна істотно гірше, ніж у номінальному режимі. Через це асинхронні двигуни, що не призначені для тривалої роботи за умов ковзання близького до одиниці, можуть працювати в режимі короткого замикання лише протягом дуже коротких проміжків часу (рисунки 1.1, г).

При кожному запуску двигуна короткочасно виникає режим короткого замикання. Часті або повторні запуски двигуна із короткозамкненим ротором,

особливо з малими проміжками часу між ними, можуть призвести до перегріву обмоток і, як наслідок, пошкодження або виходу двигуна з ладу.

1.3 Методи навантаження електродвигунів

З метою зменшення енергоспоживання, особливо при випробуваннях електродвигунів значної потужності, доцільно використовувати системи рекуперації енергії, яка проходить через випробовуваний двигун. Існують дві основні системи такого типу: системи взаємного навантаження і системи повернення енергії [11-13].

У системах взаємного навантаження випробування проводяться за допомогою двох електричних двигунів, які мають близькі або ідентичні параметри потужності. В такій схемі один із двигунів працює у генераторному режимі, а інший – у двигунному. Особливістю цієї схеми є те, що точки споживання і повернення енергії збігаються, завдяки чому загальна мережа живлення витрачає енергію лише на компенсацію втрат в обох двигунах. Ця схема є найбільш енергоефективною та економічною.

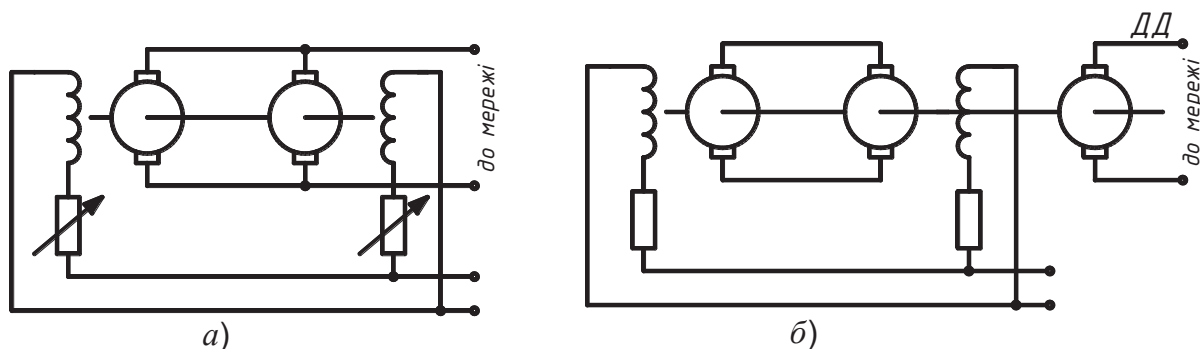
У системах з поверненням енергії навантаження випробовуваного двигуна (або його привод) реалізується за допомогою електричного двигуна іншого типу або навіть іншого виду струму. При цьому точки споживання і повернення енергії рознесені, між ними існує довгий ланцюжок передачі енергії, що спричиняє додаткові енергетичні втрати.

Основні принципи побудови схем взаємного навантаження для електричних двигунів різних типів і струмів передбачають облік специфіки роботи кожного типу двигуна. Варто враховувати, що у випадку використання двигуна з одним кінцем вала напрямок його обертання при роботі у схемі взаємного навантаження може змінюватися, що потребує відповідного перепідключення обмоток і забезпечення схеми постійними перемикачами.

1.3.1 Методи навантаження машин постійного струму (МПС) [14-16]

Для навантаження машин постійного струму (МПС) можуть використовуватися чотири різні схеми. Схема, наведена на рисунку 1.2, застосовується для машин постійного струму з регульованим збудженням. При збільшенні струму збудження одна із машин переходить у генераторний режим. Внаслідок цього магнітні потоки обох машин постійного струму відрізняються один від одного, а покриття втрат енергії забезпечується за рахунок зовнішньої мережі.

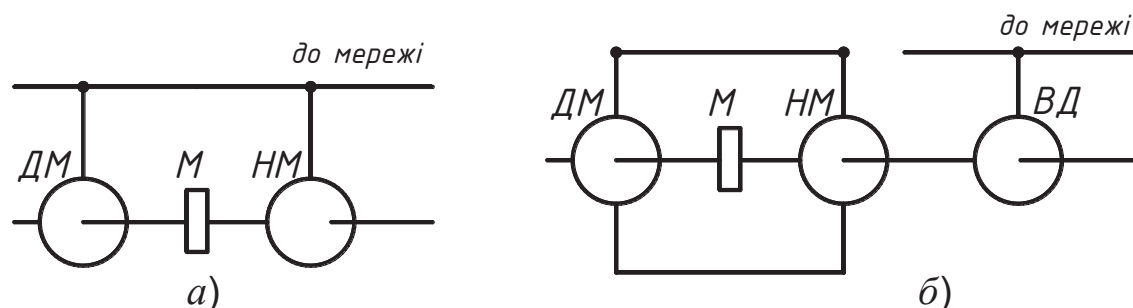
На рисунку 1.2, б (креслення [БРМА25.00.00.000ДО]) представлена схема, що передбачає використання допоміжного двигуна (ДД). У цій схемі втрати, за винятком тих, що виникають через збудження, компенсуються енергією, яка передається на вал допоміжного двигуна. Для підтримки робочого режиму обмотки збудження необхідне її живлення від електричної мережі. Ця схема є універсальною та може застосовуватись для навантаження як низьковольтних, так і високовольтних машин постійного струму. У схемі також спостерігаються відмінності магнітних потоків випробовуваного двигуна.



а – з регульованим збудженням; б – з допоміжним двигуном (ДД)

Рисунок 1.2 – Схема взаємного навантаження:

вольтодобавляючим генератором. Також важливо забезпечити однакову частоту обертання валів досліджуваних двигунів у режимі двигуна в обох напрямках обертання, що є умовою коректності проведення досліджень та вимірювань.



а – з живленням від електромережі; б – із приводом від допоміжного електродвигуна

Рисунок 1.4. – Схеми взаємного навантаження синхронних електродвигунів за рахунок кутового зсуву роторів за допомогою муфти:

Для успішного функціонування машин постійного струму у схемах взаємного навантаження необхідно, щоб вони володіли стабільними електромеханічними характеристиками. Зокрема, швидкість обертання досліджуваного асинхронного двигуна, який працює в режимі двигуна, та напруга на затискачах досліджуваної машини постійного струму, що працює у генераторному режимі, повинні знижуватися із зростанням навантаження, тобто із збільшенням струму якоря.

Такий характер зміни параметрів забезпечує стійкість роботи системи і можливість точного відтворення навантаження. Крім того, для забезпечення ефективного режиму роботи необхідно правильно встановити положення щіткового вузла на машині постійного струму. Зсув щіток має бути здійснений у бік, протилежний до напрямку магнітного потоку збудження, тобто проти збудження. Це дозволяє зменшити реакцію якоря, стабілізувати

роботу машини та забезпечити належне формування характеристик у режимі взаємного навантаження.

1.3.2 Методи навантаження синхронних електромашин [17]

Характер навантаження синхронних машин (СМ), а також режим їх роботи – двигунний або генераторний – визначається кутом δ між віссю полюсів ротора (напрямок ЕРС) та напрямком магнітного поля статора (вектором напруги U). У зв'язку з цим метод взаємного навантаження синхронних машин ґрунтується на створенні контрольованого відносного кутового зміщення між роторами або полями статорів двох з'єднаних СМ. В результаті цього одна із машин працює у генераторному режимі, інша – у двигунному.

Аналогічно до машин постійного струму, компенсація втрат енергії при випробуваннях синхронних машин може здійснюватися як з електричної мережі (рисунок 1.6, а), так і за допомогою зовнішнього механічного приводу – шляхом обертання двох з'єднаних синхронних машин спільним приводним двигуном (рисунок 1.3, б).

Найпростішим методом створення навантаження для СМ є формування кутового зміщення δ між роторами. Цей підхід не потребує додаткового електричного обладнання та є єдиним технічно можливим варіантом для випробування синхронних машин великої потужності, зокрема турбогенераторів.

До недоліків такого методу належать складність точного регулювання кута δ , оскільки для цього потрібно здійснювати контрольоване обертання одного з роторів на малий кут. Крім того, жорсткість з'єднання між машинами вимагає застосування високонадійних муфт. Для цього використовують зубчасті муфти, кулачкові з'єднання або затискачі з внутрішніми шестернями, що забезпечують передачу моменту без люфтів.

Ще одним варіантом електричного регулювання кута δ є використання спеціалізованої синхронної машини подвійного збудження (МПЗ) як навантаження або приводу. Така машина повинна мати стільки ж пар полюсів, скільки й випробуваний синхронний двигун. Ротор цієї МПЗ оснащено двома незалежними обмотками збудження, зміщеними одна відносно одної на 90° за електричним кутом. Змінюючи співвідношення струмів у цих обмотках, можна плавно змінювати просторове положення осі магнітного поля ротора. Завдяки цій властивості МПЗ забезпечує точне та безперервне регулювання кута δ , що є особливо корисним для дослідницьких цілей. Такі машини знаходять широке застосування у наукових лабораторіях і стендах для випробування електричних машин.

Крім того, навантаження синхронної машини струмом, близьким до номінального, може бути досягнуто без використання парних машин – у режимі роботи синхронного компенсатора, при якому коефіцієнт потужності дорівнює нулю ($\cos\varphi = 0$). У такому режимі машина споживає або генерує лише реактивну потужність, однак струм у її обмотках може досягати номінального значення, що дозволяє реалізовувати необхідне теплове навантаження на обмотки.

1.3.3 Методи навантаження асинхронних електродвигунів [7-10]

Характер та величина навантаження (генераторний, двигунний) асинхронного двигуна визначається напрямом (знаком) і значенням ковзання s .

Зворотна робота асинхронного двигуна можлива, коли є дві електромережі (рисунок 1.6) із частотами:

$$f_1 = f(1 + s) \text{ і } f_2 = f(1 - s), \quad (1.4)$$

де f - номінальна частота.

Для асинхронного електродвигуна з малими значеннями s можна встановити та експлуатувати з частотами f й $f(1-2s)$. Взаємне навантаження АД електромережі може бути зменшено, якщо між осями досліджуваних електродвигунів розмістити редуктор з коефіцієнтом провідності $1+2s$.

Для асинхронного електричного двигуна фазного ротора каскадні схеми можуть бути застосовані для виконання режиму реверсу. Приклад такої схеми (рисунок 1.3, б) для випробування чотирьох полюсних АД показано на рис. 1.6 (КК- контактні кільця). Досліджуваний двигун підключений до шести полюсного АД (АГ1), від роторних кілець, що подаються асинхронним генератором електричного двигуна (чотири та десять полюсів). Втрата опору становить близько 7% від досліджуваної потужності електродвигуна. Номінальна потужність АД2 та АГ2 дорівнює 1/3 досліджуваної потужності електричного двигуна. Загальна втрата відключення становить приблизно від 30 до 35% досліджуваної потужності електродвигуна.

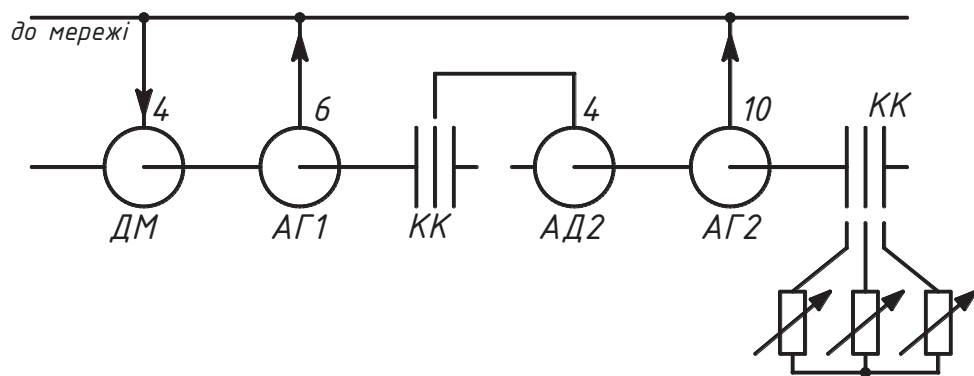


Рисунок 1.6 – Каскадна схема повернення енергії при дослідженні чотирьохполюсного асинхронного електродвигуна (цифри 4, 6, 10 означають число полюсів)

Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата

БРМА25.00.00.000 ПЗ

Арк.
23

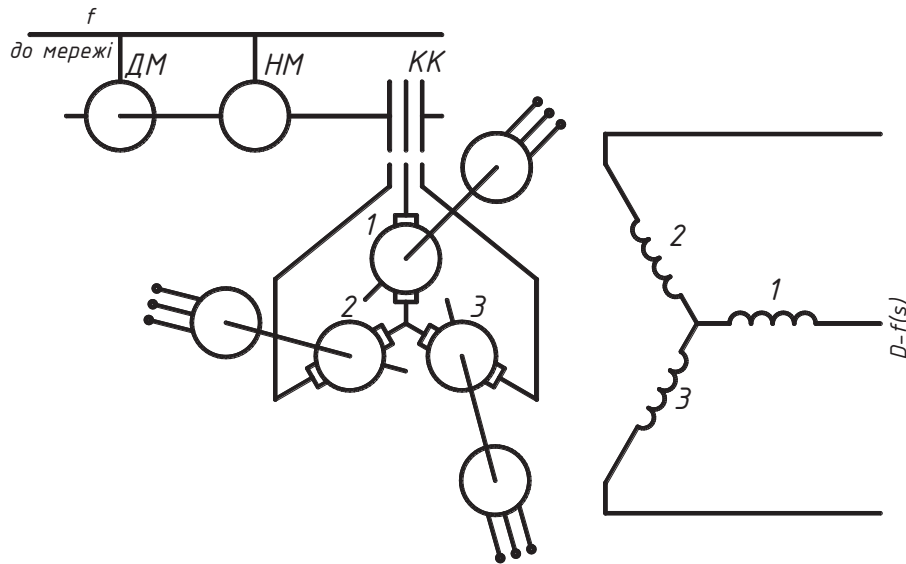


Рисунок 1.7 – Схема зворотної роботи з підводом електроенергії ковзання

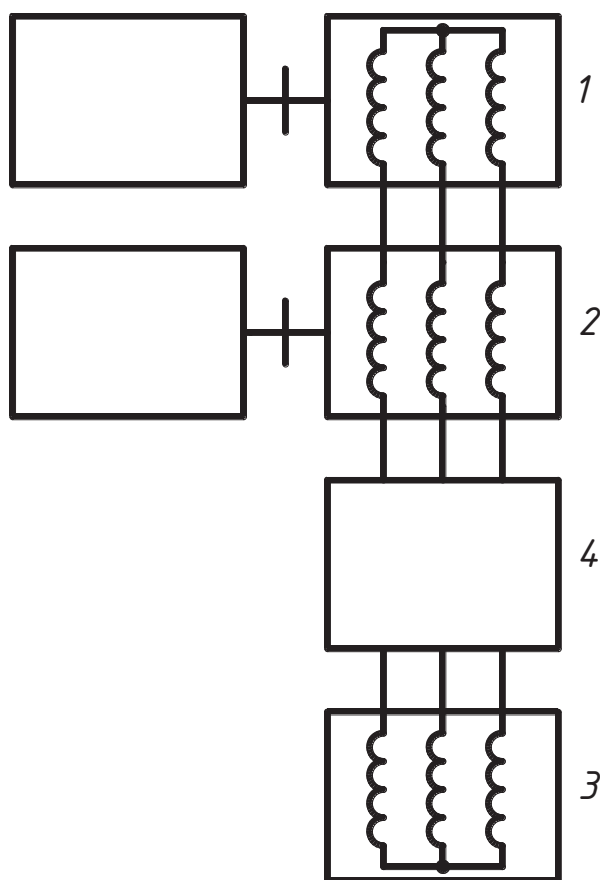
Ще одним прикладом реалізації зворотної схеми навантаження є система, зображена на рисунку 3.6, яка застосовується під час випробування потужних асинхронних двигунів (АД) з короткозамкненим ротором у діапазоні 8–10 МВт, як наведено в джерелі [6]. У цій схемі як навантаження використовується асинхронний двигун з фазним ротором, що забезпечує гнучке регулювання режиму навантаження. Такий фазний ротор може бути реалізований шляхом заміни короткозамкненої обмотки ротора на обмотку з виводами до контактних кілець, що типово для фазного виконання.

Використання системи активного охолодження дозволяє уникнути перегріву навантажувального двигуна при тривалому функціонуванні у режимах підвищеного навантаження, що є характерним під час стендових випробувань. До контактних кілець фазного ротора під'єднуються три окремі контури постійного струму, кожен з яких включає зарядний опір (згладжувальний елемент), що забезпечує стабільність струму в обмотках.

Для живлення обмоток збудження застосовується джерело постійного струму з регульованою частотою, яка змінюється в межах від нуля до значення, близького до номінальної частоти живлення двигуна (f_s). Завдяки регулюванню цієї частоти створюється змінне магнітне поле необхідної

амплітуди й частоти, що дозволяє точно формувати режим навантаження досліджуваного двигуна. Це дає змогу моделювати умови реальної експлуатації без потреби у спарюванні з іншим електроприводом [7-10].

Зазначена схема є ефективною для випробувань потужних АД, оскільки дозволяє відтворити широкий діапазон навантажень при високій енергоефективності та зниженому тепловому навантаженні на досліджуваний об'єкт.



1 – генератор (індукційний регулятор) частотою 50 Гц; 2 – генератор частотою 40 Гц; 3 – випробуваний асинхронний двигун; 4 – схема вимірювання напруги, струму, потужності

Рисунок 1.8 – Схема двохчастотного навантаження асинхронного двигуна:

Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата

БРМА25.00.00.000 ПЗ

Арк.
25

Необхідна потужність двигуна постійного струму визначається умовами навантаження та робочим режимом випробуваного електропривода.

Для асинхронних двигунів існує можливість здійснення штучного навантаження на номінальному рівні струму без застосування з'єднання зі спареним електродвигуном. Такий ефект досягається за рахунок одночасного живлення двигуна від двох незалежних джерел змінної напруги, що працюють на різних частотах – наприклад, 50 і 40 Гц (див. рисунок 1.8). Один із генераторів, що працює на зниженій частоті (40 Гц), виконує функцію вольтодобавляючого елемента. Шляхом регулювання напруги цього генератора забезпечується досягнення необхідного рівня струму в ланцюзі статора, що відповідає номінальному навантаженню випробуваного двигуна.

Такий метод штучного електромагнітного навантаження є ефективним для виконання контрольних стендових випробувань без потреби в механічному зв'язку між машинами. Його застосування дає змогу відтворити електромагнітні навантаження, аналогічні робочим умовам, для перевірки термічної стійкості, аналізу електричних характеристик і розрахунку додаткових втрат потужності. Разом із цим метод не дозволяє виконати випробування, пов'язані з акустичними параметрами (рівнем шуму), а також з визначенням вібродинамічних характеристик, оскільки не створюється механічне навантаження на вал.

Крім зазначеного способу, існує низка альтернативних методів штучного навантаження асинхронних двигунів без спарювання. Зокрема, широке застосування має метод Костенка–Кузнецова, який ґрунтується на використанні джерел постійного струму для створення зворотного магнітного поля або гальмівного моменту в роторі. Цей підхід дозволяє здійснювати навантаження без потреби в механічній взаємодії між машинами, що робить його зручним для автономного випробування великогабаритних або важкодоступних приводів у лабораторних і промислових умовах.

1.4 Методи вимірювання механічних характеристик

1.4.1 Вимір частоти обертання

Для визначення частоти обертання валу електричної машини (в об/хв) застосовують як контактні, так і безконтактні методи вимірювання [18-19].

Контактні методи передбачають фізичне з'єднання вимірювального пристрою (тахометра) з обертовою частиною - зазвичай, з торцем валу. Одним із точних і надійних контактних пристроїв є тахометр-датчик, який генерує певну кількість електричних імпульсів за кожен оберт валу. Ці імпульси надходять на електронний частотомір, який обчислює частоту обертання. Серед таких засобів контролю також використовуються годинникові тахометри, зокрема модель ТГ10Р, яка забезпечує точність у межах $\pm 0,5\%$ за часу відліку 6 секунд. Однак традиційні відцентрові тахометри мають низьку точність та можуть використовуватися лише для орієнтовного контролю.

Безконтактні методи вимірювання обертів мають ширше застосування завдяки вищій точності та зручності експлуатації. Найпоширенішим з них є стробоскопічний метод, при якому частота спалахів спеціальної лампи налаштовується до значення, що відповідає частоті обертання об'єкта. При синхронізації мерехтіння із частотою обертання створюється візуальний ефект зупиненого зображення. Строб-тахометри дозволяють регулювати частоту з точністю до $\pm 0,5\%$ в діапазоні від 2 до 250 Гц (іноді до 500 Гц). Ці прилади часто синхронізуються з джерелами живлення високої стабільності (мережа, генератор тощо), що забезпечує можливість вимірювання ковзання ротора відносно поля.

Серед сучасних високоточних засобів одним із найперспективніших вважається метод із застосуванням фотоелектричних датчиків, таких як ПДФ-3. Принцип їх роботи полягає у фіксації електричних імпульсів, що

виникають у результаті переривання або відбиття світлового променя спеціальною міткою, нанесеною на обертовий елемент – вал, шків або перфорований диск. Отримані імпульси надходять до цифрового тахометра (ТЦ-3М) або частотоміра (наприклад, ЧЗ-57), де обробляються і перетворюються на значення частоти обертання.

Для підвищення роздільної здатності вимірювання, особливо при аналізі прискорень, ковзання або коливань, кількість світлових міток або прорізів на диску повинна бути значною – від 60 до 600 залежно від діаметра. Така методика забезпечує надзвичайно високу точність – до 0,01% і менше, дозволяючи фіксувати мінімальні відхилення частоти обертання, що особливо важливо під час визначення ковзання у випробуваннях асинхронних двигунів.

Завдяки точності, швидкодії та можливості інтеграції в автоматизовані системи, методи з фотоелектричними датчиками є оптимальними для сучасних дослідницьких і стендових установок, де проводиться моніторинг частоти обертання в режимі реального часу з можливістю подальшого аналізу.

1.4.2 Вимірювання ковзання

Серед методів випробування асинхронних двигунів широке практичне застосування отримав спосіб визначення ковзання шляхом індукції електрорушійної сили (ЕРС) у допоміжній індукційній обмотці. Для реалізації цього підходу поблизу торця валу двигуна встановлюється вимірювальна котушка з великою кількістю витків, кінці якої підключаються до чутливого гальванометра з двосторонньою шкалою [19, 20].

Незначна асиметрія повітряного зазору між статором і ротором, або навіть незначні дефекти в короткозамкненій клітці ротора (наприклад, нерівномірності лиття або тріщини у стрижнях), призводять до утворення

пульсуючого магнітного потоку вздовж осі валу. Частота зміни цього потоку відповідає частоті ковзання двигуна. Внаслідок цього в розміщеній поруч обмотці індукуюється змінна ЕРС, яка викликає коливання стрілки гальванометра. Кількість таких коливань за певний проміжок часу прямо пропорційна частоті ковзання.

Підраховавши кількість односторонніх відхилень стрілки за певний інтервал часу (наприклад, 10 або 20 секунд), можна з високою точністю визначити значення частоти ковзання, а отже, і сам коефіцієнт ковзання s за формулою:

$$S = f_{\text{ковз}} / f_{\text{мережі}} \quad (1.5)$$

При належному рівні досвіду та навичок оператора вдається зафіксувати частоту коливань у межах 2–2,5 Гц, що відповідає ковзанню близько 5% при номінальній частоті мережі 50 Гц.

Для підвищення чутливості системи доцільно використовувати феромагнітний (сталевий або феритовий) стрижень, пропущений крізь вимірювальну обмотку з наближенням одного з його кінців до торця ротора. Це сприяє посиленню індукованого сигналу.

Альтернативним варіантом є підключення обмотки до електронного частотоміра, що забезпечує автоматичне визначення частоти наведеної ЕРС і дозволяє реалізувати безперервний моніторинг ковзання, особливо в умовах автоматизованих випробувальних стендів. Проте цей метод має певні обмеження: він може бути непридатним для двигунів з числом полюсів більше восьми, а також за умов використання підвищених частот живлення (наприклад, 400 Гц), оскільки індуковані сигнали можуть мати низьку амплітуду або спотворення.

Ще одним доступним методом оцінки ковзання є стробоскопічне визначення частоти обертання валу. На вал наноситься контрастна мітка, а сам вал освітлюється стробоскопом, синхронізованим із частотою мережі. Під час налаштування частоти спалахів до збігу з реальною частотою

обертання вала створюється ефект нерухомої мітки. Порівнюючи частоту мережі з обертами валу, можна обчислити значення ковзання за стандартною формулою:

$$s=(n_1-n)/n_1 \quad (1.6)$$

де n_1 - синхронна частота;

n - виміряна частота обертання ротора.

Обидва методи - як індукційний, так і стробоскопічний - дозволяють із достатньою точністю вимірювати ковзання без використання складного обладнання, що робить їх особливо корисними в лабораторних умовах та при випробуваннях середньо- і великогабаритних електричних машин.

1.5 Висновки до першого розділу

У першому розділі проаналізовано конструкцію, принцип дії та режими роботи асинхронних машин, які є найпоширенішими безконтактними електродвигунами змінного струму, що широко застосовуються в різних галузях. Характеристики таких двигунів описуються функціональними залежностями між електромагнітними, енергетичними та механічними параметрами, які подаються у вигляді графіків для оцінки поведінки машини в різних умовах.

Асинхронна машина може працювати як у режимі двигуна, так і генератора. При обертанні ротора швидше за обертове поле відбувається зворотне перетворення енергії, і машина виконує функцію генератора. Напрямок обертання можна змінити перестановкою фаз живлення.

Актуальним є використання схем з рекуперацією енергії, особливо при випробуваннях двигунів великої потужності. Це дозволяє знизити енерговитрати та підвищити ефективність випробувальних систем, відповідаючи сучасним вимогам енергозбереження.

					БРМА25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						30
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

2 РОЗРОБКА ЛАБОРАТОРНОГО ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ АСИНХРОННИХ ТРИФАЗНИХ ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ

2.1 Аналіз факторів та вибір методу експериментальних досліджень при розробці стенду

Сучасна підготовка висококваліфікованих інженерів неможлива без глибокого засвоєння фізичних процесів, що лежать в основі функціонування технічних систем, а також без навичок використання комп'ютерних технологій, сучасних засобів вимірювання, обробки експериментальних даних і знання принципів автоматизованого управління. Однією з головних вимог, що висуваються до випускників технічних спеціальностей на сучасному ринку праці, є збалансована підготовка як у сфері фундаментальних інженерних дисциплін, так і в галузі інформаційних технологій, особливо з урахуванням зростаючої цифровізації промисловості.

Інженер повинен не лише володіти теоретичними знаннями щодо розрахунків, моделювання і проектування, а й мати практичні навички у роботі з сучасними виробничими засобами, системами автоматичного контролю, засобами збору, аналізу та передачі технологічних даних, зокрема щодо реальних машин, їх вузлів і агрегатів. Це передбачає організацію освітнього процесу таким чином, щоб майбутній фахівець отримав досвід роботи з усіма ключовими етапами вимірювань – від реєстрації фізичних величин до аналізу результатів і формування алгоритмів управління технічними об'єктами.

Однак на сьогоднішній день технічне забезпечення більшості лабораторій українських ЗВО характеризується значним моральним та фізичним зносом. Лабораторні установки, переважно створені ще наприкінці ХХ століття, вже не відповідають вимогам сучасної інженерної освіти.

Значна частина приладів перебуває в неробочому стані або функціонує лише частково через відсутність запасних частин. Устаткування морально застаріло як у структурному, так і в метрологічному плані: воно базується на використанні механічних первинних перетворювачів і ручного збору даних, що не дозволяє реалізувати автоматизовані підходи до обробки експериментів.

У зв'язку з цим виникає необхідність у розробці нової концепції побудови лабораторного навчального середовища, заснованої на принципах дослідницького підходу, використанні сучасних інформаційно-вимірювальних технологій, віртуальних приладів і автоматизованих систем збору та обробки інформації. Найперспективнішим шляхом модернізації таких систем є впровадження інструментів від компанії National Instruments, яка понад 25 років є визнаним світовим лідером у галузі створення апаратного й програмного забезпечення для автоматизації, моделювання, вимірювань і обробки даних у наукових і навчальних цілях [22].

Основна концепція рішень National Instruments полягає у перетворенні персонального комп'ютера на високоточний вимірювальний інструмент із заданими метрологічними характеристиками, шляхом підключення модулів збору даних та використання спеціалізованого програмного забезпечення. Ключовим продуктом компанії є середовище візуального програмування LabVIEW (Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench), яке широко використовується як у промисловості, так і в академічному середовищі.

LabVIEW забезпечує створення гнучких, потужних віртуальних приладів, дозволяє реалізовувати багатофункціональні вимірювальні комплекси, здійснювати обробку даних у реальному часі, реалізовувати алгоритми контролю та керування. Графічне програмування на мові G значно спрощує процес розробки програм, а інтерфейс LabVIEW інтуїтивно зрозумілий навіть для користувачів без досвіду програмування.

LabVIEW дозволяє реалізовувати складні алгоритми аналізу даних, моделювати динаміку технічних об'єктів, формувати зворотні зв'язки і проводити віддалені експерименти через інтернет. У сукупності з аналогово-цифровими модулями (АЦП/ЦАП) програмне забезпечення забезпечує безперервний моніторинг і точне керування фізичними параметрами у широкому діапазоні задач.

Застосування продуктів National Instruments у навчальному процесі забезпечує [23]:

- інтеграцію з сучасним лабораторним обладнанням;
- дистанційний доступ до експериментальних установок;
- підвищення точності вимірювань;
- автоматизацію процесу збору, візуалізації та обробки даних;
- можливість багаторазового повторення експериментів у стабільних умовах;
- впровадження складних аналітичних та оптимізаційних алгоритмів.

Таким чином, використання технологій National Instruments, зокрема LabVIEW, відкриває нові можливості для оновлення лабораторної бази технічних ЗВО, реалізації компетентнісного підходу у підготовці інженерів і впровадження стандартів Індустрії 4.0 в освітній процес.

2.2 Розробка структурної схеми стенду для дослідження параметрів асинхронних двигунів

Структурна схема лабораторного стенда для дослідження характеристик асинхронних електродвигунів наведена на рисунку 2.1 (креслення [БРМА25.00.00.000С2]). Конструктивна реалізація стенда дозволяє здійснювати комплексну реєстрацію широкого спектра електричних параметрів двигуна, включаючи напругу, струм, потужність та їх часові характеристики, у динамічних і перехідних режимах роботи. Особливу увагу

приділено здатності системи працювати за умов змінного, знакозмінного, імпульсного навантаження, у режимах з недосконалою (деформованою) формою напруги живлення, а також у випадках симетричного та асиметричного навантаження на обмотки статора.

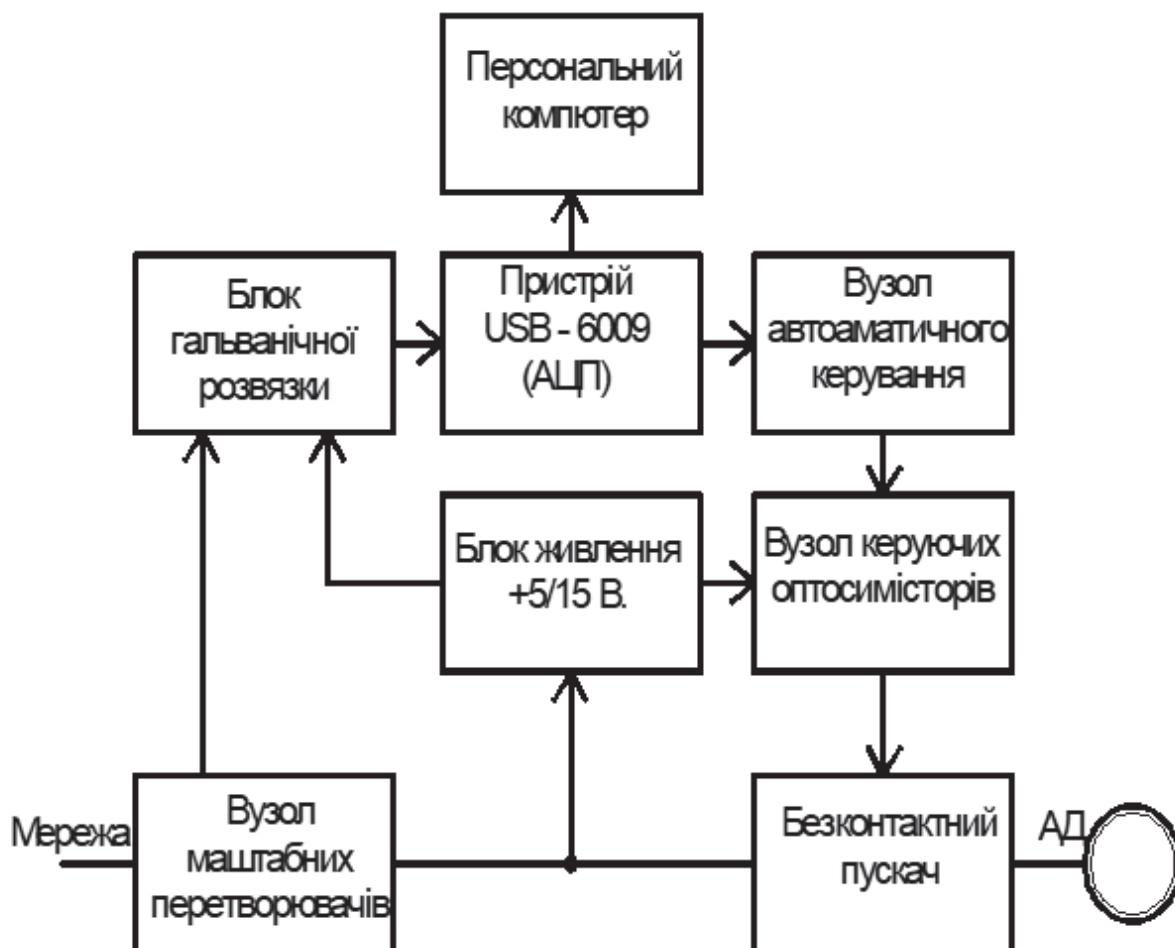


Рисунок 2.1 – Структурна схема стенда для дослідження асинхронного електродвигуна

Інформаційне ядро системи побудовано на основі персонального комп'ютера, що забезпечує достатню продуктивність для виконання задач збору, обробки та візуалізації експериментальних даних у реальному часі. Програмно-апаратне керування виконується у середовищі віртуальних приладів LabVIEW 8.5, що дозволяє реалізувати гнучкі алгоритми обробки, фільтрації та представлення результатів [22].

Для запуску асинхронного двигуна передбачено використання електронного симісторного пускача, керованого з комп'ютера через оптоізольований інтерфейсний вузол. Симісторна схема забезпечує плавне підвищення напруги на обмотках статора, що дозволяє уникнути ударних пускових струмів. Сигнали керування передаються через гальванічно розв'язаний оптронний канал, який живиться від стабілізованого джерела +15 В, що гарантує електробезпеку та усунення впливу перешкод між силовою та керуючою частинами стенда.

Для вимірювання струму в провідниках живлення використовується вузол струмового перетворювача з балансною схемою. Сигнали, пропорційні силі струму, після гальванічної розв'язки, подаються на вхід універсального багатоканального вимірювального модуля NI USB-6009, який виконує аналого-цифрове перетворення і передає дані на ПК [24]. Аналогічно, до NI USB-6009 підключаються сигнали вимірюваної напруги. Живлення системи керування реалізовано від окремого стабілізованого блоку на +5 В.

Завдяки інтеграції з програмним середовищем LabVIEW, всі етапи вимірювання, збору, обробки та аналізу параметрів – повністю автоматизовані. Результати експериментів можуть бути використані для побудови механічних, електромеханічних та пускових характеристик асинхронного двигуна, а також для дослідження його поведінки в різних експлуатаційних режимах. Крім того, система дозволяє створювати адаптивні алгоритми керування та реалізовувати функції контролю технічного стану досліджуваних об'єктів, що розширює можливості стенда для використання у навчальному процесі та наукових дослідженнях.

2.3 Розробка принципової електричної схеми стенду та принцип її роботи

Пуск і зупинка асинхронного двигуна реалізуються як у ручному режимі (за допомогою кнопки SB2), так і автоматизовано – з персонального

з яких знімається напруга, пропорційна струму. Ці сигнали передаються через вузол гальванічної розв'язки на вхід модуля збору даних NI USB-6009, підключеного до комп'ютера через інтерфейс USB 2.0.

Уся апаратура: електронний комутатор, шунти, блок живлення, схема розв'язки – інтегровані в єдиний корпус станда, що підвищує зручність використання та надійність експлуатації.

За допомогою цифрового виходу NI USB-6009, який керується з віртуального інтерфейсу LabVIEW, реалізовано повноцінне програмне керування запуском і зупинкою двигуна, що дозволяє реалізувати різні алгоритми тестування.

Розроблена система станда забезпечує автоматизовану обробку сигналів, візуалізацію результатів у реальному часі та розширені функції вимірювання, зокрема:

- обчислення середньоквадратичних значень фазних струмів;
- розрахунок активної потужності;
- реєстрацію амплітуд фазних напруг і струмів;
- підключення допоміжних сенсорів для оцінки швидкості обертання, механічного навантаження та експлуатаційних характеристик.

Таким чином, стенд є багатофункціональним випробувальним комплексом, що дозволяє проводити повноцінні електромеханічні дослідження асинхронних двигунів у статичних та динамічних режимах.

2.4 Розробка вузла комутації, безконтактного пускача

Для забезпечення швидкого, надійного та безударного пуску асинхронного електродвигуна в складі дослідного станда було прийнято рішення про розробку і виготовлення безконтактного електронного пускового пристрою на основі симісторних перемикачів [25, 26]. Такий підхід дозволяє виключити механічні зноси контактних елементів, зменшити

пускові перенавантаження та забезпечити точне керування моментом включення фаз.

З огляду на попередньо оцінене значення пускового струму досліджуваного електродвигуна, для силової частини схеми були обрані потужні симістори типу ВТА41-600 (позиції DA1–DA3), що мають такі номінальні електричні характеристики:

- максимальний робочий струм у відкритому стані - до 40 А;
- гранична напруга комутації - до 600 В;
- струм керування (імпульс запуску затвором) - $I_{GT} = 50$ мА.

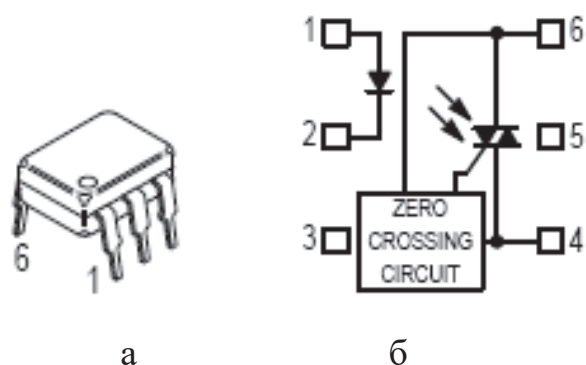
Для надійного електричного розділення силової та керувальної частин, а також для підвищення електробезпеки, керування силовими симісторами здійснюється за допомогою оптоелектронних елементів — оптосимісторів типу МОС3061-М (поз. SA1–SA3), виробництва компанії Motorola. Цей тип оптосимістора забезпечує:

- вхідну напругу керування - не більше 1,2 В;
- струм спрацювання - в межах 10...15 мА;
- типову споживану потужність на вхідному колі - до 15 мВт;
- наявність вбудованого схеми Zero-Crossing Detection, яка забезпечує комутацію при переході через нуль напруги, що істотно знижує електромагнітні перешкоди при вмиканні.

Для обмеження струму в колі керування оптосимісторів застосовується резистор обмеження струму – R4, обраний номіналом 300 Ом з допуском $\pm 5\%$ типу С2–23. Значення опору підібрано відповідно до умов безпечної експлуатації діодної частини оптопари при живленні постійною напругою +5 В, з урахуванням необхідного струму на вході оптосимістора.

Таким чином, побудована симісторно-оптосимісторна система керування дозволяє реалізувати безконтактне вмикання трифазного навантаження, забезпечує плавність і точність пуску електродвигуна та є

надійною і довговічною альтернативою традиційним механічним пускачам. Дана схема реалізована згідно з принциповою електричною схемою, зображеною на рисунку 2.3.



а - зовнішній вигляд; б - внутрішня структура

Рисунок 2.3 – Оптосимістори серії MOC3061, MOC3062, MOC3063 фірми Motorola:

Для забезпечення надійної роботи електронного пускового пристрою в керувальній частині схеми були обрані елементи з оптимальними номіналами та допусками. Так, резистори R5, R8, R11 обрані з опором 1 кОм $\pm 5\%$, типу C2–23, що забезпечує стабільну роботу вхідних кіл оптосимісторів. Резистори R6, R9, R12 мають номінал 390 Ом $\pm 5\%$, а резистори R7, R10, R13 - 470 Ом $\pm 5\%$, також типу C2–23. Таке поєднання опорів використовується для формування оптимального струму керування та обмеження струму в різних вузлах керувальної логіки (рис.2.4).

Для фільтрації імпульсних завад у ланцюгах живлення застосовується конденсатор C8 з ємністю 22 нФ, напругою ~ 220 В, допуском $\pm 5\%$, що забезпечує надійне згладжування перехідних процесів і додаткову електричну розв'язку між ланцюгами.

з'єднані із платою управління за допомогою навісного монтажу, як показано на рисунку 2.5. Така конструкція забезпечує модульність, зручність у монтажі та обслуговуванні системи електронного пуску асинхронного двигуна.

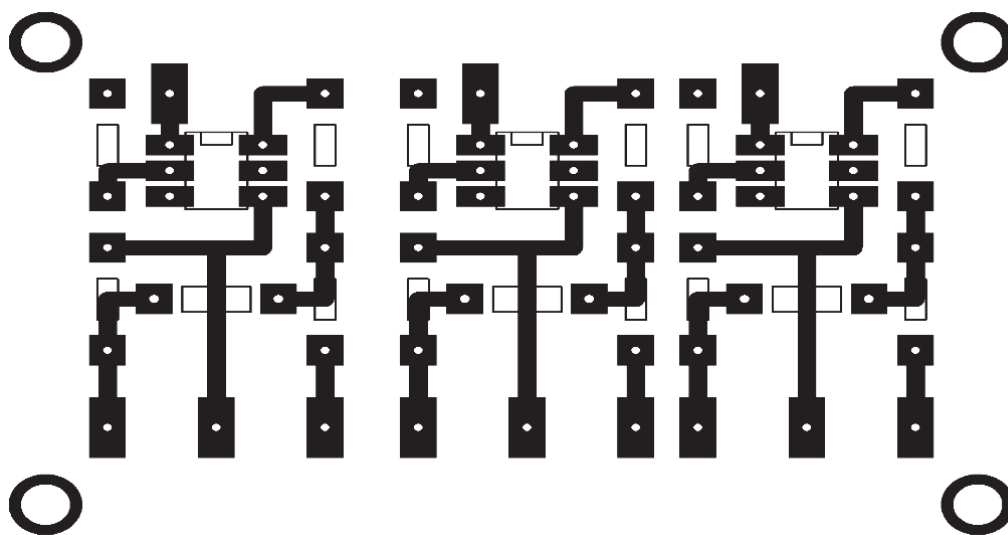


Рисунок 2.5 – Друкована плата вузла комутації

2.5 Розробка блоку живлення

Друкована плата, зображена на рисунку 2.6, спеціально спроектована та виготовлена для забезпечення функціонування вузлів гальванічної розв'язки та керування оптосимісторами. Її компоновка враховує вимоги електричної безпеки, мінімізацію електромагнітних перешкод і надійність передачі керувальних імпульсів.

На платі передбачено окремі ізольовані зони для високовольтної та низьковольтної частин, що забезпечує електричну розв'язку між силовими ланцюгами та логічними схемами управління. Гальванічна розв'язка реалізована з використанням оптронних вузлів, які передають сигнали керування від мікроконтролера до симісторів без прямого електричного

з'єднання, тим самим забезпечуючи захист контролера від перенапруг та імпульсних завад.

Блок керування оптосимісторами вмонтовано на тій самій платі, що зменшує кількість зовнішніх з'єднань, підвищує надійність роботи системи в цілому та дозволяє реалізувати компакту і функціонально завершену конструкцію. Розміщення елементів на платі оптимізоване для забезпечення ефективного тепловідведення та зручності у обслуговуванні [27].

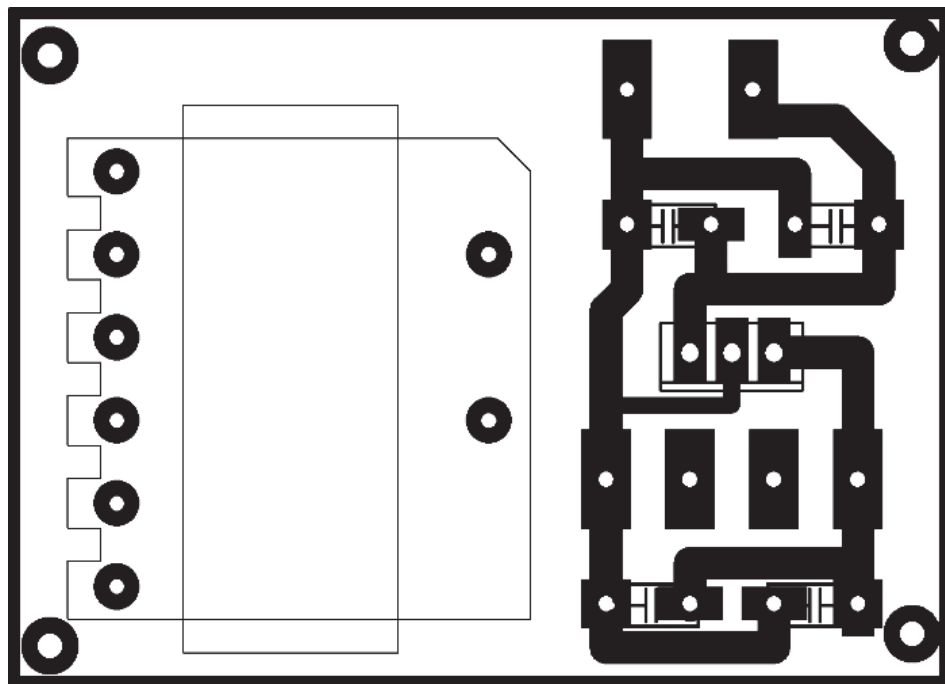


Рисунок 2.6 – Друкована плата блоку живлення

До джерела живлення системи пред'являються наступні технічні вимоги:

- вихідна напруга постійного струму 5 В для живлення логічних схем;
- вихідна напруга постійного струму 15 В для живлення вузлів підвищеної потужності (наприклад, оптронів і гальванічних розв'язок);
- висока стабільність напруги незалежно від коливань навантаження або вхідної напруги;
- низький рівень пульсацій постійної напруги;

Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата

- наявність захисту від перевантаження або короткого замикання для забезпечення безпеки системи.

Враховуючи ці вимоги до трансформації напруги, було обрано малогабаритний трансформатор типу TS 2/036, схема якого представлена на рисунку 2.7. Цей трансформатор призначений для монтажу на друковану плату та має наступні експлуатаційні характеристики:

- вхідна (мережева) напруга живлення: 230 В змінного струму, частотою 50/60 Гц;

- вихідна (вторинна) напруга під навантаженням: два незалежні канали по 12 В (2×12 В);

- максимальний струм вторинної обмотки: $2 \times 0,08$ А, що забезпечує загальну потужність на виході до 1,92 Вт;

- конструктивні розміри: $36 \times 28,5 \times 30$ мм, що дозволяє легко інтегрувати трансформатор у компактні електронні пристрої;

- виводи для пайки: розраховані на монтаж безпосередньо у друковану плату, що спрощує збірку та підвищує надійність з'єднань.

Обраний трансформатор TS 2/036 повністю задовольняє вимоги до надійного та безпечного живлення електронних компонентів дослідного стенда, зокрема вузлів керування, гальванічної розв'язки та датчиків [28].

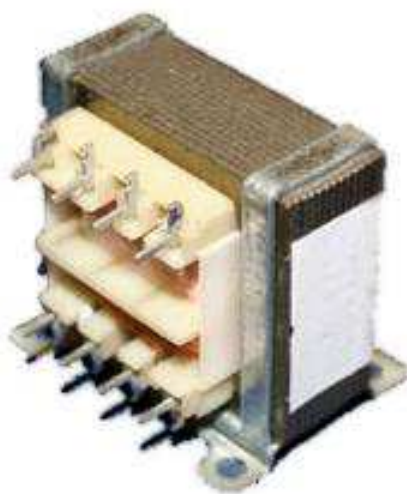


Рисунок 2.7 – Загальний вигляд трансформатора напруги TS 2/036

Для забезпечення якісного перетворення змінного струму у постійний у складі стенда застосовується мостова випрямна схема, реалізована на напівпровідникових діодах. Як основний елемент вибрано діодний міст типу Д243Б, який розрахований на максимальний струм до 5 А та напругу до 200 В, що забезпечує надійний запас по струмовим і напруговим характеристикам для живлення виконавчих елементів та систем керування.

Стабілізація постійної напруги здійснюється за допомогою інтегрального стабілізатора напруги 7805 у корпусі ТО-220, що забезпечує вихідну стабілізовану напругу +5 В при максимальному струмі навантаження до 1,5 А. Вхідна напруга для мікросхеми допускається в межах до 30 В, що відповідає параметрам випрямленого сигналу після мостового модуля.

Для зменшення пульсацій та фільтрації випрямленого сигналу у схемі передбачено використання електролітичного конденсатора С6 номіналом 200 мкФ / 50 В, що згладжує коливання напруги після випрямлення. Крім того, конденсатори С4 та С5 номіналом 100 нФ / 50 В встановлюються безпосередньо на вході та виході мікросхеми 7805 з метою придушення високочастотних перешкод та забезпечення стабільної роботи регулятора напруги.

У результаті розроблено енергетичну схему, яка повністю відповідає попередньо сформульованим вимогам щодо рівня напруги, стабільності, струмових навантажень та захисту. Всі основні елементи живлення – трансформатор, діодний міст, фільтрувальні й стабілізуючі компоненти – розміщені на одній друкованій платі, що забезпечує компактність і зручність обслуговування.

Розробка друкованої плати та розміщення елементів виконані в середовищі автоматизованого проєктування Sprint Layout, що дало змогу оптимізувати трасування струмопровідних доріжок, забезпечити необхідну гальванічну розв'язку і підвищити надійність живлення всієї вимірювальної системи.

Перелік елементів схеми живлення подано у додатку А, який містить повну специфікацію з типами, номіналами та параметрами компонентів. Такий підхід забезпечує простоту повторення схеми та полегшує технічне обслуговування при експлуатації.

2.6 Розрахунок вузла масштабних перетворювачів

Виконаємо розрахунок ключового компонента електричної схеми - вузла перетворення масштабу змінного струму, що представлений на рисунку 2.8. Цей функціональний модуль є основним елементом вимірювального контуру, призначеним для прийому, перетворення та масштабування електричних сигналів змінного струму, які надходять від об'єкта дослідження - асинхронного двигуна.

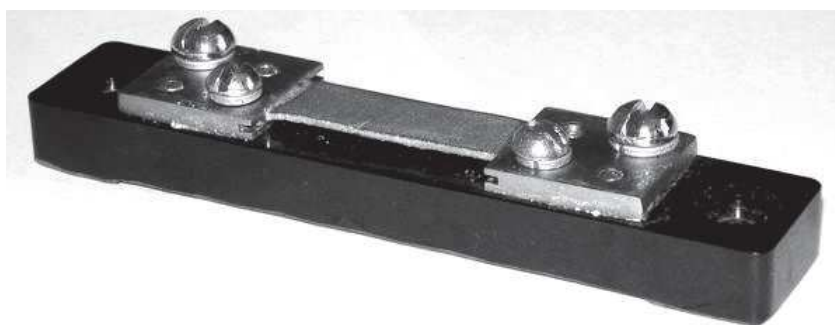


Рисунок 2.8 – Загальний вигляд масштабного перетворювача струму

Основним призначенням вузла перетворювача шкали є підготовка вхідного сигналу до подальшого аналізу: зменшення амплітуди струмового або напругового сигналу до рівнів, допустимих для аналогово-цифрових перетворювачів (наприклад, плати NI USB-6009), а також забезпечення відповідного масштабування, необхідного для виведення результатів у фізичних одиницях виміру.

У структурі вузла можуть бути реалізовані такі компоненти:

					БРМА25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						45
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

- прецизійний струмовий шунт або трансформатор струму, який виконує роль первинного перетворювача струму в напругу;
- підсилувально-масштабуючий каскад на операційних підсилювачах з фіксованим коефіцієнтом підсилення або дільником напруги;
- система фільтрації для зменшення високочастотних перешкод, що спотворюють результат вимірювання;
- захисні обмежувальні елементи, які запобігають перевантаженню входу АЦП при імпульсних перенапругах.

Вузол перетворення масштабу є невід'ємною частиною автоматизованого стенда і забезпечує точну передачу інформації про змінні електричні параметри тестованого двигуна в цифрову систему обробки. Завдяки застосуванню такої схеми досягається висока достовірність, повторюваність і адекватність експериментальних даних, необхідних для побудови електромеханічних характеристик, контролю теплових і навантажувальних режимів роботи двигуна.

1 Розрахунок шунтів.

Опір шунта знаходиться за формулою [29]:

$$R_{ш} = \frac{U_{ш}}{I_{ш}} = \frac{0,075}{20} = 0,00375 \text{ Ом}, \quad (2.1)$$

де $I_{ш} = 20 \text{ А}$ - струм шунта;

$U_{ш} = 0,075 \text{ В}$ - напруга шунта;

$R_{ш} = 0,003 \text{ Ом}$ - опір шунта.

За результатами розрахунків було підібрано шунти, відкалібровані в стаціонарному 75ШСМЗ з номінальним струмом - 20А (рис.2.8).

Вихідні дані:

– трифазна напруга електромережі 380 В;

- номінальний струм електродвигуна 3А;
- клас точності вимірювань, що не перевищує 0,5.

2.7 Вибір вузла гальванічної розв'язки

Для забезпечення гальванічної розв'язки між виходами масштабних перетворювачів та входами аналогово-цифрового перетворювача (АЦП) у складі вимірювального комплексу було застосовано ізолюючий сигналоперетворювач типу HL-7B30 [30]. Цей пристрій виконує подвійне призначення: перетворює вхідний сигнал постійної напруги в уніфікований вихідний сигнал, а також забезпечує повну гальванічну ізоляцію між вимірювальним трактом та цифровим модулем обробки даних.

Основна функція HL-7B30 полягає у формуванні стандартного аналогового сигналу (наприклад, 0...5 В або 0...10 В) на виході при подачі відповідного діапазону вхідної напруги (наприклад, від сенсорів струму або напруги), зберігаючи при цьому електричне розділення між високовольтною та низьковольтною частинами схеми.

Технічні переваги використання HL-7B30:

- гальванічна ізоляція високого ступеня захисту (типово до 2500 В), що гарантує безпеку персоналу та збереження електроніки у випадку імпульсних перенапруг;
- висока точність передавання сигналу, що забезпечує достовірність даних при роботі в динамічних режимах;
- компактне виконання, що дозволяє інтегрувати перетворювач у друковані плати стендового обладнання;
- низьке власне енергоспоживання, що важливо при побудові енергоефективних систем.

Застосування HL-7B30 в структурі електронного стенда дозволяє реалізувати стабільний, безпечний і точний процес вимірювання електричних

величин, що, в свою чергу, є критично важливим для побудови електромеханічних характеристик досліджуваних асинхронних двигунів у режимах змінного навантаження, а також для їх подальшого аналізу в середовищі LabVIEW або іншому ПЗ збору та обробки даних.

Основні технічні характеристики блоку гальванічної розв'язки показані в табл. 2.1.

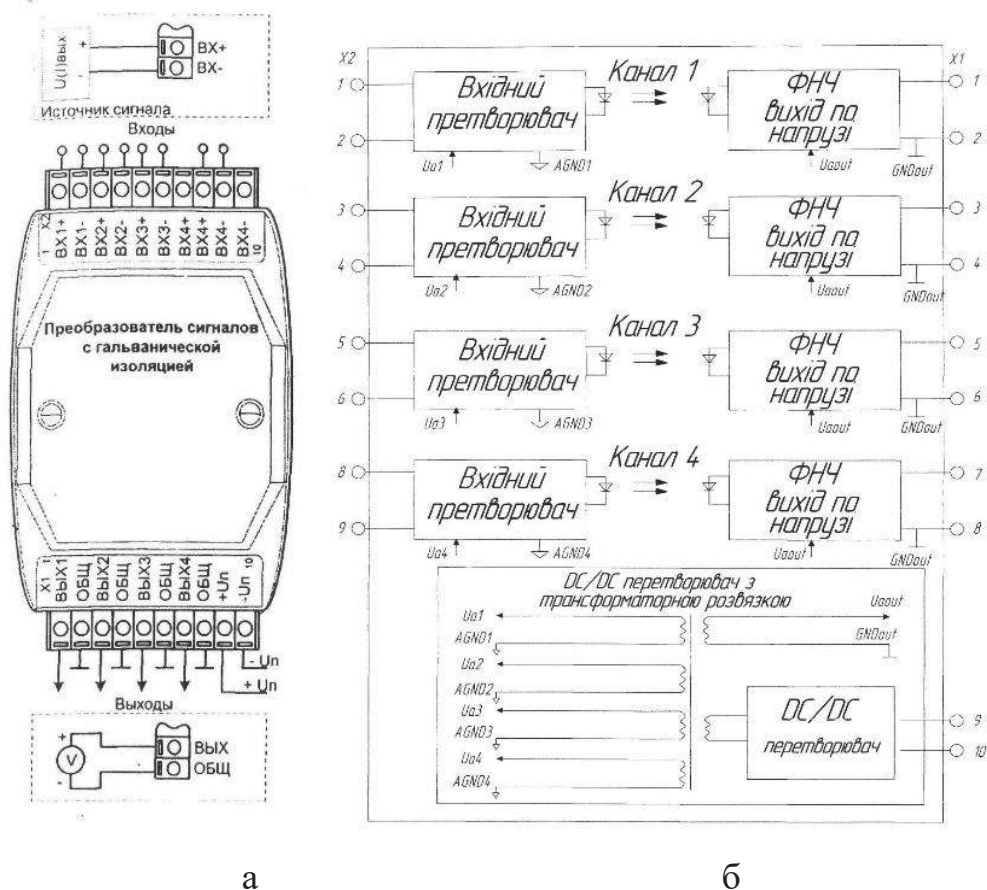
Таблиця 2.1 – Основні технічні характеристики блоку гальванічної розв'язки

Параметр	Величина
Кількість каналів	4
Діапазон зміни вхідного сигналу, мВ	-200...+200
Діапазон зміни вихідного сигналу, В	0.....+10
Придушення перешкоди загального вигляду 50/60 Гц не менше, дБ	100
Вхідний опір не менше, кОм	100
Час встановлення вихідного сигналу, протягом якого він виходить в зону меж основної похибки, що припускається, не більш, мс	0,3
Вихідне навантаження не більше, Ом	0,1
Частотний діапазон, кГц	0.....5кГц
Споживана потужність не більш, Вт	0,3
Додаткова похибка в робочому діапазоні температур % / °С	10,15/10
Опір навантаження не менше, кОм	5
Робоча температура навколишнього повітря, °С	-10.....+60

Продовження табл.2.1.

Живлення перетворювача - напруга постійного струму (не стабілізоване), В	+10...+30
Відносна вологість при температурі +35 % / °С	35...95
Вхідні по кожному каналу і вихідний ланцюги гальванічно ізольовані між собою і живленням перетворювача, напруга гальванічної ізоляції, В	1500
Температура зберігання, °С	-20.....+70

Функціональна схема й схема підключення блоку гальванічної розв'язки наведені на рисунку 2.9, а, б відповідно [30].



а - схема підключення; б - функціональна схема

Рисунок 2.9 – Блок гальванічної розв'язки:

Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата
-----	------	---------	--------	------

У таблиці 2.2 представлено докладний опис самих контактів перетворювача [30].

Таблиця 3.2 – Опис контактів перетворювача

№ конт.	Позначення	Опис
XI 1	“ВИХ1”	Вихід каналу 1
2	“ЗАГ”	Загальний виходу
3	“ВИХ2”	Вихід каналу 2
4	“ЗАГ”	Загальний виходу
5	“ВИХ3”	Вихід каналу 3
6	“ЗАГ”	Загальний виходу
7	“ВИХ4”	Вихід каналу 4
8	“ЗАГ”	Загальний виходу
9	+U	Напруга живлення перетворювача (+10...+30)В
10	-U	Загальний живлення перетворювача
X2 1	VX1 +	Високий потенціал входу 1
2	VX1-	Низький потенціал входу 1
3	VX2+	Високий потенціал входу 2
4	VX2-	Низький потенціал входу 2
5	VX3+	Високий потенціал входу 3
6	VX3-	Низький потенціал входу 3
7	VX4+	Не використаний
8	VX4+	Високий потенціал входу 4
9	VX4-	Низький потенціал входу 4
10	VX4-	Не використаний

Внутрішній DC/DC перетворювач, що має трансформаторну розв'язку здійснює по каналне живлення вхідних і групове живлення вихідних кіл.

Габаритні розміри наведено на рисунку 2.10.

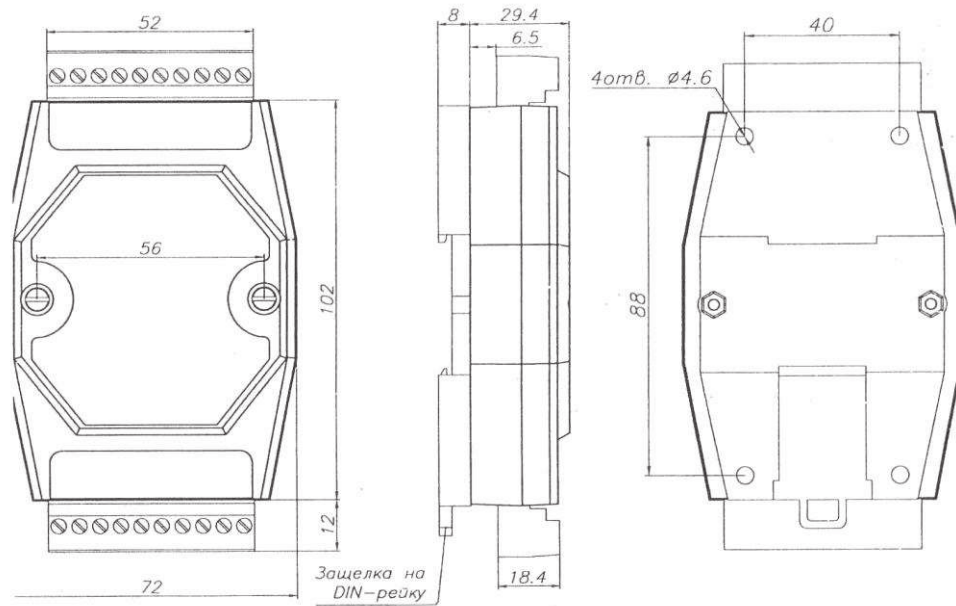


Рисунок 2.10 – Габаритні й настановні розміри перетворювача

2.8 Вибір вузла аналого-цифрового перетворення

Для проведення експериментальних досліджень асинхронного електродвигуна в складі стендового обладнання використано багатофункціональний модуль збору даних NI USB-6009, що працює у зв'язці з блоком гальванічної розв'язки сигналів (рис.2.11) [24].

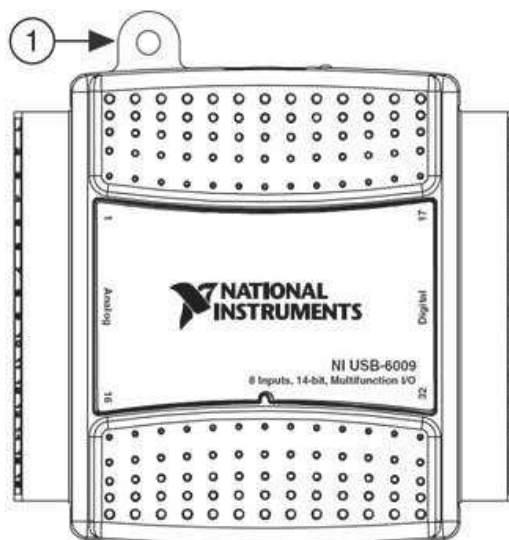


Рисунок 2.11 – Зовнішній вигляд USB перетворювача NI USB-6009

Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата

БРМА25.00.00.000 ПЗ

Арк.

51

Цей пристрій, що підключається до персонального комп'ютера через інтерфейс USB типу full-speed, забезпечує широкий спектр можливостей збирання, аналізу та обробки даних у режимі реального часу. Основним призначенням NI USB-6009 є оцифрування аналогових сигналів, формування керувальних сигналів та зчитування станів цифрових входів/виходів, що дозволяє реалізувати повноцінний цикл автоматизованого вимірювання електричних характеристик двигуна.

Основні функціональні можливості NI USB-6009 [24]:

- 8 каналів аналогового введення (AI) з роздільною здатністю 14 біт та діапазоном ± 10 В;
- 2 канали аналогового виводу (AO) для генерації керуючих аналогових сигналів;
- 12 каналів цифрового введення/виводу (DIO) для фіксації логічних станів або подачі цифрових команд;
- 32-розрядний лічильник для вимірювання частоти імпульсів або підрахунку подій.

Пристрій має компактне конструктивне виконання та живиться безпосередньо через USB-інтерфейс, що усуває потребу в додаткових блоках живлення. Усі сигнали, що надходять на вхід USB-6009, попередньо проходять через схему гальванічної розв'язки, що дозволяє уникнути паразитних впливів та захистити комп'ютер від високовольтних завад.

В таблиці 2.3 наведено технічні характеристики аналогово-цифрового перетворювача (АЦП), реалізованого в складі модуля NI USB-6009, які дозволяють оцінити його ефективність та придатність до використання у складі лабораторного стенда для дослідження динамічних та усталених режимів роботи асинхронного двигуна.

Таблиця 2.3 – Характеристика АЦП USB NI 6009

Особливості	NI 6009
Шина	USB
Аналогові входи	8 SE (4DI)
Частота оцифрування сигналів	14 кГц
Розширення АЦП (біт.)	12
Діапазони вхідної наруги	від 1 до 20 В
Аналогові виходи	2
Розширення ЦАП (біт.)	12
Частота роботи ЦАП	150 кГц
Вихідний діапазон	0-5 В

Принципова схема блоку аналогового введення наведена на рисунку 2.12 [24].

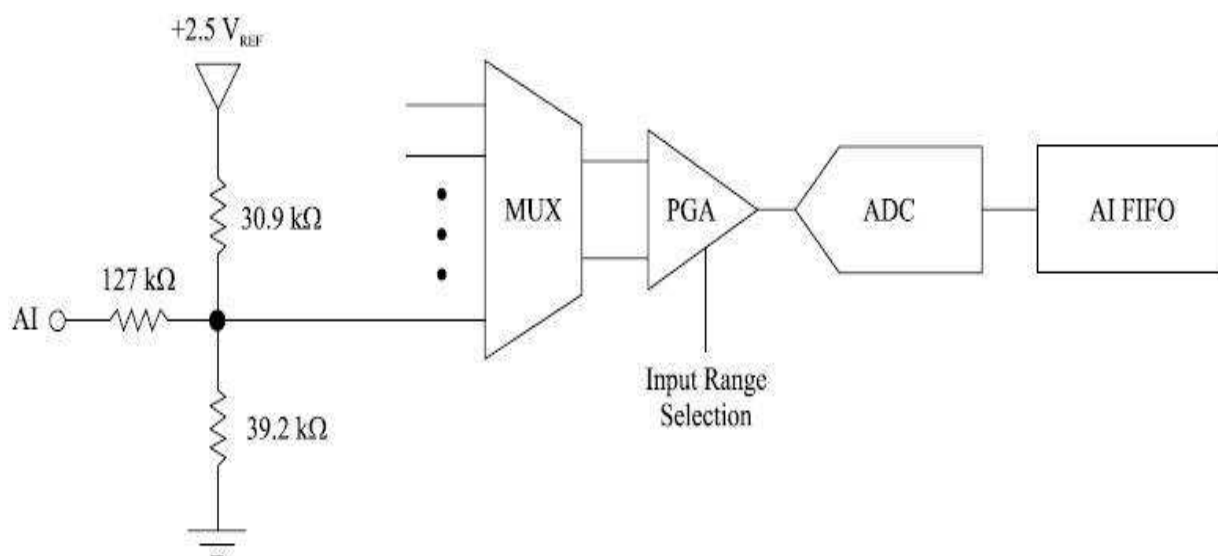


Рисунок 2.12 – Принципова схема блоку аналогового введення

2.9 Вибір електронно-обчислювальної машини

Програмування вимірювального обладнання National Instruments здійснюється за допомогою набору драйверів NI-DAQ для середовища Windows, що постачається разом із пристроями. Драйвери сумісні з операційними системами Windows 98/NT та підтримують популярні середовища розробки прикладного програмного забезпечення, зокрема LabVIEW, LabWindows/CVI і ComponentWorks. Це забезпечує повну інтеграцію апаратної частини з гнучким програмним забезпеченням, дозволяючи реалізовувати складні алгоритми збору, обробки та візуалізації експериментальних даних у зручному віртуальному середовищі.

Серії мобільних рішень DAQpad та DAQcard, розроблені компанією National Instruments, є повноцінними функціональними аналогами вбудовуваних вимірювальних плат, що використовуються в стаціонарних системах на базі персональних комп'ютерів. Вони мають ідентичні програмні інтерфейси, що дозволяє без жодних змін переносити програмне забезпечення між настільними та портативними платформами. Завдяки цьому спрощується створення універсального комплексу для проведення лабораторних, наукових і технічних досліджень.

З урахуванням потреби в гнучкості, портативності та сумісності апаратного і програмного забезпечення, у створеній системі для дослідження електричних характеристик асинхронних двигунів було застосовано персональний комп'ютер, модуль гальванічної розв'язки та USB-перетворювач сигналів. Така апаратна конфігурація дозволяє автоматизувати процес збирання, аналізу та архівації даних, зменшити похибки ручних вимірювань і забезпечити високий рівень достовірності експериментальних результатів.

2.10 Загальний вигляд стенду для досліджень параметрів трифазних асинхронних двигунів

На основі розроблених структурної та електричної схем, а також враховуючи особливості та виклики, пов'язані з аналізом перехідних процесів, було спроектовано та виготовлено лабораторний стенд для дослідження електричних перехідних процесів в асинхронному електродвигуні. Його створення обумовлене необхідністю діагностики електрообладнання, що експлуатується у змінних умовах навантаження, зокрема при перемінному та знакозмінному режимі роботи, в умовах симетричного та асиметричного живлення, а також при недосконалій формі напруги.

В таких умовах виникають складні перехідні процеси, аналіз яких потребує реєстрації значної кількості електричних параметрів та їх часових залежностей. Особливо це важливо під час запуску, самозапуску після короткочасного зникнення живлення, а також у випадках аварійного вимкнення або нестабільної роботи системи. Перехідні процеси суттєво впливають на пускові та експлуатаційні характеристики асинхронних двигунів, а також на стабільність усього електромеханічного комплексу.

Розроблений стенд дозволяє моделювати реальні умови експлуатації двигунів, проводити експериментальне визначення часових характеристик таких як струм, напруга, потужність, ковзання, а також забезпечує можливість реєстрації динаміки зміни цих параметрів у режимі реального часу.

Стенд реалізовано як навчально-дослідницьку установку для лабораторії «Електричні машини та електропривод» кафедри машин та апаратів, електромеханічних та енергетичних систем, де він використовується як для вивчення теоретичних основ, так і для практичного ознайомлення з поведінкою асинхронних двигунів у перехідних режимах. Це дозволяє

студентам та дослідникам отримати глибше розуміння роботи електричних машин в реальних умовах.

Зовнішній вигляд стенда представлено на рисунку 2.13, а його конструктивна документація наведена на кресленні [БРМА25.00.00.000ДІ1].

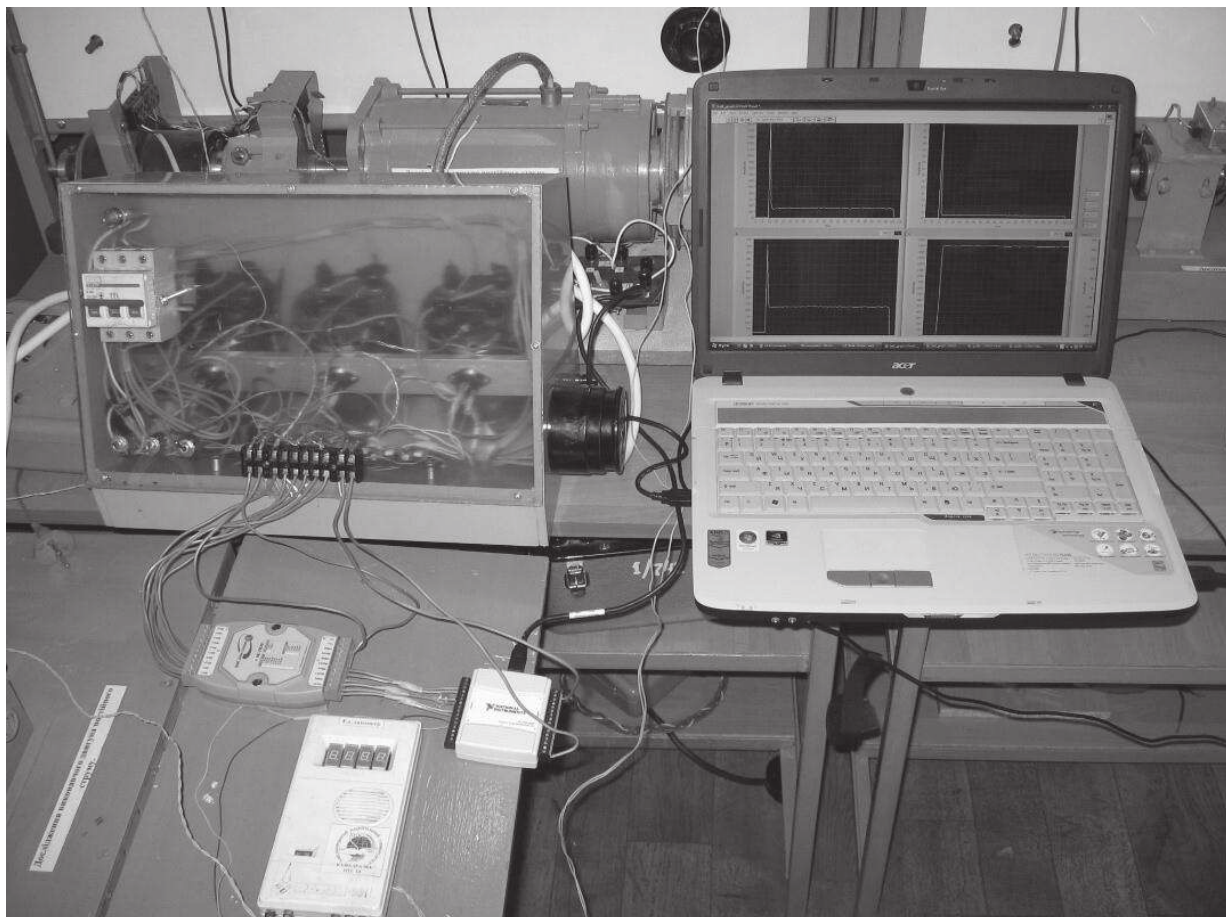


Рисунок 2.13 – Зовнішній вигляд стенду для дослідження параметрів асинхронних двигунів

2.11 Висновки до другого розділу

В другому розділі на основі опрацьованих структурної та принципової електричної схем, а також урахування зазначених технічних проблем, був розроблений функціональний стенд для дослідження параметрів асинхронних

двигунів. Його призначення полягає у відтворенні типових експлуатаційних умов роботи АД в змінних режимах навантаження, з метою аналізу й вивчення параметрів запуску, самозапуску, відмов та асиметричних режимів живлення.

Діагностика електроустановок, оснащених асинхронними двигунами, ускладнюється через необхідність реєстрації великої кількості електричних параметрів (струм, напруга, потужність, частота, фазний зсув тощо) та їх динаміки у часі. Особливо актуальним є дослідження поведінки двигуна при недосконалій синусоїдальній формі напруги, тимчасових збоях живлення, перемінному навантаженні, а також у симетричних та асиметричних схемах підключення.

Стенд дозволяє здійснювати експериментальне дослідження режимів пуску, гальмування, переходу між режимами, а також процесів самозапуску після зникнення живлення. Такий підхід дозволяє визначати критичні моменти, пов'язані з перенапругами, надструмами, затягнутими пусками, та виявляти вплив конструктивних і електричних особливостей приводу на загальну стійкість системи.

					БРМА25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						57
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ

3.1 Проведення експерименту

Було прийнято рішення використовувати середовище графічного програмування LabVIEW для реалізації програмного модуля дослідження трифазних асинхронних двигунів [22]. Laboratory Virtual Instrumentation Engineering Workbench є універсальною інтерактивною платформою розробки від компанії National Instruments (США), що дозволяє створювати прикладні вимірювальні, діагностичні та автоматизовані системи. Основою цього середовища є мова графічного програмування G, яка реалізує концепцію потокового виконання даних (dataflow programming) і принцип побудови блок-схем.

Платформа забезпечує кросплатформну сумісність і підтримує різні операційні системи, зокрема Windows, Linux, UNIX, Mac OS. Середовище має розвинений інструментарій для реалізації задач збору та обробки даних, керування приладами та автоматизації процесів. Завдяки інтеграції з платформою .NET, сучасні версії підтримують модулі реального часу та розширені засоби математичних обчислень.

Програмування в LabVIEW здійснюється у двох основних вікнах: «блок-діаграма» (Block Diagram), де створюється логіка роботи програми, і «лицьова панель» (Front Panel), яка є візуальним інтерфейсом користувача. Програмний код у вигляді блоків з'єднується між собою лініями передачі даних (проводами), що відповідають змінним. Кожен функціональний блок виконується після надходження на вхід усіх необхідних даних, що дозволяє реалізувати паралельне виконання незалежних ділянок коду.

Програму в середовищі LabVIEW прийнято називати віртуальним приладом (Virtual Instrument – VI). Кожен VI може бути самостійною

функціональною одиницею або використовуватись як підпрограма (SubVI) в інших проектах. Інтерфейс управління та індикації розміщується на лицьовій панелі, що надає можливість користувачу вводити параметри або спостерігати за результатами виконання у режимі реального часу.

LabVIEW містить широкую бібліотеку шаблонів, функціональних модулів, драйверів та документації. Це дозволяє створювати масштабовані системи з підтримкою мережевих технологій (наприклад, архітектура клієнт-сервер) та забезпечує гнучкість у розробці програмно-апаратних комплексів для наукових та навчальних потреб.

Попри певні обмеження щодо підтримки сторонніх платформ, середовище LabVIEW залишається потужним інструментом для створення вимірювальних, навчальних і дослідницьких лабораторій, що забезпечує глибоку інтеграцію з апаратними засобами National Instruments, зокрема з картами збору даних, осцилографами та керуючими пристроями.

3.2 Розробка та опис роботи блок-діаграми

Блок-діаграма була створена для вивчення перехідних характеристик асинхронного двигуна в програмному середовищі LabVIEW (рис. 3.1) (креслення [БРМА25.00.00.000ДІ2]).

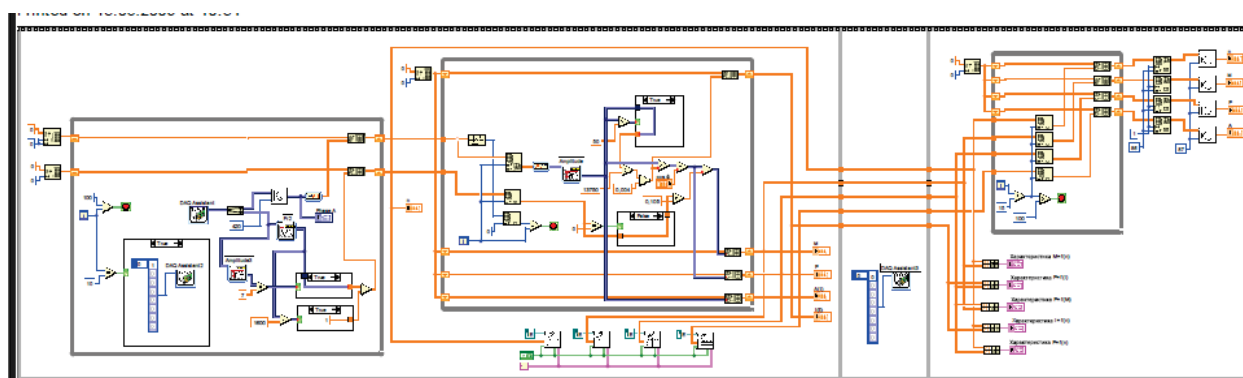


Рисунок 3.1 – Загальний вигляд блок-діаграми

Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата

Робота даної програми побудована на основі стекової (послідовної) логіки виконання, що передбачає реалізацію алгоритму в три етапи або підходи. Основна логіка програми реалізована шляхом використання структур керування виконанням, зокрема умовних циклів типу While, що забезпечують безперервне зчитування та обробку даних у реальному часі [22].

На першому етапі, що представлений на рисунку 3.2, використано два вкладені цикли While. У зовнішньому циклі відбувається послідовне зчитування даних із аналогово-цифрового перетворювача. За одну ітерацію зчитується 100 зразків аналогових сигналів, які надходять із вимірювальних каналів. Перед початком зчитування здійснюється ініціалізація двох масивів: одновимірного масиву для зберігання поточних значень напруги або струму, а також двовимірного масиву, в якому кожен рядок відповідає набору зразків для одного каналу, а кожен стовпець - часовій мітці (sample index).

Ініціалізація масивів значень "по нулях" дозволяє попередити помилки при записі або обробці ще не отриманих даних та забезпечити коректне використання буферної пам'яті. Зчитані зразки передаються на наступні етапи обробки, зокрема фільтрацію, математичну обробку та візуалізацію. Такий підхід дозволяє накопичувати дані для подальшого аналізу часових характеристик асинхронного двигуна при різних режимах його роботи.

Визначення каналів відтворення даних у програмному середовищі LabVIEW здійснюється за допомогою вбудованої функції DAQ Assistant, яка забезпечує конфігурацію параметрів зчитування, таких як вибір необхідних аналогових каналів, частота дискретизації та кількість зразків на цикл (рис.3.3). Після кожної ітерації циклу, що керується DAQ Assistant, здійснюється зчитування двовимірного масиву, що містить дані з двох каналів:

1. Сигнал з тахометра, що використовується для визначення частоти обертання;

2. Напряга з шунта, яка пропорційна силі струму в ланцюзі живлення.

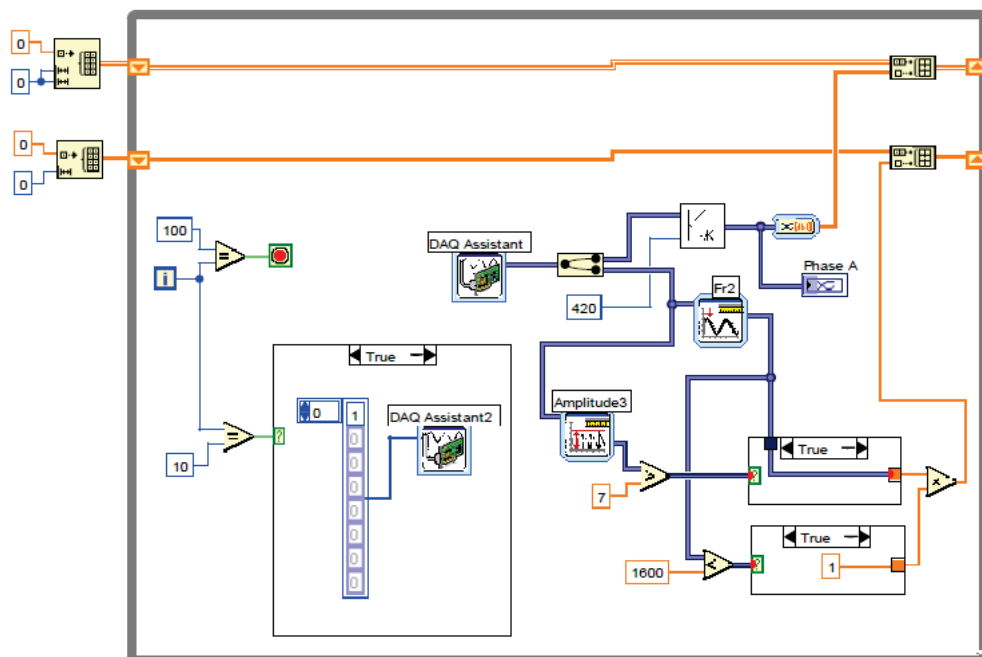


Рисунок 3.2 – Зображення умовного циклу While1

Отриманий двовимірний масив динамічного типу розділяється на два одновимірні сигнали за допомогою функції Split Signals. Це дозволяє окремо обробляти кожен з каналів. Зокрема, сигнал із шунта, який є вимірюванням аналогової напруги, приводиться до уніфікованого масштабу вимірювання (наприклад, за допомогою калібрувального коефіцієнта) і негайно виводиться на одну з індикаторних графіків (waveform chart), що в режимі реального часу відображає напругу.

Для збереження даних і подальшого аналізу, динамічний сигнал додатково обробляється (рис.3.3). За допомогою блоку Convert from Dynamic Data він перетворюється в одновимірний масив числових значень. Ці значення послідовно записуються в заздалегідь ініціалізований двовимірний масив, де накопичується історія вимірювань за кожен цикл. Такий підхід дозволяє зберігати часову послідовність сигналів і створює основу для

подальшого аналізу характеристик асинхронного двигуна під час випробувань.

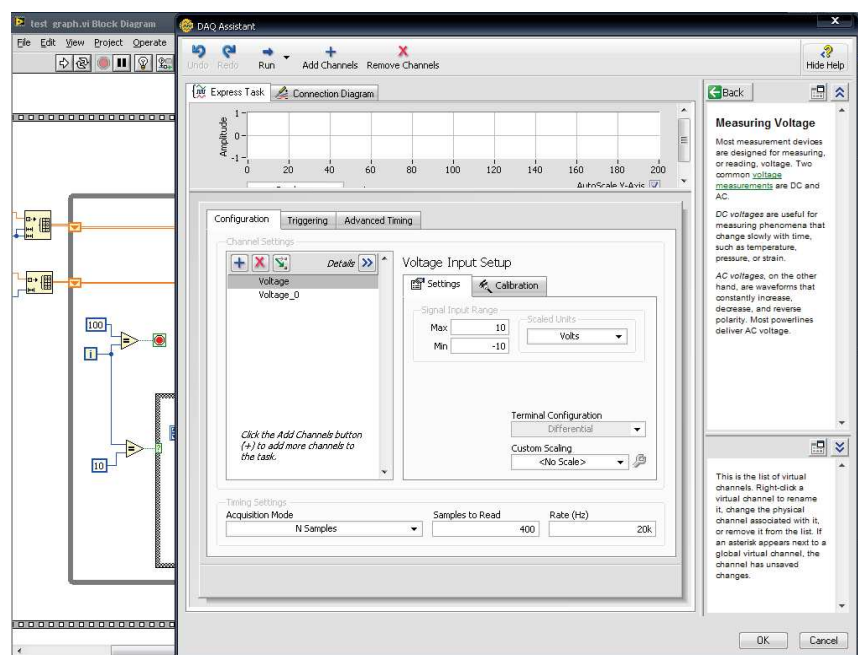


Рисунок 3.3 – Вікно налаштування параметрів у функції DAQ Assistant

Ще один важливий параметр, який реєструється в ході дослідження, - це сигнал тахометра, з якого визначаються амплітуда та частота обертання. Амплітудне значення сигналу, отримане з аналогово-цифрового перетворювача (АЦП), порівнюється з наперед заданим граничним рівнем - у цьому випадку 7 умовних одиниць (число, що відповідає каліброваному порогу за рівнем напруги). Одночасно розрахована частота порівнюється з максимально допустимим значенням - 1600 Гц. Якщо обидва параметри (амплітуда й частота) не перевищують встановлених меж, сигнал вважається коректним, і його значення додається до одновимірному масиву вимірних даних.

У протилежному випадку, якщо амплітуда сигналу нижча за допустимий поріг або частота виходить за межі допустимого діапазону, інтерпретується це як відсутність коректного тахометричного сигналу. Така

ситуація може свідчити про збої у вимірювальному тракті, електричні перешкоди або про стан, у якому двигун ще не досяг обертів, необхідних для стабільного зчитування. У цьому випадку система фіксує в масиві значення 0, що позначає відсутність достовірного сигналу. Ця логіка реалізована за допомогою функціонального блоку Case Structure, який переключається між режимами в залежності від результатів порівняння поточних значень з пороговими.

Після кожної ітерації перевірки та обробки сигналу, ці дані накопичуються у відповідних масивах. Коли досягається 10 повторень циклу збирання (що відповідає 100 зразкам кожного з двох сигналів), програма переходить до наступного етапу обробки. У момент досягнення десятої ітерації, що відстежується блоком порівняння, активується цифровий вихід DAQ пристрою NI USB-6009, який видає логічний сигнал на нульовий розряд цифрового порту. Цей сигнал, запрограмований у структурі Case, слугує тригером запуску двигуна, що ініціює перехід його режиму роботи від нульового до номінального.

Після виконання повного циклу збирання (100 зразків), зібраний масив даних передається до наступної обчислювальної структури - другого циклу While, який виконує подальшу обробку або візуалізацію даних, як зображено на рисунку 3.4. Такий підхід забезпечує надійність прийняття рішень щодо пуску двигуна, дозволяє автоматизувати контроль параметрів сигналу та уникати запуску в умовах відсутності коректного зворотного зв'язку.

У завершальній фазі обробки перехідного режиму роботи асинхронного двигуна реалізується процедура реєстрації та подальшого аналізу отриманих даних. Перед завершенням циклу, що виконує зчитування параметрів у режимі реального часу, дані виводяться на один із графіків для візуалізації швидкісної характеристики об'єкта. Одночасно відповідний масив значень зберігається у файл на жорсткому диску комп'ютера. Цей файл служить основою для наступного етапу - побудови уточнених графіків і

поточного значення корисного крутного моменту двигуна. У випадку, коли значення частоти дорівнює нулю, для запобігання помилці в обчисленнях як номінальне значення використовується одиниця, що не впливає на загальні результати, але забезпечує стабільність виконання алгоритму.

Далі за визначеною формулою проводиться розрахунок потужності або крутного моменту, використовуючи амплітуду та частоту, отримані в цій ітерації. Значення обчислених параметрів послідовно додаються до відповідних масивів, які накопичуються до досягнення кількості ітерацій, що дорівнює кількості зразків у базовому масиві.

У підсумку, на основі сформованих трьох масивів (амплітуд, частот і розрахованих значень) будуються графіки, які ілюструють перехідні процеси в електродвигуні. Паралельно результати обчислень записуються у файл для подальшого використання - наприклад, при формуванні карт перехідних процесів або звітної документації.

На завершальному етапі програма переходить до наступного логічного блоку. У ньому функція DAQ Assistant виконує скидання цифрових каналів керування, що призводить до формування керуючого сигналу зупинки електродвигуна в системі управління. Це програмно визначений момент завершення експериментального циклу, що супроводжується зупинкою двигуна, як показано на рисунку 3.5. Такий підхід забезпечує повну автоматизацію процесу збору, обробки, збереження та аналізу експериментальних даних.

У фінальній фазі роботи програма переходить до завершального, третього етапу стекової послідовності, під час якого виконуються аналітичні обчислення на основі масивів, сформованих у попередніх блоках. Зокрема, до цього блоку передаються одновимірні масиви даних, що містять значення швидкості обертання, амплітуди струму, активної потужності та обчисленого крутного моменту двигуна. На основі цих параметрів на передній панелі (Front Panel) в режимі реального часу формуються узагальнені графіки, які

наочно відображають характер зміни кожного з параметрів протягом дослідження.

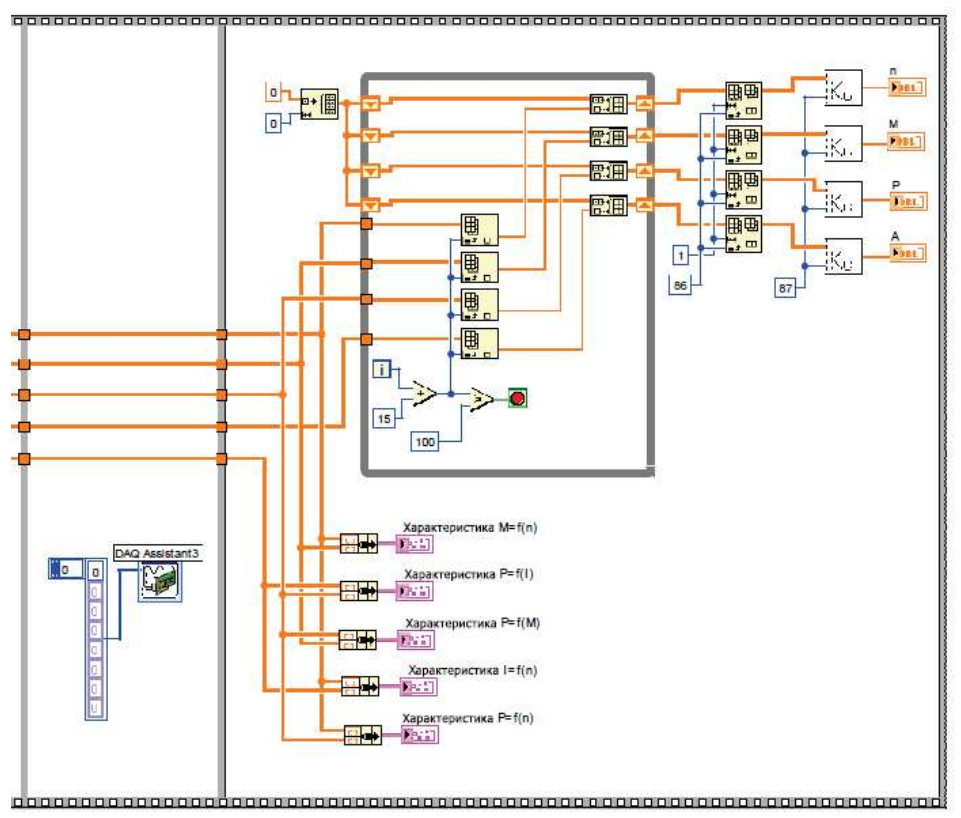


Рисунок 3.5 – Зображення наступних двох стеків програмної блок діаграми

Далі програма переходить до циклу While3, в якому реалізується перезапис даних, при цьому перші 15 елементів кожного з масивів свідомо ігноруються. Такий підхід обумовлений необхідністю виключити вплив нестабільних значень, характерних для фази перехідних процесів, яка зазвичай супроводжується імпульсними стрибками та флуктуаціями параметрів. Видалення початкової ділянки дозволяє провести подальший аналіз лише в усталеному режимі, що забезпечує високу точність статистичних оцінок.

У рамках цього циклу реалізуються функції обчислення середньоквадратичних значень (RMS) для кожного параметра. Ці функції враховують кількість вибірок у відповідному масиві та виконують

повноцінне математичне згладжування сигналу. Розраховані середні значення відображаються на спеціалізованих цифрових індикаторах на передній панелі віртуального інструменту, дозволяючи оператору безпосередньо зчитувати результати у зручній формі.

Кожен індикатор пов'язаний із конкретним сигналом - струмом, частотою обертання, потужністю або моментом - і відображає усереднене значення параметра за період стабільної роботи двигуна. Ці значення можуть бути зафіксовані оператором, збережені у звітному файлі або використані як вхідні дані для подальших розрахунків. Візуалізація на моніторі дає змогу швидко оцінити ефективність роботи асинхронного електродвигуна за основними експлуатаційними характеристиками.

Зовнішній вигляд вікна з результатами обчислень та відображенням усереднених значень на цифрових індикаторах представлено на рисунку 3.6. Така реалізація дозволяє повністю автоматизувати не лише процес збору та аналізу даних, а й представлення результатів у наочному та технічно інформативному вигляді.

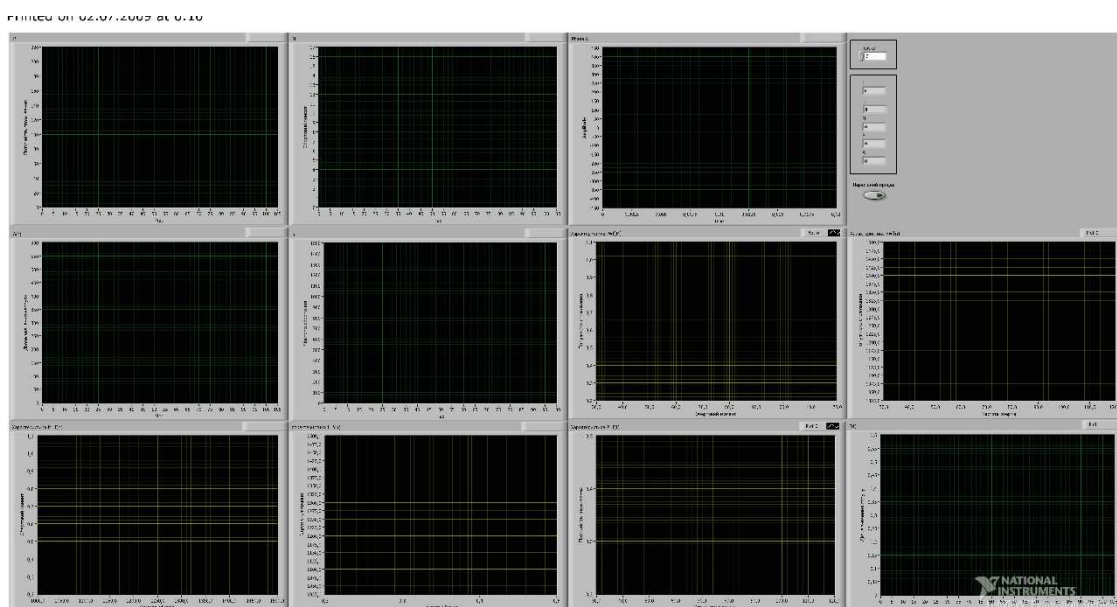


Рисунок 3.6 – Лицьова панель віртуального приладу для отримання перехідних характеристик

3.3 Отримання результатів

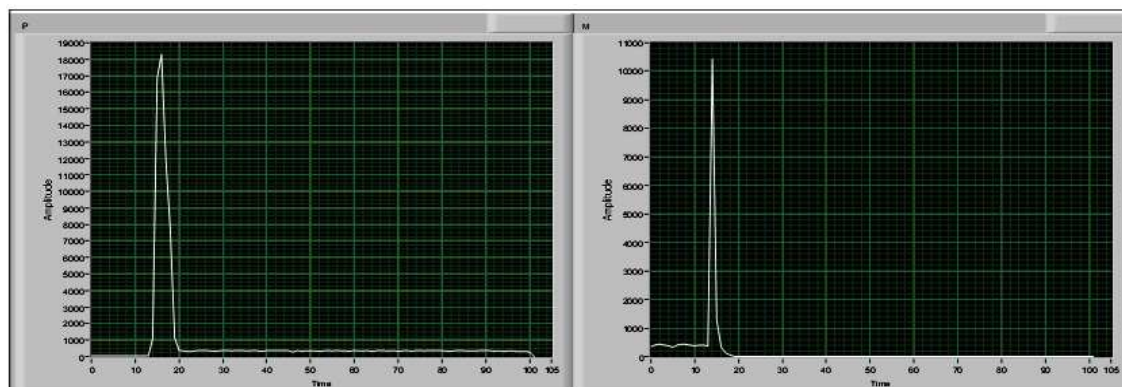
У ході експериментальних досліджень було випробувано асинхронні електродвигуни різних типів, зокрема ТМ-42/8-4-2 та 4ААМ50В4У3 [31]. Двигун типу ТМ-42/8-4-2 дозволяє змінювати частоту обертання за рахунок різних схем підключення обмоток: при відповідному підключенні реалізуються режими з номінальними частотами обертання 700 об/хв та 1400 об/хв. В цих режимах електродвигун споживає відповідно 0,8 кВт (з коефіцієнтом потужності $\cos\varphi = 0,62$) та 1,8 кВт ($\cos\varphi = 0,86$). Двигун 4ААМ50В4У3 працює з частотою обертання 1500 об/хв, номінальною потужністю 0,120 кВт ($\cos\varphi = 0,57$) та номінальним струмом 0,32 А.

На основі вимірних даних були побудовані експериментальні графіки (рис.3.7), які демонструють зміну основних параметрів роботи двигуна ТМ-42/8-4-2 у динаміці: споживаної електричної потужності, корисного крутного моменту, напруги живлення та частоти обертання ротора у часовому вимірі з дискретністю 0,02 с.

На графіку потужності (рис. 3.7, а) видно, що під час запуску, впродовж перших 15 мс, спостерігається різке зростання потужності до пікового значення - приблизно 18 000 Вт. Далі, протягом наступних 25 мс, вона зменшується до усталеного рівня близько 280 Вт. Така поведінка є типовою для асинхронних машин при пуску з прямим вмиканням у мережу. На графіку моменту (рис. 3.7, б) видно, що максимальне значення корисного моменту на валу досягає приблизно 10 500 Н·м. Це свідчить про значне навантаження, яке двигун витримує в момент запуску.

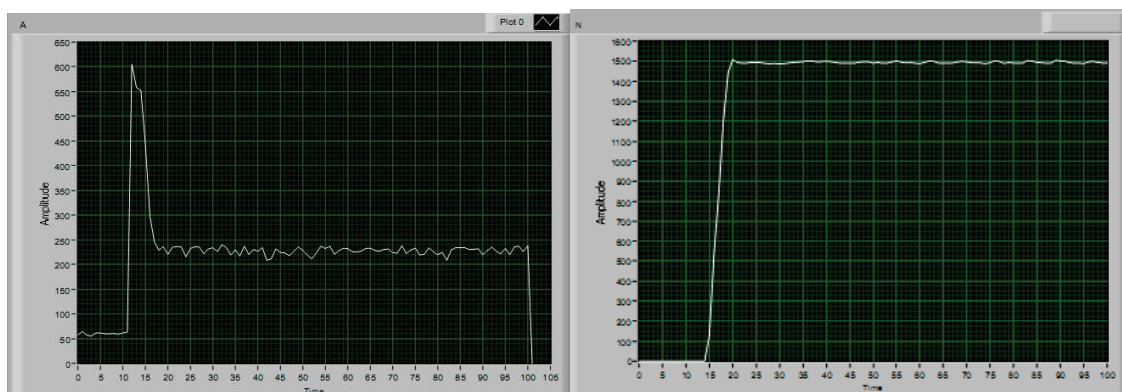
На графіку напруги живлення (рис. 3.7, в) зафіксовано, що максимальне діюче значення напруги на обмотках під час перехідного процесу сягало 600 В. Частота обертання ротора стабілізується до номінального значення - близько 1490 об/хв - протягом 120 мс після вмикання (рис. 3.7, г), що відповідає типовому часу розгону двигуна даного типу.

Механічна характеристика, наведена на рисунку 4.7, д, ілюструє зміну моменту у часі й корелює з кривою частоти обертання. Електромеханічна характеристика (рис. 3.7, е) показує залежність між струмом споживання та частотою обертання: найбільше значення струму (~23 А) зафіксовано на швидкості 530 об/хв, що відповідає фазі найбільшого навантаження під час розгону.



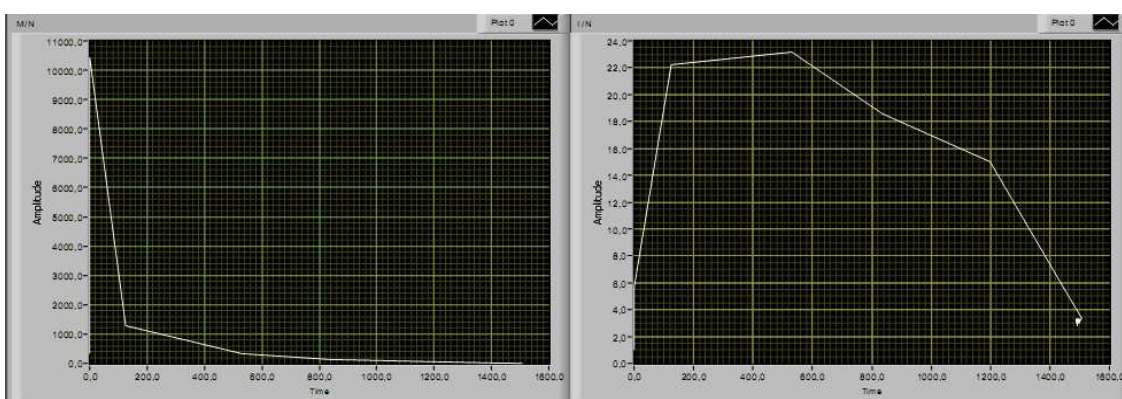
а)

б)



в)

г)



д)

е)

Рисунок 3.7 – Лицьова панель віртуального приладу з отриманими характеристиками з двигуна ТМ-42/8-4-2

Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата

БРМА25.00.00.000 ПЗ

Арк.
69

Загальний аналіз отриманих результатів дозволяє зробити висновок, що найкритичнішим режимом роботи асинхронного електродвигуна є його пуск. Саме в цей момент відбуваються найбільш інтенсивні перехідні процеси, які супроводжуються значними перевантаженнями струму, моменту та тепловими впливами на обмотки. Дослідження цих процесів є надзвичайно важливим з точки зору підвищення надійності та ресурсу електродвигуна, а також оптимізації його конструкції та системи керування. Результати, отримані зі стенду, можуть бути використані для вдосконалення методик діагностики й адаптивного регулювання параметрів електроприводів у промислових застосуваннях.

На рисунку 3.8 (креслення [БРМА25.00.00.000ДД]) наведено характеристики електродвигуна 4ААМ50В4У3 при змінному навантаженні.

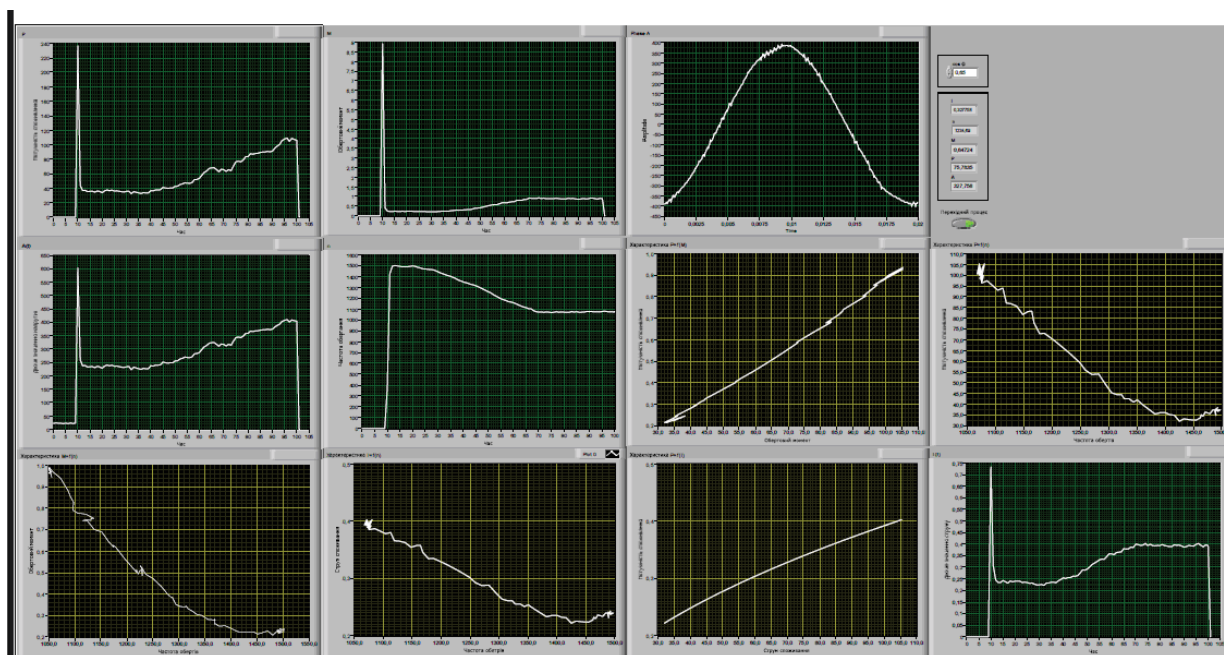


Рисунок 3.8 – Панель віртуального приладу з отриманими характеристиками при змінному навантаженні з двигуна 4ААМ50В4У3

3.4 Характеристики, що досліджуються в ході експерименту

Суть проведеного дослідження полягає у реєстрації параметрів напруги, струму та частоти обертання ротора асинхронного електродвигуна під час пуску. Основна мета - вивчення перехідних характеристик, що виникають у момент запуску, для подальшого аналізу й оптимізації роботи приводу. Недоліком такої методики є значна тривалість обробки даних, оскільки кожна зміна конфігурації або параметрів схеми потребує повторного моделювання пускового процесу, що ускладнює оперативне отримання результатів.

Під час дослідження було виявлено, що при певному типі з'єднання обмоток статора результуючий вектор струмів, зумовлений взаємною індукцією між фазами, має нульове значення. Таким чином, імпульс струму у вхідному колі визначається переважно індуктивною складовою, спричиненою змінами магнітного поля. Для зменшення впливу імпульсних перевантажень та покращення точності вимірювань рекомендується знижувати напругу живлення двигуна на 15–25% відносно номінального значення. Проведення кількох повторних запусків у різних умовах дозволяє підвищити достовірність експериментальних даних.

Метою роботи є створення універсального стенду для експериментального дослідження динамічних характеристик асинхронних трифазних машин. На основі проведених спостережень сформульовано такі висновки:

- узгодження між теоретичними розрахунками та експериментально отриманими даними дозволяє виявити та врахувати поправочні коефіцієнти для підвищення точності моделі;
- при суттєвих відхиленнях між аналітичними та практичними результатами доцільно провести корекцію або уточнення параметрів елементної бази та повторити цикл вимірювань;

- розроблений навчально-дослідницький стенд є ефективним засобом для вивчення електромеханічних перехідних процесів в рамках навчальних дисциплін «Електричні машини», «Теорія електроприводу» та «Спеціальні електричні машини», що викладаються на кафедрі машин, апаратів, електромеханічних і енергетичних систем.

У разі доукомплектування стенду перетворювачами струму відповідної потужності, він може бути використаний для діагностики двигунів різної енергетичної ємності. Це відкриває можливість застосування даного обладнання не лише в навчальному процесі, але й у промисловості або сервісних центрах, де необхідно оперативно визначати пускові характеристики та технічний стан асинхронних електродвигунів у виробничих або побутових умовах.

3.5 Висновки до третього розділу

Для дослідження трифазних асинхронних двигунів у третьому розділі було обгрунтовано використання середовища LabVIEW. Програму побудовано на графічній мові «G», яка дозволяє створювати інтерактивні віртуальні прилади.

На основі аналізу було спроектовано та зібрано стенд для вивчення перехідних процесів в асинхронних двигунах. Такі процеси характерні для режимів пуску або відновлення після зникнення напруги та мають вирішальне значення для надійності електроприводів. Діагностика проводиться шляхом реєстрації напруг, струмів та швидкості обертання.

У дослідженні використано двигуни типу ТМ-42/8-4-2 з частотами 700 та 1400 об/хв (0,8 кВт та 1,8 кВт відповідно) та 4ААМ50В4У3 (1500 об/хв, 0,12 кВт, 0,32 А). Графіки (розділ 4) демонструють, що пуск є найбільш критичним режимом, супроводжуваним максимальними струмами та

моментами. Наприклад, споживана потужність при запуску може досягати 18 кВт, а момент - понад 10 000 Нм.

Суть експерименту - зняття масивів напруг, струмів і швидкості під час запуску. Недоліком є тривалі розрахунки, адже після кожної зміни параметрів необхідно повторювати моделювання. Для підвищення точності проводилися кілька вимірювань, зокрема зі зниженням напруги на 15–25 % від номіналу.

Особливістю методу є те, що при певному з'єднанні обмоток взаємна індукція нівелюється, а перехідні процеси визначаються лише індуктивністю розсіювання. Порівняння розрахункових та експериментальних результатів дозволяє верифікувати модель двигуна й оптимізувати керування.

Стенд може використовуватись у лабораторних умовах при підготовці фахівців за курсами «Електричні машини», «Теорія електроприводу» тощо, а також для практичної діагностики двигунів різної потужності як у промисловості, так і в побуті.

					БРМА25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						73
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

ВИСНОВКИ

У бакалаврській роботі досліджено конструкцію, принцип дії та режими роботи асинхронних трифазних двигунів, що широко використовуються у промисловості, енергетиці та побуті. Особливу увагу приділено аналізу перехідних процесів, які виникають при запуску, гальмуванні та зміні умов живлення.

На основі теоретичних положень і технічних вимог розроблено лабораторний стенд, що дозволяє моделювати типові режими роботи електроприводу та досліджувати поведінку двигуна під час запуску, самозапуску, асиметричного живлення. Для збору й аналізу даних застосовано програмне середовище LabVIEW, яке забезпечує візуалізацію параметрів та автоматизацію експериментів.

Під час досліджень протестовано двигуни ТМ-42/8-4-2 та 4ААМ50В4У3. Встановлено, що пусковий режим є найбільш навантаженим — струм до 23 А, потужність до 18 кВт, момент понад 10 000 Н·м. Застосування зниженої напруги підвищує точність результатів. Методика дозволяє визначати параметри схеми заміщення та проводити ефективну діагностику.

Створений стенд придатний як для освітніх потреб з дисциплін «Електричні машини» та «Електропривод», так і для практичного використання у промисловості. Він забезпечує точне дослідження динаміки роботи асинхронних двигунів і сприяє підвищенню ефективності електроприводних систем.

					БРМА25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						74
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Трифазні асинхронні двигуни [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://web.kpi.kharkov.ua/ze/wp-content/uploads/sites/146/2022/04/Tryfazni-asyhronni-dvyguny.pdf>
2. Класи енергоефективності двигунів ІЕС [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://ogrant.com.ua/ie3/>
3. Створення віртуальних приладів в середовищі LabVIEW [Електронний ресурс]: навч. посіб. для студ. спеціальності 172 «Електронні комунікації та радіотехніка» / В. М. Головня; РТФ; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові дані (1 файл: 9,92 Мбайт). – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. – 142с.
4. Осташевський М. О. Електричні машини і трансформатори : навч. посібник / М. О. Осташевський, О. Ю. Юр'єва; за ред. В. І. Мілих. – Харків: ФОП Панов А. М., 2017. – 452 с.
5. Белікова Л.Я. Електричні машини : навч. посіб. для студ. вищ. навч. закл. / Л.Я. Белікова, В.П. Шевченко. – Одеса : Наука і техніка, 2012. – 478 с.
6. Загірняк М.В. Електричні машини : підручник / М. В. Загірняк, Б. І. Невзлін. – Київ : Знання, 2009. – 399 с.
7. Андрієнко В.М. Електричні машини : навч. посіб. для студ. вищ. навч. закл., які навч. за напрямом підгот. «Електротехніка та електротехнології» / В.М. Андрієнко, В.П. Куєвда. – К. : НУХТ, 2010. – 366 с.
8. Електричні машини : підручник / Б.Т. Кононов, Г.І. Лагутін, О.Б. Котов та ін.; за заг. ред. Б.Т. Кононова. – Харків : ХУПС, 2015. – 493 с.
9. Яцун М.А. Електричні машини : навч. посіб. для студ. Базового напрямку «Електромеханіка» / М.А. Яцун – 2-ге вид., стер. – Львів : Видво Нац. ун-ту «Львівська політехніка», 2004. – 440 с.

10. Електричні машини [Текст]: Курс лекцій для студентів спеціальності 5.05070103 «Електропостачання» денної форми навчання / уклад. Лишук В.В. – Луцьк: Технічний коледж Луцького НТУ, 2016. – 120 с.

11. Лябук М.Н. Електротехніка. Лабораторні роботи. Навчальний посібник / М.Н. Лябук. – К.: ІЗМН, 1998. -284 с.

12. Метельський В.П. Електричні машини та мікромашини: Навчальний посібник для електротехн. спец. ВНЗів / В.П. Метельський; наук. ред. А.М. Кравченко. – 2-е вид, доповнене й перероблене. – Запоріжжя: ЗНТУ, 2005. – 616 с.

13. Півняк Г.Г. та ін. Електричні машини: Навчальний посібник. – Дніпропетровськ, НГУ, 2003. – 327 с.

14. Метод безпосереднього навантаження електричних машин і трансформаторів з видачею енергії в мережу [Електронний ресурс]. – Режим доступу:

https://web.posibnyky.vntu.edu.ua/feeem/4lagutin_vyprobuv_elektrmashin_transformatoriv/p29.htm.

15. Машини постійного струму [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://electro-tech.ho.ua/le/m3/3-3>.

16. Машини постійного струму [Електронний ресурс]. – Режим доступу:

https://learn.ztu.edu.ua/pluginfile.php/272099/mod_resource/content/1/%D0%9B%D0%B5%D0%BA%D1%86%D1%96%D1%8F%20%D0%9C%D0%9F%D0%A1.pdf

17. Лагутін В.М. Випробовування електричних машин і трансформаторів в електроенергетичних системах: навчальний посібник / В.М. Лагутін, В.Ц. Зелінський, О.Б. Бурикін. – Вінниця: ВНТУ, 2010. – 115с.

18. Які методи регулювання швидкості трифазних асинхронних двигунів? [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://ua.linear-rotary.com/info/what-are-the-speed-regulation-methods-of-three-101142153.html>

19. Режими роботи електродвигуна [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://tmmotor.ua/ua/news/rezhimy-raboty-elektrodvigatelja?srsltid=afmboop5uux_hxpaywrnwasjljy5wa37q3juagcqbducoakpl-ulgv6

20. Вимірювання ковзання машин змінного струму [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://web.posibnyky.vntu.edu.ua/feeem/4lagutin_vyprobuv_elektrmashin_transformatoriv/p15.htm

21. Discover NI's next-generation USB DAQ hardware [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.ni.com/en.html?srsltid=AfmBOoryJLFpDjgqt0t0nTMSdpMcLmz3CmZ8TsalUIYO8U1vP9n0d8Cх>.

22. Програмні засоби National Instruments у навчанні основ ідентифікації об'єктів автоматизації студентів-інженерів [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.researchgate.net/publication/331405101_PROGRAMNI_ZASOBI_NATIONAL_INSTRUMENTS_U_NAVCANNI_OSNOV_IDENTIFIKACII_OB'EKTIV_AVTOMATIZACII_STUDENTIV-INZENERIV.

23. National Instruments [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.otec-industry.com.ua/brand/national-instruments/779957-01>.

24. USB-6009 Specifications [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.ni.com/docs/en-US/bundle/usb-6009-specs/page/specs.html?srsltid=AfmBOootLK-H0iyD2JTye-TRdjFZLBKOhUqXhkrfF_U50_N2jP6sOKhh

25. Мілих В.І. Електротехніка, електроніка та мікропроцесорна техніка : підручник / В.І. Мілих, О.О. Шавьолкін; за ред. В.І.Мілих. – Київ : Каравела, 2012. – 688 с.

26. Мілих В.І. Електротехніка та електромеханіка / В.І. Мілих. – Київ : "Каравела", 2006. – 376 с.

27. Все про радіоелементи [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.google.com/search?q=%D0%A0%D0%BE%D0%B7%D1%80%D0%B0%D1%85%D1%83%D0%BD%D0%BE%D0%BA+%D1%80%D0%B0%D0%B4%D1%96%D0%BE%D0%B5%D0%BB%D0%B5%D0%BC%D0%B5%D0%BD%D1%82%D1%96%D0%B2&sca_esv=2d7bf4916587ae0a&sxsrf=AE3TifPRiHbSAH01ayKAgr-rWalkPOb5Pg:1749250353627&ei=MXFDaLKCJpiki-gP3P_piAY&start=10&sa=N&sstk=Ac65TH6YnSzH1rFjH0A4FXuwdQFlcwaxMeUvD3Y-tIQHaOgUFWKUiaqfN0QwcisNevOEv6kMuZm6SoLwXzmKFSeQFGSx6vtwHs4qkg&ved=2ahUKEwjy3s2v8d2NAXUY0gIHHdx_GmEQ8tMDegQIBxAE&biw=1536&bih=695&dpr=1.25.

28. TS 2/36 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.tme.eu/ua/details/ts2_36/transformatori-z-kriplenniam/indel/ts-2-36/

29. Розрахунок опору шунта [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://vseosvita.ua/library/rozrahunok-oporu-sunta-47276.html>.

30. Гальванічна розв'язка аналогових сигналів [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://old.holit.ua/download/common/catalog/control2003/2.pdf>.

31. Електродвигуни 4А ТА 4АМ [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://xn--80aqy.com.ua/elektrodvigateli-4a-i-4am/>.

ДОДАТОК А

					БРМА25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						79
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		